



Jatropha curcas L.
**Rapport de synthèse
bibliographique**

Marjorie DOMERGUE (CIRAD, UPR Biomasse Energie)
Roland PIROT (CIRAD, UPR Systèmes de Culture Annuels)
Contact : roland.pirot@cirad.fr

Décembre 2008

CIRAD, Avenue d'Agropolis 34398 Montpellier Cedex 5
AGROgeneration, 45-47 rue de Monceau 75 008 Paris

SOMMAIRE

Introduction	3
PARTIE I – Origine géographique, description botanique, diversité génétique	4
I.1. ORIGINE GEOGRAPHIQUE	4
I.2. DESCRIPTION BOTANIQUE	5
I.2.1. Germination	6
I.2.2. Développement végétatif	6
I.2.3. Floraison	7
I.2.4. Fruit.....	9
I.3. DIVERSITE GENETIQUE.....	10
PARTIE II – Ecologie et pratiques culturales	15
II.1. EXIGENCES CLIMATIQUES.....	15
II.1.1. Températures.....	15
II.1.2. Eau.....	15
II.2. SOL.....	16
II.2.1. Types de sol.....	16
II.2.2. Mobilisation des éléments nutritifs	16
II.2.3. Valorisation des sols marginaux et lutte contre l'érosion.....	16
II.3. ITINERAIRE TECHNIQUE	17
II.3.1. Semis et plantation.....	17
II.3.2. Fumure.....	26
II.3.3. Taille	29
II.3.4. Problèmes phytosanitaires.....	31
II.3.5. Cultures intercalaires	36
II.3.6. Récolte.....	43
II.3.7. Stockage et conservation des graines	46
PARTIE III – Le rendement	48
III.1. COMPARAISON DES RENDEMENTS REPERTORIES DANS LA BIBLIOGRAPHIE	48
III.2. UNE ESTIMATION RAISONNABLE DU RENDEMENT ?	48
PARTIE IV – Extraction et utilisations de l'huile	53
IV.1. EXTRACTION DE L'HUILE	53
IV.1.1. Le pressage.....	53
IV.1.2. L'extraction par solvant.....	61
IV.2. PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'HUILE DE JATROPHA.....	63
IV.2.1. Historique	63
IV.2.2. Propriétés physiques (tableau 19).....	65
IV.2.3. Composition chimique (tableau 20)	65
IV.3.1. L'utilisation de l'huile pure (tableau 22).....	69
IV.3.2. Le biodiesel de <i>Jatropha</i>	71
IV.4. L'UTILISATION D'HUILE EN SAVONNERIE	73
IV.5. ECLAIRAGE AVEC DE L'HUILE DE JATROPHA	74
PARTIE V – Valorisation des coproduits de la récolte	76
V.1. INTRODUCTION	76
V.2. LES COMPOSES TOXIQUES DE LA GRAINE DE JATROPHA	78
V.3. POSSIBILITES D'UTILISATION DU TOURTEAU DE PRESSAGE	80
V.3.1. Valorisation en alimentation animale	80
V.3.2. Utilisation comme engrais organique.....	84
V.4. POSSIBILITES DE VALORISATION ENERGETIQUE DES COPRODUITS	85
V.4.1. Production de biogaz.....	85
V.4.2. Voie thermochimique	87
V.5. VALORISATION DES PRINCIPES ACTIFS DE LA PLANTE	88
V.5.1. Propriétés biocides de <i>Jatropha curcas</i>	88
V.5.2. Propriétés médicinales du <i>Jatropha</i>	91
Impact environnemental : les questions soulevées	93
Table des tableaux	95
Table des figures	96
ANNEXES	97
BIBLIOGRAPHIE	111

Introduction

Le *Jatropha*, également appelé Pourghère, est un arbuste de la famille des euphorbiacées. Non consommé par le bétail, il est couramment utilisé dans les zones tropicales comme haie défensive contre les animaux ou pour délimiter les propriétés. Au Mali, plusieurs milliers de kilomètres de haies de Pourghère ont ainsi été plantés. L'arbre peut aussi jouer un rôle dans la lutte contre l'érosion, comme les Acacias ou les Prosopis. Bien connu des paysans, il est utilisé en médecine traditionnelle : l'huile a des propriétés purgatives à petite dose et sert à traiter certaines maladies de peau ou à soulager les rhumatismes. Elle trouve d'autres utilisations, comme la fabrication de savon artisanal ou l'éclairage avec des lampes rudimentaires. Le latex, utilisé sur les blessures, aurait des propriétés antiseptiques et coagulantes.

Les graines de *Jatropha* contiennent cependant des produits toxiques dont les principaux sont la curcine (voisine de la ricine), poison violent quand il est administré à de faibles quantités (3 ou 4 graines pour un enfant et 7 ou 8 pour un adulte), et des esters de phorbol. Il existerait toutefois une variété non toxique, d'origine mexicaine, dont les graines ne contiendraient pas d'esters de phorbol et pourraient être consommées après avoir été bouillies ou grillées. D'une manière générale, la toxicité des graines et de l'huile exclut à l'heure actuelle la valorisation du tourteau de pressage en alimentation animale. Bien que des recherches sur la détoxification aient été menées par plusieurs laboratoires, les procédés ne sont encore pas au point et les coûts sont prohibitifs. Les autres possibilités de valorisation sont l'utilisation en tant qu'engrais organique (comme c'est le cas pour le tourteau de ricin, également toxique), ou la production d'énergie (combustion, cogénération).

En 2007, avec l'augmentation des cours du pétrole, l'intérêt pour la plante est réapparu en tant qu'agrocarburant. L'huile, après filtration, peut en effet être utilisée dans différents types de moteurs de conception classique. Une estérification est cependant nécessaire pour son usage dans les moteurs diesel modernes.

Ce rapport est une synthèse des informations bibliographiques disponibles sur la plante : origine géographique, écologie, pratiques culturelles, extraction et utilisation de l'huile et des coproduits. Il a été réalisé par le CIRAD à la demande la société AGROGénération dans le cadre d'une étude sur les potentialités de développement de la culture du *Jatropha* à grande échelle.

PARTIE I – Origine géographique, description botanique, diversité génétique

I.1. Origine géographique

Le *Jatropha* est une plante ancienne. Des formes fossiles datant de l'ère tertiaire auraient été découvertes au Pérou. Son origine est néanmoins controversée puisque certains auteurs la situent dans les régions sèches du Brésil (Caatinga, Etat de Ceara) alors que pour d'autres, ce serait plutôt l'Amérique centrale ou le Mexique (Wilbur, 1954 ; Aponte, 1978). Il semble que ce soit cette dernière origine qui soit officiellement retenue¹. Cependant, son existence très ancienne établie par les traces fossiles remonte à la période où les continents n'étaient pas encore individualisés, aussi beaucoup d'hypothèses peuvent être envisagées.

Il semble que la plante fut introduite au 16^e siècle aux îles du Cap Vert par les marins portugais, puis en Guinée Bissau pour se répandre ensuite en Afrique et en Asie. On la trouve actuellement dans toutes les régions tropicales et intertropicales ainsi que sur les îles tropicales.

Son aire de distribution naturelle se situe principalement dans les zones arides et semi-arides (Jones et Miller, 1992 ; Makkar *et al.*, 1997) mais on la rencontre également dans les régions tropicales humides comme le Guatemala (> 4000 mm/an), ou le Nord du Vietnam et de la Thaïlande. Ainsi, Rijssenbeek *et al.* (2007) situent son aire de culture entre les latitudes 30°N et 35°S.



Figure 1 : distribution de *Jatropha curcas* L. (Heller, 1996)

¹ Certains auteurs prétendent que la plante aurait été présente dans l'Ancien monde avant la découverte de l'Amérique (références dans les documents de la médecine de l'époque)

I.2. Description botanique

Le *Jatropha* se présente sous la forme d'un arbre ou arbuste de 2 à plus de 10 m de hauteur. Son écorce grise ou roussâtre est marquée de taches blanches. La feuille, en forme de cœur, est plus ou moins découpée en 3 à 5 lobes. Ses branches contiennent du latex. Souples quand elles sont jeunes, elles deviennent cassantes avec l'âge, ce qui peut gêner les opérations de récolte. Sa floraison est liée au régime des pluies. L'arbre donne des fruits de couleur jaune, qui deviennent marron foncé en séchant. Les fruits contiennent 1, 2 ou 3 graines riches en huile. La multiplication du *Jatropha* peut être réalisée par graines ou par boutures.

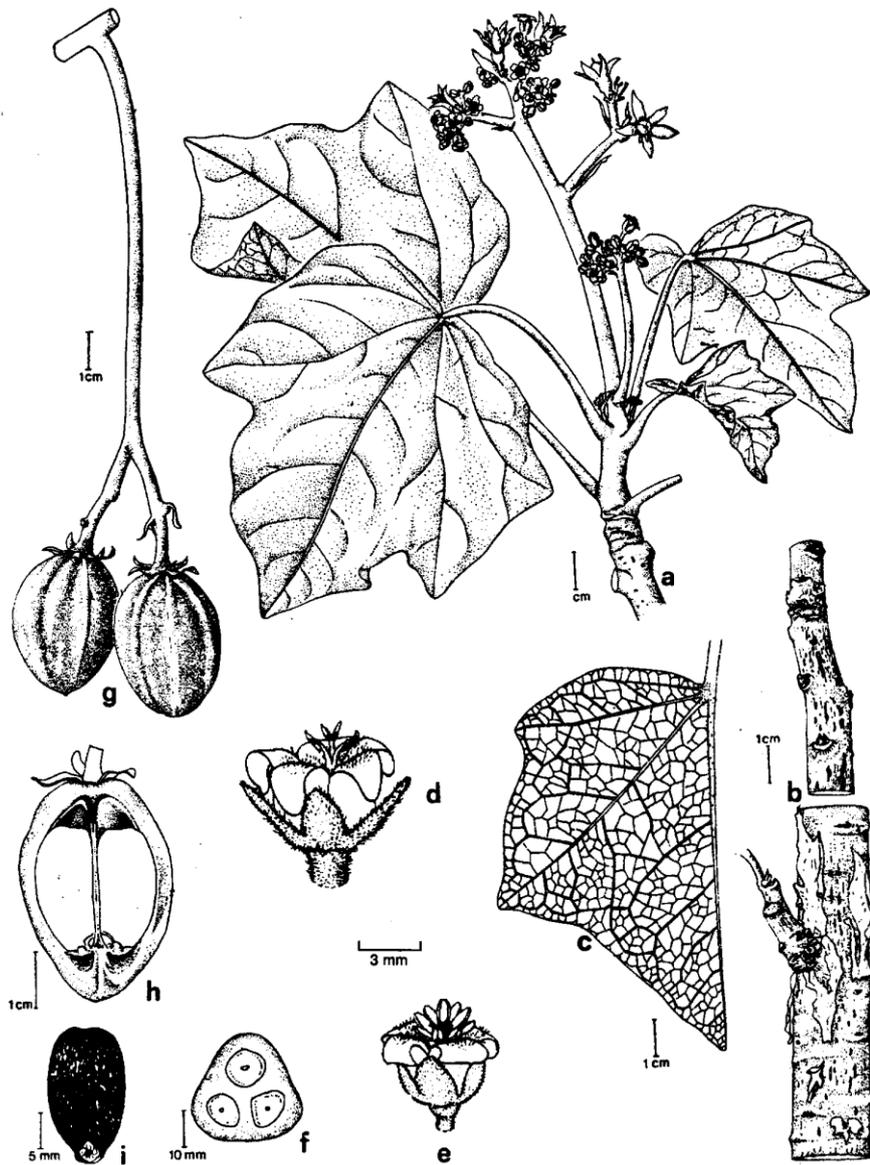


Figure 2 : parties importantes du *Jatropha curcas* L.

a : branche florifère, b : écorce, c : nervures des feuilles, d : fleur femelle, e : fleur mâle, f : coupe d'un fruit vert, g : fruits, h : coupe longitudinale d'un fruit, i : graine (Aponte et Deghan, 1994)

Le *Jatropha* est couramment utilisé pour réaliser des clôtures autour des jardins ou le long des chemins. La toxicité de ses parties aériennes lui évite en effet d'être mangé par les animaux. Toutes les parties de la plante et l'huile sont utilisées en médecine traditionnelle à faibles doses, mais l'ingestion d'huile ou de graines peut être mortelle à doses plus fortes. L'huile sert traditionnellement à l'éclairage et à la confection de savon.

1.2.1. Germination

D'après Münch (1986), la germination est induite par le changement d'humidité dans l'air, à la suite d'une période de sécheresse. Heller (1996) n'a pas réussi à mettre en évidence de période de dormance. Il faut compter 1 à 4 semaines pour la germination. Le tégument externe éclate pour laisser passer la racine principale pivotante qui se courbe pour s'enfoncer dans le sol. Puis 4 petites racines apparaissent latéralement. Les cotylédons, après s'être nourris de l'albumen, peuvent avoir des difficultés à se libérer de l'épiderme intérieur, ce qui peut freiner le développement de la jeune pousse. Ce problème peut être résolu en augmentant la température et l'humidité de l'air (si c'est possible en aspergeant les plantes), en tenant toutefois compte du fait que cela peut favoriser l'émergence de maladies et parasites.

1.2.2. Développement végétatif

Développement après germination

La germination est suivie du développement de l'axe principal, des feuilles et du système racinaire.

La croissance est favorisée, comme pour beaucoup de plantes, par l'humidité du sol, sa fertilité, et une température élevée. Ces bonnes conditions entraînent un développement arborescent plus rapide de la plante, avec une cime large (plusieurs mètres de haut avec des ramifications). En sols caillouteux et secs, c'est le port buissonnant qui prédomine avec une cime moins large (peu de ramifications). Le vent ne semble pas avoir d'influence sur son port.

Si le *Jatropha* est conduit en arbre avec une taille adéquate, un tronc de 3 m de haut peut atteindre 35 cm de diamètre à la base.

En général, dans les régions où alternent les saisons sèches et humides, la pousse des feuilles se fait un peu avant les premières pluies, lorsque l'humidité de l'air augmente. Les premières jeunes feuilles sont souvent rougeâtres. La chute des feuilles est due à la sécheresse et s'observe généralement après le milieu de la saison des pluies. Dans les zones toujours humides, la plante garde ses feuilles toute l'année. Les fleurs se situent au bout des jeunes branches. On compte au moins 3 axes verticaux de pousse avant la floraison.

La racine est un pivot bien développé juste en dessous de la graine. Ensuite, quatre racines latérales prennent naissance et vont explorer la partie superficielle du sol. Les racines ont une grande faculté à contourner les obstacles (pierres) mais préfèrent les sols légers. En cas d'érosion, elles ne semblent pas souffrir de leur mise à l'air libre.

Développement des boutures

Dans un environnement favorable (principalement humidité), la plante issue de bouture se développe plus vite que celles issues de graine.

Le développement des racines à la base des boutures est différent de celui des plantes issues de graine. Les racines se forment sur la partie pointue de la bouture et sont moins nombreuses si la coupe est oblique. Si elle est droite, elles se forment d'une façon uniforme tout autour du plan de coupe. Elles sont cependant de formes inégales et de tailles différentes. Cette différence morphologique entraîne souvent une moins bonne résistance à des conditions difficiles.

I.2.3.Floraison

L'inflorescence est le plus souvent proche de l'extrémité des jeunes pousses ou à la périphérie de la cime. D'après Vidal *et al.*, (1962) la première fleur d'une plante issue d'une graine se formerait 4 à 5 ans après la germination. Cette observation est surtout valable pour des conditions climatiques arides (Iles du Cap Vert par exemple). Sur le terrain, si les conditions environnementales sont correctes, quelques fleurs peuvent apparaître dès la première année. Ceci dit la floraison a toute son ampleur la seconde et troisième année.

Les plantes issues de boutures fleurissent plus tôt que celles issues de graines. Adam (1953) a observé des productions 4-5 mois après la plantation (soit une floraison vers 2-3 mois).

Description de la fleur

Le *Jatropha* est une plante monoïque à fleurs diclines : les fleurs sont de sexes séparés mais se trouvent sur la même plante. Le bouquet floral est appelé racème.

Münch (1986) les décrivait comme suit :

- la corolle est de teinte verte jaunissant avec l'âge ;
- elle est composée de 5 pétales alternant avec 5 sépales deux fois plus courts ;
- les fleurs mâles sont plus nombreuses (15:1 en moyenne, mais nous verrons que tous les auteurs ne sont pas d'accord à ce sujet), pédonculées et occupent la périphérie de l'inflorescence. Les fleurs femelles, un peu plus grandes, occupent le centre de l'inflorescence et possèdent un pédoncule plus court que les fleurs mâles.

En 1932, Droit en donnait une description différente :

- la corolle est de teinte rose ;
- les fleurs mâles sont peu nombreuses, sans pédoncules et occupent le milieu de l'inflorescence. Les fleurs femelles, plus grandes que les fleurs mâles, occupent la périphérie de l'inflorescence, elles sont 4 ou 5 fois plus nombreuses.

Concernant la proportion du nombre de fleurs mâles et femelles, les observations se contredisent. Selon Münch (1986) à Fogo (Iles du Cap Vert), les fleurs mâles sont plus nombreuses que les femelles (rapport environ de 15). Les observations de Droit (1932) et Laroche (qui s'appuient sans doute sur des descriptions de Baillon, 1874) indiquent une proportion 4 ou 5 fois plus grande de fleurs femelles que de fleurs mâles. Ces observations contradictoires peuvent s'expliquer par une différence génétique mais surtout par des différences de milieu (les descriptions de Droit et Laroche sont vraisemblablement issues d'observations faites dans des serres à lumière naturelle près de Paris où les longues journées d'été ont pu influencer sur le nombre de fleurs femelles). Chez le ricin, proche parent du *Jatropha*, le nombre de fleurs femelles est accentué par des températures basses et les journées longues.

Une étude plus récente sur la biologie florale menée en Inde (Aruna, 2007) confirme les observations de Münch (1986). Elle montre des fleurs mâles beaucoup plus nombreuses que les fleurs femelles, avec un ratio moyen de 24,7:1 la première année et de 13,2:1 la seconde année. Les auteurs ont constaté que le nombre de fleurs par inflorescence, mâles et femelles, augmente la seconde année. Cette augmentation est encore plus marquée pour les fleurs femelles.

On observe parfois des fleurs hermaphrodites, d'après des informations personnelles du Professeur Ferao, obtenues par Münch. Ces fleurs hermaphrodites peuvent être auto-pollinisées (Heller, 1996).

Mécanismes induisant la floraison (tableau 1)

Dans les régions où alternent les saisons sèches et humides, la floraison semble induite par le début de la saison des pluies. Ainsi, différents auteurs mentionnent que certains arbres fleurissent (et donc produisent) 2 fois par an, en fonction du site considéré et de l'écotype. La plante peut également fleurir à l'occasion de précipitations qui tombent en dehors de la saison des pluies habituelle. La reproduction s'arrête dès que la saison sèche commence.

Selon Vidal (1962), dans les régions humides en permanence, la floraison peut durer toute l'année. Une branche peut alors porter des fruits mûrs à sa base, des fruits verts au milieu et des fleurs à l'extrémité, ce qui est problématique pour mécaniser la récolte.

Site	Auteur, année	Période de floraison/ remarques
Cap Vert	Freitas, 1906	1 ^{re} floraison : mai - juin Avant la saison des pluies A la même période que la formation des feuilles 2 ^e floraison Août/ septembre. La plante porte des bourgeons, des fleurs et des fruits simultanément.
Nord-Est de la Thaïlande	Sukarin <i>et al.</i> , 1986	1 ^{er} pic : novembre 2 ^e pic : avril - mai Ces 2 pics correspondent à la fin et au début de la saison des pluies.
Régions humides de l'Equateur	Vidal, 1962	Floraison toute l'année

Tableau 1 : cycles de floraison observés, d'après différents auteurs

Lors du projet Biomasa au Nicaragua (Sucher, 1999), il a été observé jusqu'à 5 pics de floraison durant l'année (avec 2 pics plus importants, en mai-juin et août-septembre). Selon les auteurs, le nombre de pics de floraison dépend non seulement de l'humidité, mais est également de la disponibilité en éléments nutritifs. La limitation en éléments nutritifs provoque la fin de la floraison (Aker, 1997), mais aussi des avortements de fleurs et de fruits, phénomène fréquent en Inde, notamment si la disponibilité en hydrates de carbone (glucides) est insuffisante. La floraison peut par ailleurs être induite par l'application de l'hormone GA 3 (Kumari et Kumar, 2007).

Durée de la floraison

Les fleurs mâles s'ouvrent pendant 8-10 jours, alors que les fleurs femelles s'ouvrent seulement pour 2-4 jours (Prakash *et al.*, 2007). La même remarque est faite par Deghan (1976) qui parle en plus de protogynie (ouvertures des fleurs femelles avant les fleurs mâles). Au Sénégal, Heller (1996) a également observé que sur la même inflorescence, les fleurs mâles s'ouvriraient plus tard que les fleurs femelles. Ce mécanisme favoriserait la pollinisation croisée. A Fogo (îles du Cap Vert), Münch (1986) observe au contraire qu'un décalage entre floraisons mâle et femelle pourrait être dû aux conditions environnementales.

Pollinisation et fécondation (tableau 2)

La pollinisation est faite par les insectes. Dans le cas d'absence d'insectes (en serre), il n'y a pas de pollinisation (Deghan, 1976), ce qui voudrait dire qu'il n'y a pas d'autofécondation naturelle. Dans le cas d'arbre isolé, la pollinisation se fait entre fleurs de la même plante (gitonogamie). Dans les cas de haies ou de plantations, la pollinisation entre arbres différents est possible (xénogamie) avec la présence d'insectes volants. Dans tous les cas, l'allogamie est la règle générale. La pollinisation par le vent n'a pas été observée, mais elle n'est pas à exclure.

Site	Auteur, année	Insecte pollinisateur observé
Fogo	Münch, 1986	Chenilles (<i>Geometridae Lepidoptera</i>), couleur jaune clair, longueur de 3 à 13 mm
	Dehgan, 1976, Webster, 1979	Papillons de nuit (<i>Noctuidae Lepidoptera</i>)
Inde	Bhattacharya 2005	Abeilles (<i>Apis dorsata</i> , <i>A. florea</i> , <i>A. mellifera</i>)
Porto Rico	Little et Woodbury 1974	Abeilles (<i>Apis mellifica</i> L.) Mentionnent le <i>Jatropha</i> comme une "plante à miel"

Tableau 2 : les insectes pollinisateurs du *Jatropha curcas* L., d'après différents auteurs

La fécondation est, comme chez toutes les Euphorbiacées, aporogame : le chemin du tube qui conduit le pollen passe par une autre voie que par le micropyle.

I.2.4.Fruit

Description du fruit (tableau 3)

Selon Münch (1986), la maturité du fruit est atteinte 3 à 4 mois après la fécondation. Le fruit est une capsule presque sphérique, de 4 cm de long et 3 cm d'épaisseur, à trois loges séparées (les carpelles) contenant chacune une graine. Le fruit est vert lorsqu'il se forme, puis il jaunit et devient rouge-noir ridé et rugueux. Il contient 1, 2 ou 3 graines séparées les unes des autres par une cloison. Sur 50 fruits observés par Cuhna Da Silveira (1934) au Cap Vert, 26 avaient 3 graines, 15 en contenaient 2 et 9 n'en possédaient qu'une. Les fruits secs et mûrs restent sur la plante et libèrent rarement les graines, même en tombant au sol, car les carpelles restent soudés du côté du pédoncule des graines.

Auteur/ site		Ecart observé	Moyenne
José Cuhna Da Silveira, 1934, Cap Vert (sans doute des fruits secs)	Longueur	1,8 à 3 cm	2,45
	Largeur	1,5 à 2,3 cm	1,98
	Epaisseur	1,3 à 2,2 cm	1,85
Münch, 1986 Fruits verts	Longueur	4 cm environ	
	Largeur	3 cm environ	
Münch, 1986 Fruits secs	Longueur	1,5 à 3 cm	

Tableau 3 : taille des fruits, d'après différents auteurs

Les fruits mûrs ont un poids moyen de 2,16 g (1,53 à 2,85) avec un rapport graines / péricarpe de 53 à 62 % (José Cuhna Da Silveira, 1934). L'auteur ne donne pas d'indication sur le degré de séchage du fruit mais des observations faites par le projet Biomasa au Nicaragua (Sucher, 1999) donnent des rapports graines sèches / fruits frais d'environ 15 %. On peut conclure sans se tromper que les fruits observés par Da Silveira étaient secs.

Description de la graine

Les graines mûres, 1 à 3 par fruit, sont de couleur brun foncé à noir. Elles présentent quelques analogies avec les graines de ricin. De forme ovale allongée, elles sont enveloppées d'un tégument extérieur très dur à cassure nette, souvent appelé coque. Sous ce tégument, une pellicule blanche (tégument intérieur) recouvre l'amande. Cette dernière est formée d'un albumen huileux blanchâtre contenant l'embryon pourvu de 2 larges cotylédons aplatis. Les graines représentent 53 à 62 % du poids du fruit sec (Cuhna Da Silveira, 1934, Cap Vert) et 15 % du fruit frais (Sucher, 1999)

Poids, taille et teneur en huile des graines selon différents auteurs (tableaux 4 et 5)

La plupart des auteurs indiquant des valeurs de poids ne précisent pas le taux d'humidité de la graine (tableaux 4 et 5). Les graines issues de fruits frais ont des taux d'humidité d'environ 35 % alors que pour les graines séchées à l'air, ce taux est de 5 à 10 % (7-8 % pour le projet Biomasa au Nicaragua). On peut supposer que les poids sont donnés pour des graines sèches. Cela dit, le taux d'humidité peut varier d'un endroit à l'autre.

D'après Ferrao (1962), il existe un lien entre l'aridité du climat et la teneur en huile des graines, ce qui expliquerait la teneur en huile plus importante au Cap Vert. Plusieurs auteurs ont ainsi décrit l'aridité comme un facteur favorisant les plantes à entreposer des réserves en lipides. Ceci dit, les mesures effectuées au Sénégal, dans un climat voisin de celui du Cap Vert, ne confirment pas cette hypothèse. Des observations complémentaires seraient à entreprendre.

Site	Auteur Année	Poids (g)	Dimensions moyennes (mm)
Cap Vert	José Cuhna Da Silveira, 1934,	0.56 - 0.75	16.7x10.9x8.1
Cap Vert/ Nicolau	José Cuhna Da Silveira, 1934,	0.41 – 0.46	15.0x10.6x8.0
Portugal	Droit, 1932	0.67	17.7x11.2x8.8
Bénin	Droit, 1932	0.72	18.0x11.4x8.8
Cameroun	Droit, 1932	0.66 – 0.69	17.6x11.2x8.6
Madagascar	Droit, 1932	0.67 - 0.71	
Mali	Droit, 1932	0.71	17.1x11.3x8.3
Bénin (variété verte)	Droit, 1932	0.87	19.3x11.6x9.1
Côte d'Ivoire	Amman,	0.68 - 0.85	
Rép. Pop. du Congo	Adriaens,	0.51 – 0.70	16.8x10.7x8.5
Inde	Kaushik <i>et al.</i> , 2007	0.49 - 0.69	16.8x10.5x7.8
Mozambique	José Cuhna Da Silveira, 1934	0.54 – 0.65	
Angola	José Cuhna Da Silveira, 1934	0.66	
Brésil	Centre Technologique du Minas Garais 1985	0.87	
Brésil	Saturnino & al 2005	0.53 –0.67	

Tableau 4 : poids et taille des graines, d'après différents auteurs

I.3. Diversité génétique

Droit (1932) fait état de plantes à fleurs roses, Corell et Corell (1982) de plantes à fleurs jaunes avec plus d'étamines aux Bahamas, Deghan (1976) de graines très grosses originaires de Porto Rico, Burkill (1966) de graines foncées et de graines claires en Malaisie... En 1919, Heim témoigne de la découverte d'une nouvelle plante oléagineuse, dans le Sud-Ouest de Madagascar, le *Betratra* (*Jatropha mahafalensis*), originaire du plateau de Mahafaly, qui pousse et se reproduit comme le *Jatropha curcas* L. Il est actuellement assimilé au *Jatropha*. Son rendement est comparable, et l'huile extraite de ses graines possède des propriétés très voisines. Houard (d'après Droit, 1932), signalait au Bénin 2 variétés distinctes, qui différaient par la coloration des feuilles : l'une à feuilles vertes, très répandue dans cette région, dont les graines étaient nettement plus grosses, avec un tégument de teinte brun rougeâtre, et l'autre à feuilles rouges, beaucoup moins commune, appelée *Jatropha gosipephelium*. Ses feuilles étaient plus petites.

Site	Auteur Année	Humidité de la graine (% poids graine)	Amande (% poids graine)	Huile (% poids amande)	Huile (% poids graine)
Cap Vert	Cuhna da Silveira 1934	5.5 -7	60-64	52.5–61.7	27.9–37.3
Mozambique	Cuhna da Silveira 1934	5.5 – 5.8	63.8 - 65.1	54.7-56.7	35-36.9
Angola	Cuhna da Silveira 1934	4.9	64	58.3	37.3
Portugal	Droit 1932		62.5	50	31.3
Benin	Droit 1932		66.6	54.5	36.3
Cameroun	Droit 1932		63	58	36.5
Madagascar	Droit 1932		68	55	37.4
Côte d'Ivoire	Amman		63.7–65.3	49.2-59.4	32.1-37.8
Congo	Adriaens		61.44 - 64.9	51.2-58.2	35.1-37.8
Sénégal	Station de Bambey		60.8 - 62.1	48.2-50.6	29.9-32.6
Sao Tomé	Ferrao 1982	7.8		46.7	23.7
Inde	Kaushik <i>et al.</i> 2007				28 - 38.3
Nicaragua	Projet Biomasa 2003	7 - 8	72.3 ²	41.1 ²	29.7
Brésil	CETEC 1985	11	62.3	60.8	38.1
Thaïlande	Kurtlab 2003				46.3

Tableau 5 : composition des graines, d'après différents auteurs

² Ce chiffre, donné par le projet Biomasa, est anormalement élevé. Après vérification, il s'avère que le décorticage de la graine a laissé le tégument intérieur. Si l'on considère que le décorticage enlève aussi ce tégument, l'amande occupe 59,9 % du poids de la graine et l'huile 49,4% du poids de l'amande, ce qui concorde avec les ordres de grandeurs de la littérature.

Les observations faites sur des plantes dont les graines provenaient d'origines diverses montrent des propriétés variables du fait de la forte interaction génotype-environnement. Au Nicaragua par exemple, où 1 200 ha avaient été plantés avec des variétés locales et des variétés du Cap Vert, la variété locale a présenté des graines plus grosses, des feuilles plus larges, et moins de branches alors que la variété du Cap Vert a eu un meilleur rendement. En Inde, Kaushik *et al.* (2007) ont étudié la variabilité de certains caractères et de la teneur en huile des graines de 24 écotypes de *Jatropha*, ramassés dans différentes zones agro climatiques de l'Etat de Haryana. Ils ont noté une différence significative pour la taille des graines, le poids de 100 graines et la teneur en huile. D'après ces auteurs, l'analyse statistique montre qu'il y aurait une forte héritabilité et un gain génétique sensible pour la teneur en huile et le poids des graines. Ce dernier point présente un intérêt tout particulier pour l'amélioration variétale.

D'après Prabakaran *et al.* (1998), il existerait des hybrides naturels de *Jatropha curcas* L. avec d'autres espèces du même genre. Ainsi, *Jatropha tanjorensis* serait un hybride naturel entre *J. curcas* et *J. gossypifolia*. Mais cet hybride ne donne pas de graines et il est surtout utilisé pour des haies décoratives. Il y aurait aussi un autre hybride naturel entre *J. curcas* et *J. canascens*, également stérile. L'hybridation interspécifique avait été rapportée par Ruppert *et al.* (1970). Deghan, en 1984, a répété l'expérience à des fins botaniques en croisant *Jatropha curcas* L. avec d'autres espèces de *Jatropha*. Enfin, Basha et Sujatra (2007) l'ont réitérée, cette fois à des fins d'amélioration variétale : ils ont obtenu des hybrides avec *J. integerrima* qui donnent des graines dont il faut évaluer les propriétés.

La variété mexicaine non toxique

Une attention particulière est à porter à la variété dite mexicaine qui ne serait pas toxique. Schmook et Serralta-Peraza (1997) affirment que dans les régions de Quintana Roo et de Campeche au Yucatan (Mexique), les graines sont utilisées en alimentation humaine après avoir été grillées, ou dans d'autres cas, l'huile est extraite des amandes pour être utilisée dans la cuisine.

Des études réalisées par Makkar et Becker (1997) sur l'utilisation des tourteaux de cette variété en alimentation animale ont montré que si la toxicité n'était pas aussi élevée que celle des autres écotypes, il était difficile d'affirmer qu'elle était inexistante. Il semble possible de la réduire encore par le chauffage (ce qui confirme l'intérêt du chauffage dans le processus de détoxification).

Une étude indienne par marqueurs moléculaires (Basha *et al.*, 2007) a pu distinguer les provenances mexicaines et les provenances indiennes d'un lot de graines étudiées. De même, des travaux de Da Camara Macahdo *et al.* (1997) montrent, contrairement aux autres écotypes de *Jatropha*, une mauvaise aptitude de celui du Mexique pour la micropropagation.

Si toutes ces observations confirment bien une originalité de la forme mexicaine, les travaux concernant cet écotype restent dispersés et n'ont pas été entrepris de façon systématique. Il est vrai que si cette graine se révélait comestible, son intérêt pour l'énergie s'en trouverait sérieusement atténué... L'utilisation du tourteau pour l'alimentation animale serait en revanche intéressante.

Caractérisation de la variabilité génétique par des marqueurs moléculaires

Les méthodes de sélection traditionnelles utilisant les caractères morphologiques pour l'établissement de la diversité génétique sont en grande partie infructueuses avec le *Jatropha* à cause de la trop grande influence de l'environnement pédo-climatique sur les caractères héritables (Heller 1996).

Par contre les marqueurs neutres moléculaires de l'ADN permettent de mesurer la diversité génétique de plusieurs écotypes et aident à les choisir pour entreprendre un programme de croisement et de sélection.

Basha *et al.* (2007) ont ainsi mené une étude pour évaluer la diversité génétique de 42 écotypes de *Jatropha curcas* : 41 écotypes en provenance d'Inde et 1 écotype de la variété mexicaine non toxique. Le polymorphisme moléculaire de 42% avec 400 amorces RAPD³ et de 33.5 % avec 100 amorces

³ Random Amplification of Polymorphic DNA

ISSR⁴ révèle une faible variabilité génétique entre les différents écotypes indiens (probablement due aux quantités limitées de semences introduites dans cette zone géographique)
Cependant, ce travail a permis d'identifier des marqueurs polymorphes ISSR capables de différencier les écotypes indiens de l'écotype mexicain. Ceci dit, bien que ces marqueurs permettent de différencier le génotype mexicain, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir mettre au point les marqueurs associés au caractère non toxique de ce écotype.

⁴ Inter Simple Sequence Repeat

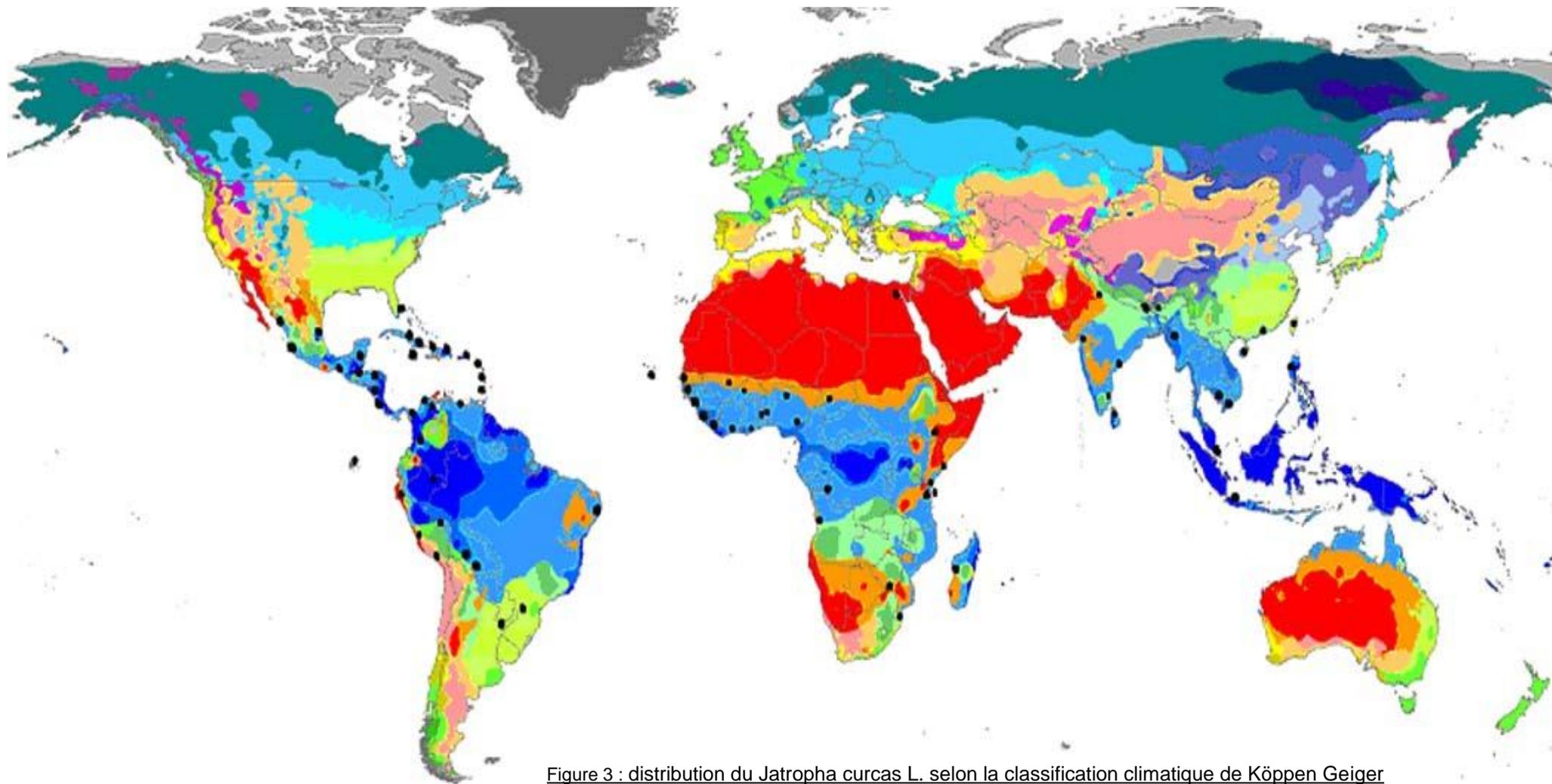


Figure 3 : distribution du *Jatropha curcas* L. selon la classification climatique de Köppen Geiger

Af : climat équatorial
 Aw : climat de savane avec saison sèche en hiver
 T moy annuelle > 18°C
 As : climat de savane avec été sec
 Am : Climat tropical humide (mousson)
 PP annuelles > 1500 mm
 BSh : climat de steppe (semi-aride) / sec et chaud
 380<pp<760 mmT° moy mensuelle > 18°C
 BSk : climat de steppe (semi-aride) / sec et froid (T°
 mo< 18°C)
 BW : climat désertique

Cf : climat tempéré chaud sans saison sèche
 Cw : climat tempéré chaud avec hiver sec
 Cs : climat tempéré chaud avec été sec
 (méditerranéen)
 Df : climat tempéré froid sans saison sèche
 Dw : climat tempéré froid avec hiver sec
 Ds : climat tempéré froid avec été sec (continental
 méditerranéen)
 ET : climat de toundra
 EF : climat d'inlandsis
 EM : climat subpolaire océanique

	Af		BWh		Csa		Cwa		Cfa
	Am		BWk		Csb		Cwb		Cfb
	Aw		BSh				Cwc		Cfc
			BSk						
	Dsa		Dwa		Dfa		ET		
	Dsb		Dwb		Dfb		EF		
	Dsc		Dwc		Dfc				
	Dsd		Dwd		Dfd				

PARTIE II – Ecologie et pratiques culturales

II.1. Exigences climatiques (figure 3)

II.1.1. Températures

L'aire d'expansion de la plante montre que le *Jatropha* aime la chaleur. L'arbre tolère une température moyenne annuelle de 11 à 28 °C, mais sa température optimale se situe entre 20 et 28 °C. La résistance à un gel léger est probablement un facteur variétal et les différents écotypes ne présentent pas la même sensibilité. Cette faculté d'adaptation est à prendre en compte en cas de plantation dans des zones d'altitude. Münch (1986) note que la plante existe sur des zones d'altitude à Fogo et à Cha das Caldeiras (1 700 m). Il en déduit qu'elle peut supporter un gel léger, après une phase d'adaptation. Ullenberg (2007) qui a réalisé des observations sur ce point à Madagascar remarque que même s'il existe des variétés résistantes au gel provenant d'Amérique du Sud, les variétés locales sont sensibles au froid et au gel.

II.1.2. Eau

La pluviométrie est un important facteur du rendement. Des études montrent que le Pourghère donne une production faible avec un régime pluviométrique minimal de 500 à 600 mm/an, et elle devient optimale avec un niveau de précipitations de 1 200 à 1 500 mm (Euler et Gorriz, 2004).

Les besoins minimums pour sa survie sont de 300 mm/an (une exception est toutefois relevée dans les conditions des îles du Cap Vert, où les précipitations ne sont que de 250 mm, mais où l'humidité de l'air est très importante). D'après Larochas (1948), l'arbre peut traverser de longues périodes de sécheresse sans péril, il perd simplement une partie de ses feuilles. Cette résistance est attestée par la présence de vieilles plantes de *Jatropha* à Fogo au Cap Vert, où les précipitations sont très rares. D'après Ouedrago (2000), les principaux caractères adaptatifs permettant au *Jatropha* de résister à la sécheresse sont :

- le développement racinaire de surface et de profondeur, qui assure à la plante un bon approvisionnement en eau ;
- la protection cuticulaire ;
- la réduction ou l'élimination du feuillage en saison sèche, qui limite au maximum les pertes par transpiration.

Pour Münch (1986), les mécanismes de cette adaptation sont également expliqués par la classification du *Jatropha* parmi les plantes succulentes : ses racines, ou son tronc, peuvent stocker et accumuler beaucoup d'eau en peu de temps quand les conditions d'humidité le permettent, par exemple à la suite d'une forte pluie. Des essais sous serre menés à l'Université de Hohenheim confirment cette hypothèse : le diamètre des jeunes troncs de la plante diminue pendant les phases de sécheresse pour reprendre leurs dimensions normales pendant les phases d'irrigation.

Certains auteurs modèrent cependant sa résistance à la sécheresse, comme Freitas (1906) qui rapporte qu'au Cap Vert une maladie attribuée à la sécheresse par la population autochtone se traduit par la déhiscence de l'écorce de l'arbre. Cette maladie se répand par bouturage, provoquant la mort précoce de beaucoup de plants.

Le *Jatropha* s'accommode de régimes pluviométriques variés. La distribution naturelle de la plante montre que son introduction a été la plus réussie dans les régions tropicales sèches avec une précipitation annuelle entre 300 et 1 000 mm, et qu'elle pousse principalement à basse altitude (0 - 500 m). Elle peut toutefois s'adapter à des altitudes plus élevées. Pant *et al.* (2006) ont en effet réalisé des comparaisons de rendements d'arbres cultivés à 3 niveaux d'altitude : 400-600 m, 600-800 m, 800-1 000 m. Les variables de rendement (nombres de branches par arbre, fruits par branche, fruits par arbre, graines par arbre) ont été les plus élevées pour la plus haute altitude. Cette étude ne mentionne cependant pas le régime pluviométrique des sites, et on peut supposer qu'une pluviométrie plus élevée à l'altitude la plus haute explique en partie le résultat obtenu.

II.2. Sol

II.2.1. Types de sol

Même si, d'après l'ensemble des auteurs, le *Jatropha* s'accommode bien de la plupart des conditions édaphiques, la plante préfère les sols profonds, de texture sableuse, à structure grumeleuse, où son système racinaire peut se développer de manière optimale. Elle est également capable de croître entre les rochers sous lesquels il y a un peu de terre, et on peut la cultiver sur des sols secs et caillouteux (Godin et Spensley, 1984).

Les sols argileux conviennent mal au *Jatropha*, sa croissance racinaire est en effet réduite dans les sols lourds et compacts (Vidal *et al.* 1962), et la plante est sensible à l'engorgement qui peut se produire dans ce type de sol (Daey Ouwens, 2007). D'une manière générale, le *Jatropha* ne doit pas être implanté dans un sol présentant un risque d'engorgement, même éphémère (Vertisols⁵, sols argileux lourds) (Achten *et al.*, 2007).

Les sols peu profonds ne conviennent pas aux plants produits à partir de graines, qui développent une longue racine pivot centrale : la profondeur doit être au minimum de 45 cm (Gour *et al.*, 2006). Ils peuvent éventuellement convenir pour les boutures, dont le système racinaire ne se développe qu'en surface, à condition d'avoir une pluviométrie suffisante tout au long de l'année, ou un dispositif d'irrigation.

Le pH du sol ne doit pas être supérieur à 9 (Tewari, 2007). Dans des sols très acides, la plante peut avoir besoin d'un apport en calcium et en magnésium (Biswas *et al.*, 2006)

II.2.2. Mobilisation des éléments nutritifs

Lors d'observations réalisées sur l'île de Fogo, Münch (1986) remarque que la plante n'a jamais présenté de symptômes de manque d'éléments nutritifs et en déduit qu'elle possède un système d'absorption particulièrement performant, compte tenu de la pauvreté des sols, notamment en phosphore. Selon lui, des mycorhizes de type VA (mycorhizes à Vésicules et Arbuscules) pourraient jouer un grand rôle, comme c'est le cas pour l'alimentation d'un proche parent du *Jatropha*, le Manioc. A noter que si cette hypothèse est vérifiée, la culture du *Jatropha* en plein champ risque d'épuiser les réserves du sol en phosphore en l'absence d'apport complémentaire. Des essais de mycorhization arbusculaire des plants ont été menés par certains auteurs afin d'étudier son effet sur les paramètres de croissance du jeune plant (voir paragraphe II.3.1.5).

II.2.3. Valorisation des sols marginaux et lutte contre l'érosion

Le *Jatropha* est adapté aux sols marginaux, c'est-à-dire peu fertiles et impropres à la culture, avec une faible teneur en éléments nutritifs (Heller, 1996). Son système racinaire développé lui permet en effet de mobiliser les éléments des couches profondes du sol. Ce système racinaire, grâce à sa croissance rapide et sa forte ramification, semble également intéressant pour lutter contre l'érosion (Achten *et al.*, 2007). L'adaptation de la plante aux sols marginaux est l'un des principaux enjeux avancés pour le développement de culture intensive de *Jatropha curcas*, notamment en Inde. Les expériences menées dans ce type de sol montrent que le Pourghère peut donner une production raisonnable, à condition de lui apporter l'entretien nécessaire en phase de croissance, de maintenir la production par des intrants (azote et phosphore) (Shekhawat *et al.*, 2007 ; Patolia *et al.*, 2007 ; Daniel, 2005), et de sélectionner des écotypes adaptés (Patolia *et al.*, 2007).

⁵ - Sol caractérisé par une forte teneur en argile (40 à 45 %) une couleur brun foncé, et un pH neutre (7 à 7,5). Sa grande profondeur et la présence d'argiles gonflantes (smectinites) lui confèrent une capacité d'absorption et de rétention en eau élevée avec une réserve utile de 180 mm pour une épaisseur de sol de 80 cm.

Ogunwole *et al.* (2007) ont observé l'impact de la culture de *Jatropha* sur un Entisol⁶ dégradé dans des conditions semi-arides de l'Ouest indien. Sur l'horizon 0-10 cm, les auteurs notent une amélioration de la structure du sol sous couvert de *Jatropha* (culture de 30 mois), avec notamment une augmentation de la stabilité des agrégats de 6 à 30 % et une diminution de la densité apparente de 20 %.

II.3. Itinéraire technique

II.3.1. Semis et plantation

II.3.1.1. Densité de plantation

La densité de plantation doit être choisie de manière à éviter la compétition entre les plantes. Les densités les plus courantes relevées dans la bibliographie sont les suivantes:

- 2 * 2 m (2 500 arbres /ha) ;
- 2 * 3 m (1 700 arbres / ha) ;
- 3 * 3 m (1 111 arbres / ha).

La densité doit être choisie en fonction des conditions pédo-climatiques du site d'implantation, qui vont influencer sur la croissance des plantes. En zone de pluviométrie abondante, il est conseillé de choisir un grand écartement. Le rapport « Handbook on *Jatropha Curcas* L. » de Fact Fuel (2006) préconise en conditions humides une densité de 3 * 3 m, car une densité de 2,5 * 2,5 m donnerait une végétation trop dense qui affecterait la production. Selon Gokhale (2008), l'expérience menée dans la région Nashik en Inde pendant 17 ans a montré qu'un espacement de 3 * 3 m est nécessaire, et que les densités de 2 * 2 (2 500 plants/ha) et 3 * 2 m (1 666 plants/ha) ne sont pas adaptées.

Parmi les publications récentes, le rapport d'experts de la Commission européenne (Rijssenbeek *et al.*, 2007) donne des recommandations dans ce sens : la densité optimale est proche de 1 300 plants/ha (3 * 2,5 m). La densité de 2 500 plants/ha, souvent mentionnée, est trop élevée, car la croissance des plants de plus de 3 ans empêche le passage lors de la récolte.

Densité et productivité individuelle de l'arbre

En Inde, dans la zone semi-aride de Gujarat (540 mm/an, 31 °C en été et 22,8 °C en hiver), une expérience a comparé la productivité individuelle du *Jatropha* à différentes densités de plantation (Chikara *et al.*, 2007) :

- 1 * 1 m (10 000 plants/ha)
- 2 * 1 m (5000 plants/ha)
- 1,5 * 1,5 m (4 444 plants/ha)
- 2 * 2 m (2 500 plants/ha)
- 3 * 2 m (1 666 plants/ha).

Le rendement individuel le plus élevé a été obtenu pour la densité la plus faible (1 666 plants/ha) avec 94,23 g de graines sèches par plante. La densité 1 * 1 m n'a donné qu'un rendement de 31,87 g par plante. Toutefois, si l'on ramène ce rendement à l'hectare, c'est cette densité qui donne la plus haute production : 318,7 kg de graines sèches à l'hectare, contre 156 kg pour les 1 666 plants. Les auteurs reconnaissent ne pas pouvoir tirer de recommandation de densité optimale à partir de cette expérience puisque les observations ont été faites sur des plantations de 1 an et demi. Selon eux, les densités les plus fortes connaîtront une sévère compétition qui sera défavorable au rendement individuel.

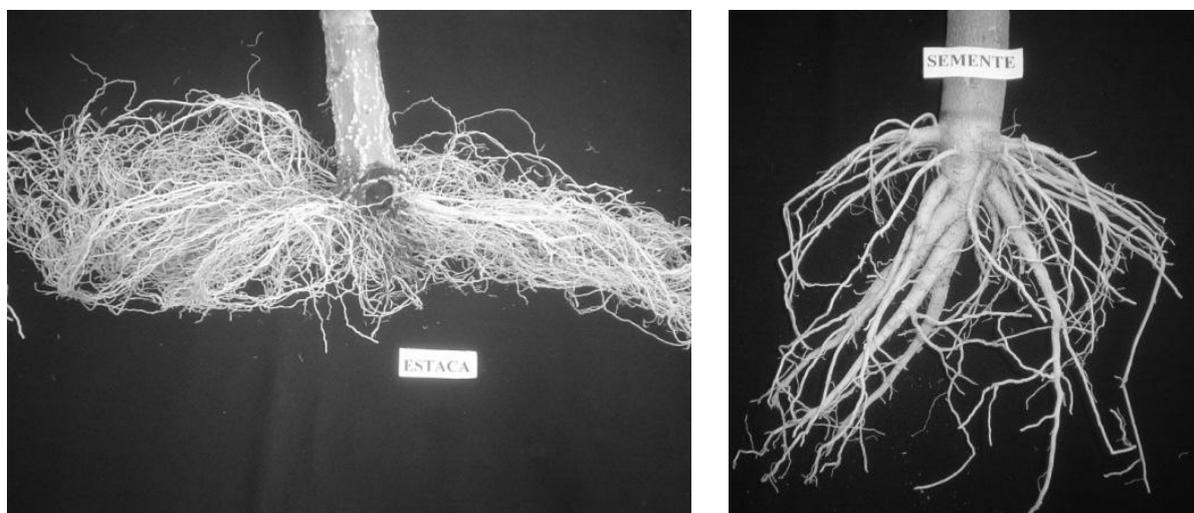
Au Brésil, Ungaro *et al.* (2007) ont comparé 4 densités de plantation : 2 * 1m, 3 * 1 m, 2 * 2 m, et 3 * 2m pour des plantations de 4 ans (plants issus de pépinières). Aucune différence significative de la productivité individuelle n'a été observée. Les rendements les plus élevés ont été obtenus pour les densités les plus fortes : 4,08 t/ha pour la densité 2 * 1 m et 2,8 t/ha pour la densité 3 * 1 m.

⁶ Sol sans horizon diagnostique, peu évolué, souvent sableux

II.3.1.2. Aperçu des techniques de multiplication

La multiplication du *Jatropha* peut s'effectuer par graine (multiplication sexuée) ou par bouture (multiplication végétative). Compte tenu du caractère allogame de l'espèce, la multiplication sexuée ne peut donner une plante génétiquement identique à celle dont la graine est issue. On peut espérer une certaine homogénéité phénotypique en semant des graines d'écotypes stabilisés qui présentent un certain degré d'homozygotie. Seule la multiplication végétative permettra d'obtenir un individu génétiquement identique à la plante mère. Le bouturage permettrait également de gagner plusieurs mois sur la première production.

D'après différents auteurs, la plantation en graine donne des plants plus résistants, du fait de la racine pivot centrale qui se développe profondément, alors que les plants issus de boutures ne produisent que des racines superficielles (photos 1 et 2). Lors du bouturage, le déséquilibre entre la partie aérienne et souterraine entraîne un stress, qui est probablement la cause de la faible rusticité et du rendement moins élevé observé par la suite.



Photos 1 et 2 : comparaison des systèmes racinaires d'un plant obtenu à partir d'une bouture (à gauche), et d'un plant issu de graine plantée directement dans le sol (à droite) (Soares Severino, 2007).

D'une manière générale, la multiplication végétative présente 4 inconvénients principaux :

- un risque accru d'infection par des pathogènes à cause de la surface de coupe qui représente un point d'entrée ;
- un développement superficiel du système racinaire. Or une plantation de *Jatropha* étant mise en place pour des années (environ 30 ans), une attention particulière doit être portée au bon développement de son système racinaire ;
- une mauvaise adaptation pour les plantations industrielles car la longévité de la plante se trouve considérablement réduite (Soares Severino, 2007 ; Henning, 1996) ;
- une mauvaise adaptation aux zones sèches non irriguées.

Des observations de la première production ont été faites (tableau 6) sur des plants sauvages qui n'ont pas bénéficié de soins particuliers (irrigation, fertilisation). La variabilité des dates de première floraison ou de première production est à imputer aux conditions environnementales (faible pluviométrie). Ainsi, en zone sèche non irriguée, on suppose que la première floraison et la première production se trouvent largement retardées, comme c'est le cas au Cap Vert, où les différents auteurs observent une première production au bout de seulement 3 à 5 ans.

	Multiplication sexuée Semis direct de graines	Multiplication végétative Bouture repiquée
Reprise	La réussite de la plantation dépend du pouvoir germinatif des semences	
Enracinement	Enracinement profond Développement d'une racine pivot et de 4 racines latérales	Enracinement superficiel Les boutures ne développent pas de racine pivot, mais uniquement des racines latérales : nombre élevé de petites et moyennes racines superficielles
Début de production	Production de fruits : - 3 ^e ou 4 ^e année (Avila, 1949, Cap Vert) - Sûrement plus tôt dans des conditions meilleures	Plants plus précoces - 1 ^{re} production : 2 ^e année (Chelmicki et Varnhagen, 1841, Cap Vert) - Sûrement plutôt dans des conditions meilleures
Résistance à la sécheresse	Plants plus résistants. La racine pivot permet d'aller puiser l'eau jusqu'à 10 m.	En rapport avec l'enracinement : moins de résistance aux longues sécheresses
Croissance, rendement	Croissance plus rapide due à l'enracinement Dimensions plus larges Plante plus robuste Rendement plus élevé, sauf la première année (Calvino, 1925)	Rendement plus élevé la 1 ^{re} année uniquement (Heller, 1996) Plants plus petits que ceux issus de graines
Résistance aux adventices et maladies	Concurrence des adventices plus importante les premières années Plus grande résistance aux maladies	Les grandes boutures peuvent tomber sous l'effet du vent (Soares Severino, 2007)
Longévité observée de l'arbre	50 ans (déclin du rendement après 30 ans)	Beaucoup moins élevée (pas de durée mentionnée)

Tableau 6 : avantages et inconvénients des techniques de multiplication. Observations faites en zones semi-arides

II.3.1.3. Multiplication par semis

Le semis peut se réaliser de 2 façons :

- **le semis direct des graines** qui représente sans doute la solution la plus indiquée sur le plan des moyens à mettre en œuvre, même si un démariage futur est nécessaire, mais qui ne peut être réalisé que dans des zones avec une pluviométrie suffisante (ou avec une irrigation d'appoint) ;
- **la mise en place de pépinières** qui permet une implantation précoce et d'avoir des plants plus vigoureux. C'est certes une technique plus coûteuse, mais elle donne les meilleurs résultats de plantation. Cette méthode est la plus adaptée pour les zones semi-arides.

A - Choix des semences et semis

L'origine des semences doit être choisie en fonction de l'environnement pédoclimatique de la zone de plantation. Les semences doivent remplir les exigences suivantes :

- pureté ;
- absence de germes ;
- taux élevé de germination.

D'après Saturnino *et al.* (2005), la taille des graines influence différents paramètres de croissance mesurés 90 jours après plantation : hauteur des plants, profondeur d'enracinement, nombre de feuilles, poids de matière verte. En 1949, Avila recommandait déjà l'utilisation de grosses graines nettoyées, dépourvues de débris et de corps étrangers, puis séchées.

Selon Münch (1986), les fruits dont les graines sont destinées au semis doivent être récoltés immédiatement après maturation, afin d'éviter les risques de contamination par des champignons.

Avila et Calvino (1949) préconisent d'utiliser uniquement des graines issues de la dernière récolte, car le pouvoir germinatif diminuerait rapidement. Une expérience de germination menée sous serre au Sénégal a abouti à un taux de germination des graines de 86 %, 15 jours après semis (Samba Arona *et al.*, 2007). Les semences utilisées avaient été ramassées quelques mois avant et stockées à 4 °C pendant 90 jours avant semis. Les auteurs remarquent que ce résultat est beaucoup moins bon qu'une autre expérience réalisée en Afrique du Sud, où une germination complète a été observée 9 jours après la plantation.

Sharma (2007) note un effet écotype important sur le pouvoir germinatif et le temps de germination. Lors de son expérience, menée sur 7 écotypes indiens, il a observé 3 pics de germination à 3, 6 et 9 jours après semis.

L'ensemble des auteurs préconise un pré-trempe des graines dans de l'eau froide (12 ou 24 heures selon les auteurs) pour faciliter la germination. Sharma (2007) a obtenu une augmentation moyenne de 30 % du taux de germination en effectuant un pré-trempe des graines pendant 24 heures. Il note cependant que le pré-trempe n'a eu aucun effet sur l'un des 7 écotypes testés.

La graine sera ensuite placée à quelques centimètres de profondeur : 2 cm pour Avila (1949) et 3 cm selon Vidal *et al.* (1962). Les graines de *Jatropha* peuvent germer à des profondeurs plus importantes, mais sous irrigation ou en zones très humides, les faibles profondeurs d'ensemencement sont probablement plus favorables car les germes utilisent moins d'énergie pour sortir du sol (Münch, 1986). Une fois les graines semées, il faut les recouvrir de terre et les arroser.

B - Semis direct

Le semis direct peut être envisagé en zones humides ou en zones à forte humidité relative, juste avant la saison des pluies (Münch, 1986). Le succès d'une plantation en semis direct dépend principalement de la qualité des semences, de la période de semis, de l'humidité de la terre et de la qualité du travail du sol. Cette technique nécessite moins d'investissement que l'élevage de plants en pépinières, mais une quantité de graines proportionnellement plus élevée. La première production débutera seulement en deuxième année.

Sur un sol nettoyé des adventices, Avila (1949) recommande au Cap Vert de creuser des trous de 20 cm de rayon. La terre de ces trous doit être légèrement meuble. Vidal *et al.* (1962) préconisent de placer 2 à 5 graines par trou. Le nombre de graines est choisi en fonction des conditions climatiques. Dans tous les cas, les graines sont équidistantes les unes des autres dans le trou, avec un écart de 10 cm minimum. La profondeur d'ensemencement est de 1 à 2 cm.

Les prédateurs des semis sont les oiseaux, les poules et les souris qui creusent dans les trous de semis (Vidal *et al.*, 1962). Le bétail peut également causer des dégâts en piétinant les jeunes plantules.

D'après Münch (1986), les deux premières années, le sol doit être désherbé dans un rayon de 50 cm autour de la plante. S'il s'agit d'herbes de grande taille, il faut pratiquer un désherbage sur toute la superficie. En seconde année, deux désherbages sont encore nécessaires. Au premier désherbage de la seconde année, le démariage est effectué à une plante, la plus vigoureuse. Le sol doit être humide de manière à ne pas blesser les racines des plantules, celle qui reste comme les plantules enlevées qui peuvent être utilisées en remplacement d'un pied manquant ou pour une nouvelle plantation.

C - Semis en pépinière

La durée d'élevage des plants en pépinière varie, selon les différents auteurs, de 6 semaines à 5 mois. Joker et Jepsen (2003) recommandent de laisser grandir les plants en pépinière pendant 3 mois, jusqu'à ce qu'ils aient atteint une taille de 30 à 40 cm car, à partir de ce stade, ils commencent à développer leur odeur repoussante et ne risquent plus d'être pâturés par les animaux.

Le nombre de plants doit tenir compte du taux de germination des graines et d'une sécurité pour assurer le remplacement. Il est nécessaire de prévoir 15 à 20 % supplémentaire par rapport au besoin calculé. La quantité de semences est déterminée à partir du poids de 100 graines.

Quelle que soit la durée prévue, la date de mise en place de la pépinière doit être choisie de manière à effectuer le repiquage en début de saison des pluies. Le terrain choisi doit être le plus plat possible et protégé des vents dominants. Le sol doit être léger, mais pas trop sinon le système racinaire se développerait trop vite ce qui gênerait la transplantation, profond et fertile. Il est nécessaire de prévoir une source d'eau à proximité pour assurer l'irrigation nécessaire.

Pépinière en plein

Les pépinières en plein produisent des plants à racine nues. La confection de planches est la technique la moins coûteuse. Elle présente l'avantage de réduire les temps de transport des plants jusqu'au champ lors du repiquage.

Préparation des planches

- Travailler le sol à 50-60 cm de profondeur, le débarrasser de ses cailloux et racines (Avila, 1949) et le niveler.
- Dimension des planches : 1 à 1,2 m de largeur, sur une longueur variable en fonction du nombre de plants (Vidal *et al.*, 1962). La planche peut être délimitée sur son pourtour avec des briques de 40 cm de hauteur (Ky Lilea *et al.*, 2007). Prévoir des allées d'au moins 60 cm de largeur pour le passage entre les planches.
- La planche est ensuite remplie avec un substrat, de type mélange de terre de surface et de compost (ou engrais organique) avec du sable (1/3 de terre de surface, 1/3 de compost et 1/3 de sable). D'après Bhojvaïd (2006), le substrat idéal est une terre sablonneuse et drainante, qui facilite l'arrachage des plants sans endommager les racines. Le choix du substrat dépend du type de sol, en gardant à l'esprit qu'un substrat trop léger risque de provoquer un développement racinaire trop rapide. Le mélange se fait progressivement en prenant soin d'arroser pour homogénéiser le substrat
- L'irrigation peut être réalisée par arrosage. Sa fréquence dépend du site considéré. Ki Kilea *et al.* (2007) préconisent un arrosage matin et soir par temps frais au Mali.

Distance de semis

La distance entre les graines doit être de 10 * 10 cm (100 plants/m²) selon Avila (1949) et de 15 * 15 cm (44 plants/m²), selon Vidal. Cette distance dépend de la durée prévue de la pépinière. Pour une durée de 6 semaines, une densité de 100 plantes conviendra. Pour une durée plus longue, il est préférable d'augmenter la distance de manière à ne pas entraver le développement des jeunes plants. Par ailleurs, le semis en triangle utilise mieux les zones de bordures et optimise le développement (Münch, 1986).

Pépinière en sachets ou en tubes plastiques

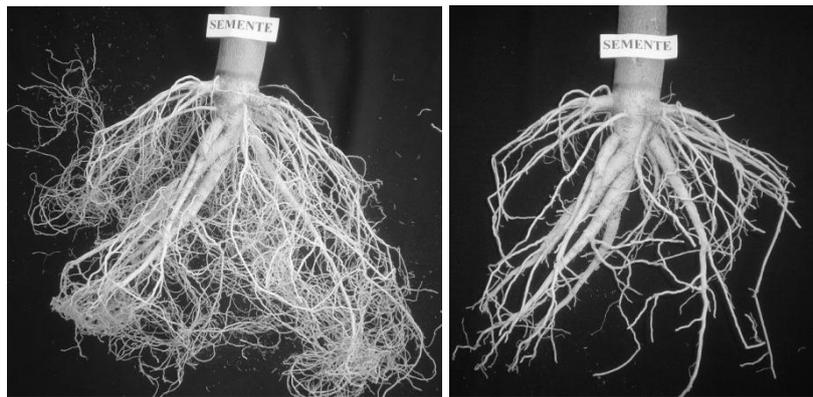
La seconde option est la culture des plants en sachets ou en tubes plastiques cannelés, moins traumatisante pour les racines lors de la transplantation. Dans les sachets, où le substrat est plus léger par rapport à la plantation directe en sol, les racines se développent très vite et ont besoin de beaucoup d'espace. Dans le cas de semis en pot, De Lourdes Silva (2007) a observé que la racine se recourbe au fond et reste déformée même après transplantation au champ. Il est donc primordial de choisir la profondeur du pot ou du sachet en fonction de la durée prévue d'élevage du plant. En arboriculture, les plantes élevées en sachets présentent souvent le même recourbement de racine ; lors de la transplantation, les pépiniéristes coupent le bas du sac pour enlever les racines déformées. Si cette pratique peut provoquer des dégâts irréversibles chez certaines plantes, le *Jatropha* semble très bien la supporter et forme de nouvelles racines après transplantation (Soares Severino, 2007).

Le développement racinaire de plants semés dans 2 types de containers (tube et sachet) a été comparé à celui de plants semés en pleine terre (photos 3 à 7) (Soares Severino *et al.*, 2007).

- Dans le cas des plants semés en tubes cannelés (volume 0,28 l), on observe la formation d'un nœud, probablement à cause du volume limité. Les racines primaires ont un diamètre normal mais elles sont moins nombreuses que celles du plant en pleine terre. Les cannelures du tube tendent à faire pousser les racines verticalement, et aucune racine latérale ne se développe superficiellement.
- Dans le cas des plants semés en sachet (volume 2 l), le développement racinaire est similaire à celui du plant élevé en tube, mais les racines sont davantage courbées. Les racines latérales sont moins nombreuses. On observe un nombre plus élevé de fines racines par rapport au tube, probablement en raison du plus grand volume de substrat.

En conclusion, lorsque le diamètre du tube ou du sachet est trop étroit, les racines se développent verticalement et il n'y a pas de racines superficielles.

Le choix des dimensions du sachet représente un compromis qui doit permettre une croissance adéquate des racines tout en optimisant les coûts de production et de transport. La profondeur des sachets généralement relatée dans les expériences de pépinières est d'environ 30 cm, pour une durée de 2 à 4 mois. Handreck et Black (1991) et Apud Souza (1995) recommandent de ne pas utiliser des sachets de moins de 22 cm de haut. Le diamètre doit être supérieur à 10 cm. Une expérience menée par de Lourdes Silva de Lima *et al.* (2007) a montré une croissance maximale du plant dans un sachet de 2 litres (24 * 16 cm), atteignant une hauteur de 25 cm au bout de 35 jours alors qu'elle était de 16,25 cm dans le sachet de 20 * 13 cm.



Photos 3 et 4 : systèmes racinaires de plantes semées en pleine terre

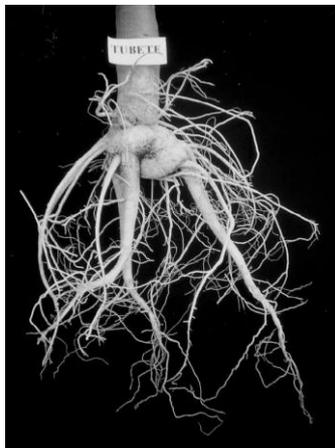
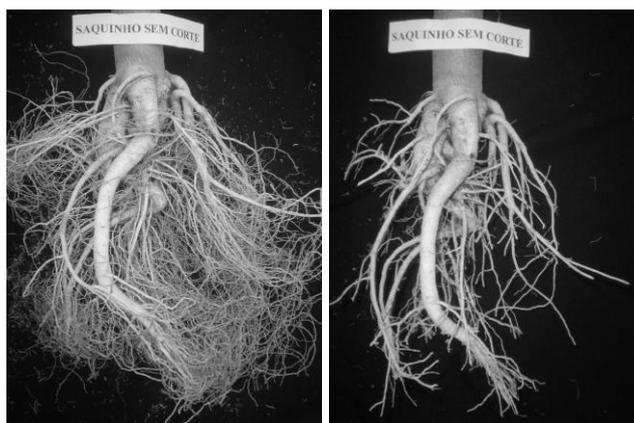


Photo 5: système racinaire d'une plante semée en tube



Photos 6 et 7 : systèmes racinaires de plantes semées en sachet plastique

D – Repiquage des plants issus de pépinière

Selon Avila *et al.* (1949), le repiquage peut se faire quand les plants perdent leur aspect de broussaille, c'est-à-dire quand la coloration passe du vert au gris et quand la formation du bois dans le tronc a eu lieu. A cette période, de la sève s'écoule du tronc après incision.

Münch (1986) préconise d'arrêter l'irrigation 2 à 3 semaines avant l'enlèvement des plants pour le repiquage sur le site définitif. Le repiquage a lieu en début de saison des pluies. Cependant, si une irrigation complémentaire est possible, l'auteur recommande un repiquage un peu avant le début de la saison des pluies. Ceci permet de libérer du temps de travail en début de saison des pluies et laisse aux plants plus de temps pour se développer et résister à une éventuelle sécheresse.

Arrachage des plants de pépinière en plein

Il est conseillé d'arroser les planches la veille de l'arrachage afin de faciliter leur enlèvement. L'arrachage doit être précautionneux : Avila (1949) recommande de creuser un fossé sur la largeur de la planche suffisamment profond pour atteindre les racines de la plante. Les jeunes plants peuvent ensuite être enlevés les uns après les autres en les soulevant. Avila conseille le trempage des racines aussitôt après arrachage dans un mélange d'eau, de bouse de vache, d'argile ou de terre. Calvino (1925) recommande de couper les racines à quelques centimètres, exception faite de la racine principale. Les plants doivent être transportés rapidement, à l'ombre et avec précaution.

Transplantation

La parcelle à implanter doit avoir été débarrassée de ses adventices, notamment *Lantana Camara* L. et *Dichrostachys Sineria* L., qui sont des adventices concurrentes du *Jatropha* (voir paragraphe II.3.4.2). Des trous auront préalablement été creusés selon la densité choisie (voir paragraphe II.3.1.1). La dimension des trous conseillée par les différents auteurs varie de 30 * 30 * 30 cm à 40 * 40 * 40 cm (Münch, 1986). Ils devront être rebouchés avec de la terre de surface. A noter qu'en période sèche, ces trous doivent être creusés au fur et à mesure de l'implantation et non en avance, sinon la terre s'assèche complètement à l'intérieur et provoque un stress à la reprise.

Si la plantation est réalisée avant le début de la saison des pluies et si aucune irrigation n'est envisageable, il est possible de réduire l'évaporation en plaçant 3 pierres autour de la plante (Avila, 1949) ou par d'autres méthodes telles que le mulching ou le paillage plastique.

E - Comparaison des taux de survie des plants pour chaque méthode de plantation

Des comparaisons des taux de survie à la plantation pour les différentes méthodes ont été faites par Kobilke (1989) au Cap Vert et par Heller (1992) au Sénégal. Les taux de survie les plus bas sont ceux obtenus avec le semis direct : entre 5 et 50 %, avec une moyenne annuelle de 19,8 %. Selon Heller, ce taux dépend non seulement de la date de semis et de la profondeur d'ensemencement, mais également de l'année d'essai. Les essais ont confirmé que le semis devrait être fait après le début de la saison des pluies. Pour les plants issus de pépinière, les taux de survie vont de 79 à 100 %, et on

ne note pas de différence significative entre la reprise des plants issus de pépinière en racines nues et ceux issus de pépinières en sac.

II.3.1.3. Multiplication par bouturage (multiplication végétative)

La multiplication par bouturage doit avoir lieu pendant la période dite de repos végétatif, c'est-à-dire lorsque l'arbre a perdu ses feuilles en région semi-aride. Cette période varie selon les sites : par exemple, elle s'étend de mars à juin au Cap Vert (Avila, 1949 ; Freitas, 1906). A cette période, les branches du *Jatropha* sont sans feuilles et les boutures peuvent former des racines avant la formation de nouvelles feuilles et approvisionner celles-ci en eau.

Choix des boutures

D'après Münch (1986), les boutures doivent être choisies de la manière suivante :

- provenir de la partie la plus proche possible du tronc ;
- ne pas être trop grosses ;
- avoir de courtes distances d'entrenœuds ;
- être les plus droites possible, avoir une écorce lisse, grise et brillante (Avila, 1949, rappelle de ne jamais utiliser les branches tachetées ou aux écorces soulevées car elles sont malades).

Les boutures traditionnellement utilisées au Cap Vert ont une longueur de 1 à 1,5 m (Münch, 1986). Plusieurs auteurs critiquent ce choix car de trop longues boutures présentent le risque d'être renversées par le vent ou par les animaux, ce qui rend leur enracinement plus difficile. Selon Freitas (1905), les grandes boutures sont davantage menacées par la sécheresse, en raison du plus grand nombre d'yeux et de la plus grande surface de transpiration. Si les boutures trop longues ne sont pas appropriées, il en est de même pour les boutures trop courtes.

Au Sénégal, Samba Arona N'Diaye *et al.* (2007) ont comparé les taux de survie de boutures de 3, 5, 10 et 15 cm de longueur. Les boutures de moins de 10 cm ont un taux de survie très bas, 20 % pour celles de 5 cm et 0 % pour celles de 3 cm. Les boutures de 10 et 15 cm ont un taux de survie de 60 %. Le taux de survie peut être amélioré par un prétraitement aux hormones de croissance (Kochhar, 2008). Un prétraitement à l'auxine a permis d'obtenir un taux de survie de 93 % après 45 jours de plantation, alors qu'il était de 60 % pour les témoins.

Les expériences de terrain dans d'autres régions (Rakotovo, 2005, à Madagascar) conseillent de prendre des boutures de 30 à 40 cm (4 à 6 yeux) à partir de branches âgées d'un an. Cela permet d'en couper plusieurs à partir d'une même branche, mais l'inconvénient est une plus grande perte de sève pour les boutures à 2 aires de coupures. Sans produit de cicatrisation, cela réduit les chances de survie après plantation.

La coupe doit être effectuée avec un couteau très tranchant de manière à être nette. Il faut éviter les cassures et les fentes. Selon Münch, une ligne de coupe perpendiculaire à la branche est préférable à une ligne oblique, car elle donne un meilleur enracinement et la surface de coupe est plus petite, ce qui réduit la plaie et les risques d'infection.

Stockage et transplantation des boutures

Aussitôt coupées, les boutures doivent être apportées à l'ombre, dans un lieu frais. Il est conseillé de les conserver avec la zone de coupe dirigée vers le haut pour ne pas perdre de sève. La sève sèche dans la zone du cambium et y forme une couronne d'où partiront les premières racines (Avila, 1949). On peut recouvrir les coupes de paille pour les protéger de la transpiration jusqu'à la plantation. L'humidité ambiante doit être faible pour éviter qu'elles ne commencent à germer. Il n'existe pas d'information sur la durée de stockage des boutures. Il est préférable de les planter le plus tôt possible après la coupe.

La densité de plantation (voir paragraphe **II.3.1.1**) peut être plus élevée pour les plants issus de bouture que ceux issus de graines, dans la mesure où la partie aérienne est moins développée. La distance optimale dépend là encore de la qualité du sol et de son état hydrique.

Pour la plantation, Avila (1949) recommande d'enfoncer la bouture dans un trou préalablement préparé comme pour le semis ou la transplantation de plants issus de pépinière. La profondeur de plantation de la bouture dépend de sa longueur. Les observations faites sur le bouturage pratiqué traditionnellement montrent que les paysans enfoncent la bouture dans le sol d'environ 1/3 de sa longueur. C'est le choix retenu par la plupart des auteurs. Freitas (1906) et Vidal (1962) conseillent de planter 2 boutures par trou. Les boutures n'ayant pas pris doivent être remplacées par des plants issus de pépinière au moment du premier désherbage.

Effet de traitement hormonal sur le développement racinaire

L'induction de racines par application d'auxine a été rapportée par de nombreux auteurs sur d'autres espèces. Kochhar *et al.* (2005) ont testé l'action de différentes hormones sur le développement racinaire de boutures de *Jatropha curcas*. D'après leurs travaux, un prétraitement avec de l'auxine avant la plantation (trempage de 24 heures dans une solution diluée à 100 mg/l d'IAA) permet d'obtenir un développement racinaire chez 75 % des plants 30 jours après plantation, et 100 % 45 jours après, alors que seules 60 % des boutures témoins ont commencé à développer des racines. Des tests similaires réalisés sur 2 espèces de *Jatropha* ont permis de montrer que la réponse au traitement hormonal est différente en fonction de l'espèce : alors que l'auxine est plus efficace dans le développement racinaire de *Jatropha curcas*, *Jatropha glandulifera* montre une meilleure réponse avec de l'acide naphthalèneacétique (NAA).

II.3.1.4. Une autre possibilité de multiplication végétative : la micropropagation in vitro

La micropropagation *in vitro* consiste à reproduire un individu à partir d'un fragment qui est placé sur un milieu nutritif synthétique. Cette technique permet d'obtenir rapidement un grand nombre d'individus à partir d'une plante mère présentant un génotype sélectionné pour sa performance. Elle peut se faire selon deux voies :

- la multiplication par bourgeonnement axillaire : en provoquant le développement de bourgeons axillaires présents naturellement à la base des feuilles. Le même développement peut être provoqué à partir de tiges ou d'inflorescences pour autant qu'ils comportent des nœuds. Cette technique ne fait donc qu'accélérer *in vitro* le fonctionnement normal des méristèmes déjà formés sur une plante ;
- la multiplication par bourgeonnement adventif : en provoquant l'apparition de bourgeons adventifs en des endroits inhabituels. L'initiation de tels bourgeons peut être en principe induite sur n'importe quel type d'organe ou de tissu (feuille, tige, racine...).

Les cinq stades de la multiplication *in vitro* sont les suivants :

- *stade de mise en culture* : après repérage d'individus performants et stérilisation de l'explant, des bourgeons sont prélevés ou induits sur l'explant ;
- *stade de multiplication* : cultivé sur un milieu approprié contenant de la cytokinine, le bourgeon se développe en une petite tige feuillée, développant de nouveaux bourgeons à la base de chaque feuille. Ces bourgeons pourront se développer en autant de petites tiges qui, à leur tour, initieront de nouveaux bourgeons ;
- *stade d'élongation* : les tiges feuillées sont repiquées sur un milieu contenant de l'acide gibbérellique qui provoque l'allongement des pousses ;
- *stade d'enracinement* : lorsqu'elles atteignent une taille de quelques centimètres, les pousses feuillées sont individualisées sur un milieu additionné d'auxine favorisant le développement des racines ;
- *stade d'acclimatation* : la dernière étape consiste à adapter progressivement les microplants aux conditions auxquelles ils seront exposés à l'extérieur.

Le rôle des régulateurs de croissance, cytokinine et auxine, dans les différentes étapes de l'embryogenèse a été démontré, mais la proportion idéale entre leurs concentrations, qui varient selon les types de tissus, est difficile à établir.

Si de nombreuses plantes peuvent aujourd'hui être multipliées par culture *in vitro*, *Jatropha Curcas* L. reste l'une des plus difficiles à multiplier. La difficulté pour obtenir des racines a notamment été soulevée. Sanket (2004) donne les conclusions suivantes :

- l'utilisation de bourgeons de jeunes pousses est idéale pour l'initiation de la culture ;

- le milieu de culture le plus adapté pour la multiplication, l'élongation et l'induction de bourgeons est composé d'une combinaison de cytokinine (BAP) (1 mg/l), de sulfate d'adénine (10 mg/l) et d'acide citrique (30 mg/l) ;
- l'un des principaux problèmes rencontrés est la nécrose des feuilles et de la masse tissulaire entière, qui nécessite l'utilisation d'antioxydants en plus de régulateurs de croissance ;
- les vitesses de multiplication et d'élongation sont lentes par rapport à celles des autres espèces ;
- le stade d'élongation a abouti à un enracinement sur un milieu complété en d'acide indol-3 acétique (IAA) et auxine (IBA). Le développement racinaire obtenu reste toutefois limité.

L'effet génotype semble influencer sur la réponse à la technique de micropropagation. Da Camara Machado *et al.* (1997) ont réalisé des essais de multiplication *in vitro* d'écotypes de différentes provenances sur plusieurs milieux de culture pendant plusieurs années. Ils ont réussi à obtenir un taux acceptable de bourgeons bien formés pour le génotype en provenance du Nicaragua (jusqu'à 70 %), alors qu'ils ont abouti à une perte totale de la culture du génotype mexicain.

Le choix de l'organe qui servira d'explant a également son importance. Samba Arona *et al.* (2007) au Sénégal ont montré que la multiplication *in vitro* à partir de graines est difficile à réaliser en raison d'infections. Même après désinfection des explants (avec Hg Cl₂ 1% seul ou en combinaison avec du NaClO₄), les auteurs ont obtenu un taux de germination nul avec des graines non décortiquées et de 20 % seulement avec des graines décortiquées. Ensuite, 95 % des explants placés sur un milieu de culture ont montré une réactivation des bourgeons axillaires, produisant une ou deux feuilles au bout de 10 jours. Jha *et al.* (2007) ont obtenu une induction d'embryons somatiques de 58 % à partir d'explants de feuilles. Ils ont ensuite obtenu un enracinement puis une acclimatation des plantules avec un taux de survie de 90 % en plein champ. Datta *et al.* (2007) ont cultivé des explants nodaux de *Jatropha* et sont arrivés à une induction racinaire de 52 % en 2-3 semaines. Les plantules transplantées en pot après 12-16 semaines se sont acclimatées avec un taux de survie de 87 %.

II.3.1.5. Essais de mycorhization des semences

Münch constatait en 1986 une mobilisation extrêmement élevée de certains éléments minéraux par la plante. Il supposait l'action de mécanismes impliquant des mycorhizes.

En Inde, Suhas P Wani *et al.* (2006) ont testé l'effet de l'inoculation de graines de *Jatropha* avec une souche locale de champignons mycorhiziens à arbuscules. Les paramètres de croissance « hauteur des jeunes plants », « circonférence du pseudo-tronc » et « nombre de feuilles » ont été observés 3 mois après semis. La croissance des plants inoculés a été supérieure à celle des plants non inoculés : hauteur + 34 %, circonférence du pseudo tronc + 10 %, nombre de feuilles + 33 %. Sharma (2007) a observé que l'inoculation de *Jatropha* avec des mycorhizes augmente significativement la mobilisation de phosphore et des autres ions métalliques : aluminium, zinc, chrome, cuivre, fer et plomb. Cette observation pourrait présenter un intérêt environnemental. Toutefois, les mycorhizes ne font que mobiliser le phosphore déjà présent dans le sol : sans fertilisation, cela peut provoquer l'appauvrissement du sol à moyen ou long terme.

II.3.2. Fumure

La fertilisation azotée est fondamentale pour la production et le développement végétatif de la plante. Le phosphore participe à la fois à la croissance de la plante et au développement des racines dans les premières phases de la culture. Durant la période de floraison, il stimule la production de fleurs, accélère la maturation et augmente la production et le remplissage des graines. Le potassium assure le transport et le stockage des sucres, il contribue également à la floraison et au développement des fruits.

Actuellement, on ne connaît pas la fertilisation optimale pour la culture de *Jatropha*. Les études menées sur le sujet permettent toutefois de dégager des recommandations.

II.3.2.1. Evaluation des besoins de la culture

Le calcul des exportations peut donner de précieuses indications sur la fertilisation requise par la culture pour les compenser. On considère que la principale exportation de la culture est induite par les fruits (les exportations dues à la chute des feuilles en saison sèche et aux bois de taille ne sont pas prises en compte). Plusieurs auteurs ont réalisé des analyses de la teneur en éléments NPK des fruits (tableau 7).

Auteur	N (%)	P (%)	K (%)
Saturnino et al. (2005)	2.15	0.05	0.73
Reinhardt (2008) Scénarios 1 et 2	2.09	0.83	2.33
Reinhardt (2008) Scénario 3	2.19	0.88	2.09

1 : scénario reflétant les conditions actuelles de culture du Jatropha

2 : scénario avec optimisation de l'itinéraire technique

3 : scénario avec optimisation de l'itinéraire technique et amélioration variétale

Tableau 7 : Teneur en éléments nutritifs de fruits secs de Jatropha selon différents scénarios de production (fruits à 7% d'humidité) (Reinhardt, 2008)

Reinhardt (2008) a ensuite évalué les exportations de la culture en extrapolant ces valeurs selon différents scénarios de rendements :

- un scénario reflétant les conditions actuelles de culture du Jatropha ;
- un scénario « optimisé », reflétant les rendements qui seraient obtenus avec une amélioration des pratiques agronomiques ;
- un scénario « idéal » : extrapolant les rendements qui pourraient être obtenus avec à la fois des pratiques agronomiques optimales, et une amélioration variétale (pour ce dernier scénario, la teneur des fruits en éléments NPK est également extrapolée, car on considère que l'amélioration variétale aura permis d'augmenter le pourcentage d'huile dans la graine).

Cette étude donne une évaluation intéressante des besoins de la culture, comme le montre le tableau 8.

Scénario	N (kg/ ha/ an)	P ₂ O ₅ (kg/ ha/ an)	K ₂ O (kg/ ha/an)	Rendement moyen fruits secs à 7% d'humidité (kg/ ha/ an)	Rendement moyen graines sèches à 5.8% d'humidité (kg/ ha/ an)
1	48	19	53	2 270	1 418
2	81	31	89	3 811	2 382
3	141	89	139	6 572	4 436

Tableau 8 : Besoins en fertilisation selon les exportations théoriques calculées pour chaque scénario (Reinhardt, 2008)

II.3.2.2. Essais de fertilisation minérale

Le tableau 9 résume les recommandations trouvées dans la bibliographie. Une étude menée en Inde sur la fertilisation minérale (Patolia *et al.*, 2007) montre qu'elle contribue efficacement à l'augmentation du rendement. Quatre niveaux d'azote et de phosphore ont été testés sur des parcelles de Jatropha (densité de plantation 2 * 2 m) dans la région semi-aride de Gujarat (précipitation annuelle : 540 mm).

	N	P	K	Remarque
Arup Gosh <i>et al.</i> , 2007 (Inde)	45	30	20	Fertilisation : urée, P ₂ O ₅ et SPP Expérience de comparaison du rendement avec les densités de plantations
Fact Foundation	60	60	60	
Patolia <i>et al.</i> , 2007 (Inde)	45	20	0	Essais de comparaison de fertilisation - la potasse n'a pas été testée
Joshi, 2005 (Inde)	46	48	24	Fertilisation préconisée à partir de la seconde année de plantation

Tableau 9 : Récapitulatif des apports en fertilisation minérale préconisés dans la bibliographie (kg/ha)

La fertilisation optimale obtenue est la suivante :

- 30 kg /ha N et 10 kg/ha P₂O₅ la première année ;
- 45 kg/ha N et 20 kg/ha P₂O₅ les années suivantes.

Cet apport a donné les résultats significatifs suivants pour la deuxième année : hauteur de la plante 1,97 m, +32 % ; LAI⁷ 1,1 m²/m², + 30 % ; rendement en graines 0,44 t/ha, + 72 % ; rendement en huile 141,7 kg/ha, + 76 %. Ces résultats ont été mesurés sur 10 plantes par parcelle et la réponse à la potasse n'a pas été étudiée.

D'autres essais menés sur la station expérimentale de l'ICRISAT à Patancheru en Inde (Suhas P Wani *et al.*, 2006) ont révélé qu'un apport de 100 g d'urée et de 38 g de superphosphate par plant à la plantation a significativement amélioré les paramètres de la croissance, 21 mois après la plantation (la densité n'étant pas précisée) :

- nombre de branches par plant : 3,8 branches pour les témoins et 8,7 pour les plants ayant reçu l'engrais ;
- hauteur du plant : + 60 cm en moyenne pour les plants fertilisés.

Enfin, les recommandations de Fact Foundation (2006) sont les suivantes pour l'Inde :

- à l'implantation, mélanger le sol en surface avec 0,5 kg de superphosphate ;
- tous les ans à partir de la 2^e année : une application de 250 g NPK (15-15-15), par plante au début de la saison humide.

II.3.2.3. Essais de fertilisation organique avec du tourteau de Jatropha

Le tourteau de Jatropha, dont la teneur en azote est élevée, peut être épandu comme engrais organique (tableau 10). Cuhna Da Silveira (1934) mentionne qu'au Cap Vert il était utilisé sur le blé (mêlé avec du superphosphate) et sur le maïs (mêlé avec du sulfate de potasse). Au Zimbabwe, il est commercialisé comme fertilisant pour sa haute teneur en NPK.

Eléments	Fumier de volaille (Aprima, 1992)	Fumier de bovin (Aprima, 1992)	Tourteau Jatropha (ICRISAT, 2006, Inde)	Tourteau Jatropha (Arup Gosh <i>et al.</i> , 2007)
N (%)	2 - 5	2	4.91	3 - 4.5
P ₂ O (%)	2.5 - 3	1.5	0.9	0.65 - 1.2
K ₂ O (%)	1.3 - 1.59	2	1.75	0.8 - 1.4
CaO (%)	4	4	0.31	
MgO (%)	1	1	0.68	
S (%)			0.24	0.2 - 0.35
Fe (mg/kg)			772	800 - 1000
Mn (mg/kg)			85	300 - 500
Zn (mg/kg)			55	30 - 50
Cu (mg/kg)			22	18 - 25

Tableau 10 : Composition de tourteaux de Jatropha analysés par différents auteurs et comparaison avec d'autres fertilisants organiques

⁷ Leaf Area Index

La dose préconisée ne doit pas être supérieure à 5 t/ha en raison du risque de phytotoxicité du produit (voir paragraphe V.3.2). Des expériences de terrain ont montré qu'il avait également un effet répulsif vis-à-vis des rongeurs.

Dans la région humide d'Orissa en Inde, sur sol sableux à pH 7,2, Arup Ghosh *et al.* (2007) ont testé 4 niveaux d'apport de tourteau sur une culture de *Jatropha* : témoin sans apport, 0,75 t/ha, 1,5 t/ha, 2,25 t/ha, 3 t/ha. Les essais ont été menés sur 2 densités de plantation : 4 * 3 m et plants âgés de 2,5 ans, 3 * 2 m et plants âgés de 2 ans. Les plants avaient reçu un apport minéral avant l'essai de 45 N – 30 P - 20 K. La composition du tourteau était la suivante : 3,2 % N, 1,2 % P₂O₅ et 1,4 % K₂O (% MS). L'application de tourteau a eu un effet élevé sur le rendement. Les plantes ayant reçu 3 t/ha/an ont donné un rendement individuel de 1,52 kg de graines pour la densité de 4 * 3 m soit 120 % de plus que la parcelle témoin.

II.3.3. Taille

Il existe deux formes de taille : la taille de formation, destinée à donner une forme à l'arbre afin de faciliter les opérations culturales notamment la récolte, et la taille de fructification, pour augmenter et régulariser la floraison, donc le rendement.

Lors du projet Biomasa au Nicaragua (Sucher et Holzer, 1999), les auteurs ne disposaient d'aucune information sur la taille. Elle a été réalisée lorsque les arbres sont devenus trop grands pour récolter dans de bonnes conditions. La taille a été pratiquée sur les plants adultes ayant atteint 3 m (approximativement après 3 ans, en fonction des conditions culturales). Les auteurs préconisaient alors la taille des parties hautes de l'arbre pour limiter sa hauteur entre 2 et 2,5 m. Ils recommandaient également de couper les branches latérales entrecroisées entre les rangs de manière à permettre l'entrée de lumière et la circulation de l'air entre les plantes. Une observation intéressante a été rapportée lors de cette expérience : la flexibilité des jeunes rameaux, une des caractéristiques du *Jatropha*, facilite la récolte manuelle des parties hautes de la plante mais se perd avec le temps. Il est donc important de couper les branches avant qu'elles ne grossissent trop, d'autant que lorsque la branche se casse, elle produit un écoulement de latex irritant pour le ramasseur.

Ramification de l'arbre et potentiel de rendement

Beaucoup d'auteurs supposent qu'une ramification précoce de la plante aurait un effet déterminant sur le rendement car les inflorescences se développent seulement au bout des branches, donc plus la plante a de branches et plus elle produirait de fruits.

Afin d'évaluer le potentiel de plusieurs écotypes indiens, Patolia (2007) a observé les caractéristiques morphologiques de plants issus de graines de différentes provenances. Il note une corrélation positive entre le rendement en graines et le nombre de branches tertiaires par plant et, dans une moindre mesure, une corrélation positive entre rendement et nombre de branches secondaires par plant. La ramification est donc bien corrélée avec le rendement.

Les essais confirment qu'il y a une forte interaction entre la variété et l'environnement, car les écotypes observés par Patolia, bien que n'ayant subi aucune opération de taille, montrent des nombres de branches secondaires et tertiaires significativement différents.

Protocoles de taille

Les protocoles de tailles proposés pour augmenter le nombre de branches diffèrent selon les auteurs. Quelques-uns sont décrits ci-dessous.

A – Henning (2007) : Pour obtenir une ramification précoce telle qu'il l'a observée chez un producteur brésilien dont la plantation présente un rendement intéressant (photo 8), Reinhard Henning conseille de tailler les nouvelles pousses durant les 3 premières années. Lorsqu'elles atteignent une longueur de 60 cm, il préconise de couper 50 cm et de laisser 10 cm de manière à ce que de nouvelles branches puissent se développer. L'avantage de cette taille est de permettre de garder un port assez bas qui facilite la récolte des fruits, facteur important à prendre en compte dans la faisabilité d'une plantation de *Jatropha curcas* L. (voir paragraphe récolte).



Photo 8 : Exemple d'un arbre de la plantation de M. Torres au Brésil présentant une très bonne ramification, juste au-dessus du sol (Henning, 2007)

B – Gour (2006) propose le protocole suivant : Dès l'âge de 6 mois, pratiquer un pincement des terminaux à environ 30 cm de l'apex, afin d'induire des rameaux latéraux. A la fin de la première année, les branches secondaires et tertiaires doivent être à leur tour pincées, ou taillées, de manière à obtenir un minimum de 25 branches. En deuxième année, chaque branche doit être coupée aux 2/3 (obtention de 35 – 40 branches en fin de deuxième année). Les années suivantes, la taille peut être poursuivie, en fonction de la croissance de la plante.

C – Dans le rapport de Fact Fuel « Handbook on Jatropha curcas First draft » (2006), Shri Vinayakaro Patil donne les recommandations suivantes pour l'Inde :

- Pratiquer une première coupe sur les arbustes de 1 an (avant que l'arbre n'ait commencé à former de nouvelles feuilles). Les arbustes sont alors coupés à la même hauteur entre 30 et 45 cm au-dessus de sol. Le but est de permettre la croissance des branches latérales jusqu'au début de la saison des pluies suivante.

- sur les arbres de 2 ans, les branches latérales sont coupées au 2/3 (1/3 reste sur l'arbre), afin de permettre la formation de nouveaux rameaux et obtenir un port « en ombrelle ».

D - Dans le rapport d'experts de la Commission européenne (Rijssenbeek *et al.*, 2007), il est mentionné qu'une branche taillée va former 3 à 5 nouvelles pousses, et que la coupe peut être répétée tous les 6 à 8 semaines pendant les 2 ou 3 premières années de plantation, afin d'obtenir une plante très touffue avec un grand nombre de branches, et sans doute un rendement élevé (des nuances à l'influence d'un trop grand nombre de branches sur le rendement sont apportées dans le paragraphe ci-dessous).

Quelques remarques sur les techniques de taille :

On a assez peu de recul sur l'âge des plantations ayant subi ces protocoles pour savoir s'ils sont vraiment adaptés et efficaces. On peut citer une expérience brésilienne (Ungaro *et al.*, 2007), qui compare une parcelle témoin sans taille à 2 types de taille :

- élagage des branches secondaires à 1 an ;
- élagage des branches apicales à 1 an.

Elle n'a montré aucune influence significative avantageuse de la taille sur la production, pour des arbres de 4 ans. Cependant, cet essai a été conduit sur de très petites parcelles comprenant chacune 3 lignes de 6 plants.

Quoiqu'il en soit, les protocoles de taille assez sévères préconisés par Henning ou Rijssenbeek *et al.* (2007) entraînent une productivité réduite pendant les 2 ou 3 premières années alors qu'un arbre non taillé entre en production dès la première année de plantation.

Pour conclure, d'après les connaissances que l'on a sur la taille des arbres fruitiers, on peut émettre des recommandations d'ordre général concernant la taille du Jatropha :

- pour obtenir un port en gobelet évasé, il faut au départ laisser la branche centrale, ce qui évite que les branches latérales ne remontent. Une fois que les branches latérales se sont stabilisées, on peut alors couper le tronc central ;
- il faut éviter de tailler l'arbre en hauteur, comme cela a été fait lors du projet Biomasa, car cela va entraîner une fructification vers le haut tout en dégarnissant le bas de plante ;
- une taille induisant trop de ramifications peut provoquer un dégarnissement de l'intérieur de l'arbre assez rapidement.

C'est probablement la raison pour laquelle Achten *et al.* (2007) préconisent, en plus du protocole indien décrit plus haut, de pratiquer un recépage tous les 10 ans, en coupant la plante à 45 cm de hauteur. Selon le développement végétatif de la plante, le recépage devra probablement être plus fréquent.

Par ailleurs, on sait que la taille de l'inflorescence, donc le nombre de fruits, est en partie proportionnelle à la taille de l'axe porteur. Si l'architecture est très touffue, les fruits risquent d'être petits, avec probablement une baisse du rendement et de la qualité des graines.

Période de taille :

La période recommandée pour la taille est la période où l'arbre a perdu ses feuilles, appelée période de repos végétatif par la plupart des auteurs, bien que le peu d'observations dont on dispose sur cette période laisse plutôt entendre qu'il s'agit d'une adaptation de l'arbre à la sécheresse plutôt qu'une période de dormance. Au Nicaragua, la meilleure période a été estimée entre le 15 février et le 15 mars.

Si l'on envisage une taille sévère, il faut la pratiquer suffisamment tôt pour que la plante ait le temps de se rééquilibrer et donner une récolte lors de la saison des pluies.

Il est recommandé d'utiliser un instrument bien aiguisé. La coupure doit être propre, réalisée en diagonale, sans fendre la branche pour ne pas favoriser l'entrée des insectes et maladies (cryptogamiques, bactériennes) ou provoquer de pourrissement.

II.3.4. Problèmes phytosanitaires

L'absence d'attaques importantes de maladies et de ravageurs relatée dans la bibliographie est à imputer aux petites surfaces observées. Cependant, la monoculture de Jatropha sur de grandes surfaces serait naturellement sujette à ces attaques. Le danger de voir se développer ravageurs et maladies jusqu'alors peu observés est donc présent.

De plus, le Jatropha appartient à la famille des Euphorbiacées, qui comprend de nombreuses espèces sauvages et cultivées comme l'hévéa et le manioc, ce dernier étant plus sensible que le Jatropha à certaines affections. Les maladies ou prédateurs peuvent facilement s'installer dans des espèces hôtes. Le risque d'infestation et de transmission entre ces plantes et une culture de Jatropha proche est réel. Il est donc important d'évaluer de façon critique l'installation de Jatropha par rapport à l'environnement naturel et à la proximité éventuelle de plantations de manioc.

II.3.4.1. Maladies fongiques

Les risques d'infection sont augmentés lors de la taille ou du bouturage à cause des plaies. Un certain nombre de champignons pathogènes du *Jatropha curcas* L. ont déjà été identifiés (*tableau 11*).

On suppose que le Jatropha peut transmettre le germe de la maladie de la croissance démesurée du manioc et qu'il est un hôte possible pour le virus mosaïque du manioc, jusqu'alors uniquement observé sur le *Jatropha multifida* L. (Heller, 1996).

Concernant les maladies affectant la plantule, on peut citer *Colletotrichum gloesporioides* et *Fusarium* sp observés au Brésil (Ungaro et al., 2007).

II.3.4.2 Faune arthropode associée à la culture

Le tableau 12 regroupe l'ensemble des observations faites en différents sites.

Contrairement à la croyance selon laquelle la toxicité et les propriétés insecticides de la plante lui épargnent la présence de ravageurs, beaucoup d'insectes n'y sont pas sensibles, et l'on trouve notamment des insectes de l'ordre des Hétéroptères sur les arbres de *Jatropha* dans la plupart des aires de distribution (Grimm et Maes, 1997).

Les auteurs ont tendance à diviser la faune d'arthropodes entre les nuisibles et les espèces « utiles » : prédateurs des nuisibles et pollinisateurs. En fait, les interactions sont complexes : la majorité des insectes a un effet neutre qui n'interfère pas avec le rendement de la culture. D'autres peuvent connaître des changements de comportement au cours de leur cycle, et tour à tour se retrouver prédateurs, pollinisateurs et ravageurs.

Durant le projet Biomasa (Nicaragua), qui a duré 10 ans, de nombreuses observations intéressantes ont été recueillies sur les ravageurs qui ont été observés tout au long de leur cycle. On peut s'appuyer sur les observations qui en sont tirées concernant les infestations.

A - Les ravageurs

D'après Grimm et Maes (1997), le groupe de ravageurs potentiels le plus fréquemment observé au cours du projet Biomasa sont les punaises. Ces Hétéroptères sont présents à chaque stade de la culture, quelle que soit la taille des arbres. L'espèce la plus importante relevée est *Pachychoris klugii*, qui peut être considéré comme le principal ravageur du *Jatropha curcas* L. au Nicaragua. L'insecte rouge et noir réalise l'ensemble de son cycle sur le *Jatropha* et n'a pas été retrouvé sur d'autres plantes voisines. Ses œufs sont disposés par groupes d'environ 60 à 70 sur la face inférieure des feuilles. Ils sont enveloppés de sécrétions maternelles les protégeant des prédateurs. Au stade larvaire, les nymphes s'alimentent principalement des fruits, sans quitter l'arbre. La dispersion a lieu après la mue finale (5^e stade du cycle), lorsque les insectes sont adultes. Cette espèce, dont la distribution en Amérique du Sud s'étend du Mexique au Nicaragua, peut être trouvée sur le *Jatropha* à n'importe quel moment quand les fruits sont présents. A la saison sèche, les adultes peuvent quitter l'arbre et se dissimuler. Mais si les conditions sont favorables, tous les stades du cycle peuvent être observés sur la plante à tout moment de l'année. La ponte a lieu à la première saison des pluies. Plusieurs générations se développent ainsi durant l'année. Lors du projet Biomasa, une densité maximale de 145 000 individus/ha a été enregistrée, entraînant de fortes baisses de rendement, avec notamment des dégâts sur les fruits et les graines (avortement, graines vides ou malformées).

Le second ravageur le plus observé au Nicaragua est l'Hétéroptère *Leptoglossus zonatus*, qui peut également attaquer le sorgho, le maïs, les tomates et le soja. Cette espèce peut réaliser tout son cycle sur le *Jatropha curcas* L., mais la plus grande fréquence des adultes, par rapport aux nymphes et aux œufs, indique un mouvement vers d'autres cultures ou d'autres plantes sauvages. Les œufs sont dispersés en chaînes de 50 et plus, la plupart du temps sur les branches mais ils peuvent également se trouver sur les feuilles et les pédoncules. Les larves sont agrégées durant les deux premiers stades, et se dispersent ensuite. Les dégâts causés sont similaires à ceux du *P. klugii* avec un nombre plus élevé d'avortement des fruits.

D'autres espèces de punaises ont été relevées sur les fruits mais uniquement au stade adulte. Les plus fréquents sont : *Acrosternum marginatum*, *Nezara viridula*, *Chelisomidea variabilis* et *Hyalymenus tarsatus*. Les Hétéroptères *Hypselonotus intermedius* et *H. lineatus detersus* se nourrissent des fleurs. Ils ont à la fois la fonction de pollinisateurs et de ravageurs, car ils réduisent le nombre de fruits arrivant à maturation.

Tableau 11 : maladies fongiques identifiées par les différents auteurs sur la culture de *Jatropha curcas* L.

Nom	Lieu d'observation	Auteur	Dégâts	Remarque	Méthode de lutte
<i>Fusarium moniliforme</i>	Inde Brésil	Sharma et Kaushik, 2000	Root rot : maladie de pourriture des racines	Cette maladie a causé 20-25 % de mortalité. Les symptômes sont apparus 45-50 jours après la plantation, se caractérisant par un jaunissement des feuilles, puis une défoliation et un dessèchement de la plante de haut en bas. Lors de l'arrachage des plantes infectées, on a observé un brunissement des racines.	
<i>Macrophomina phaseolina</i>	Inde	Naveen Sharma, 2007		Ces 2 pathogènes provoquent une maladie de la pourriture du collet (Collar rot). Ils peuvent poser problème en début de culture, notamment sur les parcelles où l'on a pratiqué de la monoculture sous irrigation, ou dans les sols saturés en humidité.	0.2% de COC (Oxy chlorure de cuivre) bouille bordelaise
<i>Rhizoctonia bataticola</i>	Inde	Naveen Sharma, 2007			
<i>Oidium hevea</i>	Amérique du Sud	Viegas (1961) Ungaro <i>et al.</i> (2007)	Feuilles (des deux côtés), en particulier les jeunes feuilles	Hôte collatéral du <i>Jatropha</i> et de l'hévéa. Attaque les parties vertes de la plante et peut causer la défoliation. Période d'incubation de 5-7 jours. Les spores des plantes infectées sont transférées aux jeunes pousses d'hévéa après 4 ou 5 jours. Au Brésil, il a été observé dans les mois les plus humides, mais ne semble avoir des conséquences très néfastes sur la culture (Ungaro <i>et al.</i> , 2007)	
<i>Phytophthora jatrophae</i> Champignon Phycomycete en forme d'algues	Java, 1930	Droit, 1932		Selon Maublan et Barat, ce champignon serait le même que celui du vanillier	
Mucoraceae		Juillet <i>et al.</i> , 1955	Graines	Tégument interne de la graine attaqué par le mycélium en forme de filet	
<i>Sphaceloma manihoticola</i>		Heller, 1996	Germe de la maladie de la croissance démesurée	Transmission supposée Grand spectre de plantes hôtes Destruction totale et complète impossible	
<i>Sclerotinia ricini</i> Godfrey/ <i>Botrytis</i> <i>Cinerea</i>	USA	Godfrey, 1918	Fleurs	Maladie qui touche le ricin. L'auteur n'a pas la certitude qu'il s'attaque vraiment au <i>Jatropha curcas</i> .	Méthode préventive : mixture de bordeaux en poudre, ou dérivés soufrés
Agaricinés (<i>basidiomycete</i>)	Cap Vert	Freitas, 1906	Bois	Forme de console blanche Produit des filaments de mycélium entre le bois et l'écorce et cause la mort de l'arbre Un des dangers essentiels de la culture au Cap Vert Apparaît dans les zones humides au bord des cours d'eau	
<i>Panus arsenarius</i> Mont (<i>Agaricacés</i>)	Cap Vert	Calvino, 1925	Racines de surface	Chapeau en forme de tuile, charnu, épais, couleur jaune, pâle, fendu au rebord	
<i>Hydnum delicatulum</i>	Cap Vert	Calvino, 1925	Habitat : troncs morts	Forme circulaire, bordure presque renversée, recouverts de poils feutrés, couleur jaune ocre	
<i>Armillaria mellea</i>	Cap Vert	Freitas, 1906	S'enracine dans les parties mortes des blessures et s'étale en tuant les tissus sains.	- contamine les arbres sains à partir de souches mortes à l'aide de ces rhizomes - action favorisée par de longues périodes de sécheresse où les sujets sont déjà affaiblis.	
<i>Uredo jatrohicola</i> Arth	Cuba	Calvino, 1925	Provoque la rouille	Les dommages causés par les champignons provoquant la rouille ne sont pas mortels car le développement du mycélium se limite à la zone infectée	
<i>Phyllosticta calvinoi</i> Ciferri	Cuba	Calvino, 1925	Feuilles	Tâches sèches, rondes, de 2 à 3 mm sans limites distinctes	

<i>Helminthosporium tetramera</i> MCK (Deutéromycètes)	Inde	Singh, 1974	Feuilles	Tâches rondes irrégulières, couleur rouille, périphérie foncée. Diamètre 1 à 3 mm Mycélium gris brun	
<i>Pestalotiopsis paraguayensis</i>		Singh, 1983	Feuilles		
<i>Pestalotiopsis versicolor</i>	Inde	Phillips, 1973	Feuilles	Tâches de 1 cm de diamètre Centre de couleur gris blanc, dans lesquels de petits points sont visibles. Pathogène démontré : parasite des plaies	
<i>Cercospora jatrophae</i>					
<i>Clitocybe tabescens</i>		Usda, 1960			
<i>Colletotrichum gloesporioides</i>	Brésil	Usda, 1960, Ungaro, 2007		Observé sur la plantule au Brésil	
<i>Elsinoe jatrophae</i>		Viegas, 1961, Amérique du sud			
<i>Fusarium spp</i>		Heller, 1996			
<i>Glomerella cingulata</i>		Viegas, 1961			
<i>Phakopsora jatrohicola</i>		Viegas, 1961			
<i>Psathyrella subcorticalis</i>		Viegas, 1961			
<i>Pythium spp</i>		Heller, 1996			
<i>Schizophyllum alneum</i>		Viegas, 1961			
<i>Uredo jatrohicola</i>		Viegas, 1961			

Une évaluation des pertes de rendement (utilisant la méthode de table de culture) causée par l'ensemble de ces ravageurs a abouti à une réduction de 18,5 % de poids en graines, dans le cas d'une densité faible de populations de ravageurs (3500 individus/ha). Compte tenu des densités de populations beaucoup plus élevées mesurées au champ, leur potentiel de destruction est en réalité beaucoup plus important.

Le scarabée *Lagocheirus undatus*, qui touche également le manioc, est un autre ravageur représentant une menace potentielle importante. Les femelles, nocturnes, sont attirées par le bois mort et les plantes endommagées dont elles dévorent l'écorce et où elles pondent des œufs. Les larves blanches creusent des galeries parallèles à l'axe du bois, provoquant progressivement le pourrissement du tronc et des branches, puis la mort de l'arbre. Au Nicaragua, les adultes ont été relevés dans les plantations, de mai à septembre. Les blessures mécaniques sur les arbres, provoquées par exemple lors d'un sarclage, augmentent le risque d'infestation par cette espèce. Il est recommandé d'éliminer tout foyer possible d'infestation (le bois mort, les arbres attaqués) pour éviter la contamination des arbres sains.

Quelques insectes attaquent les feuilles du *Jatropha curcas*. Les sauterelles *Schistocera nitens* et *Idiarthron* sp dévorent les feuilles et les fruits non mûrs, mais les dégâts causés sont mineurs par rapport à ceux des hétéroptères. *Pantomorus femoratus* est également fréquemment observé sur les feuilles, mais on a relevé des dégâts importants uniquement sur des plantations à grande échelle.

B - Les prédateurs

Il est important d'identifier la faune de prédateurs dans la mesure où elle contrebalance celle des ravageurs. Le groupe le plus important est celui des araignées, qui se divise entre les araignées à toile et les araignées de chasse. L'espèce la plus fréquente dans le premier groupe est *Leucauge* sp (Araneida : Tetragnathidae), qui a été observée pour prendre dans sa toile *C. variabilis*. Les araignées de chasse trouvées sur le *Jatropha* sont de la famille des Salticidae, Thomisidae, Oxyopidae et Heteropodidae. *Peucetia viridans* (Araneida : Oxyopidae) a en particulier été identifiée comme prédateur de *Nezara viridula*, de même qu'une espèce non identifiée de la famille des *Thomisidae* se nourrit des larves de *L. zonatus*.

C - Les insectes pollinisateurs

Conomyrma sp. a été observé comme pollinisateur. D'autres fourmis ont au contraire été enregistrées comme ravageur très important sur les plantules au Brésil (Saturnino, 2005).

II.3.4.3. Lutte phytosanitaire

A - Lutte biologique

Grimm *et al.* (1997) ont testé le potentiel d'efficacité des champignons entomopathogènes *Beauveria bassiana* et *Metarhizium anisopliae* pour lutter contre les hétéroptères *Leptoglossus zonatus* et *Pachychoris klugii*. L'élimination des insectes avec les champignons prend plus de temps qu'avec un traitement chimique : 20 à 24 jours pour *P. klugii* et 13 à 16 jours pour *L. zonatus*, mais l'activité des insectes est réduite dès le début d'infection. Les expériences de laboratoire ont démontré une mortalité de 99 % chez *L. zonatus* et 64 % chez *P. klugii*. Les essais en plein champ réalisés au Nicaragua ont confirmé l'efficacité de cette méthode qui, d'après les auteurs, serait facilement applicable en milieu paysan. A noter que l'on utilise également *Beauveria bassiana* et *Metarhizium anisopliae* pour le contrôle des termites.

Remarque : l'huile et les feuilles de *Jatropha* sont connues pour leurs propriétés insecticides. Minengu (2007) donne les préconisations suivantes pour lutter contre la cochenille et d'autres insectes responsables d'attaques : employer des l'extrait de feuilles de *Jatropha* écrasées, mélangées à de l'huile de *Jatropha* dans les proportions suivantes : 10 kg de feuilles broyées dissoutes dans 2 à 3 l d'eau ajouté à 10 cl d'huile de *Jatropha*. Cependant, l'auteur ne fait aucune mention des résultats obtenus avec cette technique, ni des espèces exactes qui sont traitées. Cette technique de lutte biologique mériterait d'être expérimentée.

B - Lutte chimique

La lutte chimique préconisée par les différents auteurs contre les insectes ravageurs est la pulvérisation d'insecticide à base d'endosulfan (pour l'Union européenne : cette substance active est interdite en application de la décision communautaire 2005/864/CE du 2 décembre 2005). Les doses ne sont encore pas définies avec précision et nécessitent des recherches plus approfondies, prenant notamment en compte la possibilité d'apparition de résistances en cas d'application répétée du produit.

II.3.5. Cultures intercalaires

Les expériences de cultures intercalaires de *Jatropha* ne sont pas nombreuses, mais ne semblent pas présenter de contre indication particulière, si ce n'est d'éviter une association avec une autre euphorbiacée, comme le Manioc ou l'Hévéa (le *Jatropha* pourrait être une plante hôte pour les mêmes bioagresseurs).

Pour la mise en place d'une culture intercalaire, il est préférable que les plants de *Jatropha* soient issus de graines et non de boutures, car celles-ci développeraient des racines latérales de surface entrant en concurrence avec celles de la culture associée.

Saturnino *et al.* (2005), recommandent d'implanter des cultures annuelles entre les rangs pendant les deux premières années de plantation, afin d'amortir la mise en place de la culture de *Jatropha* en permettant la rémunération du producteur avant l'entrée en production.

Comme exemples de cultures associées, Drummond *et al.* (1984) citent la plantation de haricots, d'arachide ou de sorgho. Saturnino *et al.* (2005) ont testé avec succès deux cultures intercalaires de maïs (destiné à l'alimentation des vaches) et de concombre (destiné à l'industrie), mais ne précisent pas les densités de plantation. Bhojvaid (2006) recommande l'interculture avec des cultures fourragères. Des essais d'interculture avec du piment au Belize ont montré une réduction de la présence d'insectes ravageurs sur le piment, qui est par ailleurs bien adapté à l'ombrage du *Jatropha* (Baumgart, 2007).

Au Honduras, un rapport d'activité sur les plantations de *Jatropha* élaboré pour la FHIA (Fundacion Hondurena de Investigacion Agricola, Alfonso, 2007) relate plusieurs associations observées chez les paysans :

- avec de la patate douce. La densité de plantation est de 2 * 3 m (3 m : distance entre les rangs) ;
- avec du maïs (voir photo 9). La densité de plantation est 2 * 3 m également, avec une irrigation par aspersion appliquée sur le maïs pendant la saison sèche. Malgré le succès de cette association, les auteurs rapportent que l'utilisation d'un herbicide (2.4 D) sur le maïs a causé des dommages au Pourghère



Photo 9 : Maïs en association au Honduras

Là encore, les auteurs se limitent à la mise en place d'une culture intercalaire pendant les 2 premières années de plantation, afin de rentabiliser la surface occupée et de limiter la concurrence avec les adventices. A partir de la 3^e année, avec une distance de 3 m entre les rangs, le *Jatropha* occupe trop d'espace pour permettre une culture associée. Si l'on souhaite mettre en place une culture intercalaire permanente, la distance entre les rangs devra être supérieure

Tableau 12 : faune arthropode associée à la culture de *Jatropha curcas* L.
(En gras, ceux reconnus pour causer de réels dégâts sur les fruits ou les fleurs)

Ordre/ Genre	Espèce	Lieu	Auteur	Photo	Dégâts	Nom commun/ Remarques	Lutte biologique Prédateur connu
Hétéroptère Scutelleridae	<i>Calidea Stigmata</i>	Cap Vert Nord Sao Tomé	Münch et al., 1986 Ferraio, 1984	Non disponible	Fruits	Peut représenter un facteur de dégâts importants Insecte fréquent en Afrique occidentale	
Hétéroptère Scutelleridae	<i>Calidea Dregei</i>	Nicaragua	Heller, 1996	Non disponible	Fruits		
Hétéroptère Scutelleridae	<i>Pachycoris klugii</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Fruits et fleurs Avortement des fruits Malformation des graines	Insecte rouge et noir Espèce la plus observée lors du projet Nicaragua. Densité de 1 234 à 3 455 insectes/ha. Principal ravageur de la culture Vit tout son cycle sur le Jatropha.	champignons entomopathogènes <i>Beauveria bassiana</i> et <i>Metarhizium anisopliae</i> (Grimm et al., 1997) <i>Pseudotelenomus pachycoris</i> (Hyménoptère : Scelionidae) : prédateur des oeufs (Gabriel et al., 1988).
Hétéroptère Scutelleridae	<i>Pachycoris torridus</i>	Brésil et Nicaragua	Foidl et al., 1996 Grimm et al, 1997		Fruits et fleurs	Insecte qui présente une grande variabilité de couleurs et de taches, la forme la plus fréquente est rouge et noire, et vert métallique sur la partie ventrale. Attaque également le manioc, l'eucalyptus, le riz (Ungaro et al., 2007)	
Hétéroptère Scutelleridae	<i>Chelisomidea variabilis</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997	Non disponible	Fruits et fleurs		<i>Leucauge</i> sp (Araneida : Tetragnathidae) : prend les adultes dans sa toile
Hétéroptère pentatomidae	<i>Nezara Viridula</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Dégâts sur fruits	Punaise verte	<i>Peuceitia viridans</i> (Araneida : Oxyopidae)

Hétéroptère Scutelleridae	<i>Scutellera nobilis</i>	Inde	Shanker, 2006		Chute des fleurs Avortement du fruit Malformation des graines	Observé en moyenne de 5 individus par inflorescence avec un maximum de 15 par inflorescence	
Hétéroptère pentatomidae	<i>Acrosternum marginatum</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Fruits	Palisot de Beauvois	
Hétéroptère pentatomidae	<i>Euschistus sp</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Fleurs		
Hétéroptère pentatomidae	<i>Proxys punctulatus</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Fleurs		
Hétéroptère coreidae	<i>Leptoglossus zonatus</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Fruits et fleurs	Seconde espèce la plus observée lors du projet Nicaragua. Attaque d'autres cultures : maïs, sorgho, tomates, soja Le <i>Jatropha</i> peut être un hôte pour tout le cycle de cet insecte, et peut l'héberger tout au long de l'année tant que les fruits sont présents sur l'arbre (Grimm et al. 1999)	espèce non identifiée de la famille des Thomisidae (Araneida) : se nourrit de ses larves champignons entomopathogènes <i>Beauveria bassiana</i> , et <i>Metarhizium anisopliae</i> (Grimm et al, 1997)

Hétéroptère coreidae	<i>Leptoglossus gonagra</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Fruits		
Hétéroptère coreidae	<i>Hypselonotus Intermedius</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997	Non disponible	Fleurs		
Hétéroptère coreidae	<i>Hypselonotus lineatus detersus</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997	Non disponible	Fleurs		
Hétéroptère coreidae	<i>Anasa scorbutica</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997				
Hétéroptère Alydidae	<i>Hyalymenus tarsatus</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Fruits		
Hétéroptère Alydidae	<i>Stenocoris tipuloides</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997	Non disponible	Fleurs		
Hétéroptère Rhopalidae	<i>Niesthrea sidae</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Fruits secs		
Hétéroptère Largidae	<i>Largus cinctus</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Fleurs et bourgeons		
Hétéroptère	<i>Lygus</i> (Heteroptera Miriade)	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997	Non disponible	Dégâts sur feuilles		
Homoptère Cicadellidae	<i>Macunolla ventralis</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997	Non disponible			
Homoptère	<i>Enpoasca</i>	Nicaragua	Grimm et Maes,	Non disponible			

Cicadellidae	<i>kraemeri</i>		1997				
Homoptère <i>Pseudococcidae</i>	<i>Ferrisia virgata</i>	Cap Vert	Münch et al., 1986	Non disponible	Troncs et branches		
Homoptère <i>Diaspididae</i>	<i>Pinnaspis strachani</i>	Cap Vert	Münch et al., 1986 Freitas, 1906	Non disponible	Troncs et branches		
Coléoptère <i>bostrichidae</i>	<i>Bostrichus</i> sp	Cap Vert	Münch et al., 1986 Freitas, 1906	Non disponible	Attaque le bois de la plante et le perce	Un des principaux ennemis du Pourghère au Cap Vert (Freitas, 1906)	
Coléoptère <i>curculionidae</i>	<i>Sternocolapsis quatuordecim costata</i>	Brésil	Peixoto et al, 1973	Non disponible	Feuilles.		
Coléoptère <i>curculionidae</i>	<i>Coleosternus notariaceps</i>	Brésil	Peixoto et al, 1973	Non disponible			
Coléoptère <i>curculionidae</i>	<i>Pantomorus femoratus</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997	Non disponible	Mange les feuilles	Fréquemment présent en saison des pluies Dégâts observés pour des plantations de grandes échelles	
Coléoptère <i>Cerambycidae</i> <i>op</i>	<i>Lagoceirus undatus</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997		Ses larves creusent le bois	Scarabée aux longues cornes Peut tuer l'arbre entier	
Lépidoptère noctuidae	<i>Spodoptera litura</i> (chenille)	Inde	Meshram et al, 1994		Feuilles	Seule chenille qui défolie le Jatropha	
Lepidoptère, Noctuidea	<i>Achaea janata</i>	Inde	Shanker, 2006				
Myriapodes <i>Diplopoda</i> <i>Julidae</i>	<i>Julus</i> spp Mille pattes	Sénégal/ Soudan	Anon rapporté par Grimm et Maes, 1997	Non disponible	graines	Mille pattes Perte totale des graines	
<i>Caelifera</i> <i>Acrididae</i>	<i>Oedaleus senegalensis</i>	Afrique	Grimm et Maes, 1997	Non disponible	feuilles		
<i>Caelifera</i>	<i>Schistocera</i>	Nicaragua	Grimm et Maes,	Non disponible	Feuilles	sauterelle	

Acrididae	<i>nitens</i>		1997		Fruits non matures		
Ensifera Tettigoniidae	<i>Idiarthron</i>	Nicaragua	Grimm et Maes, 1997	Non disponible	Feuilles Fruits non matures	sauterelle	
Thysanoptère	<i>Retithrips syriacus</i>	Brésil	Peixoto et al, 1973	Non disponible	feuilles		
Hétérocère Pyrilidae	<i>Pempelia morosalis</i>	Inde	Un auteur rapporté par Shanker, 2006)	 Haut : larve Bas : adulte	Inflorescences Capsules du fruit	Considéé comme l'un problèmes majeur de la culture en Inde	un diptère l'élimine à 85% (l'auteur donne la photo mais pas le nom (Shanker, 2006)) <i>Stegodyphus sp (Eresidae : Arachnida) : capture l'insecte dans sa toile</i>
	<i>Stomphastis thraustica</i>	Inde	Shanker, 2006				
Scarabaeoidea Cetoniidae	<i>Oxycetonia versicolor</i>	Inde	Shanker, 2006		fleurs		
Arachnide Tarsonemidae	<i>Polyphagotars onemus latus</i>	Amérique du Sud	Drummond et al., 1984			Tarsonème	Application de poudre de souffre peut facilement le contrôler. L'application doit être réalisée à l'aube, par journee sans vent.
	<i>Coccina</i>	Fogo	Münch, 1986	Non disponible	Tronc principal Des dégâts peuvent se manifester à travers les effets toxiques des salives sur le rendement des récoltes, par la transmission de virus ou la prolifération de champignons sur les excréments des animaux	Puceron Le Jatropha semble tolérant vis- à-vis de ces attaques Attention : risques de transmission lors du bouturage	
Orthoptère Proscopiidae	<i>Corynorhynch us radula</i>	Brésil	Saturnino et al., 2005	Non disponible	Fleurs et feuilles	A causé des dégâts importants sur la plantation. Ne se trouve qu'au Brésil.	
Acarina: Tetranychidae	<i>Tetranychus sp</i>	Brésil	Saturnino et al., 2005	Non disponible	Fruit		L'application du soufre en poudre permet de le contrôler

Orthoptère Proscopiidae	<i>Stiphra robusta</i>	Brésil	Saturnino et al, 2005		Fleurs	Criquet phasme :	
Hyménoptère Formicidae	<i>Atta sexdens rubropilosa</i>	Brésil Honduras	Saturnino et al , 2005 Alfonso, 2007	Non disponible	feuilles	Fourmi A été enregistré comme le ravageur le plus important de la plantation au Brésil. Gros dégâts sur les plantules (surtout en cas de semis direct). Dévore l'écorce de l'arbre. Egalement signalé comme ravageur au Honduras, sur les jeunes plants	Les auteurs recommandent d'éliminer les fourmilières, avant la plantation, et également de laisser une bande de culture de 80 à 100 m entre la plantation et la végétation indigène.
Thysanoptère Thripidae	<i>Selenothrips rubrocinctus</i>	Brésil	Saturnino et al , 2005	Non disponible		Trips Larves rouges et caractérisées par la présence d'une excrétion rouge à l'extrémité de l'abdomen. Forment des colonies bien visibles à l'œil nu. L'adulte est noir. Egalement ravageur du cacaoyer	
	<i>Podagrira</i> spp	Zimbabwe	Openshaw, 2000	Non disponible			
	<i>Coccina</i> Pseudococcidés	Fogo	Münch, 1986	Non disponible	Dégâts très importants sur les jeunes pousses et les feuilles	Observés à Fogo sur 2 plantes voisines du Pourghère Répandu dans les régions tropicales et subtropicale	

II.3.6. Récolte

La maturité est échelonnée. Elle l'est d'autant plus dans les zones où la saison des pluies est étendue. La couleur de la capsule du fruit passe du vert au jaune, puis vire au marron.

II.3.6.1. Détection de la maturité

En Inde, Kaushik *et al.* (2001) ont mené une étude de détection des indices de maturité du fruit en effectuant des observations sur le poids de la graine, sa taille, sa couleur et son taux de germination. La capsule du fruit reste verte jusqu'à 47 jours après pollinisation (JAP), puis vire au jaune à 57 JAP. Les graines à l'intérieur sont blanches jusqu'à 27 JAP, puis deviennent marrons (37 - 47 JAP) et enfin noires (57 JAP). C'est précisément à ce 57^e JAP (lorsque la capsule vire au jaune et les graines au noir) que les paramètres maximums de taille et de poids sont atteints, et que la graine présente un taux de germination maximal. La maturité physiologique de la graine semble donc atteinte quand la capsule du fruit se colore en jaune, c'est-à-dire 57 jours après pollinisation dans les conditions de cette expérience indienne. Chez d'autres espèces (soja, blé), on considère que la qualité maximale de la graine est atteinte avec la maturité physiologique. Il faudrait réaliser une étude plus poussée sur le *Jatropha* pour savoir si la teneur maximale en huile est atteinte à cette période.

Plusieurs auteurs s'accordent sur le fait qu'il faut effectuer la récolte lorsque le fruit se colore en jaune. Le nombre de jours pour arriver à maturation varie en fonction des conditions pédoclimatiques. Selon Reyadh (1997), la coloration jaune du fruit se produit environ 4 mois après la pollinisation en Egypte, alors que pour Ratre (2004), elle est atteinte 2 à 3 mois après pollinisation en Thaïlande.

Au Nicaragua (projet Biomasa), les fruits étaient également récoltés lorsqu'ils se coloraient en jaune, car, d'après les auteurs, à ce stade, les graines ne sont pas encore attaquées par des bactéries ou champignons, et sont plus faciles à décortiquer. Selon eux, une fois la maturité optimale dépassée, la capsule du fruit adhère aux graines ce qui rend le décortiquage plus difficile, et les graines commencent à être attaquées par des champignons. Deux ou trois passages par semaine étaient alors réalisés, afin d'éviter les pertes et ne pas laisser sur les arbres des fruits trop mûrs.

Au Honduras, pour récolter le fruit dans des conditions optimales, Mejia (2006) rapporte que l'intervalle entre 2 passages était de 4 jours au maximum pendant la saison des pluies, alors qu'il pouvait être de 6 jours au début de la saison sèche.

II.3.6.2. Récolte

La récolte est l'un des points clés de la faisabilité économique de la production d'huile de *Jatropha*, le prix des graines dépendant du temps de récolte (Rijssenbeek *et al.*, 2007). Le moment et la durée de la période de récolte varient beaucoup en fonction des conditions du site. Dans les régions semi-arides, la récolte s'étend sur 2 mois environ, avec une fréquence de passage quotidienne à hebdomadaire. Dans des conditions où la saison des pluies est longue, l'arbre donne des fruits toute l'année.

Cette maturité échelonnée représente un frein à beaucoup de formes de récoltes mécaniques. D'après Saturnino *et al.* (2005), le contrôle de la disponibilité en eau, à supposer qu'il soit possible, pourrait permettre d'obtenir une maturité plus regroupée et éventuellement d'envisager une récolte mécanique. Ce point est cependant discutable car il faudrait tellement limiter la disponibilité en eau pour regrouper la maturité que la production risquerait d'être trop faible. On pourrait également imaginer arriver à regrouper la maturité par amélioration génétique.

La récolte manuelle

Le ramassage s'effectue en cueillant les fruits soit directement sur l'arbre soit en provoquant leur chute avec un bâton lorsque l'arbre est trop haut pour pouvoir atteindre ses parties supérieures. Au Brésil, les ramasseurs étaient équipés d'une perche avec un sac de toile au bout pour récolter les fruits trop hauts (Saturnino *et al.*, 2005).

Les estimations de temps de travaux pour le ramassage varient considérablement (tableau 13). Ces estimations sont données pour des quantités de graines sèches ramassées à l'heure (ou à la journée). Cependant, lors de la récolte, ce sont les fruits qui sont ramassés, et non les graines. On peut donc se demander si dans les estimations de temps de récolte, il n'y a pas eu de confusion entre

Auteur	Récolte fruits (kg/h)	Récolte graines (kg/h)	Récolte graines (kg/jour)	Fiabilité	Remarque
Ullenberg, 2007 Madagascar		1.5		Pas de précision sur l'obtention de cette donnée	(rapport sur l'état actuel du secteur Jatropha à Madagascar pour la GTZ)
Henning (2008, communication personnelle)		2 (graines sèches)		Mesuré	Estimation personnelle de Henning sur plantation plein champ
Projet Biomasa, Nicaragua	30			Mesuré	Observation faite sur une plantation en plein (Projet Biomasa). Estimation pour les meilleurs récolteurs
Minengu, 2007			40	Pas de précision sur l'obtention de cette donnée	Conférence de Wageningen, réponse aux questions sur la productivité

Tableau 13 : Estimations des temps de travaux pour le ramassage, répertoriés dans la bibliographie

les terminologies fruits, graines humides ou graines sèches dans les quantités rapportées. Les données de temps de récolte sont hétérogènes. Elles dépendent de nombreux facteurs : hauteur, port de l'arbre, méthode de ramassage, densité de plantation et également productivité de l'arbre (la collecte est plus efficace pour les variétés à haut rendement). Il faut également apporter une nuance entre les données réellement mesurées sur le terrain et les données estimées, par exemple par des enquêtes auprès des paysans, dont la fiabilité est discutable.

En Tanzanie, Henning (1992) a mesuré des temps de récolte sur des haies et rapporte qu'une personne peut récolter 3 kg de graines fraîches par heure. Pour une plantation en plein champ, il estime le temps de récolte moyen à 2 kg de graines sèches par heure (Henning, 2008, communication personnelle).

L'expérience au Nicaragua fait état de 30 kg fruits jaunes par heure pour les « meilleurs récolteurs ». Cette estimation semble élevée. Les auteurs expliquent leur méthode pour optimiser le rendement de leurs récolteurs. La récolte était au départ effectuée à l'aide de paniers : les récolteurs marchaient le long des rangs, mais perdaient beaucoup de temps à aller et venir pour charger les paniers et à les déplacer autour de l'arbre. Les responsables du projet ont donc envisagé l'utilisation de « besaces » accrochées à la ceinture (comme pour le café), ou dans le dos du cueilleur (comme pour la récolte du raisin). Pour récolter les parties centrales de la plante, les cueilleurs plaçaient la besace dans leur dos à cause des branches latérales.

Les difficultés posées par la récolte manuelle

Les responsables du projet Biomasa ont rapporté que la maturité échelonnée, nécessitant des passages réguliers tout au long de la saison des pluies, a été véritable frein au bon déroulement de la récolte. Les paysans, peu habitués à ce rythme de ramassage, ont parfois laissés les fruits sur l'arbre, ou les ont récoltés trop tardivement pour qu'ils puissent être traités (les responsables du projet précisent toutefois que les paysans manquaient de qualification et de formation).

A l'aspect contraignant de la régularité des passages s'est ajoutée la difficulté du ramassage en lui-même, déjà abordé au paragraphe **II.3.3** : les branches vieillissantes perdent leur flexibilité et deviennent cassantes, provoquant en se rompant un écoulement de latex, urticant au contact direct de la peau. Cet écoulement de latex n'a pas seulement été observé lors de la section de rameaux mais également au niveau de la grappe, au point de ramassage (Saturnino *et al.*, 2005).

Ces particularités du Pourghère sont de véritables contraintes qui compliquent le ramassage. La taille de l'arbre est essentielle, car elle permet d'éviter ce phénomène de rameaux cassants et donner à

l'arbre une structure souple qui facilite le travail au cueilleur. De plus, il est nécessaire d'équiper les récolteurs de gants et de vêtements de protection pour éviter le contact irritant avec la sève.

Possibilité de récolte mécanique

Les auteurs brésiliens (Saturnino *et al.*, 2005) évoquent une possibilité de récolte mécanique à l'aide d'un vibreur, telle qu'elle se pratique pour l'olivier ou le caféier. Cette option pourrait être envisagée si l'on arrive à regrouper la maturité. En pratique, ce type de récolte utilise une machine pour faire vibrer :

- soit le tronc de l'arbre : vibreur mécanique accouplé à la prise de force du tracteur,
- soit les branches (moins traumatisant) : cas du vibreur porté.

D'après ces auteurs, la vibration provoque la chute des fruits mûrs uniquement, récupérés dans une toile préalablement placée sous l'arbre. Cette technique est mentionnée, mais il n'est pas précisé si elle a véritablement été expérimentée sur le terrain. Plusieurs questions peuvent se poser quant à son applicabilité sur le *Jatropha*. Cette pratique n'est pas utilisable sur tous les arbres car elle peut provoquer un déracinement. Elle serait donc certainement à proscrire pour les plants issus de boutures, dont le système racinaire est superficiel. Elle mériterait peut être d'être testée sur les plants issus de graines mais, dans ce cas, sur des arbres adultes bien enracinés.

II.3.6.3. Opérations post-récolte

Dépulpage des fruits

Le dépulpage est l'opération de séparation des graines (seeds) du péricarpe (husk). Cette opération peut être réalisée manuellement ou mécaniquement.

Münch (1986) relate que la méthode traditionnelle au Cap Vert consistait à exposer les fruits au soleil très longtemps, afin de provoquer leur déhiscence, avant de les trier à la main. Une alternative consistait à mettre les fruits dans un sac et lui administrer des coups de bâton. La séparation se poursuivait alors par vannage, tamisage ou par simple tri. On ne dispose pas d'information sur le temps de travail relatif au dépulpage manuel.

Dépulpage mécanique

Il n'existe pas à l'heure actuelle d'appareil spécifique pour le dépulpage mécanique du *Jatropha*. Au Nicaragua (projet Biomasa), la séparation s'effectuait immédiatement après récolte sur les fruits jaunes, à l'aide d'une décortiqueuse mécanique, ou dépulpeur, semblable à celle utilisée pour le café (mais sans humidifier les fruits préalablement comme pour le café). Des appareils destinés au dépulpage d'autres graines oléagineuses sont en cours de test.

Décorticage des graines

Le décorticage est l'opération consistant à séparer l'enveloppe de la graine, riche en constituants membranaires (matières cellulosiques, lignine, tanins) et l'amande, qui contient la majeure partie des nutriments utiles (amidon, protéines, lipides).

Différents principes de décorticages ont été mis au point pour les graines oléagineuses : écrasement cisaillement sur cylindres cannelés, impact sur cage d'écureuil, fatigue mécanique par variation de pression d'air. Cependant, l'opération n'est pas aisée et les résultats sont aléatoires : le décorticage laisse subsister des fractions intermédiaires difficiles à séparer (graines partiellement ou non décortiquées, très fines particules d'enveloppes et d'amandes), qu'il est nécessaire de réaffecter dans les fractions terminales.

Le cas de décorticage de la graine de *Jatropha* n'a été abordé dans la bibliographie que pour l'extraction traditionnelle de l'huile (voir partie III-3), et les graines sont dans ce cas décortiquées à la main. Il n'est pas nécessaire de décortiquer les graines pour l'extraction de l'huile par pressage (voir partie III – 3). Le décorticage mécanique des graines n'est donc pas une technologie à développer.

II.3.7. Stockage et conservation des graines

Les semences d'euphorbiacées, à l'exception de l'hévéa, sont classées parmi les semences dites orthodoxes (Ellis *et al.*, 1985, Heller, 1996) : elles subissent une forte déshydratation au cours de leur maturation et survivent parfaitement dans cet état. Elles sont capables de supporter une dessiccation extrême et une conservation au froid sous des températures pouvant aller jusqu'à -196 °C (permettant de les conserver par cryoconservation, seule technique disponible à l'heure actuelle qui permette d'assurer la conservation de ressources génétiques à long terme). A l'inverse des semences récalcitrantes, la conservation des semences orthodoxes ne pose généralement pas de problème important. Leur longévité est accrue par la réduction de leur teneur en eau et la conservation à basse température (Hong *et al.*, 1996).

Conservation :

Remarque : les tests de conservations cités dans le paragraphe qui suit se sont uniquement intéressés à l'évolution de la capacité de germination des graines en fonction du stockage. Malheureusement, aucune expérience n'a été menée sur l'influence de la durée de stockage des graines sur la qualité de l'huile. Ce paramètre est pourtant le plus intéressant lorsqu'on se place dans un but de production d'huile, et non de production de semences. Concernant les autres graines oléagineuses, destinées à la production d'huile à destination carburant, Vaitilingom (2008, communication personnelle) rapporte que les graines doivent être ventilées régulièrement pour éviter l'acidification et les échauffements, et que les lots sont considérés comme stabilisés à une humidité inférieure à 9 %, qui est le taux d'humidité maximal des graines pour le bon fonctionnement de la plupart des presses artisanales disponibles sur le marché.

Malgré la bonne capacité de conservation de graines, leur pouvoir germinatif diminue avec le temps. Heller a réalisé des tests de conservation en stockant des graines âgées de 2 à 6 mois dans des sachets plastiques non fermés à température ambiante (environ 20°C) pendant 5 mois. Le taux de germination moyen relevé a été de 62 %. Après un stockage de 7 ans dans les mêmes conditions, les graines avaient encore un pouvoir germinatif de 47 %. Leur analyse a montré une teneur en eau de 6,2 % (moyenne de toutes les provenances).

Kobilke (1989), qui a comparé le pouvoir germinatif de graines âgées de 1 à 24 mois, a quant à lui observé un pouvoir germinatif inférieur à 50 % pour les graines de plus de 15 mois. Ce faible pouvoir germinatif est cependant expliqué par le fait que ces graines n'avaient pas été stockées, mais étaient restées au champ, elles ont donc été exposées à de fortes variations d'humidité et de températures, qui ont affecté leur viabilité.

Ratree *et al.* (2004) ont établi une corrélation significative entre le taux de germination et la durée du stockage (à température ambiante), comme le montrent leurs résultats consignés dans la figure 4.

En conclusion, le taux de germination des graines en fonction de la durée de stockage rapporté par les différents auteurs est variable. Il dépend des conditions de températures et d'humidité (la température ambiante de l'expérience en Thaïlande n'est pas mentionnée). D'une manière générale, les conditions de préparation et de stockage vont directement influencer la qualité des graines. Lorsque ces opérations sont réalisées dans de mauvaises conditions, les conséquences peuvent se ressentir à plusieurs niveaux :

- attaque des moisissures ;
- perte du pouvoir germinatif ;
- réduction de la teneur en huile ;
- diminution de la qualité de l'huile.

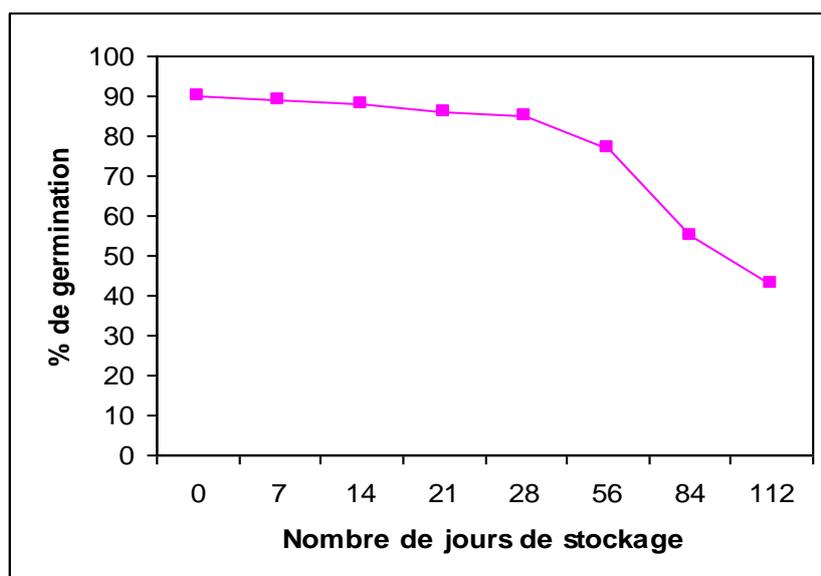


Figure 4 : Comparaison du taux de germination en fonction de la durée du stockage des graines, en Thaïlande (Ratree, 2004)

Séchage :

Les semences fraîchement récoltées peuvent présenter un taux d'humidité élevé, qui stimule la respiration, la croissance des embryons des graines et les champignons. Les graines doivent donc être séchées en utilisant des techniques qui n'affectent pas leur viabilité, afin de réduire leur taux d'humidité à des niveaux recommandés pour le stockage. Cette déshydratation doit avoir lieu le plus tôt possible après la récolte.

Plusieurs méthodes sont disponibles pour sécher des semences : utilisation d'un dessiccateur (déshydratation déshumidifiée), séchage au silicagel ou au chlorure de calcium. On peut également utiliser des méthodes moins onéreuses, par exemple le séchage naturel à l'ombre. Il doit être réalisé dans un environnement où l'humidité relative est basse (inférieure à 40 %). Il est parfois mentionné dans des documents techniques d'exploitation du Pourghère que le séchage des semences est effectué au soleil. Cette méthode est cependant à éviter, car l'exposition directe au soleil affecte leur pouvoir germinatif (Joker et Jepsen, 2003). Les semences fraîches sont étalées en une seule couche sur un drap ou une natte, dans un endroit bien aéré. Si cette opération est effectuée en plein air, il est recommandé de recouvrir les graines d'un filet protecteur pour empêcher la prédation par les animaux (oiseaux, rats, etc.). Cette opération peut durer plusieurs jours.

Stockage :

Une fois séchées, les graines peuvent être conservées dans des sacs de jute ou de polyéthylène tissé. Elles doivent être stockées dans un endroit sec et aéré, et à des températures les plus basses possibles. Une température de stockage inférieure à 20 °C permet de réduire la respiration et d'empêcher la détérioration rapide des graines (Ratree, 2004). Il est important de veiller à ce que celles-ci ne soient pas ré-humidifiées pendant le stockage.

PARTIE III – Le rendement

(Voir figure 5 : schéma d'élaboration du rendement)

III.1. Comparaison des rendements répertoriés dans la bibliographie

Le tableau 14 présente les rendements très variables relatés dans les différentes études sur le *Jatropha*. Les informations telles que les densités de plantations, la méthode de propagation, les conditions de culture ou encore l'âge des plants sont souvent manquantes. De plus, il est rarement spécifié si le rendement en graines est mesuré en poids de matière fraîche ou de matière sèche (les graines fraîches ont un taux d'humidité d'environ 30 % alors que les graines sèches ont un taux d'humidité de 7-8 %). Enfin, il est important de faire la part des choses entre un rendement à l'hectare réellement mesuré (pesée de la récolte) et un rendement calculé, parfois à partir d'une extrapolation sur la productivité d'un arbre isolé ou d'une haie (alors que la disponibilité en éléments nutritifs et eau est bien différente sur une plantation en plein, ainsi que le risque d'occurrence de ravageurs et maladies).

Dans cette sélection, certaines études de rendements présentent des informations (pluviométrie, âge des plants) et des mesures réelles, soit sur plusieurs hectares, soit sur quelques individus (essais agronomiques). Dans ce dernier cas, la productivité mentionnée est individuelle (par plant), et cette valeur n'est pas extrapolée. On notera que les rendements répertoriés sont malheureusement souvent issus d'essais sur des plantations juvéniles (1 à 3 ans), qui ne sont pas encore en pleine production. Le rendement du *Jatropha* se stabiliserait à partir de la 7^e année (Gokhale, 2008).

III.2. Une estimation raisonnable du rendement ?

On dispose de peu de données sur des plantations en plein établies sur de longues périodes. Dans le cas du projet Biomasa au Nicaragua (1999), où les conditions pluviométriques sont de 1.200 mm/an, la quantité moyenne récoltée sur les 10 ans du projet a été de :

- 1 714 kg/ha/an en graines fraîches
- 1 158 kg/ha/an de graines sèches.

Cette quantité récoltée est en réalité inférieure au rendement réellement obtenu, une partie des fruits ayant été laissée sur les arbres (pour les raisons expliquées au paragraphe récolte, II.3.6.2). Ainsi, les rendements annoncés par Foidl (à 2, 3 et 4 ans), compris entre 1,6 et 2,4 t/ha seraient plus représentatifs de la productivité de cette plantation. A noter que le rendement attendu en début de projet était de 5 t/ha de graines sèches. L'invasion de ravageurs sur les parcelles de *Jatropha* (voir paragraphe II.3.4), contre lesquels aucune lutte n'a été mise en place apparaît comme la principale cause de cet écart.

Un autre projet mené sur plusieurs années (1986-2003) dans la région de Nashik en Inde (pluviométrie de 610 mm/an), sur une surface totale de plus de 8 000 ha fait état d'un rendement moyen inférieur à 500 kg/acre (avec des variétés d'origines diverses, non précisées), soit moins de 1 250 kg/ha de graines sèches, sur les arbres en pleine production après 7 ans de culture (Gokhale, 2008) Ce rendement bien inférieur aux espoirs de départ a conduit à l'arrêt du projet au bout de 17 ans.

La productivité de l'arbre est dépendante du régime pluviométrique qui détermine le nombre de fructifications et donc de récoltes. La dernière observation du tableau 14, réalisée par Henning (2007) au Cambodge, fait état de 2,8 kg de graines par plante par récolte. Cette observation a été réalisée sur une plantation de 10 ha en plein, âgée de 3 ans. Avec une récolte bisannuelle, il estime donc à 5 kg par plante le rendement annuel, et par suite à plus de 5 t/ha de graines, avec une densité de 1 300 plants/ha. Henning admet que cette estimation est élevée, et qu'elle n'a d'ailleurs pas été confirmée par des observations de terrain d'autres producteurs actuels de *Jatropha*. De plus, il ne précise pas s'il s'agit de graines sèches ou fraîches.

Actuellement, il n'y a pas suffisamment de données mesurées pour obtenir une estimation sérieuse du rendement du *Jatropha*. La bibliographie doit continuer à être étudiée et il faudrait obtenir des informations récentes sur les plantations actuelles.

Lors de la conférence de Wageningen (mars 2007), les chercheurs travaillant sur *Jatropha* en provenance du monde entier se sont accordés sur une échelle de rendement de 3 à 5 t/ha/an. Mais on ne peut pas parler de rendement indépendamment des conditions pédoclimatiques du milieu. **Il serait plus juste de parler de rendement potentiel dans une zone pédoclimatique donnée.**

Rendement dans des sols marginaux

En Inde, des données non publiées de l'Institut for Rural Development de Karnataka, dans des sols marginaux sans irrigation (et une pluviométrie de 1140 mm) et avec une fertilisation limitée (non précisée) apportent les informations suivantes (Daniel, 2005) :

- La 5^e année de culture, le rendement est de 500 kg/ha de graines pour la variété locale (Karnataka) avec une densité de 2 500 plants/ha, et de 300 kg/ha pour une densité de 4 000 plants/ha ;
- la 6^e année, avec irrigation, le rendement passe alors à 1,2 t/ha de graines pour la densité de 2 500 plants/ha.

L'auteur considère qu'on pourrait atteindre un rendement moyen de 2 t/ha avec des apports d'engrais, d'eau et une conduite de culture adaptée. Malheureusement, il ne donne aucune précision concernant les conditions climatiques et les modalités de cet essai. Dans les mêmes conditions de culture, une variété en provenance du Nicaragua n'a donné qu'un rendement très faible de 50 kg/ha. Ceci atteste que l'adaptation variétale au milieu est un facteur primordial à prendre en compte. Cependant, vu l'extrême faiblesse de ce rendement, on peut se demander si d'autres facteurs n'en sont pas responsables (maladie, etc.).

Scénario	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5-20	Moyenne
1	0	268	803	1 606	1 606	1 418
2	0	535	1 606	2 676	2 676	2 382
3	496	991	2 974	4 956	4 956	4 436

1 : scénario reflétant les conditions actuelles de culture du *Jatropha*

2 : scénario avec optimisation des l'itinéraire technique

3 : scénario avec optimisation de l'itinéraire technique et amélioration variétale

Tableau 15 : rendement en graines sèches à 5,8% d'humidité (t/ha/ an) selon 3 scénarios de culture (source IFEU, 2007)

Conclusion

Une étude réalisée par l'IFEU (Reinhardt, 2008), à partir des données du Central Salt and Marine Chemicals Research Institute (Inde) et de l'Université de Hohenheim (Allemagne), donne des prédictions de rendements en graines sèches selon 3 scénarios de production : un scénario actuel, un scénario « optimisé », et un scénario « idéal » (tableau 15). Il ressort que le rendement de 5 t/ha de graines sèches, souvent annoncé comme facilement réalisable, est en réalité à considérer comme un niveau de rendement optimal avec des techniques culturales optimisées et des écotypes performants et adaptés à la zone considérée.

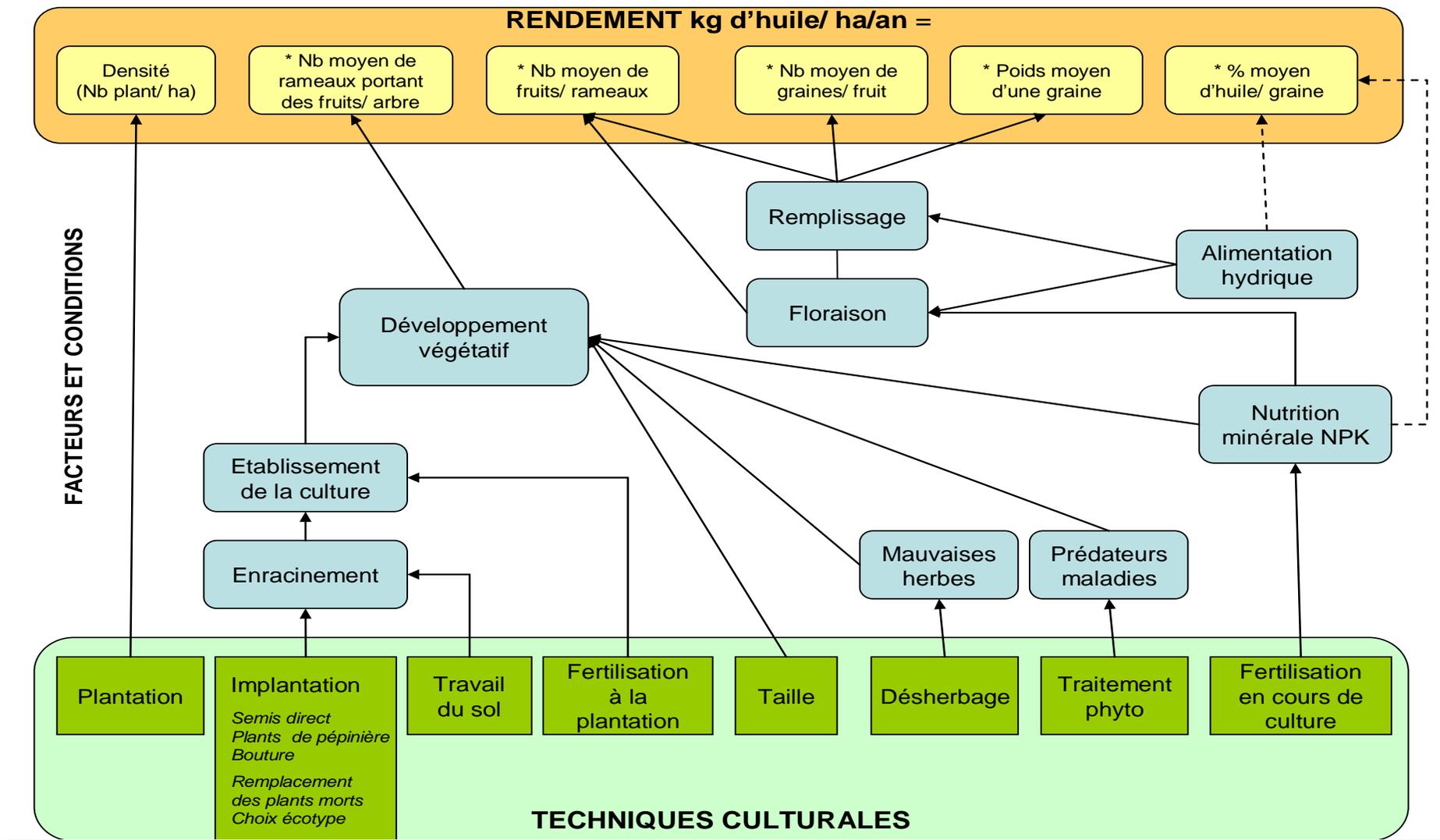


Figure 5 : schéma d'élaboration du rendement du *Jatropha curcas* L., d'après les connaissances bibliographiques actuelles (Roland PIROT, Marjorie DOMERGUE, 2008)

Site	Auteur, année	Age des plants, origines	Conditions climatiques	Densité plantation	Graines (kg/plante)	Graines (kg/mètre haie)	Fruits (kg/ha)	Graines kg/ha	Huile (kg/ha ou l/ha)	Tourteau (kg/ha)	Fiabilité - remarque		
Cap Vert	Cuhna da Silveira, 1934	Plantations locales	230 mm (minimum estimé)					200-800			Calculé		
Cap Vert	Avila, 1949	Plantations locales	230 mm (minimum estimé)	Haies	0.70 – 0.90				2 à 2,5 l/ha		Estimé à partir de la production d'huile		
Mali	Henning et al., 1996		800 mm	Haies		0,8-1.03					Mesuré		
Nicaragua	Projet Biomasa	Moyenne sur 10 ans du projet Variétés locales et Cap Vert	900-1200 mm	3*3m			7 717	1 714 frais 1 158 graines sèches	342 kg/ha 3 72,7 l/ha	815,42	Moyenne récoltée sur le projet		
	Foidl et al. (projet Biomasa)	2 ans							1 576			Extrapolé	
		3 ans								1 887			Extrapolé
		4 ans								2 359			Extrapolé
Brésil, Tatui	Ungaro et al. (2007)	4 ans Variétés brésiliennes (état de Minas Gerais)		2*1 m 2*2 m 3* 2 m 3*1 m	0.75 ' ' 0.83					Mesuré Essai densité			
Brésil	Saturnino et al. (2005)	1 an (Minas Gerais)		4*3m	0.4						Mesuré		
Guatemala	E.Barrilas, Octagon	1 an	Irrigation 600 mm dans les 6 mois de saison sèche + 4 000 mm en 6 mois	2.5*2.5m				1 250 (graines sèches)			Mesuré		
Thaïlande	1984, essais de « Roi et Fields Crop Exp »		Pas de fertilisants	1*1 m				638 (graines sèches)			Mesuré		
Thaïlande	Stienswat et al. (1986)	1 an	Mini 1 200 mm		0.318			794			Extrapolé		
Thaïlande	Sukarin et al. (1987)	1 an	Mini 1 200 mm		0.638						Extrapolé		
Thaïlande	Ishii et Takeuchi, 1987		Mini 1 200 mm					2 146			Mesuré ou extrapolé ?		

Indonésie	Manurung, 2007	1 an	Témoin Avec fertilisation et mycorhize		0.61 0.91 – 1.01					Mesuré
Inde, Région de Nashik	Gokhale, 2008	7 ans Variétés « élites » en provenance du monde entier	610 mm	3*3 m				< 1 250 (rendement moyen sur les 8000 ha du projet)		Mesuré Projet de Nashik (1986-2003)
Inde	Daniel, 2005	5 ans Variété locale Karnataka	Pluviométrie < 600 mm, sols marginaux, fertilisation et management de la culture limités (apport d'eau pendant les 2 premières années)	2 500 plants/ha				500		Mesuré Note : 2 autres variétés testées dans les mêmes conditions ont donné des rendements inférieurs
Inde (Orissa)	Arup Gosh, Patolia et al., 2007	2.5 ans	800 mm	4*3m	0.69 sans fertilisation 1.52 (3 t/ha de tourteau)					Mesuré Essai fertilisation Moyenne sur 2 ans
		2 ans		3*2m	0.45 sans fertilisation 0.87 (3 t/ha de tourteau)					
Inde Université d'Hisar	Sharma et al., 1997,	15 mois	450 mm (moyenne) 25°C annuel (moyenne)	1*1m			3400	1 733		
Inde, Gujarat	Chikara et al.	1 an	540 mm	1*1m	0.32					Mesuré
				3*2m	0.94					
Cambodge	Henning, 2007	3 ans		1300	5 kg/an (2.8 kg par récolte)					Mesuré

PARTIE IV – Extraction et utilisations de l'huile

IV.1. Extraction de l'huile

Traditionnellement, l'huile de *Jatropha* était extraite par des procédés simples : les graines étaient d'abord décortiquées, puis les amandes bouillies dans l'eau. L'huile surnageant dans le récipient était alors facile à récupérer.

Pour l'extraction de graines oléagineuses à des fins commerciales, on utilise le pressage mécanique ou l'extraction par solvant. La première méthode permet d'extraire entre 90 et 95 % de l'huile de la graine avec une presse, et la seconde 99 % (Shahidi, 2005).

IV.1.1. Le pressage

*Voire Annexe 2 : comparatif des presses à huile végétales disponibles sur le marché, pouvant être utilisées pour le *Jatropha*.*

Le processus d'écrasement de graines oléagineuses pour en extraire l'huile est très ancien. Aujourd'hui, on distingue 2 types de pressages mécaniques : le pressage en continu et le pressage en discontinu.

IV.1.1.1. Le pressage en discontinu

Les presses agissent par écrasement des graines placées dans une chambre de compression munie d'orifices pour permettre l'écoulement de l'huile. Après le pressage, la chambre est vidée de son contenu. Ce sont souvent des presses hydrauliques, elles fonctionnent grâce à un vérin qui écrase les graines disposées dans la chambre de compression. La pression est de l'ordre de 400-500 bars. Ce type de presse s'utilise pour des faibles tonnages, généralement pour des huiles de valeur.



Photo 11 : presse hydraulique ADMGA, adaptée au *Jatropha* (source : site Internet Vivre au Village, projet Ingalan)

Essais de prétraitement des graines avec une presse hydraulique ADMGA (photo 11)

La presse hydraulique ADMGA est une presse rustique fabriquée au Burkina Faso. On charge ses cylindres avec environ 8 kg de graines de *Jatropha*, puis on actionne les vérins. L'huile s'écoule dans un récipient. Le pressage terminé, on vide le cylindre de la matière restante, les tourteaux. L'opération prend environ 10 minutes, ce qui donne une capacité de 40 kg par heure. La presse ADMGA peut être utilisée par des non spécialistes. Son fonctionnement en fractionné est une garantie sur le plan de la sécurité (source : site Internet Vivre au Village, Burkina Faso).

Koreissi *et al.* (2005) ont réalisé des tests avec cette presse au Mali, et ont comparé l'effet de 3 prétraitements des graines de Pourghère sur le rendement en huile (tableau 17). Le processus optimal est celui qui consiste à concasser avec le tamis à petits trous, chauffer dans une marmite, presser à 350 bars et filtrer avec un sac de filtrage. Toutefois, les auteurs reconnaissent qu'au niveau statistique, il aurait été préférable d'étudier les variables individuellement (par exemple faire un test avec le tamis à grand trou avec et sans vannage), mais expliquent qu'ils ont essayé d'optimiser le processus complet. Les auteurs font les remarques suivantes :

- le vannage prend beaucoup de temps et entraîne une perte de matière ;
- le filtrage est préférable à la décantation (la nature des filtres utilisés n'est pas précisée) ;
- Les graines utilisées pour les essais étaient vieilles.

Note : ces essais apportent des informations intéressantes mais sont à prendre avec précaution compte tenu du manque de rigueur à différents niveaux : dispositif de départ et utilisation de graines trop âgées.

Méthode	Taux d'extraction du processus (huile brute)	Taux d'extraction du processus (huile épurée)
A- graines chauffées dans une marmite et pressées à 350 bars	15,33 %	14,00 %
B - Graines concassées avec un grille à petits trous (tamis fourni avec le concasseur), chauffées dans une marmite et pressées à 350 bars	17,05 %	15,15 %
C- Graines concassées avec tamis à grand trous (tamis fournis avec le concasseur), vannées, chauffées dans une marmite et pressées à 350 bars	14,09 %	12,73 %

Tableau 17 : comparaison de prétraitement des graines sur le rendement en huile (Koreissi *et al.*, 2005). Note : le concassage a été réalisé à l'aide d'un concasseur ADMGA, moulin à marteaux

IV.1.1.2. Le pressage continu

A – La presse manuelle Bielenberg

Cette presse manuelle a été développée dans le début des années 1980 par Karl Bielenberg pour une utilisation artisanale. Elle a connu un certain succès pour des projets de petites tailles (types projets villageois d'ONG) grâce à son coût concurrentiel et à sa maintenance assez simple.



Photo 10 : la presse Bielenberg (Freslon, 2006)

C'est une presse qui, bien qu'ayant un fonctionnement en discontinu, est basée sur le principe du pressage en continu : le produit à presser est chargé d'un côté de la presse et le produit pressé sort à l'opposé. On pourrait parler de pressage en semi continu.

Son principe de fonctionnement est simple (figure 5) : les graines sont stockées dans le cône. Le levier permet de créer un mouvement d'aller retour :

1. à l'aller, le piston recule et laisse rentrer les graines dans un tube ;
2. au retour, le piston avance, écrase les graines et sous l'effet de la pression, l'huile sort par les interstices de la cage et le tourteau sort par l'extrémité. La contre-pointe permet de doser l'effort pour écraser les graines.

La longueur du levier permet de transformer la force de l'homme en une pression importante sur l'extrémité du piston. L'huile tombée dans le réceptacle est récupérée directement dans un récipient. Une décantation est nécessaire pour éliminer les matières en suspension.

Le rendement mesuré après décantation est de l'ordre de 0.15 kg d'huile pour 1 kg de graines de *Jatropha* (Freslon, 2006). ce qui représente en moyenne la moitié de l'huile contenue dans la graine.

Des variations de rendement peuvent être dues à :

- la teneur en huile des graines et leur propreté ;
- le chauffage des graines au soleil avant pressage permet d'augmenter le rendement ;
- la conception de la presse ;
- la fréquence du mouvement de l'opérateur (12 à 14 mouvements par minute en moyenne) ;
- le réglage de la contre-pointe : la position de la contre-pointe pendant l'extraction détermine la pression optimale dans la cage ainsi que l'expulsion de l'huile.

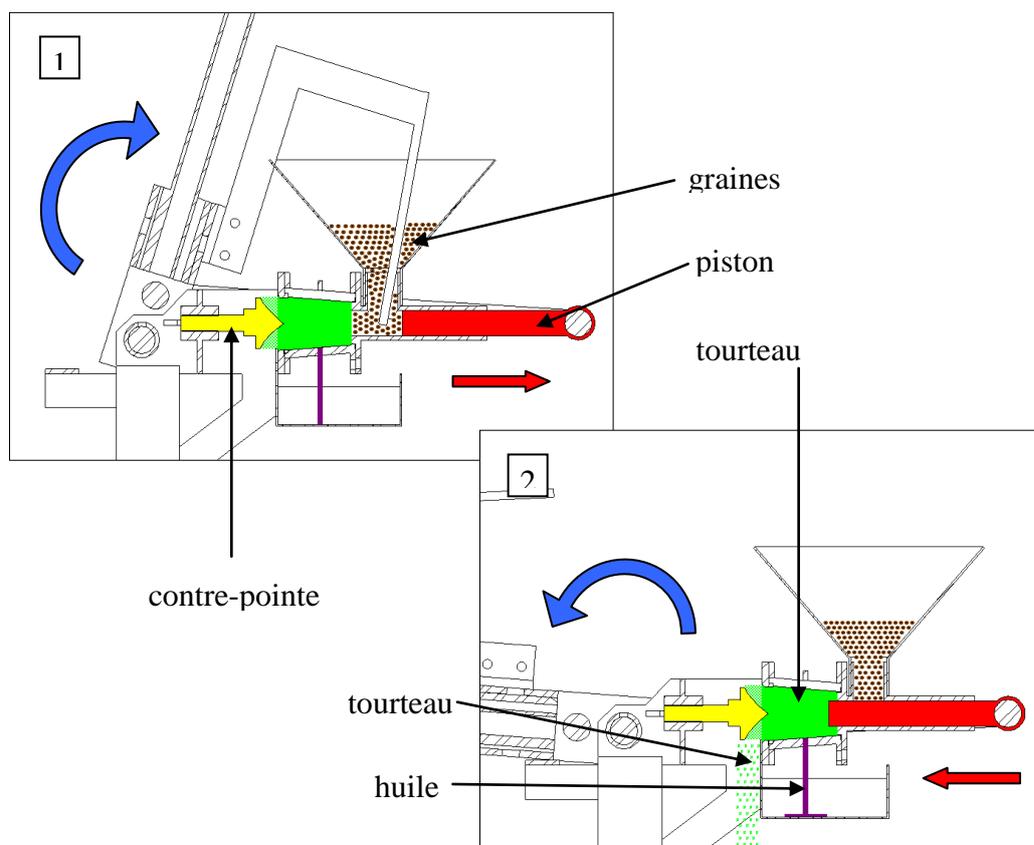


Figure 6 : fonctionnement de la presse Bielenberg (Freslon, 2006)

	Presse Bielenberg SFX	Presse Bielenberg ACAMECA	Presse Bielenberg VALY	Presse PLAE/ TANZANIE
Rendement en huile (g/kg graines)	151.75	165.2	110.8	144.5
Vitesse d'extraction de l'huile (kg/h)	0.445	0.892	0.604	0.722
Particularité de la presse		Diamètre du piston plus grand		Cylindre avec un orifice d'issue d'huile

Tableau 16 : rendements et vitesses d'extraction obtenus avec différents modèles de presses (Freslon, 2006)

Le tableau 16 présente les résultats de rendement et vitesses d'extraction obtenus avec différents modèles de presses mis en concurrence avec le modèle original, issu de Tanzanie (résultats pour 1 kg de graines, Freslon, 2006). L'auteur remarque que les tests ont été effectués sur des graines stockées pendant de longues périodes. Un test supplémentaire réalisé avec la presse SFX sur des graines fraîches a permis d'obtenir un rendement supérieur (174 g pour 1 kg de graines).

Tests supplémentaires avec des graines chauffées et décortiquées :

Des tests de prétraitement ont permis à Freslon d'observer que le préchauffage des graines a un effet positif sur le rendement. Par contre, le décorticage manuel, opération fastidieuse, a donné un rendement moins bon (134,6 g d'huile après décantation). La présence de la coque semble avoir un effet sur la pression et l'expulsion de l'huile en améliorant le drainage.

Enfin, le rendement en huile et la vitesse d'extraction dépendent fortement de l'opérateur (des essais avec deux opérateurs ont montré des différences notables sur la vitesse et le rendement de l'extraction). Freslon note qu'il est important de bien former l'opérateur. Il faut surtout préciser que l'actionnement d'une presse Bielenberg est un travail éprouvant, qui ne peut être répété par la même personne trop longtemps (c'est pourquoi elle ne convient qu'aux projets de faible ampleur).

B Les presses à vis

Les presses à vis peuvent être divisées en 2 modèles : les presses à barreaux (ou à anneaux) et les presses à cylindre perforé. Leur principe général est le suivant : les graines sont chargées dans une trémie d'approvisionnement, elles tombent dans une cage dans laquelle elles sont transportées et écrasées par une vis tournante en direction d'un orifice de sortie. La limitation de l'orifice de sortie provoque une compression de la matière et une augmentation de pression. Cette pression dans une presse à vis varie entre 40 et 350 bars (Bereens, 2007). Il se produit également un dégagement de chaleur, qui évolue en fonction de la nature de la graine et des réglages de la presse, comme nous le verrons par la suite. Le tourteau s'échappe par l'extrémité de la presse, réglable. Plus cette sortie est fermée, plus les tourteaux ont des difficultés à passer, mais plus le taux d'extraction est élevé. Avec la pression, la température d'extraction s'élève aussi (mais une huile obtenue à température plus élevée présente souvent un risque de dégradation plus important).

A - Presses à barreaux et à anneaux (figure 7)

. Dans ce type de presse, la vis tourne dans une cage garnie d'anneaux en acier, dont les écartements peuvent être réglés. L'avantage de cette presse est de pouvoir être facilement ajustée en fonction du type de matériau à presser. Les presses à barreaux sont les plus répandues dans l'industrie.

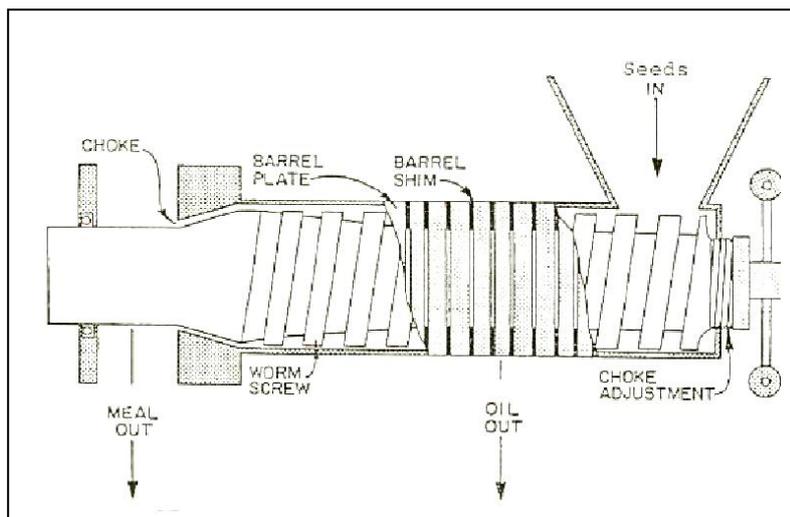


Figure 7 : presse à anneaux (Ferchau, 2000)

Sur la figure 7, on voit que la vis a un diamètre intérieur croissant et un pas décroissant, ce qui permet une augmentation de la pression en sortie des tourteaux. Une autre alternative est d'avoir une vis à diamètre constant, insérée dans un cylindre conique (ces particularités dépendent du fabricant, mais le principe de la presse reste le même). Pour plus de flexibilité dans les réglages, différents types de vis sont disponibles et des sections de la presse peuvent être remplacées. Les presses à anneaux disponibles sur le marché ont des capacités allant de 15 à 2000 kg/h de graines (Ferchau, 2000).

Note : selon le même système, il existe aussi des presses à barreaux (des barreaux horizontaux remplacent les anneaux réglables). Les presses à barreaux sont meilleur marché car les barreaux, qui sont des pièces d'usure tout comme les anneaux, sont moins coûteux à remplacer.

B - Presse à cylindre perforé (figure 8)

La vis tourne dans un tube cylindrique garni de trous à travers lesquels l'huile sort. La pression croissante fait sortir le tourteau par un orifice circulaire à l'extrémité du tube cylindrique. Afin d'éviter le blocage de la presse, la partie située vers la sortie des tourteaux) est préchauffée avant le pressage pour diminuer la viscosité de la pâte.

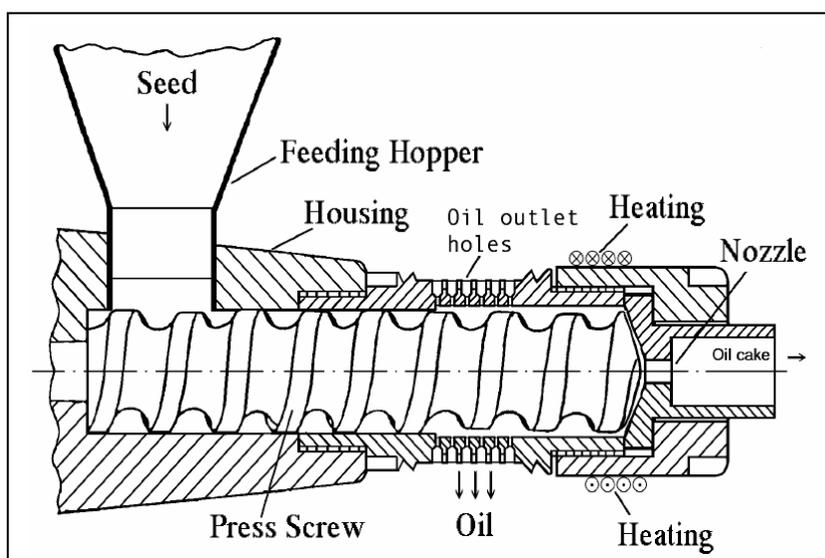


Figure 8 : presse à cylindre perforé (Ferchau, 2000)

La pression est influencée par le diamètre de sortie, la forme de la vis, et la grosseur et la dureté des graines. La réduction de l'ouverture de la sortie augmente la pression et permet d'extraire plus d'huile, mais a également des effets négatifs : augmentation de la température de l'huile en raison de l'augmentation de la résistance à l'intérieur de la presse, augmentation des particules solides dans l'huile (Ferchau, 2000). Enfin, la possibilité du colmatage augmente lorsque que l'on réduit l'ouverture de sortie. Pour le colza, une vitesse de rotation de 20 à 50 t/mn est généralement utilisée (correspond à une faible consommation d'énergie).

C - Autres types de presses, autres procédés

En plus des presses à vis conventionnelles, il existe d'autres adaptations, avec notamment l'utilisation d'une double vis (deux vis coaxiales tournent en sens inverse). Ce type de presse est reconnu pour avoir un rendement d'extraction supérieur aux presses à vis traditionnelles (Dufaure *et al.*, 1999), et permettrait de supprimer les prétraitements des graines (chauffage, concassage...). Aucune étude n'a cependant été menée sur les performances de ce type de presse avec des graines de *Jatropha*. Par ailleurs, Foidl (2007) rapporte qu'il serait possible d'obtenir un rendement d'extraction exceptionnel (0.3% d'huile résiduelle dans le tourteau) en injectant un solvant (dans l'extracteur ?) pendant le pressage. Malheureusement, il n'y a aucune publication officielle de ces résultats ainsi que du protocole utilisé. Ceci dit c'est un procédé hautement dangereux.

D - Eléments importants pour un process optimisé

Un certain nombre de facteurs doivent être pris en compte pour optimiser le rendement en huile dans les presses à vis, selon Beerens (2007) :

- la vitesse de la rotation de la vis. Avec une vitesse de rotation plus élevée, on laissera plus d'huile dans les tourteaux, puisque l'huile aura moins de temps pour s'écouler ;
- le réglage de la sortie de presse (« choke », étranglement, ou bec de sortie des tourteaux pour les presses à barreaux, buses de sorties pour les presses à cylindre perforé). Comme nous l'avons vu plus haut, le fait de réduire cette ouverture augmente la pression, et diminue l'huile résiduelle dans le tourteau ; mais augmente l'énergie consommée et la température.
- le pourcentage de coques des graines. Les coques sont supposées affecter non seulement le rendement en huile, mais aussi la consommation d'énergie pour le pressage. En enlevant une partie de ces coques, assez dures, moins d'énergie sera utilisée pour les broyer et les presser (Zheng *et al.*, 2005).
- le taux d'humidité des graines. Pour la graine de colza, le taux d'humidité optimal pour le pressage est d'environ 7 % (Bargale et Singh, 2000). Selon Vaitilingom (2008, communication personnelle), les petites presses sont très sensibles à l'humidité des graines et ne fonctionnent bien que si l'humidité est inférieure à 9 % ;
- le préchauffage des graines. Sans être une cuisson, le préchauffage présente de l'intérêt. Il permet notamment de rompre la paroi cellulaire et donc de faciliter la sortie de l'huile. Il a été mis en évidence une augmentation de rendement de trituration et de production de l'huile de 40 % sur tournesol préchauffé à 60 °C sans modification de la qualité de l'huile produite.

Les facteurs précédemment cités ont une influence sur le rendement d'extraction mais également les variables suivantes :

- la température.
Les forces à l'intérieur de la presse génèrent de la chaleur qui chauffe également l'huile. Au-dessus d'une certaine température, le niveau important de phospholipides et l'évolution de l'acidité de l'huile détériore la qualité de cette huile utilisée en tant que carburant.
- la pression.
Plus elle est élevée, plus d'huile sera récupérée, mais sa qualité évoluera
- le taux d'huile résiduelle dans les tourteaux ;
- la consommation d'énergie.
Elle dépend de la pression (donc de la viscosité du matériau à presser) et de la vitesse de rotation de la vis.

Bereens (2007) a étudié l'influence des facteurs précédemment cités sur le rendement d'extraction de graines de *Jatropha* avec 2 types de presses : une presse à cylindre perforé danoise (type BT 50), de faible capacité (environ 12 kg/h avec des graines de *jatropha*), et une presse Sayari/Sundhara de

fabrication Tanzanienne (conception FACT). Les conclusions de son expérience sont plutôt intéressantes. Le facteur qui a le plus d'effet sur le rendement est le taux d'humidité des graines, qu'il a fait varier entre 2 et 13 %. Plus les graines sont sèches, meilleur est le rendement en huile, les rendements obtenus variant entre 33 et 88 % selon le taux d'humidité considéré. L'effet d'un préchauffage et d'un écrasement (pre heating and flaking crushing) des graines a été insignifiant. En revanche, une cuisson d'une heure à 70 °C suivie d'un séchage donne le meilleur résultat mesuré : 89 % d'huile extraite pour les 2 types de presses. Un essai de double passage a donné un rendement de 91 % pour la presse Sayari (qui se rapproche du rendement théorique maximum de 95 %). En comparaison, le rendement obtenu avec des graines n'ayant subi aucun traitement a été de 79 % pour la BT 50 (simple passage) et de 88 % pour la Sayari (double passage). Enfin, contrairement à ce qui est souvent avancé, le décorticage a un effet négatif sur le rendement en huile, dès que l'on descend en dessous de 80 % de coques. En prenant en considération les résultats des différents tests, il conclut que le rendement optimal avec des graines de Jatropha devrait être obtenu avec une humidité de 2 à 4 %, après une cuisson à 70 °C, sans décorticage. Il précise que l'ouverture du bec de sortie des tourteaux doit être réduite le plus possible, tout en prenant en considération les limites techniques de la presse et l'effet de la température sur la qualité de l'huile.

Influence de la température sur la qualité de l'huile

La pression à froid peut se réaliser avec des presses industrielles. Dans ce cas, on ne pratique pas de cuisson ni d'aplatissage préalable des graines, mais seulement un nettoyage, éventuellement un broyage. La « pression à froid » est réalisée à température ambiante (avec éventuellement un léger préchauffage des graines qui ne dépasse pas 60 °C). Les presses tournent à des vitesses lentes et la sortie de presse (choke) est réglée pour limiter l'échauffement de l'huile (en réalité, le terme « à froid » porte à confusion car il y a quand même un échauffement). L'huile ainsi obtenue est peu chargée en phospholipides. Le taux d'extraction est généralement diminué. Les constructeurs ayant testé des procédés de pressage à froid avec des graines de Jatropha donnent les indications suivantes concernant la quantité d'huile résiduelle dans les tourteaux (Saint Girons, 2008, communication personnelle):

- Olier: presse de capacité 100 kg/ heure: huile résiduelle dans le tourteau de 7 à 8% pour un 1er essai et de 10 à 11% pour le second essai. Presse de capacité 60 kg/ heure, huile résiduelle 6.8% avec une température de sortie de 55°C
- Harburg Freundberger : presse de capacité 100 kg/ heure huile résiduelle 6.4% avec un "craking" (fracture de la coque) réalisé auparavant.

En procédé industriel classique, les graines d'oléagineux sont d'abord broyées, aplaties et chauffées. On obtient une pâte – déjà huileuse – qui est injectée dans la presse. La température de pressage est très importante (environ 180°C). Les composés liposolubles (phospholipides, tocophérols...) se retrouvent dans l'huile qu'il faudra ensuite raffiner.

E - Choix d'une presse : quelques éléments de réflexion

Presses à barreaux ou presses à cylindre perforés ? Sur le plan de la qualité de l'huile et des tourteaux, les presses à barreaux sont adaptées du modèle industriel et ont en principe de meilleurs résultats que les presses à cylindre perforé. Elles sont particulièrement préconisées pour des projets d'une dimension importante (gros volumes d'huile). Certaines presses à cylindre présentent de très bons résultats mais sont plus chères à l'achat et l'entretien. Il existe une grande diversité de matériel et la plus grande vigilance est conseillée concernant les presses « bon marché » compte tenu du manque de références et de suivi après vente.

Température du corps de presse : l'objectif est de presser à une température la plus basse possible, pour limiter la présence de composés indésirables dans l'huile (dont les phospholipides).

Capacité de pressage : à adapter selon la dimension du projet. Pour des gros volumes, privilégier une presse à barreaux.

IV.1.1.3. L'épuration

A la suite du pressage, l'huile doit être purifiée avant raffinage. Pour les huiles alimentaires, l'épuration comprend généralement cinq opérations : neutralisation, dégommeage, filtration, désodorisation, décoloration. Pour une utilisation en tant que carburant, les composés à éliminer prioritairement sont les particules solides et les phospholipides.

Filtration et décantation

La filtration permet d'éliminer les particules solides ou trop visqueuses entraînées lors du pressage. La taille des pores du filtre dépend directement de l'utilisation de l'huile :

- 5 µm pour une huile végétale alimentaire ;
- 10 µm pour une huile végétale utilisée comme carburant,
- 200 µm pour une huile qui sera estérifiée, puisque la suite du procédé permettra d'éliminer le reste des impuretés, que l'on retrouvera dans la glycérine.

Les résidus de coques et de graines sont riches en phospholipides et en cires (les cires cristallisent à froid dans les moteurs). Il convient de les extraire assez rapidement de l'huile de pression pour qu'ils n'augmentent pas les taux de ces composés indésirables. La qualité dépend du type d'oléagineux traité (par exemple une huile de colza ne contient pas de cires mais des phospholipides, pour le tournesol c'est l'inverse), et du procédé d'extraction utilisé : les huiles brutes industrielles sont chargées de phosphore et de cires, ce qui n'est pas le cas des huiles artisanales.

Deux méthodes existent : une filtration directe en sortie de presse ou une décantation suivie d'une filtration.

Filtration directe à chaud :

La filtration à chaud bénéficie de la faible viscosité de l'huile chaude en sortie de presse (50 – 60 °C). Elle nécessite un grand filtre. Cette solution d'un coût plus élevé à l'investissement peut correspondre à des projets d'une dimension importante. L'huile peut être "tamisée" afin d'éliminer les résidus de graines qui restent après le pressage (presses à barreaux notamment). Cette filtration permet d'avoir une qualité constante de l'huile filtrée (Vaitilingom, communication personnelle). Ensuite, seule une opération de nettoyage du filtre sera nécessaire.

Note : lors de la filtration à chaud, les phospholipides sont plus solubles et passent à travers les pores du filtre.

Décantation puis filtration :

L'huile est d'abord décantée pendant une durée déterminée (une semaine à un mois) dans des cuves opaques, propres et chimiquement neutres. Cette opération permet d'éliminer à moindre frais certaines impuretés, qui tombent en fond de cuve. La décantation ne doit pas être faite dans des cuves en PVC non traitées, ni dans des cuves métalliques, car les phospholipides se fixent aux métaux et catalysent des réactions d'oxydation et d'acidification de l'huile.

Après la décantation, l'huile est filtrée par un procédé mécanique (pompe + système de filtration) ou par simple gravité à travers des filtres papiers. Il est conseillé de filtrer à une température inférieure à 14 °C, car les cires se cristallisent et sont faciles à piéger (les cires sont des impuretés qui posent problème à froid dans les moteurs). Cependant, à des températures trop basses, la viscosité de l'huile peut rendre la filtration difficile.

Quelle que soit la technique utilisée, le contact avec l'air et la lumière doit être le plus bref possible. Ces 2 facteurs accélèrent l'oxydation et l'acidification de l'huile. Le « pied de presse », qui se situe au fond des bacs de décantation, est chargé en particules solides et en impuretés qui représentent environ 5 % de la masse d'huile récupérée. Il est possible de l'insérer à l'entrée de la presse pour en extraire l'huile résiduelle et ainsi réduire la perte de matière.

IV.1.2. L'extraction par solvant

La méthode d'extraction par solvant est plus complète que la méthode mécanique par presse et elle est réalisée à température modérée, alors que le pressage mécanique dégage de la chaleur susceptible d'altérer la qualité de l'huile. Elle est cependant plus coûteuse et dangereuse.

L'extraction industrielle au solvant fonctionne sur le même principe que l'extraction de laboratoire au soxhlet (figure 8).

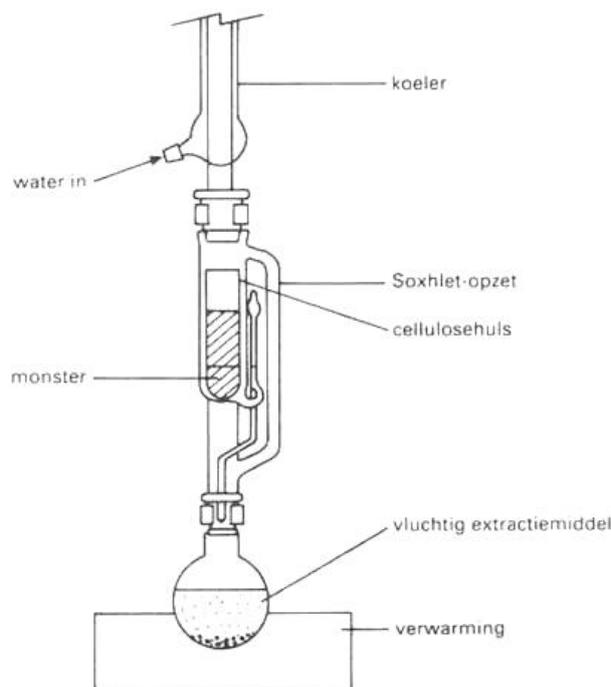


Figure 9 : l'extraction chimique de graines oléagineuses au soxhlet

Principe

L'échantillon à extraire est placé dans une cartouche en cellulose.

L'extracteur est placé sur un ballon contenant du solvant. Le ballon est chauffé, provoquant l'évaporation du solvant qui passe dans le tube adducteur, puis se condense grâce au réfrigérant, et retombe dans le corps de l'extracteur.

Le solvant condensé s'accumule dans l'extracteur jusqu'à atteindre le sommet du tube siphon, qui provoque le retour du liquide dans le ballon, accompagné des substances extraites.

Le solvant contenu dans le ballon s'enrichit progressivement de composés solubles, principalement l'huile. Le cycle peut se répéter indéfiniment jusqu'à épuisement complet de l'échantillon.

Différents types de solvants peuvent être utilisés :

- **les solvants hydrocarbonés** : hexane, heptane, pentane. L'hexane est généralement utilisé (teneur en n-hexane entre 48 et 98 %, exempt d'azote et de soufre). L'heptane commercial pourrait cependant être préféré, comme pour l'extraction des graines de ricin, non miscibles avec des hydrocarbonés, sauf à haute température (Adriaans *et al.*, 2006) ;
- **les solvants halogénés**, principalement des produits chlorés (trichloréthylène, dichlorométhane). Peu utilisés pour des raisons environnementales ;
- **l'eau chaude**, avec ou sans enzymes et tensioactifs, est utilisée comme solvant pour l'extraction des huiles de palme, d'olive et de noix de coco. Cependant, l'huile résiduelle dans le tourteau est de plus de 10 % et la séparation et le séchage consomment beaucoup d'énergie ;
- **l'acétone** : utilisé pour l'huile de coton, à cause du goût donné au tourteau. De plus, sa volatilité pose des problèmes au regard de la récupération
- **les alcools** (éthanol et alcool isopropylique) semblent prometteurs, mais demandent de l'énergie pour être évaporés ;
- **le dioxyde de carbone CO₂ supercritique** : dans certaines conditions de température et de pression se comporte comme un solvant. Cette technique, utilisée dans l'industrie agroalimentaire, présente de nombreux intérêts : travail à une température modérée, obtention d'extraits exempts de tous résidus de solvant d'extraction. Il est peu utilisé en raison du coût du procédé.

A l'échelle industrielle, seul l'hexane est actuellement utilisé, car il offre le meilleur compromis entre volatilité (émissions de composés volatils toxiques, COV) et quantité de chaleur à fournir pour distiller. Cependant, il est hautement inflammable et toxique pour l'homme. Son utilisation doit faire l'objet de précautions particulières : travail en système fermé, pas de flamme près du système d'extraction.

Selon Adriaans *et al.* (2006), les techniques d'extraction à l'éthanol, l'alcool isopropylique et l'extraction aqueuse semblent prometteuses pour l'application dans les pays en voie de développement. Le CO₂ supercritique est également intéressant en raison de sa nature non toxique. L'utilisation commerciale de ces solvants nécessite cependant des travaux de recherche supplémentaires.

Extraction continue et discontinue

A l'échelle industrielle, l'extraction au solvant peut être réalisée en continu ou par lots (extraction discontinue). Adriaans (2006) a comparé les besoins et les ressources nécessaires pour chaque type d'extraction (tableau 18). La taille de l'activité détermine le choix du procédé :

- en dessous de 200 t/j de graines, le choix économique doit être fait entre l'extraction discontinue et le pressage. Compte tenu des risques de l'extraction au solvant, c'est l'extraction par presse qui est préférée pour les petites installations ;
- à partir de 200 t/j, l'extraction continue par solvant est le seul système rentable.

Ressources par tonne de graines traitées	Extraction discontinue	Extraction continue
Vapeur (kg)	700	280
Electricité (kWh)	45	55
Eau (m ³)	14	12
Solvant (kg)	5	4
Travail (personnes/heure)	0.8	0.5

Tableau 18 : estimation des besoins pour l'extraction d'huile végétale par solvant. Comparaison des procédés continus et discontinus (Adriaan, novembre 2006)

D'autres facteurs décisionnels sont aussi à prendre en compte :

- le site, par rapport à l'environnement : l'installation d'un système d'extraction par solvant est complexe, elle nécessite un emplacement particulier en raison du risque d'explosion (distance de sécurité par rapport aux habitations, etc.) ;
- le coût, par rapport à l'investissement : le coût de l'extraction au solvant est 2 fois plus élevé que celui de l'extraction par presse, mais le rendement en huile est plus élevé. Il faut faire le meilleur choix économique ;
- le personnel et la sécurité : la maintenance d'un système d'extraction au solvant demande moins de travail mais un savoir-faire plus spécifique que le pressage mécanique. Le personnel doit être strictement formé aux règles de sécurité.

Actuellement, il n'y a pas encore de besoins techniques de développer l'extraction chimique de graines de *Jatropha*, comme c'est le cas pour le tournesol ou le soja. Il n'y a pas de projets de capacité suffisante pour justifier de telles installations. D'autres facteurs limitent ce type d'application dans les pays en voie de développement : facteurs environnementaux (consommation d'énergie élevée, émission de composés volatils toxiques, eaux usées), facteurs sociaux (formation de personnel à l'utilisation de produits dangereux). Le développement de l'utilisation d'autres solvants moins dangereux que l'hexane, comme l'eau et le CO₂ supercritique lèverait probablement ces barrières mais nécessite des travaux de recherche supplémentaires.

IV.2 Propriétés physico-chimiques de l'huile de Jatropha

L'huile de Jatropha est jaune. Sa couleur vire au rougeâtre par chauffage ou exposition prolongée à l'air. Son odeur dépend du procédé d'extraction et de son âge, sa saveur est douceâtre et son goût se rapproche celui de l'huile de ricin.

IV.2.1. Historique

L'utilisation industrielle des graines de Jatropha a toujours été assez limitée. Cependant, dans les années 1930, les produits d'origine pétrolière ou de synthèse étant peu répandus, Droit et François (1932) avaient étudié les propriétés physico-chimiques appliquées de l'huile de Pourghère, résumées ci-après.

- Siccativité

L'huile ne possède pas de propriétés siccatives. Elle ne peut donc pas être utilisée seule dans les peintures. Elle a été utilisée en mélange avec de l'huile de tung (*Aleurites fordii*) pour l'entretien de matériels ferroviaires pendant la deuxième guerre mondiale. On fabriquait ainsi des vernis, des bâches, des linoléums et de l'encre d'imprimerie.

Des essais d'amélioration de la siccativité par mélange avec de l'huile d'abrasin (*Aleurite montana*) n'ont pas donné de résultats. Des essais de cuisson avec des composés organiques de manganèse et du plomb ont en revanche amélioré la siccativité. Ce résultat recoupait l'utilisation du Jatropha pour la préparation des laques qu'en faisaient les Chinois après y avoir ajouté de l'oxyde de fer.

- Lubrifiant

Contrairement à ce que certains documents prétendent, et à l'inverse de l'huile de ricin, l'huile de pourghère ne peut servir de lubrifiant car sa viscosité est trop faible et les risques de formation de résines trop importants du fait de sa forte teneur en acides gras non saturés.

- Carburant

Son intérêt comme carburant avait déjà été souligné et des essais avaient été réalisés dans les laboratoires de Ségou au Mali au début des années 1940 puis repris en 1949 dans les laboratoires du Centre d'étude technique de l'automobile et du cycle (Martin *et al.*, 1985).

D'autres pistes avaient été explorées, notamment la carbonisation et la pyrolyse (François, à Ségou). Les résultats suivants ont été obtenus pour 1 t de graines de Jatropha :

- Carburant raffiné (essence ou pétrole)	70 kg
- Gas-oil léger	40 kg
- Gas-oil lourd	40 kg
- Brai sec (servait comme colorant)	35 kg
- Semi-coque	270 kg
- Eau ammoniacale	200 kg
+ gaz, créosote, etc.	

Ces produits avaient un intérêt commercial certain à cette époque.

Type de carburant	Origine	Auteur	Densité	Viscosité (mm ² /s)	Température au point d'écoulement (°C)	Température au point de trouble (°C)	Température au point éclair (°C)	Pouvoir calorifique (MJ/kg)
Gazole		Vaitilingom 2007	0,830	6 (20 °C)	-18	-9	70	43,8
Coprah		Vaitilingom 2007	0,915	30 (20 °C)*	23-26	28	230	37,1
Palme		Vaitilingom 2007	0,915	60 (20 °C)*	23-40	31	280	36,9
Colza		Vaitilingom 2007	0,916	78 (20 °C)	-6	-4	285	37,4
Méthyl ester colza		Vaitilingom 2007	0,880	7 (20 °C)	-12	-4	183	37,7
Jatropha		Vaitilingom 2007	0,920	75 (20 °C)	-3	2	236	38,8
		Atchen et al .2007	0,914	46 (30 °C)	-3	2	235	39,6
	Afrique Ouest	Droit 1932	0,920				247	38,3
	Inde	Agarwal 2007	0,917	36 (40 °C)			229	39,1
	Nicaragua	Foidl 1996	0,920	54,8 (30 °C)			240	39,6
	Ghana	Forson 2004	0,918	36,9 (37,8 °C)			(99)**	42,1
	Brésil	Saturnino 2005	0,919	50,7 (31 °C)			240	39,6
	Mali	Liennard 1994	0,919	78 (20 °C)			236	39,4

* Presque solides à cette température

** Valeur abhérente, peut être erreur dans la conversion d'unité

Tableau 19 : propriétés physiques des huiles

IV.2.2. Propriétés physiques (tableau 19)

La densité de l'huile de Jatropha, de 0,920, est dans la moyenne des huiles végétales.

Principalement liée à la composition de l'huile en triglycérides et acides gras, la **viscosité**, de 45 en moyenne, est bien supérieure à celle du gazole, ce qui rend plus difficile l'utilisation de l'huile de Jatropha dans les moteurs à injection directe. Elle est mal adaptée à la lubrification, contrairement à ce qui est souvent annoncé.

Le point d'écoulement est la température à partir de laquelle le produit commence à s'écouler. On remarque que l'huile de Jatropha, avec une valeur de -3 °C, similaire à l'huile de colza, est bien placée. Son utilisation comme carburant en pays chaud ne doit pas poser de problème, par rapport à l'huile de palme ou de coprah que l'on doit impérativement réchauffer.

Le point éclair de l'huile de Jatropha est de 236°C. C'est la température à partir de laquelle se produit l'inflammation des vapeurs en présence d'une flamme. Bien au-dessus du gazole ou du méthyle ester de colza, le point éclair du Jatropha fait partie des plus faibles des huiles végétales.

Le pouvoir calorifique, (de 40 MJ/kg) est parmi les plus hauts des huiles végétales.

Ces caractéristiques physiques permettent d'envisager son utilisation comme huile carburant en climat chaud. Pendant la deuxième guerre mondiale, dans les anciennes colonies françaises, les responsables locaux en avaient déjà vu l'intérêt lors de pénurie de pétrole.

IV.2.3. Composition chimique (tableau 20)

Constituants principaux

D'une façon générale, les huiles végétales sont des mélanges complexes dont la composition varie avec la nature de l'huile. Elles sont constituées de 95 % de triglycérides (triesters des acides gras et du glycérol) mélangés à 5 % de constituants minoritaires (acides gras libres, stérols de cires et autres composants minoritaires). Elles peuvent être saturées, mono ou polyinsaturées. Elles se divisent en 4 grands groupes déterminés par leur indice d'iode (quantité d'iode fixée par 100 g du corps gras analysé). L'indice d'iode donne une image globale de l'insaturation de l'huile : plus une huile est insaturée, plus l'indice d'iode est élevé. L'huile de Jatropha a un indice d'iode autour de 100, ce qui la situe dans la moyenne des huiles, comme le colza (figure 10).

Les quatre groupes d'huile sont les suivants :

- huiles saturées, indice d'iode de 5 à 50
 - de type de elles contiennent principalement les acides lauriques en C12 et myristique en C14 (ex : huile de coprah)
 - de type palmitique en C16, généralement semi-concrète (ex : huile de palme)
 - de type stéarique en C18, généralement concrètes (huile de karité) ;
- huiles mono-insaturées de type oléique, indice d'iode de 50 à 100 (ex : huiles d'arachide, de colza, d'olive et de Jatropha) ;
- huiles di-insaturées de type linoléique, indice d'iode de 100 à 150. Elle sont liquides (ex : huiles de tournesol, de coton de soja) ;
- huiles tri-insaturées de type linoléique, indice diode > 150 (ex : huile de lin).

L'huile de Jatropha comprend autour de 80 % d'acides gras insaturés (acide oléique et acide linoléique en quantité voisine) et le reste en acides gras saturés (acide palmitique et stéarique). Cette forte proportion d'acides insaturés a tendance à la rendre instable et à faciliter oxydation et acidification (par comparaison, l'huile de colza, bien qu'ayant un indice d'iode équivalent, contient plus d'acides gras insaturés, plus de 90 %, et surtout près de 10 % d'acide linoléique tri-insaturé).

	Colza	Arachide	Palme	<i>Jatropha curcas</i>						
Origine				Brésil	Inde	Mexique	Thaïlande	Mali	Togo	Zaire
Auteurs	Vaitilingom 2007	Vaitilingom 2007	Vaitilingom 2007	Tapanes 2007	Nasirullah 1987	Kpoviessi 2004	Chedchant 2004	Liennard 1994	Kpoviessi 2004	Gaydou 1982
Saturés										
<i>Laurique C12:0</i>			0,1							
Myristique C14:0			1							ε
<i>Palmitique C16:0</i>	5	6-11	42-48	16 max	12-17	15,2	14,7	15,2	15	28,4
<i>Stéarique C18:0</i>	1-2	3-18	5-6	6-7	5-6	9,1	6,9	6,6	6	3,9
Arachdique C20:0	0,5	2-4	0,3					0,2		
Behénique C22:0	0,2	ε-3								
Monoinsaturés										
Palmitoléique C16:1	0,2	0,2-0,6	0,2	1-3,5			0,8			1,5
<i>Oléique C18:1</i>	58	45-65	36-45	42-43,5	37-63	37,6	42,6	44	44	35,7
Erucique C22:1		0,7						0,1		
Di-insaturés										
<i>Linoléique C18:2</i>	22	17-34	6-10	33-34,4	19-40	38	35,2	32,6	35	30,1
Tri-insaturés										
<i>Linoléénique C18:3</i>	8-10		0,2	>0,8				0,7		ε

Tableau 20 : propriétés chimiques des huiles

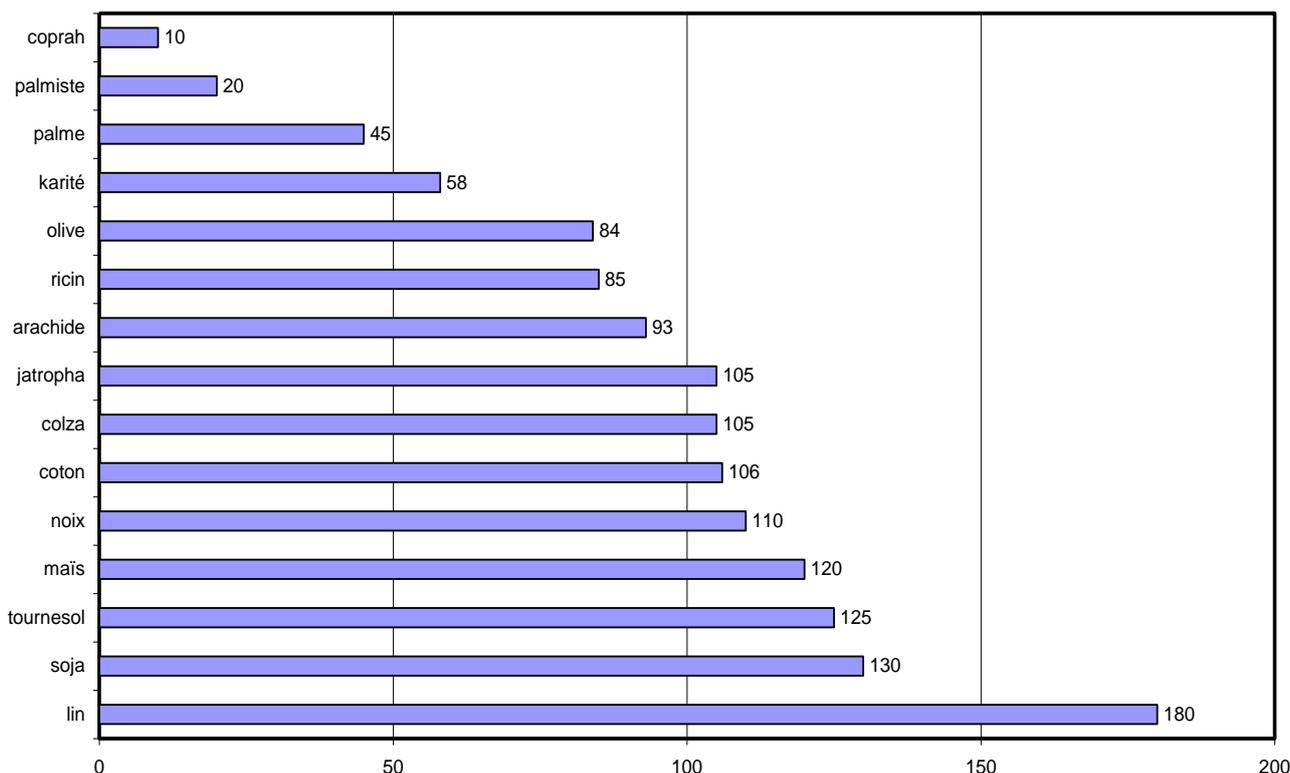


Figure 10 : indice d'iode de différentes huiles végétales

Constituants minoritaires (composés mineurs)

Les constituants minoritaires sont des produits issus de la dégradation des huiles et des constituants lipidiques des membranes.

- Les produits de dégradation sont des acides gras. Ils résultent de l'altération des triglycérides pendant le stockage des graines et des huiles brutes, qui libère des glycérides partiels. L'oxydation produit des composés volatiles (fonctions aldéhydes et cétoniques) et des acides oxydés. Ces produits peuvent influencer sur la qualité de l'huile en tant que carburant (voir plus loin).

- Les constituants des membranes sont de quatre types :

- les phospholipides, composés polaires naturellement présents dans les huiles brutes ;
- les cériques, esters d'acides gras, principalement des cires ;
- l'insaponifiable, constituants qui, après saponification de l'huile, sont très peu solubles dans l'eau ;
- les chlorophylles et leurs dérivés.

Evaluation de la qualité chimique des huiles

La mesure de l'acidité est l'un des principaux moyens pour évaluer l'altération d'une huile. La teneur en acides gras libres s'exprime par l'acidité, qui est le pourcentage d'acides gras libres exprimé selon la nature de l'huile en acide oléique, acide palmitique ou de, et par l'indice d'acide, qui est la quantité de potasse (mg) pour neutraliser l'acidité d'un gramme de produit. Plus l'indice d'acide est élevé, plus l'huile est altérée.

L'indice de peroxyde IP permet d'apprécier les premières étapes de détérioration oxydative d'un corps gras. Il est donné en milligrammes de peroxyde actif contenu dans 1 gramme du produit ou en milliequivalent par kilogramme. Plus il est élevé, plus le produit est oxydé. En produits alimentaires, en dessous de 10 meq/kg, le produit n'est pas considéré comme altéré par oxydation (Abulude *et al.*, 2007).

Source	Acidité (% d'acide oléique)	Origine	Age des graines/ conditions de stockage/ caractéristiques	Age de l'huile/ conditions d'extraction et de stockage
Abulude et al, 2007	1.75	Nigeria	Graines décortiquées et séchées 24 heures avant extraction	Extraction au Soxhlet Valeur initiale (Octobre 2005)
	4.47			Après 5 mois de stockage dans un container en Poly éthylène à conditions ambiantes (29.2 < T° < 32°C)
	3.37			Après 5 mois de stockage dans une bouteille de verre à conditions ambiantes (29.2 < T° < 32°C)
	5.42			Après 5 mois de stockage dans un réceptacle métallique (29.2 < T° < 32°C)
	3.36			Après 5 mois de stockage dans une bouteille plastique à conditions ambiantes (29.2 < T° < 32°C)
Akintayo, 2004	1.76	Nigeria, Ado-Ekiti	Âge et conditions de stockage inconnus	Extraction Soxhlet Analyse de l'huile immédiate après extraction
Kpoviessia et Al 2004	0.9-1.25	Benin	Graines séchées et décortiquées après la récolte	Extraction au Soxhlet (hexane)
Foidl, 1996	0.29-0.40	Cap Vert	Graines pressées juste après récolte. AG majoritaire : acide oléique (44.7%)	Presse à vis Montfort et Reiners (KOMET). Détermination de la composition en acides gras par chromatographie
	0.60-1.27	Nicaragua	Graines pressées juste après récolte. AG majoritaire : acide linoléique (43.2%)	
P.Beerens 2007	1.73	Nord Tanzanie	Humidité graines 2.14%.	
	1.55	Nord Tanzanie	Humidité graines 6.7%	
	12.9	Nord Tanzanie	Humidité graines 13.3%	
Gilles Vaitilingom, 2008	12.51	Mali		Pressage selon process industriel Huile stockée dans bidons opaques, fermés hermétiquement, et conservés dans un local à température stable. Durée de stockage > 10 ans.
AgroGénération, 2008 Huile claire	0.86	Mali, région de Koulikoro	âge et condition de stockage inconnu	
AgroGénération, 2008 Huile foncée	7.4	Mali	Graines provenant du marché local, probablement récoltées par terre âge et conditions de stockage avant achat inconnus	Presse industrielle (Mécanique Moderne) Mise en bouteille plastique
M.Domergue Graines mission Mali, 2008	0.6	Mali	Graines récoltées sur fruits jaunes dans la parcelle « petit bassin » de Teriya Bugu. Conservation de 10 jours en sac	Extraction Soxhlet (éther de pétrole) Analyse de l'huile immédiate après extraction
M.Domergue graines fournies par AgroGénération, 2008	1.05	Inde	Graines d'âge estimé > 2 ans, ramenées par AgroGénération	Extraction Soxhlet (éther de pétrole) Analyse de l'huile immédiate après extraction

Tableau 21 : comparatif des analyses d'acidité d'huile de Jatropha de différentes provenances

Acidité de l'huile de *Jatropha* (tableau 21)

La teneur en acides gras libres s'exprime de 2 façons:

- **L'acidité** qui est le pourcentage d'acides gras libres exprimé selon la nature de l'huile en acide oléique, acide palmitique ou de
- **L'indice d'acide** qui est le nombre de milligrammes de potasse nécessaires pour neutraliser l'acidité d'un gramme de produit.

Plus il est élevé, plus l'huile est altérée. L'acidification est facilitée par la présence d'eau et une exposition aux UV, des températures élevées et le contact avec des substances oxydantes comme des métaux. Peu de travaux ont été faits sur le vieillissement de l'huile de *Jatropha*. Ubulude (2007) a suivi l'évolution d'huile stockée dans des récipients de différente nature dans les conditions ambiantes, mais pendant 6 mois seulement. Il a observé cependant une dégradation générale de l'huile surtout quand elle est stockée dans un récipient métallique.

Selon Shah et al. (2006), l'acidité de l'huile de *Jatropha* inférieure à 1 à la récolte peut atteindre 12% au bout de 2 ans de stockage, et même plus quand l'huile a été stockée dans de mauvaises conditions pendant longtemps (Berchmans et al 2007).

Par ailleurs, l'indice d'acide de l'huile tend à augmenter avec l'humidité de la graine (Bereens, 2007).

Les valeurs en gras dans le tableau 21 sont celles obtenues sur une huile qui n'a pas subi de stockage, et provenant de graines pressées (ou extraites) immédiatement après récolte. Ces valeurs donnent un ordre d'idée de l'acidité naturelle de l'huile de *Jatropha*, qui est comprise entre 0.29 et 1.75% ou entre 0.58 et 3.5 mg de KOH/g, en indice d'acide.

IV.3. Utilisation de l'huile de *Jatropha* en tant que carburant

IV.3.1. L'utilisation de l'huile pure (tableau 22)

D'une façon générale, les huiles végétales sont de bons carburants pour les moteurs diesel, comme l'avait affirmé au début du 20^e siècle Rudolf Diesel, inventeur du moteur qui porte son nom et conçu pour fonctionner avec des huiles végétales. La viscosité importante et les mauvaises propriétés d'écoulement à froid des huiles végétales cantonnent cependant leur utilisation aux climats chauds sinon, en climat tempéré à froid, il faut un dispositif de réchauffement adapté.

L'aptitude à l'auto-inflammation est un aspect à prendre en compte dans l'évaluation d'un carburant. Elle engendre un délai d'inflammation plus ou moins long du carburant injecté dont il faut tenir compte dans le réglage des moteurs. Cette aptitude peut être représentée par l'indice de cétane (plus il est élevé, plus le délai sera court). Celui du gazole est de 50, celui des huiles varie entre 30 et 50, celui du *Jatropha* est de 40. Des travaux ont également montré la forte corrélation entre le pourcentage d'acides gras saturés et le faible délai d'inflammation (Vaitilingom, 2007). Le point éclair des huiles végétales est élevé. Celui de l'huile de *Jatropha*, bien que parmi les plus bas des huiles végétales, induit des difficultés pour sa vaporisation et implique un environnement chaud, supérieur à 500 °C, au niveau de la chambre de combustion, sous peine de provoquer des dépôts importants.

Plus l'huile est saturée, plus elle est apte à être un bon carburant (indice d'iode faible). Mais les huiles saturées présentent des températures de solidification élevées et posent des problèmes pratiques d'utilisation. Pour une utilisation plus aisée, il faudra donc une proportion d'huiles insaturées. Mais une mauvaise stabilité à l'oxydation entraîne une détérioration de la qualité, tant des huiles que de leurs esters (Knothe 2004).

En prenant en compte ces contraintes, Vaitilingom (2007) a imaginé la composition d'une huile végétale idéale pour être utilisée comme carburant diesel (ou sous forme de biodiesel) (tableau 23). On remarque de l'huile de *Jatropha* est plus proche de huile idéale que l'huile de colza (qui a trop d'acides insaturés).

Type de carburant	Origine	Auteur	Résidu carbone (%)	Viscosité (mm ² /s)	Indice de cétane	Indice d'iode	Point éclair (°C)	Pouvoir calorifique (MJ/kg)
Gazole		Vaitilingom 2007	0,01	6	50		70	43,8
Arachide		Vaililingom 2207	0,50	85	30	93	258	39,33
Coprah		Vaitilingom 2007		30	43	10	230	37,1
Palme		Vaitilingom 2007	0,42	60	39	45	280	36,9
Colza		Vaitilingom 2007	0,50	78	29	105	285	37,4
Méthyl ester colza		Vaitilingom 2007	0,66	7	49		183	41
Jatropha		Vaitilingom 2007	0,42	55 (20 °C)	32	105	236	38,8
		Atchen et al. 2007	0,38	46 (30 °C)	46	101	235	39,6
	Afrique de l'Ouest	Droit 1932	0,46			98	247	38,3
	Inde	Agarwal 2007	0,8	36 (40 °C)			229	39,1
	Nicaragua	Foidl 1996		52 (30 °C)		101	240	39,6
	Ghana	Forson 2004		36,9 (37,8 °C)			(99)*	42,1
	Brésil	Saturnino 2005		50,7 (31 °C)			240	39,6
	Mali	Liennard 1994	0,47	78 (20 °C)	39	96	236	39,4

* Valeur abhérente, peut être erreur dans la conversion d'unité

Tableau 22 : propriétés des huiles carburant

Huile	C6:0-C16:0 (%)	C18:0-C24:0 (%)	C16:1-C24:1 (%)	C18:2 (%)	C18:3 (%)
Huile idéale	28	2	50	20	
Jatropha	16	6	37	40	
Colza	5	2	59	22	10

Tableau 23 : Composition en acides gras d'une huile végétale optimale pour un carburant diesel, par rapport aux huiles de colza et de Jatropha (d'après Vaitilingom 2007)

L'influence des composés minoritaires a aussi été évaluée : la présence d'acides gras libres, de diglycérides et de phospholipides a plutôt un effet positif sur la qualité du carburant. Cela peut être différent si l'huile doit être estérifiée. Les éléments issus des membranes ont tendance à provoquer un charbonnement dans les chambres de combustion.

Vaitilingom (2007) a montré qu'on pouvait utiliser les huiles végétales pures dans les moteurs diesel moyennant quelques précautions. Pour favoriser la qualité de l'huile, il faut privilégier une extraction à basse température afin de limiter la libération des phospholipides ou des cires, facteurs d'encrassement des moteurs. Elles doivent ainsi respecter les exigences suivantes, après décantation puis filtration :

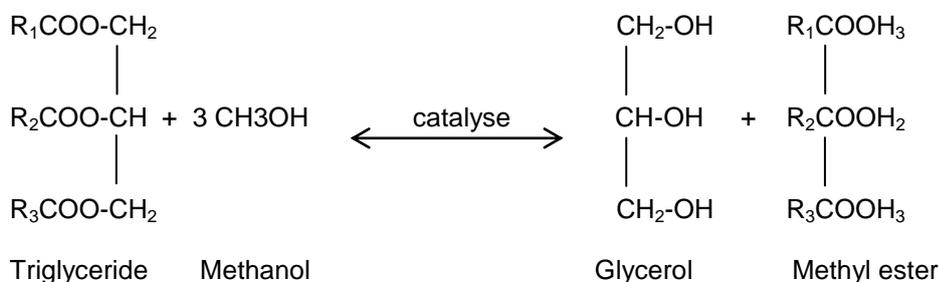
- peu de matières solubles, moins de 500 ppm après filtration à 10 µm ;
- teneur en phosphore < 50 ppm ;
- teneur en cires < 500 ppm.

Les moteurs à injection indirecte sont adaptés à l'utilisation d'huiles végétales pures comme carburant. Pour les moteurs à injection directe, mal adaptés à l'usage d'huiles pures comme carburant, l'utilisation de piston avec chambre spéciale en acier s'est révélée très efficace. Une autre voie est celle de l'adoption d'un circuit d'alimentation en bicarburant, gazole et huile. Un kit régule l'admission de l'huile carburant en fonction de la température des gaz d'échappement pour prévenir le dépôt de matières charbonneuses.

IV.3.2. Le biodiesel de Jatropha

(Voir annexe 3 : Norme Européenne EN 14214 / Biodiesel)

L'utilisation des huiles végétales pures comme carburants de substitution au gazole n'est pas toujours possible et dépend du type d'huile et de l'environnement d'utilisation. Pour contourner ces difficultés, un procédé a été mis au point : l'huile est transformée pour obtenir un produit plus proche du gazole et utilisable sans modification des moteurs. Il s'agit de la transestérification de l'huile par un alcool, on parle aussi d'alkoolyse. Le produit obtenu est un ester. Ce procédé permet de réduire la masse moléculaire à environ 1/3 de celle de l'huile, ainsi que la viscosité et la densité. Actuellement, l'alcool le plus utilisé dans cette transestérification est le méthanol, le procédé avec l'éthanol pourtant plus facilement disponible, n'étant pas entièrement maîtrisé du point de vue industriel. C'est une réaction réversible, catalysée par une base ou un acide. Pour rendre la réaction complète on utilise un excès d'alcool qui sert souvent de solvant. L'équation avec le méthanol est la suivante :



Le tableau 24 présente quelques propriétés du méthyl ester de Jatropha. On remarque que la plupart de leurs valeurs sont homogènes sauf pour celle du point éclair (?). La différence importante avec l'ester de colza est le point de trouble, qui est plus bas. Cet ester est donc mieux adapté à des utilisations dans les pays avec des hivers rigoureux.

Estérification en présence d'un catalyseur basique ou acide

La transestérification catalysée par une base (soude, potasse) est la plus courante parce que plus rapide. C'est le procédé le plus utilisé dans tous les pays produisant du biodiesel (USA, Brésil, pays européens). Le temps d'estérification est de 1 à 2 heures alors qu'avec des catalyseurs acides, l'estérification prend plus de 10 heures (Sivaprakasam *et al.*, 2007). La transestérification catalysée par une base a cependant des désavantages : elle nécessite un taux faible d'acides gras libres (inférieur à 3 % d'après Meher *et al.*, 2004, voire 1 % d'après Berchmans *et al.*, 2007) et l'utilisation d'alcool anhydre à cause des risques de saponification. La formation de savon diminue la production d'esters, gêne la séparation et la purification de l'ester et du glycérol et l'étape de lavage du produit final.

Sivaprakasam *et al.* (2007) ont étudié en laboratoire la transestérification de l'huile de *Jatropha* contenant peu d'acides gras libres. Le rendement optimal de la réaction a été de 91 %. Il a été obtenu en 1 heure à la température de 70 °C avec 500 ml d'huile, 90 ml de méthanol et 8 g d'hydroxyde de potassium pour obtenir 455 ml d'ester à 4,06 cSt de viscosité.

Dans le cas de présence d'acide gras libre en trop grande quantité, le procédé est plus complexe. Berchmans *et al.* (2007) ont étudié la transestérification d'huile de *Jatropha* contenant 15 % d'acide gras libres en testant 2 procédés, en une étape avec un catalyseur basique, ou en deux étapes avec un catalyseur acide puis basique.

Méthyl ester	Auteur	Densité	Viscosité	Indice cétane	Point de trouble	Point éclair	PCI
MEC ¹	Vaitilingom 2007	0,880	7 (20°)	52	-4°	183	41
MEJ ²	Foidl 1996	0,879	5,8 (30°)	51		191	
MEJ ²	Tiwari 2007	0,880	4,8 (15°)		2°	135	40
MEJ ²	Sarin 2007		4,4 (40°)	57	3°	163	
MEJ ²	Kaul 2007	0,879	4,3 (40°)	58	4°	135	
Gazole	Vaitilingom 2007	0.880	6 (20°)	50	-9°	93	44

1 : Méthyl Ester de colza

2 : Méthyl Ester de *Jatropha*

Tableau 24 : propriétés des méthyl esters de *Jatropha*, par rapport à celles du colza et du gazole

L'estérification en une étape est optimale pour 3,3 % de catalyseur basique et 70 % de méthanol en poids (température 65 °C, temps de réaction 2 heures), avec un rendement de 55 % de méthyl ester.

L'estérification en deux étapes consiste en une première estérification acide pour convertir les acides gras libres en méthyl esters avec un catalyseur acide (acide sulfurique). La réaction est effectuée à 50 °C pendant une heure avec une proportion de 60 % de méthanol par rapport à l'huile et une concentration de 1 % du catalyseur. Le produit obtenu contient moins de 1 % d'acides gras libres. Avec une proportion de 40 % de méthanol, le taux des acides gras se situe à 3 %. La deuxième étape est plus classique et arrive à un rendement de 90 % avec un traitement à 55 °C pendant 2 heures pour 24 % en poids de l'huile pour le méthanol, et 1,4 % pour le catalyseur.

Chitra *et al.* (2005) ont effectué sur un pilote une transestérification avec de l'huile de *jatropha* contenant 3 % d'acides gras libres. Ils ont obtenu un rendement de 96 % avec 20 % en poids de l'huile pour le méthanol et 1 % pour le catalyseur. La réaction a duré 90 minutes à la température de 60 °C.

Autres procédés de transestérification

Transestérification par catalyse basique solide

Ce procédé a fait l'objet de test de laboratoire par l'équipe Zhu *et al.* en 2006. Il consiste à ajouter du méthanol, en proportion molaire de 9:1, dans un le mélange huile de jatropha - oxyde de calcium (1,5 % en poids de l'huile) chauffé à 70 °C. La réaction dure 2,5 heures pour atteindre un rendement de 93 %. Le catalyseur est séparé par centrifugation. Le point délicat du procédé semble la qualité de l'oxyde de calcium qui influe fortement sur le rendement de la réaction.

Transestérification par alcool supercritique

Comme pour le précédent, celui-ci n'a fait l'objet que d'études de laboratoire (Rathore *et al.*, 2007). Les rendements obtenus approchent 100 % à 400 °C à la pression de 200 bars et avec une proportion molaire de méthanol de 50:1 et d'éthanol de 5:1.

Transestérification enzymatique

La transestérification de l'huile a été réalisée en présence d'une lipase d'origine commerciale : la lipase extraite de *Pseudomonas cepacia* sur différents supports (Shah *et al.*, 2007). Le meilleur rendement, de 98 %, a été obtenu en 8 heures à 50 °C en présence de 4-5 % d'eau. Le procédé a l'avantage de fonctionner avec l'alcool éthylique du commerce (hydraté) et de ne pas être affecté par le taux d'acides gras libres. De plus la lipase peut être utilisée plusieurs fois de suite. Compte tenu de sa rusticité, c'est un procédé qui peut avoir un avenir certain.

IV.4. L'utilisation d'huile en savonnerie

Les îles du Cap Vert ont produit longtemps de l'huile de Jatropha qui était envoyée en Europe pour être utilisée dans la savonnerie. En 1930, près de 3000 t d'huile ont ainsi été exportées. Certaines colonies françaises ont aussi produit de l'huile de Jatropha qui était utilisée dans le savon de Marseille (Cunha da Silveira, 1934).

L'utilisation de cette huile dans la fabrication traditionnelle du savon était répandue. La solution alcaline utilisée est issue de cendres végétales qui contiennent du carbonate de potassium (tronc de bananier) qui peut être utilisé tel quel (mais donne une solution basique faible), ou transformé en potasse avec de la chaux (et donne alors une solution forte). Le savon obtenu est mou, à cause des acides gras insaturés, et rancit facilement.

Mais l'huile de Jatropha seule est mal adaptée à la production de savon pour les raisons suivantes (Cossel *et al.*, 1982) :

- la dureté du savon est insuffisante ;
- des phénomènes d'oxydation secondaire peuvent se produire ;
- le stockage est hypothétique ;
- les propriétés lessivantes sont insuffisantes.

C'est pour ces raisons que si l'on veut dépasser le stade artisanal de production de savon, il faut limiter à 30 % la proportion d'huile de Jatropha dans le produit initial. Les corps gras complémentaires sont généralement l'huile de coco ou le suif.

En 1952, Vyas a décrit les étapes de la fabrication de savon à base d'huile de Jatropha et de coco par la méthode dite « à froid » avec un excès de solution alcaline. Le niveau de saponification dépassait 90 % pour les 2 huiles utilisées.

Tata Oil Mill Co. Ltd a testé l'utilisation d'huile de Jatropha hydrogénée (75 %) avec 15 % d'huile de Jatropha purifiée, et 10 % d'huile de coco pour réaliser un savon dont les propriétés étaient équivalentes à celles d'un savon courant. Ceci dit, le coût du procédé supplémentaire d'hydrogénation de l'huile rendait la méthode non concurrentielle.

Cependant, aujourd'hui, la connaissance de la présence de produits toxiques contenus dans l'huile de Pourghère entraîne une désaffection de la part des fabricants de savons pour ce type d'huile. Il y a de

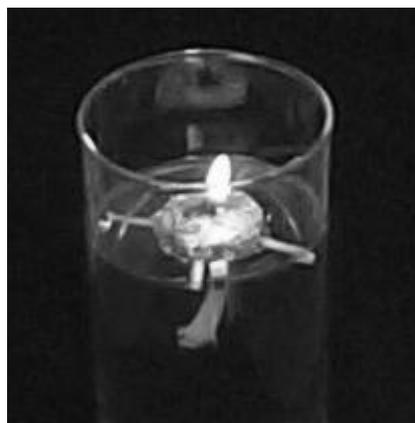
grandes chances pour qu'en dehors de son utilisation locale, cette huile ne soit plus utilisée en savonnerie avant qu'un procédé rentable de détoxification ne soit mis au point.

IV.5. Eclairage avec de l'huile de *Jatropha*

L'éclairage est un service de première nécessité en milieu rural et le pétrole n'étant pas toujours disponible, l'huile de *Jatropha* trouve également une utilisation comme pétrole lampant. Ainsi, deux types de lampes à huile de *Jatropha* ont été développés (Henning, 2005), comme l'illustrent les photos 12 :

- La lampe à pétrole « modifiée »: le mécanisme pour déplacer la mèche est monté à l'envers pour réduire la distance qui sépare l'huile et la flamme ;

- Le "Binga-Oil-Lamp", conception simple développée par l'ONG Binga Trees Trust au Zimbabwe, fabriquée à partir d'un verre rempli d'huile, au centre duquel un bouchon est placé, à l'aide d'allumettes ou d'épingles, avec une mèche en coton fixée au centre. La flamme obtenue, 1 ou 2 mm au-dessus de la surface d'huile, donne une lumière régulière. Il semble que l'odeur émise par cette lampe éloigne les moustiques.



Photos 12 et 13 : lampe à pétrole modifiée pour utilisation avec de l'huile de *Jatropha* et « Binga-Oil-Lamp » développée par Binga Trees Trust (Henning, 2006)

La connaissance et l'utilisation traditionnelle de l'huile de *Jatropha* comme pétrole lampant est variable selon les régions. A Madagascar, Sahler (2004) rapporte que les villageois de Mahazava-Ambalalova ont déjà utilisé le *Jatropha* à la place du pétrole dans les « lampes madco » traditionnelles. D'après eux, l'huile brûle sans odeur ni fumée, mais la consommation est trois fois celle du pétrole, et finalement les villageois ont préféré en rester au pétrole pour ce type de lampe. L'huile de *Jatropha* est par contre utilisée dans de rudimentaires lampes à huile : sur un support en métal, un petit bout de tissu imprégné d'huile sert de mèche. À Ambatovaky, les gens ne savent pas extraire l'huile des graines de *Jatropha*. Ils ont par contre l'habitude d'utiliser directement les graines pour s'éclairer, en les piquant sur une petite pique en bois et en y mettant le feu, ce qui permettrait d'après eux de s'éclairer un bon moment.

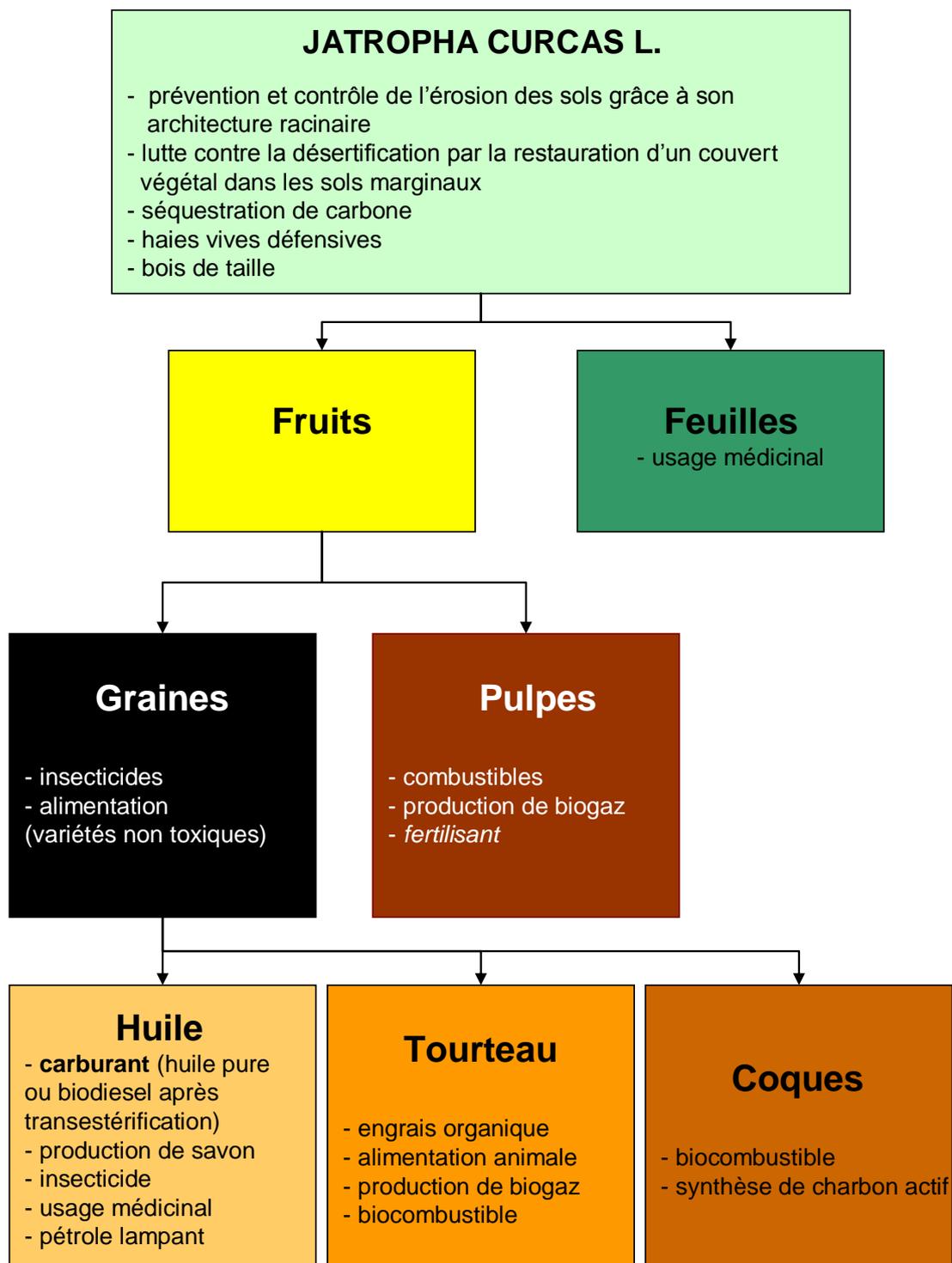


Figure 11 : possibilités d'exploitation de la plante *Jatropha curcas L.* et de ses produits

PARTIE V – Valorisation des coproduits de la récolte

V.1. Introduction

En dehors de son usage en pharmacopée traditionnelle, le *Jatropha* a toujours été utilisé pour la réalisation de haies vives afin de délimiter des parcelles. L'huile est extraite des graines récoltées par des procédés simples, consistant à faire bouillir les amandes dans de l'eau : l'huile surnageant dans le récipient est alors facile à récupérer. Cette huile a des usages médicaux mais elle est surtout utilisée pour faire du savon ou pour l'éclairage en remplacement du pétrole, dont l'odeur est désagréable.

Aujourd'hui, avec l'intérêt porté à cette plante, l'huile est devenue la production prioritaire et les autres utilisations du *Jatropha* sont passées au second plan. La valorisation de la plante est désormais principalement celle du fruit avec ses graines et celle de ses coproduits :

- la pulpe humide ou sèche (en fonction du type de récolte) ;
- le tourteau avec ou sans les coques, obtenu après le pressage des graines pour en extraire l'huile ;
- éventuellement, les coques seules en cas de décortiquage des graines avant pressage.

La récolte des fruits frais a été une pratique du projet Tempate au Nicaragua. L'objectif était d'obtenir des graines de bonne qualité en évitant de les laisser tomber au sol. Ce type de récolte nécessitait des interventions supplémentaires telles que le dépulpage en frais et le séchage des graines. Traditionnellement, les fruits se récoltent plutôt en sec, l'extraction des graines se faisant facilement à la main ou par simple battage. Il semble que les différents écotypes n'aient pas tous le même comportement quand à la chute ou à la déhiscence des fruits secs et que certains fruits restent accrochés à l'arbre.

Le mode d'extraction de l'huile a une incidence sur sa qualité et celle du tourteau. En mode artisanal, la graine est décortiquée avant d'être pressée. Le tourteau obtenu est de meilleure qualité nutritionnelle puisqu'il ne contient pas de coques. Le rendement à l'extraction reste cependant faible. En mode industriel, la graine est prétraitée (broyage, aplatissage...) avant pressage mais généralement, elle n'est pas décortiquée. La qualité du tourteau est alors moindre mais l'extraction est meilleure. Le principal défaut du tourteau de *Jatropha* est de ne pas être valorisable en alimentation animale, bien que des essais de détoxification aient été menés depuis longtemps. Aussi, d'autres destinations ont été étudiées telles que la fertilisation, la combustion, la fermentation...

Enfin, devant l'utilisation très diversifiée de toutes les parties de la plante en médecine traditionnelle, les scientifiques se sont penchés sur les constituants de la plante pour en évaluer les effets et essayer d'en extraire les principes actifs. A côté de leurs intérêts biocides, la mise en évidence de la présence de produits prometteurs pour lutter contre les cellules cancéreuses reste l'information majeure à retenir.

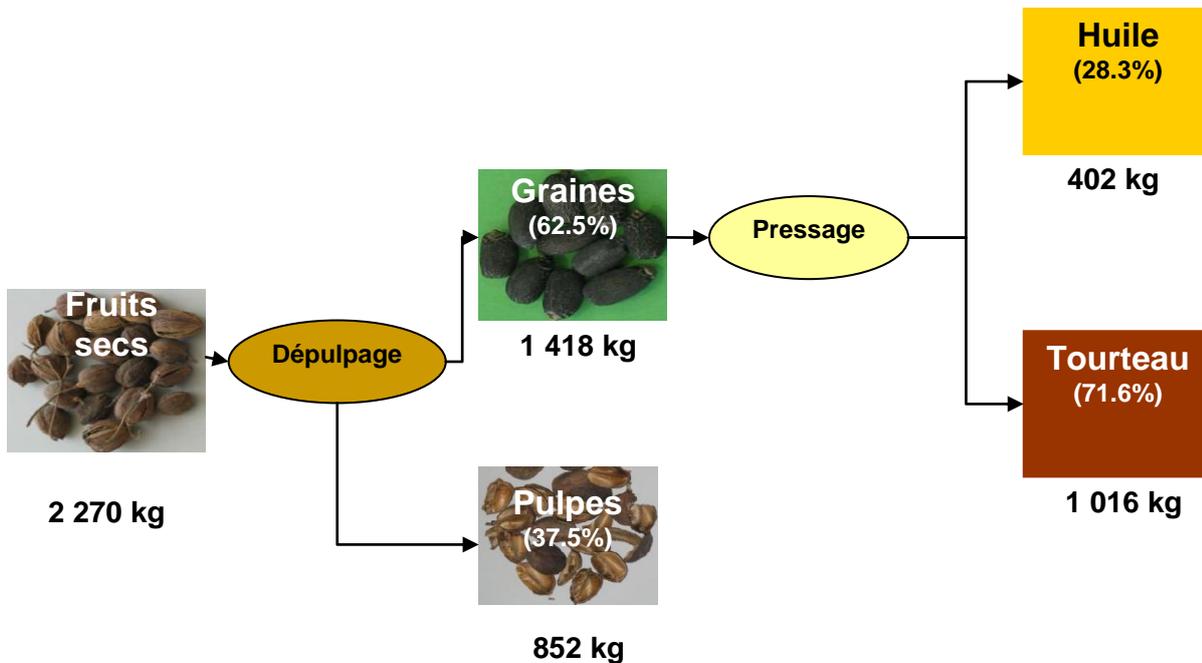


Figure 12 : répartition des masses (en matière sèche) des différents produits obtenus pour 1 ha de culture de Jatropha, dans un scénario d'exploitation actuel, pour les conditions pédo-climatiques de la zone de Bhavnagar, en Inde *moyenne obtenue sur 20 ans en considérant la pleine production obtenue dès la 5^e année (source IFEU 2007)
 Note : selon Cuhna Da Silveira (1934, Cap Vert), les graines représentent 53 à 62 % du poids du fruit sec.

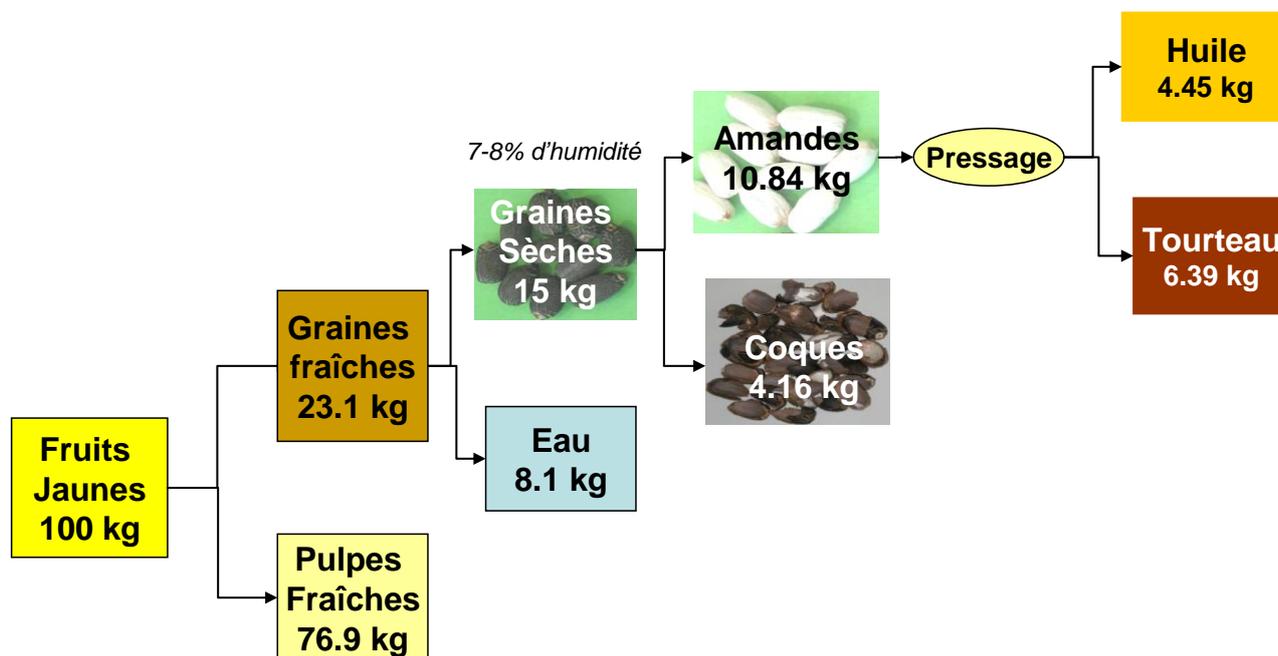


Figure 13 : répartition des masses en matière fraîche des différents produits obtenus pour 100 kg de fruits frais Jatropha (source : Proyecto Biomasa, 1999)
 Source : projet Tempate Nicaragua (1999)

V.2. Les composés toxiques de la graine de *Jatropha*

Les aspects médicaux de la graine sont probablement liés aux composants toxiques qu'elle contient. Ces derniers se situent surtout dans l'amande et on les retrouve en quantité variable dans l'huile et les tourteaux.

- **La curcine** : lectine et plus précisément toxalbumine, proche de la ricine du ricin. Cette lectine inhibe la synthèse de la protéine ribosomale, entraînant la mort rapide à faible dose. La curcine est considérée comme moins toxique que la ricine et l'abrine, autres lectines très connues (Mourgue *et al.*, 1961).
- **Les ester de phorbol** : puissants co-carcinogènes ou promoteurs tumoraux, activant l'explosion respiratoire des phagocytes professionnels par la stimulation irréversible de la protéine kinase C, impliquée dans le signal de transduction et le processus de développement de la plupart des cellules et tissus (Adolf *et al.*, 1984 ; Hirota *et al.*, 1988). Ils sont à l'origine de nombreuses tumeurs de l'épiderme. A côté du DDHP (diterpénoïde-désoxy-hydroxy-phorbol), ester le plus important, trois autres esters de phorbol sont aussi présents dans la graine.
- **Le phytate** : substance de réserve de phosphore que l'on trouve dans les graines des végétaux et dans bon nombre de racines et tubercules (Dipak *et al.*, 1986). L'acide phytique a la capacité de lier le calcium, le zinc, le fer et d'autres minéraux et réduit leur assimilabilité dans l'organisme (Davis *et al.*, 1979 ; O'Dell *et al.*, 1960). En outre, la formation complexe de l'acide phytique avec des protéines peut inhiber la digestion enzymatique de la protéine (Singh *et al.*, 1982).
- **Les inhibiteurs de trypsine** : facteurs antinutritionnels qui interfèrent avec le processus de digestion physiologique et le fonctionnement des enzymes protéolytiques du pancréas, chez les non ruminants (White *et al.*, 1989) Il est possible que les effets antinutritionnels des inhibiteurs de trypsine soient dus à leur interaction directe avec les enzymes pancréatiques et provoquent une diminution de la digestibilité des protéines (Hajos *et al.*, 1995). Les aliments contenant de fortes quantités d'inhibiteurs de trypsine (comme le soja cru) sont considérés comme ayant une faible valeur nutritionnelle pour les non ruminants. Les inhibiteurs de protéases n'affectent pas la fermentation microbienne du rumen, bien qu'une fraction considérable de l'inhibiteur de protéase peut passer à travers le rumen pour exercer ses effets néfastes sur l'animal hôte (Susmel *et al.*, 1995). Les inhibiteurs de trypsine sont thermolabiles et peuvent être partiellement voire totalement dénaturés après exposition à des températures élevées.
- **Les saponines** : substances très communes dans les plantes médicinales. Elles se caractérisent par un radical glucidique (glucose, galactose) joint à un radical aglycone. Leur propriété physique principale est de réduire fortement la tension superficielle de l'eau. Toutes les saponines sont fortement moussantes et constituent d'excellents émulsifiants. Elles ont une autre propriété caractéristique : celle d'hémolyser les globules rouges (érythrocytes), ce qui explique l'effet toxique de certaines d'entre elles, qui les rend inconsommables. Les saponines irritent les muqueuses, causent un relâchement intestinal et augmentent les sécrétions muqueuses bronchiales.
- D'autres composés toxiques sont présents dans la graine, il s'agit de β -glucuronidase, de xanthine oxydase et de l'acide curcaniléique, un acide gras voisin de l'acide ricinoléique (substance purgative).

D'après Siegel (1893) et Cano Asselieh *et al.* (1989), la lectine curcine serait le principal composé responsable de la toxicité. Cette affirmation est nuancée par l'expérience d'Aregheore *et al.* (1998), qui ont comparé l'activité de la lectine pour des tourteaux d'une variété toxique (Cap Vert) et d'une variété non toxique (Mexique). La toxicité respective de ces tourteaux a préalablement été déterminée sur des rats et des poissons. Les auteurs de cette étude observent que l'activité de la lectine n'est pas différente entre les variétés toxiques et non toxiques, et suggèrent que la toxicité du tourteau de *Jatropha* ne peut pas être attribuée à la lectine seule, bien que sa présence aggrave la toxicité.

Origine	Protéine brute (% MS)	Lipides (% MS)	Fibres (% MS)	Cendres (% MS)	Capacité calorifique (MJ/kg)	Inhibiteur de trypsine (1)	Activité de lectine (2)	Saponines (%) (3)	Phytates (%) (4)	Esters de phorbol (mg/g) (5)
Cap Verde (Fogo)	25,6	55,5	4,7	3,4	30,7	27,3	0,85	1,82	7,2	1,5
Ghana (Nyankpala)	31,1	42,9	6,1	4,7	28,5	22,2	6,85	2,25	7,8	1,29
Birmanie (Sink Gaing)	29,6	50	5,7	3,9	29,9	25,3	0,85	2,04	7,5	0,87
Kenya (Kitui)	25	52,6	5,8	3,4	29,8	24,9	0,85	2,67	6,2	3,32
Nicaragua	25,6	56,8	3,5	3,6	30,5	21,1	2,88	2	10,1	2,70
Mexique (Papantla), variété dite non toxique	27,2	58,5	3,8	4,3	31,1	26,5	1,7	3,4	8,9	nd

Tableau 25 : propriétés physico-chimiques des amandes de *Jatropha* et mesures de quelques toxines de l'amande déshuilée (Extraits du tableau de Makkar *et al.*, 1997)

(1) Trypsine inhibée, mg/g MS

(2) Inverse de la quantité minimum de l'échantillon de l'essai produisant une agglutination (latex utilisé)

(3) En équivalent diosgénine

(4) En équivalent acide phytique

nd Non détecté

Makkar *et al.* (1997) ont comparé les caractéristiques physiques, le potentiel nutritif et les composés toxiques de graines de *Jatropha* provenant de différentes zones géographiques (tableau 25) (d'après Kakes, 1991, il existe une importante variation entre les composés toxiques et les nutriments des plantes, causée par les différences génétiques et l'environnement. La principale différence observée entre les variétés dites toxiques et non toxiques concerne les esters de phorbol, présents en concentration importante dans les variétés toxiques et absents pour les graines non toxiques. Les autres constituants toxiques sont présents de façon régulière dans toutes les variétés. L'inhibiteur de trypsine est, d'après Smith *et al.* (1980), d'un niveau élevé (entre 21 et 27 %), tout comme celui des phytates, entre 6 et 10 % — dans les tourteaux d'arachide ou de soja, ce niveau est de 1,5 %. L'effet toxique de ces substances à ce niveau de concentration n'est plus négligeable et vient conforter l'origine diversifiée de la toxicité de la graine de *Jatropha*.

V.3. Possibilités d'utilisation du tourteau de pressage

V.3.1. Valorisation en alimentation animale

Compte tenu de sa forte teneur en protéines (tableau 26), le tourteau pourrait être utilisé en alimentation animale, à condition de le débarrasser de ses substances toxiques (Makkar et Becker 1997). Plusieurs études ont mis en évidence la toxicité du tourteau lors de la consommation par les animaux (Adam, 1974 ; Ahmed et Adam, 1979a, b ; Liberalino *et al.*, 1988) y compris pour les poissons (Makkar et Becker, 1997).

Composition des tourteaux (% de MS)	Jatropha	Soja
Crude protein	61.2	45.7
Lipid	1.2	1.8
Ash	10.4	6.4
Neutral détergent fiber	8.1	17.2
Acid détergent fiber	6.8	12.2
Acide détergent lignin	0.3	0
Gross energy (MJ kg ⁻¹)	18.3	19.4

Tableau 26 : comparaison de la composition des tourteaux de jatropha et de soja
 Source : Makkar *et al.* *Food Chem.* 62, 207-215, 1998 (Nicaragua)

V.3.1.1. Valeur nutritive du tourteau de *Jatropha*

Les graines de la variété non toxique (provenance : Papantla au Mexique) ont une teneur en protéines, lipides, énergie de croissance comparable à celle des variétés toxiques (Cap Vert et Nicaragua – dont la toxicité é été observée par Becket et Makkar lors d'observations non publiées). Les compositions en acides aminés des tourteaux des variétés du Mexique, du Cap Vert et du Nicaragua sont également similaires, et les valeurs apportées en acides aminées – excepté pour la lysine – sont comparables avec celles des références données par la FAO. (tableau 27).

La valeur en protéines (63.8 %), énergie métabolisable (10.7 MJ/kg) et en matière organique digestible (77.3 %) du tourteau de la variété non toxique équivaut à celle des meilleurs tourteaux oléagineux (Makkar *et al.*, 1997). Ces résultats suggèrent que le tourteau de la variété mexicaine peut être une excellence source de protéines pour les animaux et l'huile extraite pourrait également être utilisée en consommation humaine. Pour la consommation humaine, des études plus poussées

doivent toutefois être menées compte tenu de traces d'ester de phorbol et d'autres facteurs antinutritionnels.

	Tourteau de jatropha Variété toxique	Tourteau de jatropha Variété non toxique	Tourteau de soja	Référence Protéines FAO
Méthionine	1.91	1.76	1.22	2.50
Cystine	2.24	1.58	1.70	
Valine	5.19	5.30	4.59	3.50
Isoleucine	4.53	4.85	4.62	2.80
Leucine	6.94	7.50	7.72	6.60
Phénylalanine	4.34	4.89	4.84	
Tyrosine	2.99	3.78	3.39	6.30
Histidine	3.30	3.08	2.50	1.90
Lysine	4.28	3.40	6.08	5.80
Arginine	11.8	12.9	7.13	
Threonine	3.96	3.59	3.76	3.40
Tryptophan	1.31		1.24	1.10

Tableau 27 : comparaison de la composition en acides amines essentiels (g/16gN) du tourteau de Jatropha, du tourteau de soja, et des références de la FAO (source : Makkar *et al.*, 2007)

V.3.1.2. Essais de détoxification

A - Effets des traitements thermiques sur les différences substances toxiques

Lectine : thermolabile

D'après d'Aregheore *et al.* (1998), l'inactivation de la lectine peut être obtenue par des traitements à la chaleur. Un traitement à la chaleur humide est plus efficace qu'un traitement à la chaleur sèche. La lectine des deux types de variétés a été complètement inactivée par un traitement à la chaleur humide : 66 % d'humidité, à 121 °C, pendant 30 minutes.

Inhibiteurs de trypsine : thermolabiles

L'expérience d'Aderibigbe *et al.* (1997) montre les inhibiteurs de trypsines sont plus facilement inactivés avec une chaleur humide qu'une chaleur sèche. Une combinaison de chaleur humide (67 % d'humidité, à 100 °C pendant 60 min) et de chaleur sèche (160 °C, 60 min) inactive complètement tous les inhibiteurs de trypsine du tourteau de Jatropha.

Saponines : non thermolabiles

Ces mêmes auteurs ont observés qu'aucun traitement thermique n'a pas eu d'effet sur la teneur en saponine du tourteau de Jatropha. Cependant, les variétés toxiques du Cap Vert et du Nicaragua contiennent respectivement 2.6 % et 2.0 % de saponines, ce qui est bien inférieur à la valeur de saponines contenue dans le tourteau de soja (4.7 %). Il a de plus été démontré que les saponines contenues dans le tourteau de soja sont relativement inoffensives pour la consommation animale, et non hémolytiques (Liener, 1979).

Phytates : non thermolabiles

Les phytates ne sont pas affectés par les traitements thermiques. Le niveau de phytates dans le tourteau de *Jatropha* est très élevé : (6,2 à 10,1 %), alors que dans les tourteaux de soja ou d'arachide, il est respectivement de 1,5 % et 1,4 % (Aderibidge *et al.*, 1997). Ce haut niveau de phytates diminue la disponibilité en minéraux (en particulier Ca^{++} et Fe^{++}) et est également impliqué dans la diminution de la digestibilité en protéines.

Bien que les phytates ne soient pas toxiques en tant que tels, leur niveau dans l'alimentation tant humaine qu'animale, doit être la plus faible possible. Si ce n'est pas le cas, il faut ajouter les nutriments contenant les éléments qui sont bloqués par la présence de ces phytates. C'est le cas avec l'utilisation des tourteaux de soja dans l'alimentation animale.

Ester de phorbol (principal composé responsables de la toxicité) : non thermolabiles

Leur concentration n'est pas réduite par un traitement thermique. Ils ne peuvent être réduits que par un traitement chimique.

B – Combinaison de traitements thermiques et chimiques et évaluation nutritionnelle préliminaire sur les rats

Aregheore *et al.* (2003) ont réalisé des combinaisons de traitements thermiques et chimiques pour détoxifier des tourteaux issus de graines de variétés du Cap Vert et du Nicaragua. La concentration en ester de phorbol a été réduite avec 2 traitements, sans incidence sur l'appétence de la nourriture pour les rats :

- traitement chimique au méthanol : 4 lavages avec du méthanol à 92 %, suivi d'un traitement thermique à 121°C pendant 30 min ;
- traitement chimique à l'hydroxyde de sodium (NaOH) + hypochlorite de sodium (NaOCl), suivi d'un traitement thermique à 121°C pendant 30 min.

Le traitement thermique puis chimique avec du méthanol à 92 % a réduit la teneur initiale d'ester de phorbol de 1.78 mg/g à un niveau tolérable de 0.09 mg/g. Le tourteau ainsi obtenu présente un taux de protéines pures de 68 %, qui est beaucoup plus élevé que le taux de protéines habituellement trouvé dans les autres tourteaux oléagineux (45.7 % pour le soja).

Le *Jatropha* pourrait ainsi se substituer aux tourteaux oléagineux conventionnels comme le tourteau de soja, très coûteux. Le traitement est prometteur, mais pour l'instant coûteux à mettre en œuvre. Il pourrait être envisagé à une petite échelle de production. Le prix peut être réduit si le méthanol est réutilisé.

C - Possibilités d'utilisation dans l'alimentation des ruminants (Aderibidge *et al.*, 1997)

Le tableau 28 présente une comparaison des valeurs nutritionnelles pour les ruminants et des composés toxiques de 2 tourteaux de *Jatropha* (variétés toxiques du Cap vert et du Nicaragua), partiellement dégraissés (extraction par presse) et complètement dégraissés (extraction par solvant), après différents traitements thermiques. Les tourteaux non traités à la chaleur sont pauvres en protéines dégradables dans le rumen, mais présentent une différence de dégradabilité des protéines dans le rumen (la variété du Cap Vert a une valeur supérieure à celle du Nicaragua). Les teneurs en inhibiteurs de trypsine et en phytates sont élevées pour le tourteau de *Jatropha*, comparé au tourteau de colza. Les traitements thermiques permettent d'inactiver les inhibiteurs de trypsine et d'augmenter la dégradabilité des protéines dans le rumen. La présence d'huile diminue toutefois l'effet de la chaleur sur cette dégradabilité.

Sur la base de ces résultats, les auteurs suggèrent 2 traitements efficaces pour la détoxification du tourteau de la variété du Cap Vert, partiellement dégraissé ou entièrement dégraissé, en vue de l'incorporer dans l'alimentation de ruminants :

- un traitement thermique humide à 67 % d'humidité à 100 °C pendant 60 min ;
- un traitement thermique humide à 80 % d'humidité à 130 °C pendant 30 min. Ce dernier est légèrement meilleur pour la variété Cap Vert dégraissé, car il augmente la dégradabilité des protéines dans le rumen, et diminue les inhibiteurs de trypsine.

Ces traitements diminuent les inhibiteurs de trypsines à des niveaux similaires à ceux retrouvés dans le tourteau de soja, couramment utilisé en alimentation animale sans effet nocif. **Cependant, il faut**

noter que les autres composants antinutritionnels (saponine, phytates) ne sont pas affectés par ces traitements thermiques. De plus, il n'y a pas d'essais de nutrition *in vivo* avec les tourteaux traités comme indiqué au dessus pour évaluer leur toxicité et leur valeur nutritive chez les ruminants.

Les traitements testés ici peuvent s'appliquer lors de procédés industriels. A noter que les coques et autres coproduits obtenus avec le tourteau peuvent être une source d'énergie combustible permettant de réduire le coût de ces traitements thermiques.

Origine de la variété, traitement	DOM	ME	IVDN	TIA	Saponine	Lectine	Phytate
Cap Vert partiellement dégraissé	72.7	14.8	37.7	18.9	na	na	na
Nicaragua partiellement dégraissé	71.0	14.9	29.5	18.9	na	na	na
Cap Vert Dégraissé	78.0	10.9	43.3	21.3	2.6	66.7	9.4
Nicaragua dégraissé	78.0	10.7	37.7	21.1	2.0	66.7	10.1
Cap Vert partiellement dégraissé A	74.3	15.1	66.5	4.5	na	50	na
Cap Vert partiellement dégraissé B	72.4	14.7	55.2	4.5	na	na	na
Cap Vert partiellement dégraissé B'	73.0	14.8	57.8	2.9	na	50	na
Cap Vert partiellement dégraissé C	75.4	15.3	60.3	1.1	na	na	na
Cap Vert partiellement dégraissé C'	73.7	15.0	57.0	0.4	na	50	na
Cap Vert dégraissé A	81.0	11.4	67.4	5.8	2.5	12.5	8.7
Cap Vert dégraissé B	82.9	11.8	73.3	3.8	2.6	12.5	9.8
Cap Vert dégraissé B'	81.2	11.5	73.4	1.2	2.6	12.5	9.2
Cap Vert dégraissé C	80.3	11.3	71.9	0.8	2.6	12.5	na
Cap Vert dégraissé C'	80.3	11.3	72.1	0.3	2.6	12.5	9.4
Cap Vert partiellement dégraissé D	75.5	15.3	55.8	0.4	na	na	na
Cap Vert partiellement dégraissé D	76.6	10.7	51.1	2.5	2.5	12.5	9.8
Tourteau de soja	87.9	13.3	80.9	3.9	4.7	12.5	1.5

A – traitement thermique humide : 67% d'humidité, 100°C, 60 min

B – traitement thermique humide : 80% d'humidité, 130 °C, 30 min

B' – traitement thermique humide : 80% d'humidité, à 130°C, 60 min

C – traitement thermique humide : 80% d'humidité, à 160°C, 30 min

C' – traitement thermique humide : 80% d'humidité, à 160°C, 60 min

D – traitement thermique humide : 67% d'humidité, à 100°C, 60 min, puis traitement thermique sec : 160°C, 30 min

DOM : Digestible Organic Matter (%)

ME : Metabolisable Energy (MJ/kg)

IDVN24 : 24 h in vitro degradable nitrogen (% nitrogen)

TIA: Trypsin Inhibitor Activity (mg/g)

Saponin, Lectin, phytate: % contents of *Jatropha* meals and soyabean meal.

Na: not analysed

Tableau 28 : comparaison des valeurs nutritionnelles et des composés toxiques de tourteau de *Jatropha* partiellement dégraissé (extraction par presse) et complètement dégraissé (extraction par solvant), après différents traitements thermiques et chimiques (Aderibidge *et al.*, 1997)

V.3.2. Utilisation comme engrais organique

(Voir tableau 10 : composition de tourteaux de *Jatropha* analysés par différents auteurs et comparaison avec d'autres fertilisants organiques)

Le tourteau de pressage de graines entières de Pourghère est classé par « Landwirtschaftliche Versuchsanstalt » (établissement allemand d'essais agronomiques) comme un engrais organique complexe (contenant NPK) à teneur marquée en azote (Münch, 1986). Comme nous l'avons vu dans la partie II.3.2.2 - Fertilisation organique avec du tourteau de *Jatropha*, il donne de très bons résultats sur la culture de *Jatropha*. Il peut également être employé sur d'autres cultures, comme Cuhna Da Silveira (1934) le mentionne au Cap Vert : sur le blé (mélangé avec du superphosphate) et le maïs (mélangé avec du sulfate de potasse)

Au Mali, Henning (1996) mentionne que les paysans ont reconnu très tôt la valeur du tourteau comme engrais et que ces derniers emportaient la totalité des quantités produites au niveau des presses. Afin d'avoir une appréciation concrète de cette valeur, des essais d'application du tourteau sur des cultures de maïs, sorgho et coton en milieu paysan ont été menés en collaboration avec l'IPR de Katibugu sur 3 sites pilotes (tableau 29). Les auteurs observent que sur coton, le tourteau seul donne de meilleurs résultats que le fumier ou la fumure minérale vulgarisée. Les meilleurs rendements ont été obtenus avec une combinaison de tourteau + fumure minérale vulgarisée.

Site	Culture	Combinaison tourteau + FMV* (50% / 50%)	Tourteau seul 5 t/ha
Falan	Cotonnier	+134%	
Karan	Sorgho		+20%
Bendougouba	maïs		+33%

*FMV : 50 kg urée + 150 kg complexe coton

Tableau 29 : augmentation du rendement (%) après épandage de tourteau de *Jatropha* par rapport à des parcelles témoins sans apport (Mali) (Henning, 1996)

Note : les résultats présentés dans ce tableau sont issus de résultats provisoires, probablement en cours de culture.

L'ICRISAT a par ailleurs étudié l'effet du tourteau sur la croissance et le comportement végétatif du riz en Inde, en système de riziculture intensive (RSI), et système de riziculture améliorée (RSA). Les résultats sur le rendement de riz paddy sont significatifs quel que soit le système de culture considéré (figure 13).

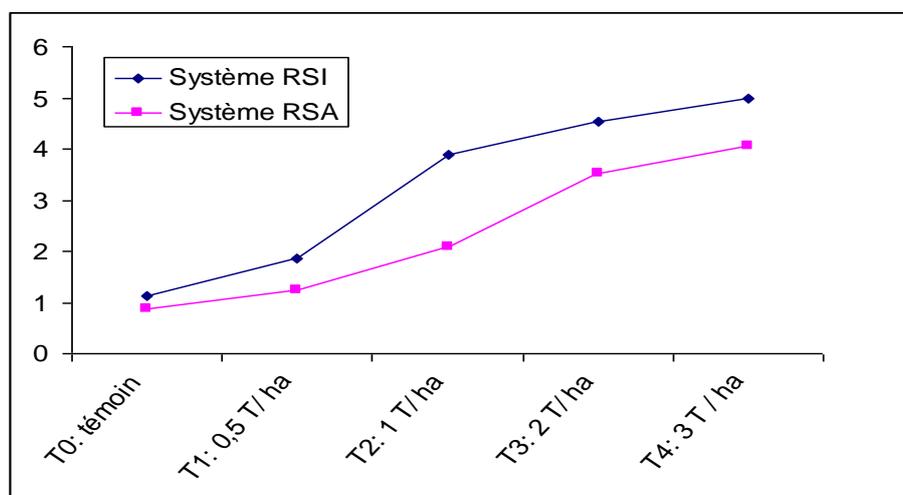


Figure 14 : effet du tourteau sur le rendement du riz paddy, en Inde (t/ha) (ICRISAT)

Effet insecticide et phytotoxicité du tourteau,

En plus d'être un excellent engrais organique, le tourteau de *Jatropha*, grâce à sa teneur résiduelle en huile, contient des mêmes substances biocides (voir partie IV.5.1 – Propriétés biocides de *Jatropha curcas*), ce qui lui confère des propriétés insecticides et réduit la quantité de nématodes dans le sol. Le tourteau de ricin, parent proche du *Jatropha*, est utilisé comme engrais organique à effet répulsif pour les taupes et rongeurs. Il est agréé en agriculture biologique en France.

Cependant, les substances toxiques qu'il contient peuvent être néfastes pour les plantes : des essais de phytotoxicité des tourteaux de *Jatropha* et de ricin sur la germination de graines tomates, de pastèques, de petits pois et de maïs dans des récipients contenant du sable avec différentes teneurs en tourteau, ont montré un effet toxique sur les semis, particulièrement sur les graines de tomates (Münch, 1986).

Aucune étude n'a été menée sur un éventuel risque de contamination des cultures vivrières par ces substances toxiques, ni sur les conséquences à moyen et long terme de l'épandage d'un engrais toxique sur le sol ou les nappes d'eau souterraines. **Des recherches doivent être menées sur l'éventuelle toxicité des résidus issus des épandages de tourteau de *Jatropha* sur des cultures destinées à l'alimentation humaine.**

V.4. Possibilités de valorisation énergétique des coproduits

Voir annexe 5 : Les voies de valorisation de la biomasse

V.4.1. Production de biogaz

V.4.1.1. Biogaz à partir de tourteaux

Le tourteau de pressage étant fermentescible, il peut être utilisé pour la production de biogaz. Staubmann *et al.* (1997) ont étudié la possibilité la production de biogaz par méthanisation à partir de tourteau (tableau 30). Une suspension aqueuse de résidu de tourteau sans addition de composés chimiques a été utilisée comme substrat, après séparation des coques par sédimentation. Les auteurs ont jugé nécessaire d'enlever les coques car ils se sont aperçus lors d'une expérience préliminaire qu'elles causaient l'obstruction des pipes et étaient à peine fermentescibles, probablement à cause de leur teneur en lignine.

Composition	Tourteau avec coques	Tourteau sans coques
Dry weight	90.86	91.40
Ash	6.03	6.55
Org. Dry. Weight	84.83	84.92
Protein	24.54	53.11
Fat	6.40	6.32
Fibre	32.26	5.60
Starch	0.63	0.68
Sugars	0.71	9.36
Hemicellulose	5.55	1.94
Cellulose	20.3	6.43
Lignin	19.46	0.53

Tableau 30 : composition (%) du tourteau de *jatropha* avec et sans les coques (Staubman *et al.*, 1997)

Trois types de réacteurs ont été comparés : un réacteur UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), un biodigester de type contact anaérobie et un réacteur filtre anaérobie, d'un volume de 110 l chacun (tableau 31). Le meilleur rendement en biogaz a été obtenu avec le filtre anaérobie, avec un niveau de

production maximal de $3,5\text{m}^3/\text{m}^3/\text{j}$ avec une charge maximale de $13\text{ kg}/\text{m}^3/\text{j}$ de DCO. D'après les auteurs, le réacteur UASB ne serait pas adapté pour la fermentation des tourteaux. Ce dernier a en effet montré une certaine instabilité durant le procédé, qu'ils attribuent à la teneur en éléments solides du substrat, conduisant à la formation de « boues granuleuses ». Concernant la qualité du biogaz produit, les indicateurs sont la teneur en méthane et en sulfure d'hydrogène (H_2S). Dans le cas du filtre anaérobie, la teneur en méthane mesurée en moyenne est de 70 % : en comparaison, le biogaz obtenu à partir de déchets de coton a une teneur en méthane de 67 %. La moyenne de la teneur en H_2S mesurée est de 0.39 % : elle ne doit pas dépasser 0.2 % avant combustion si l'on veut éviter la corrosion métallique

Production de biogaz	Réacteur UASB	Biodigesteur type contact anaérobie	Réacteur Filtre anaérobie
Niveau de charge maximale (kg DCO*/ m^3/j)	2.4	6.8	13
Rendement biogaz ($\text{m}^3/\text{kg DCO}/\text{j}$)	0.31	0.25	0.35
Production $\text{m}^3/\text{m}^3/\text{j}$	1.4	1.9	3.7
Abattement (%)			75

*DCO ou Demande Chimique en Oxygène : quantité d'oxygène consommée par les oxydants chimiques forts pour oxyder les substances organiques et minérales de l'eau. Elle permet d'évaluer la charge polluante. La DCO est systématiquement utilisée pour caractériser un effluent.

Tableau 31 : comparaison de la production de biogaz obtenue à partir de tourteau de jatropha avec trois types de réacteurs (Staubman *et al.*, 1997)

Echantillon de tourteau	Rendement total cumulé de biogaz ($\text{m}^3/\text{kg MS}$)	Rendement total cumulé de biogaz ($\text{m}^3/\text{kg MO}$)	Biogaz CO_2 (% vol)	Biogaz H_2S (mg/m^3)	Biogaz CH_4 (% vol)	Cumulative CH_4 yield ($\text{m}^3/\text{kg MS}$)	Conversion en carbone (% poids)	pH digestate	C:N ratio
1	0.84	0.89	16%	< 0.18	84%	0.70	85%	7.58	17
2	0.89	0.94	18%	< 0.18	82%	0.73	90%	7.58	13
3	0.84	0.89	17%	< 0.18	83%	0.70	86%	7.58	9
4	0.95	1.01	17%	< 0.18	83%	0.78	96%	7.54	7

Echantillons :

- 1 : tourteau pressé avec une taille d'ouverture de bec de 9 mm, graines non décortiquées (100 % de coques)
- 2 : tourteau pressé avec une taille d'ouverture de bec de 7 mm, graines non décortiquées (100 % de coques)
- 3 : tourteau pressé avec une taille d'ouverture de bec de 7 mm à partir de graines complètes et décortiquée (dans un ratio de 2 pour 1) (67 % de coques)
- 4 : tourteau pressé avec une taille d'ouverture de bec de 7 mm, à partir de graines décortiquées dans un ratio de 1 pour 2 (33 % de coques)

Tableau 32 : résultats des essais de digestibilité de 4 échantillons de tourteau de Jatropha (Visser *et al.*, 2007)

L'expérience plus récente de Visser *et al.* (2007, Fact fuels, tableau 32) a permis de comparer la digestibilité anaérobie et la production de biogaz de 4 échantillons de tourteau de Jatropha, obtenus par différentes méthodes de pressage. Ces essais ont été menés à l'échelle expérimentale dans des réacteurs de 1 l. Les résultats obtenus donnent un taux de décomposition et une production biogaz faible : le temps de réaction de 60 jours n'a pas suffi à convertir totalement la fraction digestible des échantillons. Le rendement obtenu est par contre élevé, grâce à la quantité élevée de matière organique. Les auteurs font remarquer que le rendement en méthane mesuré n'est pas représentatif d'une installation industrielle. Selon eux, la valeur à retenir pour une installation industrielle de biogaz à partir de tourteau de Jatropha serait plutôt la production d'un gaz avec 50-60 % de méthane, un rendement de 0.5 à 0.6 m^3/kg de matière organique, avec un pouvoir calorifique compris entre 18 et 22 MJ/kg.

V.4.1.2. Bioqaz à partir de pulpes de fruits

Lopez et Foidl (1997) ont testé la production de biogaz à partir de la pulpe des fruits, à échelle expérimentale également. Le réacteur utilisé, d'un volume de 23,8 l est composé d'une cuve contenant un filtre anaérobie en pierres volcaniques de 20 à 30 mm de diamètre. L'alimentation, réalisée par une pompe péristaltique, a été réglée pour que le produit séjourne environ 3 jours dans le réacteur. A l'état d'équilibre, la production de biogaz obtenue a été de 2.5 l/l/j. La teneur en méthane était de 70 %, et la dégradation de la fraction digestible comprise entre 70 et 80 %. Les coques ont dû être soumises à un prétraitement, pour séparer les fibres de la pulpe et pour éviter l'obstruction du réacteur.

Le sous-produit de la digestion peut être utilisé en fertilisant organique. Cependant, aucune étude n'a à ce jour été menée sur la valeur du compost issu de la digestion du tourteau ou des pulpes de Jatropha.

V.4.2. Voie thermochimique

Les voies de valorisations thermochimiques des coproduits du Jatropha sont diverses, mais on ne dispose pas encore de réelles études scientifiques sur le sujet, compte tenu de l'intérêt récent pour ce type de biomasse. Les expériences connues sont des applications artisanales – car les quantités produites actuellement sont insuffisantes pour avoir donné lieu à des utilisations industrielles. On manque encore de recul pour évaluer l'intérêt relatif des différents procédés.

V.4.2.1. Utilisation comme biocombustible

Le tourteau de Jatropha peut être utilisé comme combustible à la place du charbon de bois dans les ménages, ou comme combustible pour les chaudières dans les industries, en mélange avec d'autres combustibles (bois). Le pouvoir calorifique du tourteau est d'environ 18 MJ/kg.

A Madagascar, des essais de combustion des tourteaux pour des foyers domestiques (pour la cuisson des aliments en substitution au charbon) ont été réalisés dans le cadre du projet Bamex en collaboration avec D1 Oil. Mais la combustion dégageait une fumée noire très épaisse, ce qui n'est pas compatible avec une utilisation quotidienne dans les ménages (Perrine Burnod, 2008, communication personnelle).

Les pulpes et les coques sont également mentionnées comme combustibles. Le pouvoir calorifique des pulpes de fruits est évalué à 14.5 MJ/kg et celui des coques à 18 MJ/kg (Makkar, 2007).

Dans plusieurs pays, les tourteaux, pulpes et coques servent à fabriquer des briquettes d'allumage pour le feu. Aux Philippines (Bayanihan), la mise en place d'une usine de Jatropha a par exemple développé la production et la commercialisation locale de ces briquettes.

Le bois de Jatropha est quand à lui réputé pour être un piètre combustible. Très léger, il est rarement utilisé comme bois de chauffe pour les besoins domestiques et culinaires. Dans le cas d'une utilisation à cette fin, il est préférable de couper le tronc en petits morceaux afin d'accélérer le processus de séchage.

V.4.2.2. Synthèse de charbons actifs à partir des coques

Les coques étant des matériaux poreux, elles peuvent être utilisées pour produire des charbons actifs, qui présentent une très grande surface spécifique conférant un fort pouvoir adsorbant. Le charbon actif est utilisé dans différents domaines d'application : filtration (eau potable, masque à gaz), industrie, chimie (décoloration des eaux, décoloration du sucre, décaféination du café), médecine. La fabrication du charbon nécessite une première étape de pyrolyse, puis une seconde étape d'activation, qui consiste à augmenter le pouvoir adsorbant, notamment en éliminant les goudrons qui obstruent les pores, selon deux procédés distincts :

- **l'activation physique**, nouvelle combustion, entre 900 et 1 000 °C, effectuée dans un courant d'air et de vapeur d'eau, injectés sous pression (procédé d'oxydation contrôlée), crée des millions de tubes microscopiques à l'intérieur du charbon, augmentant fortement sa surface et son pouvoir d'adsorption. Ce procédé donne un charbon à pores étroits ;
- **l'activation chimique** par de l'acide phosphorique entre 400 et 500 °C. Ce procédé donne un charbon à pores plus larges.

La taille des pores dépend de la nature de la biomasse et des conditions de pyrolyse. Les coques de noix de coco donnent des micropores (< 2 nm), le bois des mésopores (entre 2 et 50 nm) ou des macropores (> 50 nm). L'adsorption des gaz nécessite des pores de 1 à 2 nm, alors que des pores de 2 à 10 nm suffisent pour l'adsorption des liquides.

Il n'existe pas encore d'étude sur cette voie de valorisation des coques, mais un projet est en cours au Burkina sur l'étude des deux voies d'activation chimique et physique au Burkina Faso (laboratoire 2IE). Le but est de produire des charbons peu onéreux, même si leur surface spécifique n'est pas très grande, à l'opposé des charbons actifs du commerce, très coûteux, qui doivent être reconditionnés lorsqu'ils deviennent saturés (ce qui impose des équipements spécifiques et coûteux). La porosité et la surface spécifique des charbons obtenus à partir de simples coques et de coques ayant subi un traitement thermique préalable sera comparé avec les charbons issus de biomasses couramment utilisées. Les charbons à bas prix issus des coques des graines de *Jatropha* ne seraient pas reconditionnés mais remplacés. Après avoir été séchés, ils pourraient ensuite être utilisés comme combustibles (selon le type de polluant qui a été traité).

V.5. Valorisation des principes actifs de la plante

L'origine du nom *Jatropha* (*jatros* : docteur et *tropa* : nourriture) met en évidence une utilisation importante de cette plante à des fins médicinales. Dans la pharmacopée, toutes les parties de la plante sont utilisées en médecine humaine et vétérinaire. Le latex soigne les blessures, une décoction des feuilles est censée calmer les rhumatismes, tandis que les graines sont surtout utilisées comme purgatif mais aussi pour traiter la gale, la goutte ou les œdèmes. Ces aspects médicaux de la plante sont sans aucun doute liés aux composants toxiques qu'elle contient et les scientifiques ont cherché à préciser les actions et les substances associées pour les valoriser.

V.5.1. Propriétés biocides de *Jatropha curcas*

Compte tenu de la grande diffusion de cette plante et de la présence de toxines dans la plupart de ses constituants, les propriétés biocides du *Jatropha* ont attiré l'attention des utilisateurs puis des scientifiques pour lutter contre des insectes prédateurs des cultures ou des stocks, ou contre des vecteurs de maladies. C'est ainsi que les moustiques (vecteurs de nombreuses affections) ont été visés ainsi que les mollusques transmetteurs de la bilharziose dont il existe plusieurs espèces.

V.5.1.1. Propriétés insecticides

De nombreuses observations et tests ont été réalisés sur divers insectes dits nuisibles. Les expérimentations complètes se sont efforcées de montrer l'intérêt de la démarche comme substitut à un produit synthétique, sans effet sur l'environnement. Toutes les parties de la plante ont fait l'objet d'études : les feuilles, l'écorce mais surtout l'huile.

Solsoloy *et al.* (2000) ont testé des émulsions d'huile en milieu expérimental, contre les insectes nuisibles des stocks de grains de maïs, *Sitophilus zeamays*, et de haricot mungo: *Callosobruchus chinensis*. Les semences étaient pulvérisées puis séchées. Les dilutions testées étaient de 0,5, 1,0, 2,5 et 10 %. La toxicité directe du traitement est faible mais l'efficacité du produit augmente avec le temps. Ainsi, après 2 mois, les dommages aux graines ne sont plus que de 10 % avec un dosage à 10 % pour *S. zeamays* et un dosage de 5 % pour *C. chinensis*. Le nombre d'œufs déposés diminue, probablement à cause d'une capacité de reproduction en diminution et d'une répulsion du produit de traitement pour le dépôt des œufs. Il a été vérifié que la qualité germinative de la graine n'était pas affectée par le traitement.

Adebowale *et al.* (2006) ont mené une expérience similaire en laboratoire sur *Callosobruchus maculatus*, insecte nuisible des graines de niébé, avec des dosages de 0.5, 1.0, 1.5, et 2.0 % d'huile de Jatropha. Ils ont observé une réduction élevée des pontes aux plus fortes concentrations et une mortalité totale des œufs et des larves quelle que soit la concentration. Les auteurs en déduisent que les grains sont ainsi protégés pendant 12 semaines, et avancent que l'effet insecticide pourrait avoir pour origine les stéroïdes et les alcools terpènes contenus dans l'huile.

Ratnadass *et al.* (1997) se sont penchés sur les nuisibles des cultures alimentaires et plus précisément sur *Busseola fusca* et *Sesamia calamistis*, foreurs des tiges de sorgho causant de nombreux dégâts au Nigeria et au Burkina Faso. L'efficacité de l'huile de Jatropha (1 % du milieu nutritif) a été comparée à celle d'esters de phorbol à 0.025, 0.05 et 0,1 % incorporé au milieu nutritif pour *S. calamistis* et 0.01, 0.1 et 1 % du milieu nutritif pour *B. fusca*. Les taux de nymphose ont été nuls pour *S. calamistis* pour tous les traitements ayant reçu un produit, comme pour *B. fusca* pour les traitements à 0.1 et 1.0 % d'huile alors qu'il était de 55 % sur le traitement supplémenté à 0.01 % et de 70 % sur le témoin (pas de différence significative entre ces deux derniers). Cette approche de laboratoire est toutefois éloignée de ce qui pourrait se passer en conditions de culture. En effet, autant l'application directe d'extraits insecticides pour *B. Fusca* pourrait avoir un effet significatif puisque la larve commence par s'alimenter dans le cornet foliaire, autant celle de *S. calamistis*, qui trouve un abri dans la tige en forant aussitôt après l'éclosion, est inaccessible à des produits de contact.

Solsoloy (2000) s'est intéressé à la lutte contre les nuisibles du coton. Deux niveaux de concentration d'huile de Jatropha en pulvérisation (800 et 1 250 ml/ha) ont été comparés à des insecticides couramment utilisés (profenofos à 400 g/ha et deltaméthrine à 12,5 g/ha). Les populations d'insectes nuisibles et utiles ont été évaluées avant et après les traitements. La récolte a aussi été évaluée, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. Trois prédateurs étaient concernés : une sauterelle (*Amrarsca biguttula*), un aphide (*Aphid gossypii*) et une chenille (*Helicoverpa armigera*). *A. gossypii* a mieux été contrôlée avec l'huile de Jatropha qu'avec la deltaméthrine, ce qui n'est pas le cas de *A. biguttula*. Au début des traitements, les insecticides de synthèse ont été plus efficaces que l'huile de Jatropha sur *H. armigera* ; l'huile ayant un effet sur la croissance des insectes, son effet est plus lent que les produits de synthèse. Les parcelles traitées avec les produits de synthèse ont donné des rendements supérieurs. Un effet phytotoxique a été observé sur la parcelle traitée avec la plus forte concentration d'huile de Jatropha. Parallèlement, la production du témoin a été bien supérieure à la moyenne paysanne. Cette situation s'explique par l'augmentation des ennemis naturels pour contrôler les nuisibles, attribuée à l'innocuité de l'huile à leur égard. A ce sujet, des observations ont montré un effet négatif important de la deltaméthrine sur les insectes utiles, alors que les produits à base d'huiles de Jatropha ont maintenu ces populations à un niveau suffisant pour que leur action soit sensible dans le contrôle des insectes nuisibles. L'auteur suggère que ce sont les acides gras qui auraient des propriétés insecticides naturelles, et qu'ils pourraient remplacer les insecticides de synthèse.

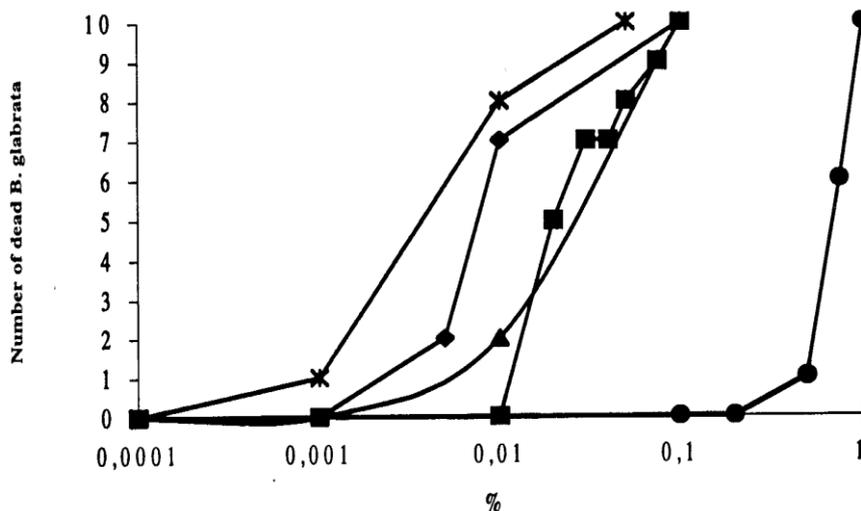
V.V.1.2. Propriétés larvicides

La lutte contre les larves des moustiques est également un sujet d'étude. Kambou *et al.* (2008) ont testé des extraits de graines et d'écorce de jatropha sur des larves du moustique *Ochlerotatus triseratus*, tandis que Rahuman *et al.* (2007) ont expérimenté des extraits de feuilles et d'écorce sur *Anopheles aegypti* et *Culex quinquefasciatus*.

Kambou *et al.* (2008) ont comparé des extraits par n-hexane, acétate d'éthyle et méthanol à la concentration de 250 µg d'extrait par millilitre d'eau. Les résultats ont été spectaculaires puisque pour tous les types d'extraits, la mortalité était totale au bout de 24 heures. L'évaluation de la toxicité du traitement sur l'environnement n'a pas été réalisée, pas plus que l'identification de la substance active. Ces auteurs ont testé les mêmes produits sur des chenilles d'*Helicoverpa virescens* et *Helicoverpa zea*, nuisibles du coton. Les extraits ont été inefficaces sur *H. virescens* mais actifs sur *H. zea* avec une réduction de 60 à 70 % du poids des chenilles après 15 jours d'alimentation à une concentration de 250 µg/ml.

Rahuman *et al.* (2007) ont expérimenté différentes concentrations aqueuses d'une solution de 1 g d'extrait dans 100 ml d'éther de pétrole. Les extraits étaient obtenus soit avec de l'acétate de méthyle, soit du butanol soit de l'éther de pétrole. Les observations étaient effectuées après 24 heures et les doses létales 50 et 90 calculées. L'éther de pétrole a été le seul extrait efficace. Celui correspondant

au *Jatropha* s'est montré particulièrement actif contre *A. aegypti* (DL50 8,79 ppm, DL 90 35,39 ppm) et contre *C. quinquefasciatus* (DL50 11,34 ppm, DL 90 46,52 ppm). Les auteurs n'ont pas évalué l'impact sur l'environnement ni identifié la substance active.



- × huile enrichie en ester de phorbol par le méthanol
- ◆ extrait de graine au méthanol
- ▲ huile brute
- extrait de tourteaux au méthanol
- extrait aqueux de graine

Figure 15 : efficacité de divers extraits de *Jatropha curcas* sur le mollusque *Biomphalaria glabrata* (10 mortalités correspondent à 100 % d'efficacité) (Rug *et al.*, 1997)

V.V.1.3. Propriétés molluscicides

La plupart des essais réalisés visaient les mollusques d'eau douce, hôtes de l'agent infectieux de la bilharziose, un ver du genre *Schistosoma*, qui comprend plusieurs espèces infectieuses. Ces mollusques sont des passages obligés pour le développement de la larve de *Schistosoma mansoni* ou de *S. haematobium*, avant leur libération dans l'eau et leur passage à travers la peau chez l'homme.

En 1997, Vassiliades rédige une note à l'ISRA sur les propriétés molluscicides de deux Euphorbiacées, dont *Jatropha curcas*, sur *Lymnaea natalensis* (hôte intermédiaire de *Fasciola gigantica* ou douve du foie) et *Bulinus guernei* (hôte intermédiaire de Schistosomes et de Paramphistomes, similaires à la douve). Les premiers essais remontaient en 1933 au Soudan mais avec une autre plante, la Balanite. Des tests ont été réalisés en 1982 et 1983, non publiés alors qu'ils ont donné des résultats satisfaisants. Dans un aquarium contenant de l'eau pure, on introduisait les plantes hachées ou écrasées à des concentrations différentes. En même temps que les mollusques, on plaçait des Guppys (petits poissons) pour vérifier l'iniquité du traitement. Parallèlement, l'eau de l'aquarium a été donnée à boire à des souris.

Les feuilles fraîches à la concentration de 0.3 g/l ont provoqué la mort de tous les mollusques de *Lymnaea natalensis* en 7 jours. Avec des tiges hachées, la mortalité a atteint 80 % des mollusques, avec les graines entières, 100 % de mortalité à 0.2-0.3 g/l, de même avec les amandes à 0.1-0.2 g/l. Dans tous les cas, il n'y a eu aucun effet sur les Guppys. Un effet similaire a été observé sur *B. guernei*. Aucun trouble n'a été observé chez les souris.

D'autres expérimentations ont été réalisées par différentes équipes. Rug *et al.* en 1997 ont testé l'effet de l'huile de *Jatropha* sur les mollusques *Biomphalaria glabrata* et *Oncomelania hupensis*, hôtes des larves de schistosomes (figure 15). Ils ont utilisé des extraits de graines et de tourteaux ainsi que

l'huile brute et des extraits enrichis au méthanol. Des esters de phorbol purs ont servis de référence. La plupart de ces extraits ont une efficacité totale à des concentrations voisines de 0,1 % sauf pour l'extrait aqueux, qui doit atteindre 1 %. La plus grande efficacité de l'extrait d'huile est sans doute due à la concentration en esters de phorbol suite à son enrichissement au méthanol. L'ester de phorbol est actif à 0,001 % sur les 2 espèces. Ces observations confirment bien l'action de l'ester de phorbol dans les propriétés molluscicides du *Jatropha*.

Les auteurs ont poursuivi leurs recherches en étudiant l'effet d'extraits de *Jatropha* sur les larves de *Schistosoma mansoni* au premier stade larvaire (miracidium) et au stade infectieux (cercaria). Ils ont évalué les effets des traitements utilisés sur les populations des eaux fréquentées par les mollusques hôtes. Ils ont exposé les larves à l'huile brute, à un extrait aqueux et un extrait au méthanol. C'est ce dernier qui s'est montré le plus efficace au bout de 2 heures : les cercariae sont hautement sensibles à des concentrations de 25 ppm, 10 fois plus sensibles que les miracidia. L'extrait aqueux nécessite une concentration 10 fois plus élevée pour être aussi efficace. En présence d'extrait au méthanol, les larves de *S. mansoni* développent des vésicules en surface conduisant à leur mort à plus ou moins long terme. Parallèlement, des tests simples ont été réalisés pour estimer la tolérance écologique des traitements. L'huile brute et l'extrait aqueux n'ont pas d'effet sur l'environnement, alors que l'extrait au méthanol a une influence sur certains crustacés comme *Polyphemus* sp. Des travaux complémentaires sont cependant nécessaires pour affiner les résultats.

V.V.I.4. Propriétés antifongiques

Ogbebor *et al.* (2006) ont étudié les propriétés antifongiques des feuilles de 21 plantes pour lutter contre le *Collantotrichum gloeosporioides*, agent pathogène de l'hévéa. Un premier test *in vitro* a retenu le *Jatropha* parmi les 5 plantes les plus efficaces. Des infestations ont alors été réalisées sur des pépinières dont les plants ont été traités par des extraits à différentes concentrations de broyat de feuilles de *Jatropha*. Le *Jatropha* a été relativement efficace sur la maladie à la concentration la plus forte (100 g de feuilles pour 100 g d'eau) avec un indice d'infestation des feuilles un peu plus faible que le témoin, 3 semaines après l'infestation.

V.5.2. Propriétés médicinales du *Jatropha*

En pharmacopée traditionnelle, le *Jatropha* est utilisé pour de nombreuses affections. L'huile, les feuilles et l'écorce sont utilisées comme purgatif. L'huile a des vertus abortives. Elle permet de traiter les rhumatismes et toutes sortes d'infections dermatologiques malgré les irritations qu'elle peut provoquer sur la peau. Le latex est réputé pour soigner les plaies, les ulcères, l'eczéma, les dermatomycoses, la gale, aussi pour soulager les piqûres d'insectes. Les feuilles sont utilisées fraîches sur les plaies ou en décoction contre le paludisme, contre l'hypertension ou pour faire monter le lait chez les femmes. Les racines en décoction servent à traiter les diarrhées.

De ce fait, c'est une plante qui a fait l'objet d'investigations importantes par de nombreuses équipes de recherches médicales tant privées que publiques. Les résultats obtenus ne sont pas tous accessibles. Les informations qui suivent sont donc partielles.

V.5.2.1. Effet coagulant et anticoagulant du latex de *Jatropha*

C'est une propriété connue utilisée traditionnellement pour soigner les blessures. Osoniyi *et al.* (2003) ont étudié le temps de coagulation de différentes concentrations de latex. Le latex entier diminue notablement le temps de coagulation alors que dilué, il le prolonge. A haute dilution il n'y a plus de coagulation. Ils en ont déduit que le latex devait contenir des constituants coagulant et anticoagulant. Ils ont séparé les constituants avec de l'acétate d'éthyle pour celui qui est responsable de l'accélération de la coagulation, et du butanol pour celui qui ralentit la coagulation.

En 1997, Nath *et al.* avaient mis en évidence l'effet toxique de la curcine extraite du latex quand elle était administrée par voie péritonéale. Par contre, utilisée mélangée à un onguent pour soigner des blessures, elle accélère leur cicatrisation en développant l'activité biologique de restauration des tissus.

Shetty *et al.* (2006) ont réalisé une expérience similaire mais avec de l'extrait d'écorce de *Jatropha* injecté à la dose de 2 à 4 ml/kg à des souris et sont arrivés à la conclusion que le produit accélérerait les processus de cicatrisation des blessures. Les auteurs insistent sur le fait qu'à l'heure actuelle, peu de produits synthétiques ont des propriétés similaires à celles observées avec le *Jatropha*.

V.5.2.2. Effet cytotoxique et antitumoral

Luo *et al.* (2007) ont mis en évidence la possibilité d'utiliser la curcine comme agent cytotoxique sur des cellules cancéreuses à des niveaux de concentration très faibles. Ils ont trouvé que cette protéine pouvait inhiber le déplacement des cellules tumorales et pensent qu'elles étaient aussi capables de provoquer la mort de ces cellules par apoptose. Cet effet a été aussi noté par Faria *et al.* en 2006.

V.5.2.3. Effet anti-inflammatoire

Staubmann *et al.* (1997, 1998) ont mis en évidence un effet anti-inflammatoire important d'extrait de feuilles de *Jatropha*. Ils ont isolé 2 produits actifs.

Mujumdar *et al.* (2004) ont testé ces mêmes effets anti-inflammatoires avec de la poudre de racine brute et des extraits concentrés au méthanol. Plusieurs types d'inflammations ont été étudiées et 2 modes de traitements ont été appliqués : le premier sous forme de poudre de racine en pâte étalée sur la partie enflammée et le second sous forme systémique par voie orale ou par injection. Des traitements de référence étaient associés à chaque expérience. Un test préalable avait fixé la dose maximale d'extrait à administrer sous forme systémique (1g/kg). Les résultats ont montré un effet équivalent aux traitements de référence. Les doses efficaces étaient largement inférieures la dose maximale (entre 50 et 200 mg/kg).

Ces mêmes auteurs, en 2000, ont évalué l'effet anti-diarrhéique avec les mêmes produits issus du *Jatropha*. L'origine de cette affection est de même nature que celle des inflammations. L'expérience a consisté à provoquer une diarrhée par administration d'huile de ricin chez des souris et à étudier la possibilité d'y remédier avec des extraits au méthanol de poudre de racine de *Jatropha*. Les résultats ont été probants puisqu'en injectant 100 ml/kg d'extrait, les effets de l'affection ont diminué significativement.

Ces travaux ont confirmé l'intérêt des pratiques traditionnelles utilisées dans certaines régions de l'Inde.

V.5.2.4. Effet abortif

Goonasekera *et al.* (1995) a mis en évidence que l'action de différents extraits de fruits frais et secs avaient la possibilité d'arrêter la gestation. Cependant, plusieurs cas de mortalité ont été observés pendant l'expérience avec certains types d'extraits. Aussi des investigations supplémentaires sont nécessaires pour faire la part des choses entre produits actifs et produits toxiques.

Impact environnemental : les questions soulevées

Alors que le Jatropha présente des intérêts potentiels pour la production de biocarburant en apportant un complément de revenus aux communautés rurales, la question de l'impact potentiel de cette culture sur l'environnement est à prendre en compte.

Plusieurs points peuvent être considérés :

Jatropha et biodiversité

Une espèce envahissante ?

Plusieurs pays ont classé le Jatropha comme une plante à caractère invasif (Low et al, 2007): Archipel des Comores, Est du Mozambique, Australie occidentale et Queensland, où sa présence est considérée comme problématique. La crique d'Emu, dans le territoire de Petford, est particulièrement touchée : le Jatropha y est présent sur une bande d'une soixantaine de kilomètres, regroupé par bosquets de 20-30 plantes, entrecoupés de zones où les plantes sont dispersées. Le plus gros bosquet mesure 50 mètres de long sur 100 mètres de large. La difficulté à contrôler le Pourghère a ainsi conduit l'Australie occidentale à interdire sa culture en 2006.

Le caractère invasif du Jatropha n'est pas prouvé, et dépend des conditions pédo-climatiques des zones considérées. La question de la difficulté à contrôler son expansion peut toutefois se poser en cas de développement de cette culture à grande échelle.

La Culture sur des zones plus ou moins dégradées : quelles conséquences ?

D'après une étude mondiale réalisée par le Gexsi (Renner et al., 2008), la principale affectation des terres à la culture de Jatropha sont des terres marginales (49% des surfaces sur un échantillon de 90 projets pour une surface totale de 325.000 ha)

La définition de terres marginales – impropres à une culture ? – est vague. Elle ne donne pas de spécification sur l'utilisation de ces terrains, qui peuvent être par exemple des zones de pâturages. Dans certains pays elles concernent aussi les terres qui ne sont pas cultivées pour des raisons diverses comme l'éloignement du village. Toutes ces zones qui ne sont pas cultivées hébergent d'autres espèces végétales et des espèces animales associées. Si de vastes superficies sont implantées en Jatropha, il y existe donc un réel risque de perte de biodiversité. Si ces superficies étaient auparavant allouées à l'élevage, il y a aussi un réel risque de report de ces zones vers des écosystèmes plus fragiles ou dévolus à d'autres usages.

Risques phytosanitaires

- Augmentation des risques phytosanitaires sur les cultures vivrières

Comme indiqué dans le paragraphe II.3.4, la mise en culture de grandes superficies présenterait une augmentation du risque d'infestation massive par des ravageurs et maladies, comparé à ce qui a été observé jusqu'alors, non seulement pour le Jatropha, mais également pour les cultures vivrières locales, notamment pour le manioc qui appartient à la même famille des euphorbiacées.

- Utilisation massive de produits phytosanitaires :

L'emploi éventuel de produits phytosanitaires à grande échelle pour contrôler ces ravageurs aura également un impact sur la faune locale spécifique de ces zones.

Pollution : toxicité du tourteau utilisé comme engrais organique

La toxicité du tourteau de Jatropha, relevée au paragraphe V.3.2, est à prendre en compte en cas d'utilisation du tourteau comme engrais organique. Aucune étude n'est aujourd'hui disponible sur les risques de contamination du sol, des nappes phréatiques, ou des cultures alimentaires par les substances toxiques présentes dans le tourteau.

Remarque : le tourteau de ricin est utilisé comme engrais organique en agriculture biologique en France. Cependant, aucune étude de toxicité n'a été réalisée préalablement (Maura, 2008, Ecocert, communication personnelle)

Ressource en eau

Une étude récente a été réalisée en Afrique du Sud par Holl et al (2007) sur l'impact de la culture de *Jatropha* sur le milieu naturel. Elle a évalué les besoins en eau de la culture par un suivi régulier de la consommation de plants de *Jatropha* de 4 et 12 ans. L'extrapolation des résultats obtenus a permis de comparer les besoins en eau d'une culture de *Jatropha* avec ceux de la végétation naturelle qu'elle est censée remplacer et ce pour différents contextes pédoclimatiques. Il s'avère que dans la plupart des cas, la consommation de la culture (entre 200 et 1200 mm) est largement inférieure à celle de la végétation en place sur un pas de temps annuel. L'étude en déduit que le risque de diminution de débit en eau des bassins versants n'est pas à retenir et que, de ce point de vue, la culture pluviale du *Jatropha* n'aura pas d'impact négatif sur l'environnement. L'irrigation de telle culture n'étant pas envisagée, l'auteur considère que, pour être économiquement intéressante, elle ne peut s'envisager qu'à partir d'une pluviométrie minimum de 800 mm.

L'auteur estime cependant qu'il est nécessaire de confirmer les résultats dans la mesure où les observations ont été effectuées pendant 2 années sèches et où il a fallu extrapoler les résultats pour pouvoir arriver à une conclusion en année normale.

Table des tableaux

- Tableau 1 : cycles de floraison observés, d'après différents auteurs
- Tableau 2 : les insectes pollinisateurs du *Jatropha curcas* L., d'après différents auteurs
- Tableau 3 : taille des fruits, d'après différents auteurs
- Tableau 4 : poids et taille des graines, d'après différents auteurs
- Tableau 5 : composition des graines, d'après différents auteurs
- Tableau 6 : avantages et inconvénients des techniques de multiplication. Observations faites en zones semi-arides
- Tableau 7 : Teneur en éléments nutritifs de fruits secs de *Jatropha* selon différents scénarios de production (fruits à 7% d'humidité) (Reinhardt, 2008)
- Tableau 8 : Besoins en fertilisation selon les exportations théoriques calculées pour chaque scénario de l'étude de l'IFEU
- Tableau 9 : récapitulatif des apports en fertilisation minérale préconisés dans la bibliographie (kg/ha)
- Tableau 10 : composition de tourteaux de *Jatropha* analysés par différents auteurs et comparaison avec d'autres fertilisants organiques
- Tableau 11 : maladies fongiques identifiées par les différents auteurs sur la culture de *Jatropha curcas* L.
- Tableau 12 : faune arthropode associée à la culture de *Jatropha curcas* L.
- Tableau 13 : estimations des temps de travaux pour le ramassage, répertoriés dans la bibliographie
- Tableau 14 : rendements du *Jatropha Curcas* L., selon différentes études
- Tableau 15 : rendement en graines sèches à 5,8% d'humidité (t/ha/ an) selon 3 scénarios de culture
- Tableau 16 : rendements et vitesses d'extraction obtenus avec différents modèles de presses
- Tableau 17 : comparaison de prétraitement des graines sur le rendement en huile
- Tableau 18 : estimation des besoins pour l'extraction d'huile végétale par solvant. Comparaison des procédés continus et discontinus
- Tableau 19 : propriétés physiques des huiles
- Tableau 20 : propriétés chimiques des huiles
- Tableau 21 : comparatif des analyses d'acidité d'huile de *Jatropha* de différentes provenances
- Tableau 22 : propriétés des huiles carburant
- Tableau 23 : composition en acides gras d'une huile végétale optimale pour un carburant diesel, par rapport aux huiles de colza et de *Jatropha*
- Tableau 24 : propriétés des méthyl esters de *Jatropha*, par rapport à celles du colza et du gazole
- Tableau 25 : propriétés physico-chimiques des amandes de *Jatropha* et mesures de quelques toxines de l'amande déshuilée
- Tableau 26 : comparaison de la composition des tourteaux de *Jatropha* et de soja
- Tableau 27 : comparaison de la composition en acides aminés essentiels (g/16gN) du tourteau de *Jatropha*, du tourteau de soja, et des références de la FAO
- Tableau 28 : comparaison des valeurs nutritionnelles et des composés toxiques de tourteau de *Jatropha* partiellement dégraissé (extraction par presse) et complètement dégraissé (extraction par solvant), après différents traitements thermiques et chimiques
- Tableau 29 : augmentation du rendement (%) après épandage de tourteau de *Jatropha* par rapport à des parcelles témoins sans apport (Mali) (Henning, 1996)
- Tableau 30 : composition (%) du tourteau de *Jatropha* avec et sans les coques
- Tableau 31 : comparaison de la production de biogaz obtenue à partir de tourteau de *Jatropha* avec trois types de réacteurs
- Tableau 32 : résultats des essais de digestibilité de 4 échantillons de tourteau de *Jatropha*

Table des figures

Figure 1 : distribution de *Jatropha curcas* L

Figure 2 : parties importantes du *Jatropha curcas* L

Figure 3 : distribution du *Jatropha curcas* L. selon la classification climatique de Köppen Geiger

Figure 4 : comparaison du taux de germination en fonction de la durée du stockage des graines, en Thaïlande

Figure 5 : schéma d'élaboration du rendement du *Jatropha curcas* L., d'après les connaissances bibliographiques actuelles

Figure 6 : fonctionnement de la presse Bielenberg

Figure 7 : presse à barreaux

Figure 8 : presse à cylindre perforé

Figure 9 : l'extraction chimique de graines oléagineuses au soxhlet

Figure 10 : indice d'iode de différentes huiles végétales

Figure 11 : possibilités d'exploitation de la plante *Jatropha curcas* L. et de ses produits

Figure 12 : répartition des masses (en matière sèche) des différents produits obtenus pour 1 ha de culture de *Jatropha*, dans un scénario d'exploitation actuel, pour les conditions pédo-climatiques de la zone de Bhavnagar, en Inde

Figure 13 : répartition des masses en matière fraîche des différents produits obtenus pour 100 kg de fruits frais *Jatropha*

Figure 14 : effet du tourteau sur le rendement du riz paddy, en Inde (t/ha)

Figure 15 : efficacité de divers extraits de *Jatropha curcas* sur le mollusque *Biomphalaria glabrata* (10 mortalités correspondent à 100 % d'efficacité)

ANNEXES

Annexe 1 : Le Ricin commun

Annexe 2 : Comparatif des presses à huile végétale (*trituration en pression unique à froid*)

Annexe 3 : Norme Européenne EN 14214 / Biodiesel

Annexe 4 : La fabrication du savon

Annexe 5 : Les voies de valorisation de la biomasse

ANNEXE 1 (1/2)

Le Ricin commun

Le **ricin commun** (*Ricinus communis*) est un arbuste de la famille des Euphorbiacées d'origine tropicale. C'est la source de l'huile de ricin, qui a de nombreuses applications, et de la ricine, un poison violent.

Origine

Il est originaire d'Afrique tropicale, il s'est répandu un peu partout dans le monde, là où le climat le permettait. On le retrouve ainsi sous des climats subtropicaux, mais également sous les climats tempérés.

Description

Le nom générique *Ricinus* signifie « tique » en latin : la graine est appelée ainsi à cause de son aspect. Le ricin se présente sous la forme d'une plante arborescente, annuelle ou vivace suivant les conditions climatiques de la région. Sa hauteur peut atteindre 10 mètres dans son pays d'origine (elle serait de 2 à 3 mètres en France.). C'est une plante allogame sensible au milieu où elle vit, cependant les sélectionneurs nord américains ont réussi à stabiliser des variétés naines peu sensibles à l'environnement. La totalité de la plante semble toxique en raison de la présence d'une lectine glycoprotéique : la ricine.

- **Feuilles** : Elles sont portées par de longues tiges, sont palmatilobées (5 à 12 lobes) et leur bord est denté. Elles sont également vertes et rouges, palmées, verticillées et caduques. Certaines variétés ornementales ont des feuilles dont la face inférieure et le pétiole sont colorés en rouge.

- **Fleurs** : Elles sont regroupées en grappes ou racèmes réunissant fleurs mâles (30 à 50%) à la périphérie et fleurs femelles sur la partie supérieure, la floraison a lieu en été et dure 15 à 20 jours pour chaque grappe et un mois pour la plante entière.

- **Graines**: Les fruits sont des capsules tricoques hérissées de pointes (parfois absentes). La graine est ovoïde, luisante, marbrée de rouge ou de brun, elle présente une ligne saillante sur la face ventrale. Le poids moyen de 100 graines est d'environ 300 g pour les types cultivés. La concentration en ricine est maximale dans les graines qui renferment par ailleurs des protéines, de l'eau et des lipides. Elle contient entre 40 et 60 % d'huile riche en triglycérides, principalement la ricinoléine. Le rendement en huile du Ricin peut atteindre de 1200 à 2000 litres à l'hectare et par an sous climat tropical.

Culture

Les premières améliorations étaient basées sur la sélection massale et généalogique. Elles ont produit des plants nains par introduction de gènes de diminution de la taille des entre noeuds trouvés dans les génotypes brésiliens, et augmenté les teneurs en huile.

La découverte de systèmes de stérilité male, s'exprimant dans certaines conditions environnementales a permis dans les années soixante la mise au point de semences hybrides. De plus, plupart des plantes hybrides F1 présentent une tendance féminine forte qui accroît le nombre de capsules et de graines par grappe.

En zones tropicales, traditionnellement le ricin est plutôt cultivé en plante pérenne de 2-3 ans sous une pluviométrie de 1100 à 1400 mm avec une saison sèche en fin de cycle qui favorise la maturation. Il préfère l'altitude entre 1000 et 1500 m. Il fait généralement l'objet de cultures associées.

En agriculture mécanisée, la culture est annuelle. Le sol est labouré au tracteur pour faciliter l'enracinement. La plantation s'effectue en carrés de 1 à 2 m avec plusieurs graines par poquet. Le démariage se fait quand les plants ont une vingtaine de cm. Binage et buttage sont réalisés à la demande pour garder un sol propre. Quand le plant a entre 1,5 et 1,7 mètre de haut, il est procédé à l'écimage pour favoriser la ramification et rendre la récolte manuelle plus facile.

Les variétés précoces mûrissent en trois mois, les tardives en six ou sept mois (plutôt des pérennes). Les variétés déhiscentes sont préférées pour la récolte manuelle. On récolte alors les grappes qu'on laisse sécher au soleil pour qu'elles éclatent. L'emploi d'hybrides indéhiscents permet la récolte mécanique mais nécessite ensuite l'usage de décortiqueuses rapidement après la récolte pour éviter l'humidification des graines et le rancissement et l'acidification des graines. Cette récolte mécanique des capsules peut s'effectuer avec des moissonneuses batteuses classiques moyennant quelques

modifications. Des matériels réalisant le décorticage au moment de la récolte ont été mis au point par CLASS en 1991. Il va sans dire que cette formule de récolte est préférable pour des raisons économiques.

La mise au point de systèmes intensifs de production s'est inspirée des expériences plus anciennes de l'URSS et des USA. Dans ce cas, le sol doit être meuble sur une bonne profondeur, les semis sont plus denses (60000 pieds/ha). La fertilisation azotée doit se limiter à 50-80 unités/ha (apport au moment du semis), potasse et phosphore à 50 unités/ha en sols normaux.

Le contrôle de l'herbe est un élément important et s'effectue par binage et par traitement herbicide.

On considère qu'avec 450 mm d'eau sous climat tempéré, les rendements de variétés hybrides peuvent atteindre 2800 kg/ha.

Toxicité

L'huile de ricin contient de l'acide ricinoléique qui altère la muqueuse intestinale et provoque des pertes importantes en eau et en électrolytes (sels minéraux), d'où son action purgative intense et irritante. La ricine, présente dans la plante et les graines, est une toxine redoutable. Les graines renferment également un allergène plus difficile à rendre inactif que la ricine et pouvant provoquer une hypersensibilité chez les humains en contact avec ce produit. Cet allergène semble peu nocif pour les animaux. Le passage à l'autoclave de la farine pendant 15 minutes à 125° C détruit la ricine. L'ingestion de graines, souvent accidentelle chez les jeunes enfants, peut provoquer des intoxications graves (en raison de la présence de ricine) nécessitant impérativement une prise en charge hospitalière. On considère que trois graines peuvent être fatales à un enfant, quatre graines peuvent déterminer une intoxication sérieuse chez l'adulte et six à huit graines pourront lui être fatales. Dans certains pays on a déjà signalé l'usage des graines de ricin à des fins criminelles. Parfois, les graines de ricin peuvent se retrouver accidentellement mêlées à des céréales, provoquant ainsi des intoxications.

Utilisation

Le ricin est cultivé dans de nombreux pays (Chine, Brésil, Inde, etc). L'huile de ricin est obtenue à partir des graines par pression à froid, c'est un purgatif puissant, très irritant dont l'usage est à proscrire absolument. L'huile possède par ailleurs des propriétés lubrifiantes très intéressantes que l'on utilise dans l'industrie. Elle fut utilisée pendant longtemps pour lubrifier les moteurs de voitures de course et les moteurs deux temps en particulier de modèles réduits, son utilisation est caractérisée par une odeur très forte et unique. Elle sert également pour fabriquer des peintures et des surfactants. Elle entre dans la fabrication de produits de parfumerie et de cosmétologie. On l'utilise également comme matière première pour préparer l'acide décylnique qui est un fongicide utilisé en usage externe. Elle est aussi utilisée dans la fabrication d'une matière plastique de la famille des polyamides aux caractéristiques particulières, le Rilsan.

En pharmacie, cette huile est utilisée pour ses effets laxatifs et anesthésiants. On l'emploie aussi comme solvant pour préparations injectables, mais elle peut induire des réactions anaphylactiques graves.

Enfin, on l'employait jadis comme combustible pour l'éclairage. Dans certains pays on consomme les graines de ricin grillées.

En horticulture, le tourteau de ricin est utilisé comme engrais organique et comme répulsif contre les rongeurs.

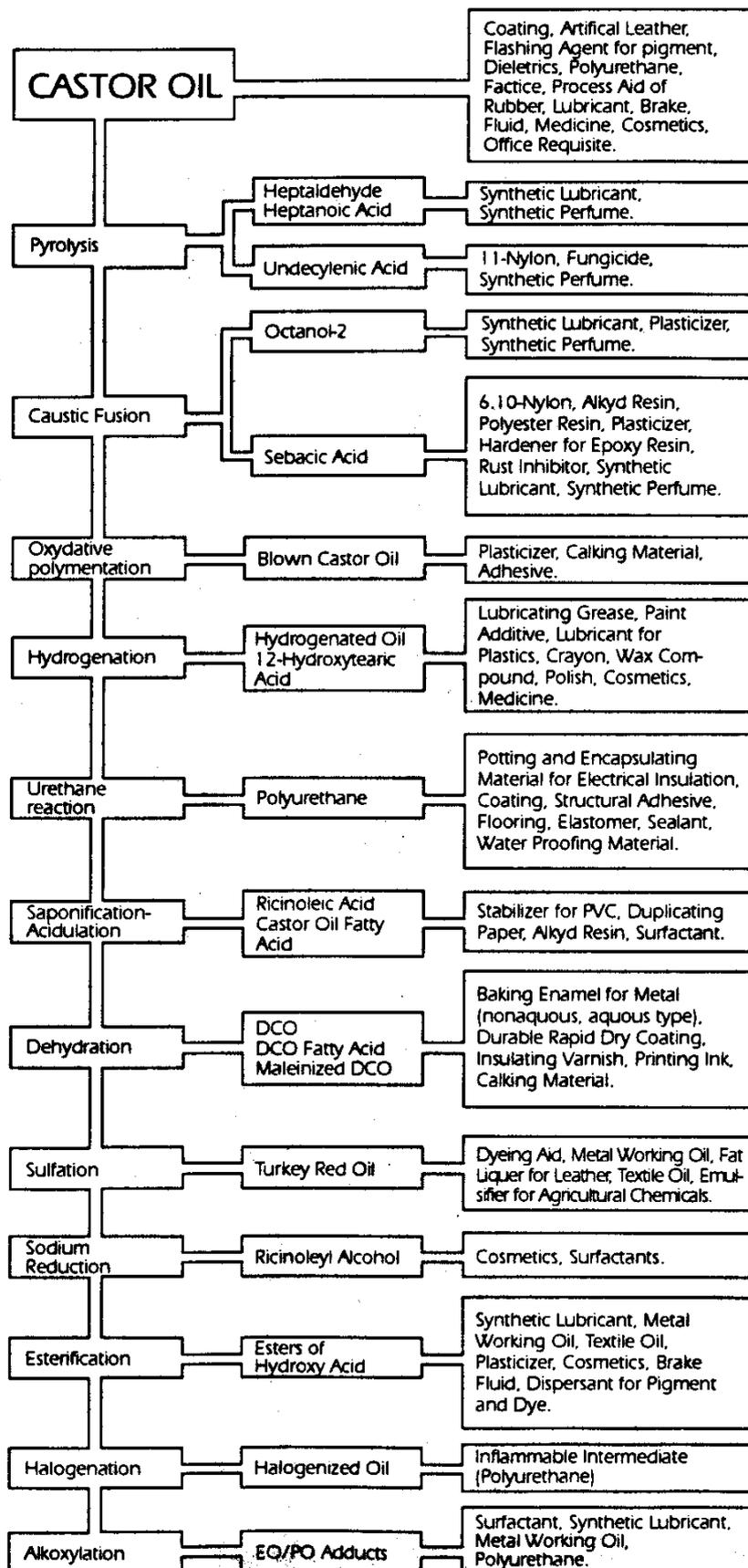
D'une façon générale, les nombreuses applications de l'huile de ricin en font un produit particulièrement apprécié parmi les oléagineux et l'industrie des corps gras.

Production

Inde	804 000	61 %	730 000	64 %
Chine	275 000	21 %	240 000	21 %
Brésil	149 099	11 %	92 327	8 %
Autres pays	83 580	6 %	80 084	7 %
Total	1 222 920	100 %	1 142 421	100 %

Tableau A1: Production en tonnes de graines de ricin. Chiffres 2004 et 2006 (Données de FAOSTAT)

Produits issus de l'huile de ricin (voir page suivante)



ANNEXE 2 (1/3) : COMPARATIF DES PRESSES A HUILE VEGETALE (trituration en pression unique à froid)
<http://www.oliomobile.org/forum/viewtopic.php?t=1398> Version 3.0 mise à jour le 28/09/2005)

Type	Fabricant	Pays	Modèle	Capacité (kg/h)	Puissance (KW)	Vitesse variable	% MG rés. (annoncé)	% MG rés. (mesuré)	Temp. interne (°C)	Poids (kg)	Prix HT* (€)
B	De Smet Rosedowns	GB	Mini 200	200	15		12-14			900	27 650
BT	Agri-Biosystem	E	E-200	160-230					90+	490	
B	Olier	F	HSB2 RP	175-250	22		6-7		45		60 000
B	Reinartz	D	AP 14/22	250-300	22		10-13		50-60	4800	50 400
B	La Mécanique Moderne	F	MBU 75-25	250-300	18,5		12				54 900
B	De Smet Rosedowns	GB	Mini 500	250-300	22		12-14			900	32 000
B	Cimbria Sket	D	KP 15	250-300	11		10-15			2100	
B	Karl Strähle	D	SK 190/1	300	22		12-13		60-65	4500	41 900
BT	ABC Hansen S/A	DK	SGD 300	280-320	18,5				90+	1100	38 600
B	La Mécanique Moderne	F	MBU 75-30	400	22		12				52 630
B	Olier	F	HSB RP	350-450	30		8-9		35		76 000
B	Keller KEK	D	P 0350	350-450	22		10-12			3500	61 150
B	Reinartz	D	AP 14/30	400-500	30		10-13		50-60	6500	70 400
B	Farmet	CZ	LS 500	500	40					3800	60 600
B	Karl Strähle	D	SK 250/1	500	30		12-13		60-65	6500	64 400
B	La Mécanique Moderne	F	MBU 130-75	650	55		12				88 800
B	De Smet Rosedowns	GB	Sterling 100	580-750	22-45		8-11			5000	
B	Reinartz	D	AP 15/45	650-800	45		10-13				127 900
B	Olier	F	HST	750-800	55		8-9				
B	Farmet	CZ	FS 1000	750-800	45					9800	99 900
B	Farmet	CZ	FLS 850	850	70					12000	127 000
B	Reinartz	D	AP 15/37	900 (colza)	37		10-12				125 000
B	La Mécanique Moderne	F	MBU 260-125	1000	90		12				100 700
B	Olier	F	H	1000	90		8-9				
B	Reinartz	D	AP 15/45 L	750-1000	45		9-10				141 000
B	Cimbria Sket	D	KP 21	1000	57		10-13			7500	
B	De Smet Rosedowns	GB	Sterling 200	1000-1500	75-90		9-12			11000	
B	Olier	F	H11	1500	110		5 à 9				
B	Reinartz	D	AP 25/110	1500-1800	110		10-13				222 000
B	Cimbria Sket	D	KP 26	2000	132		10-13			13200	
B	Olier	F	HSM	1700 à 2100	132		5-7				
B	Olier	F	HSM	2300 à 2700	150		5-7				

ANNEXE 2 (2/3) : COMPARATIF DES PRESSES A HUILE VEGETALE (trituration en pression unique à froid)
<http://www.oliomobile.org/forum/viewtopic.php?t=1398> Version 3.0 mise à jour le 28/09/2005)

Type	Fabricant	Pays	Modèle	Capacité (kg/h)	Puissance (kW)	Visse variable	% MG rés. (annoncé)	% MG rés. (mesuré)	Temp. interne (°C)	Poids (kg)	Prix HT* (€)
V	Táby	S	20	4-8	0,4		16-18	18-21,3	75-95	13	1 450
V	IBG Monforts Oekotec	D	CA 59 G	5-8	1	•	13-16	15,5	60-65	80	3 360
V	Kern Kraft	D	KK 8	8	1-1,1	•	13-15		75	55	2 200 à 3 000
V	Heizomat	D	Heizopress S1	10	0,55	•					3 520
V	Farmet	CZ	Uno	9-12	1,1				70-75	80	2 200
V	Táby	S	40A	8 - 16	1,1	O	16-18	18-21,3	75-95	46	3 280
V	Kern Kraft	D	KK 20	20	1,1-2	•	13-15		75	100	4 100 à 4 500
V	Farmet	CZ	Duo S ou K	18-25	2,2				70-75	100-200	3 300 à 4 200
V	IBG Monforts Oekotec	D	D 85-1G	10-25	3	•	13-16	15,5	60-65	210	7 900
V	Anton Fries	D	P 500R	19-30	1,5	•	22-15 ^a	14,2 ^a	70-90	70	5 500
V	Keller KEK	D	P 0015	20-30	2,2	•	13-15			115	5 100
V	Swea	DK	Double screw	30	2,2		21				4 650
V	Táby	S	55	20-36	1,5	•	16-18	18-21,3	75-95	64	6 100
V	Laplace	F	Oméga 5.5	35-40							3 300
V	Kern Kraft	D	KK 40	40	2,2-4	•	13-15		75	200-350	5 500 à 6 600
V	IBG Monforts Oekotec	D	DD 85 G	20-50	3	•	13-16	15,5	60-65	240	10 970
V	Stimel	RO	PU 50	50	3					300	
V	Táby	S	70	40-60	2,2		16-18	18-21,3	75-95	95	9 150
V	IBG Monforts Oekotec	D	S 120 F	70-100	7,5	•	13-16	15,5	60-65	440	21 480
V	Stimel	RO	PU 80 ou 100	100	5,5					300-400	
V	Táby	S	90	80-110	4	•	16-18	18-21,3	75-95	160	12 960
V	Stimel	RO	PU 200	200	11					20	

V "Vis" ou "Tube perforé"

• Oui

^a avec un repressage du tourteau

ANNEXE 2 (2/3) : COMPARATIF DES PRESSES A HUILE VEGETALE (trituration en pression unique à froid)
<http://www.oliomobile.org/forum/viewtopic.php?t=1398> Version 3.0 mise à jour le 28/09/2005)

Type	Fabricant	Pays	Modèle	Capacité (kg/h)	Puissance (kW)	Vitesse variable	% MG rés. (annoncé)	% MG rés. (mesuré)	Temp. interne (°C)	Poids (kg)	Prix HT* (€)
D	Karl Strähle	D	SK 60/1	12-15	1,5-2,2	O	12-15		60-70	135	4 480 à 5 720
B	Liatech	F	Eura2B3	20-30	2		15-18			300	5 000
D	Karl Strähle	D	SK 60/2	24-30	1,5-2,2	O	12-15		60-70	194	8 850
B	Olier	F	HSA 30	30	4		10-12		45		
B	Reinartz	D	AP 08	30-40	4		10-13	11	55-60	400	13 100
B	Liatech	F	Eura2B4	40	3		15-18			350	10 200
B	De Smet Rosedowns	GB	Mini 40	40	4		13-16			200	11 640
B	Liatech	F	Eura2B5	40-50	4		15-18			400	
B	La Mécanique Moderne	F	Oléane 50	45-55	2,2		12-15	16-21,7	70-80	110	4 850 à 5 950
B	Kern Kraft	D	KK 60	60	4	•	13-15				8 500 à 9 000
B	Olier	F	HSA 60	60	5,5		10-12		45		
BT	Agri-Biosystem	E	E-50	45-70					90+	190	
BT	ABC Hansen S/A	DK	SGD 80	60-80	5,5				90+	270	7 300
B	Kern Kraft	D	KK 80	80	5,5	•	13-15				10 900 à 11 500
B	Reinartz	D	AP 10/6	70-100	7,5		10-13	10,5-12	55-60	900	18 600
B	Liatech	F	Eura3B7	70-100	5,5		15-18			430	16 500
B	Frandsen Ecotec	DK	40-1	100		•	11-12				13 450
B	La Mécanique Moderne	F	MBUL 20-10	100	7,5	O	12-15	14,9	60-70	600	16 100
B	Keller KEK	D	P 0101	100	7,5	•	12			880	17 540
B	Olier	F	HSA 100	100	7,5		10-12		45		
B	De Smet Rosedowns	GB	Mini 100	100	7,5		13-16			500	17 460
B	Liatech	F	Eura3B11	100-120	7,5		15-18			480	17 250
B	La Mécanique Moderne	F	Oléane 100	100-120	4,5-5		12-15		70-80	230	8 750 à 10 490
BT	ABC Hansen S/A	DK	SGC 120	120	11				90+	600	
B	Karl Strähle	D	SK 130/3	130	7,5		12-13	12,8	60-65	750	24 390
B	Kern Kraft	D	KK 140	140	6,5-8	•	13-15				18 900 à 19 900
BT	Agri-Biosystem	E	E-100	100-160					90+	320	
B	Farmet	CZ	L 200	120-180	11	•				900	17 900 à 20 700
B	Reinartz	D	AP 12	160-200	15		10-13		50-60	2000	33 000
B	IBG Monforts Oekotec	D	F 200	180-200	11-15					750	26 500
B	Olier	F	HSA 200	200	15		10-12		45		

B "Barreaux" ou "Cage"
T "Tambour"

D "Disques"

• Oui
O Option

* selon options

ANNEXE 3 : Norme Européenne EN 14214 / Biodiesel

Propriétés	Unités	Min.	Max.	Méthodes d'essai
Densité à 15°C	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675, EN ISO 12185
Indice de cétane mesuré	-	51,00	-	EN ISO 5165
Viscosité cinématique à 40°C	mm ² /s	3,50	5,00	EN ISO 3104
Point d'éclair	°C	101	-	ISO / CD 3679
Résidu de carbone (sur 10% du résidu de distillation)	% m/m	-	0,30	EN ISO 10370
Stabilité à l'oxydation à 110°C	hrs	6	-	pr EN 14112
Corrosion à la lame de cuivre (3h à 50°C)	classification	Classe 1		EN ISO 2160
Esters	% m/m	96,50	-	EN 14103
Eau	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
Cendres sulfatées	% m/m	-	0,02	ISO 3987
Soufre	mg/kg	-	10	-
Indice d'acide	mg KOH/g	-	0,50	pr EN 14104
Indice d'iode	-	-	120	pr EN 14111
Linoléate de méthyle	% m/m	-	12,00	pr EN 14103
Esters méthyliques polyinsaturés	% m/m	-	1,00	-
Méthanol	% m/m	-	0,20	pr EN 14110
Glycérides				
Monoglycérides	% m/m	-	0,80	pr EN 14105
Diglycérides	% m/m	-	0,20	
Triglycérides	% m/m	-	0,20	
Glycérol libre	% m/m	-	0,02	
Glycérol total	% m/m	-	0,25	
Métaux alcalins (Na, K)	mg/kg	-	5	pr EN 14108, pr EN 14109
Phosphore	mg/kg	-	10	pr EN 14107
Contamination totale	mg/kg	-	24	EN 12662

ANNEXE 4

La fabrication du savon⁸

On désigne sous l'appellation savon les sels de sodium ou de potassium des acides gras saturés ou insaturés, solubles dans l'eau. Ils peuvent être durs ou mous, les savons durs sont des sels de sodium des acides gras à longues chaînes. Ils sont surtout utilisés dans les savons de toilette et savons domestiques. Les savons mous sont eux, des sels de potassium des mêmes acides gras. Ils sont obtenus en faisant agir une solution basique sur un ou plusieurs acides gras :

Solution basique (ou alcali ou lessive) + acide gras → **Savon** + glycérine

Les produits obtenus (savon, glycérine et excès de solution basique) ne sont pas toujours séparés ou séparables parce que les précédés à mettre en œuvre sont souvent compliqués. De plus, l'ajout de glycérine peut donner au savon une certaine valeur ajoutée.

Les procédés de fabrication

Les procédés de fabrication sont assez complexes si l'on veut obtenir du savon de bonne qualité. Trois principaux types de fabrications sont utilisés :

- Le procédé à froid, principalement adapté à la production artisanale :
Dans ce procédé la solution basique et la matière grasse insaponifiée en excès ne sont pas séparées. Pour obtenir du savon de meilleure qualité il faut utiliser des huiles qui se combinent facilement à la solution basique ou qui produisent assez de chaleur pour favoriser la combinaison avec la glycérine.
- Le procédé mi-cuit, mieux adapté à la petite production industrielle :
Principalement destiné à la production de savon de ménage. Il ne permet pas non plus le rejet des excès, pas plus que la séparation de la glycérine. Il permet par contre, l'ajout d'additifs qui peuvent améliorer notablement la qualité du savon.
- La "méthode marseillaise" bien adaptée à la production industrielle :
C'est la plus répandue. Elle demande plus de temps que la méthode précédente mais donne des produits de bien meilleure qualité car elle permet l'obtention d'un savon très pur par la séparation (on dit "relargage" dans la terminologie de la savonnerie) des produits qui ne sont pas du savon.

Chaque corps gras a ses propres caractéristiques ou propriétés physiques qui sont déterminées par les poids moléculaires de leurs acides gras. Ces caractéristiques déterminent à leur tour en grande partie, les caractéristiques du savon, notamment le pouvoir moussant, le pouvoir détergent, l'effet sur la peau, la consistance, la solubilité dans l'eau, la stabilité de la mousse.

Les corps gras utilisés dans la savonnerie

Sur base de la composition d'acides gras, il y a trois grandes catégories de corps gras :

Les huiles de noix contiennent une proportion importante d'acide laurique. Les deux huiles de cette catégorie importantes pour la savonnerie sont l'huile de coco (coprah) et l'huile de palmiste. Elles sont plus aptes au procédé à froid et se saponifient facilement avec des bases fortes (30 à 40 °Bé⁹). Cependant, ces deux huiles, mais surtout l'huile de coco, donnent des savons cassant et agressifs pour la peau. Alors ces huiles sont le plus souvent mélangées à d'autres huiles mais à des quantités limitées (de 10 à 20 %),

⁸ D'après l'ouvrage de Lisette Cauberg aux éditions Atol (Belgique)

⁹ Le **degré Baumé** est une unité de mesure indirecte de concentration, *via* la densité, inventée par Antoine Baumé. On le note par °B, °Be ou °Bé.

Les graisses dures renferment des quantités importantes d'acides palmitique et stéarique. Les graisses dures intéressantes pour la savonnerie sont l'huile de palme et les graisses animales (le suif du boeuf, du mouton et le saindoux de porc). La saponification des graisses dures demande des solutions de bases moins fortes au début du processus (10 à 15 °Bé); après une lessive plus forte peut être utilisée. (25° à 30 °Bé).

Les huiles douces renferment des quantités appréciables d'acides non saturés : acide oléique et acide linoléique. Les huiles douces connues dans la savonnerie sont l'huile de soja, l'huile d'arachide, l'huile de coton, l'huile de ricin, l'huile d'olive et l'huile de lin. Elles sont mélangées avec les huiles de noix pour la production de savons durs.

A ces 3 grandes familles s'ajoute les huiles dites non comestibles parmi lesquelles :

L'huile de neem

Cette huile est obtenue à partir des graines du neem (*Azadirachta Indica*). Le contenu en huile du noyau est à peu près 45%. Elle est toujours employée en mélange à cause de son odeur désagréable

Huile de ricin

L'huile de ricin est obtenue à partir des graines du ricin. La graine renferme entre 45 à 55 % d'huile que l'on peut mélanger avec les autres huiles dans la fabrication du savon.

Huile de pourghère

Cette huile est obtenue à partir des graines du pourghère, La graine renferme entre 28 et 38 % d'huile. Le savon de cette huile est relativement mou.

Les caractéristiques des corps gras utilisées en savonnerie.

Il existe quelques indices qui caractérisent les corps gras et qui sont utiles à connaître dans l'objectif de faire la composition 'idéale' pour obtenir le savon désiré.

Indice de saponification

Chaque huile ou corps gras est caractérisé par un *indice de saponification*. Cette valeur indique la quantité de potasse nécessaire pour saponifier une quantité donnée du corps gras.

L'indice d'iode

Cet indice indique la présence d'acides gras non saturés dans les corps gras et se traduit en centigrammes d'iode absorbé par un gramme d'huile.

Le Facteur INS (Iodine Number Saponification Value)

Le coefficient INS s'obtient par soustraction de l'indice d'iode à l'indice de saponification du corps gras concerné. C'est généralement la valeur qui est utilisée pour confectionner le mélange des corps gras et pour estimer la qualité du savon qui donnera ce mélange de corps gras.

L'augmentation de l'INS correspond à :

- des corps gras plus riches en acides saturés
- une diminution des propriétés détergentes, moussantes et de solubilité,
- une diminution de la tendance à rancir.

Corps gras	Corps gras Indice de saponification	Indice d'iode	Facteur INS
Huile de coco	256	8	248
Huile palmiste	248	17	231
Huile de palme	200	51	149
Huile de pourghère	199	100	99
Suif (de boeuf)	197	40	157
Huile de neem	196	69	127
Saindoux (porc)	195	61	134
Suif (de mouton)	195	39	156
Huile de coton	194	109	85
Huile de soja	192	128	64
Huile d'arachide	190	95	95
Huile de tournesol	190	135	55
Huile de sésame	190	111	79
Beurre de karité	187	61	126
Huile de ricin	182	85	97
Huile de lin			15

Les corps gras avec un INS extrême ne peuvent être utilisés seuls dans la fabrication de savon, les huiles avec un coefficient moyen sont mieux adaptées mais produisent des savons à pouvoir moussant limité. Il faut donc mélanger des corps gras à coefficient INS réduits (mais dont le savon est mou) avec des corps gras dont le savon augmente la fermeté de l'ensemble :

Ainsi on part du principe que pour obtenir un bon savon, le coefficient INS de l'ensemble des corps gras doit se rapprocher de 145. On peut donner comme exemple d'un bon mélange :

- 20% d'huile de palme $0,2 \times 231 = 46,2$
- 50% d'huile de palmiste $0,5 \times 149 = 74,5$
- 30% d'huile de coton $0,3 \times 85 = 25,5$

Soit un total de 146,5

L'huile de palmiste aurait pu être remplacée par les graisses d'origine animale qui donnent d'excellents savons

ANNEXE 5

LES VOIES DE VALORISATION DE LA BIOMASSE

A - Définition : la biomasse

Dans le domaine de l'énergie, le terme biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. On distingue trois familles principales, auxquels correspondent des procédés de valorisation spécifiques :

- la biomasse lignocellulosique,
- la biomasse oléagineuse (colza, palmier à huile)
- la biomasse à glucides (céréales, betteraves, cannes à sucre).

Chaque type de biomasse a une composition en cellulose, hémicellulose et lignine qui lui est propre et contient des composés minéraux communément appelés « cendres ». Elle se caractérise aussi par sa teneur en eau variable au cours du temps.

Si la composition en C, H et O est assez constante entre les biomasses, le taux d'azote varie de manière importante. Le pourcentage de cendres peut également varier dans de grandes proportions comme le montre le tableau suivant

Composition moyenne en %	C	H	O	N	Cendres
Feuillus	51,4	6,07	42,5	0,37	2,5
Résineux	50,8	6,06	42,7	0,36	2,3
Pailles	48,9	5,97	43,9	0,82	7,3
Balles de riz	48,2	6,48	45,1	1,19	15,8
Bagasses	53,1	6,03	38,7	1,25	9,3
Tiges de coton	49,5	5,80	43,8	1,17	8,5
Tourteau de Jatropha					

Tableau : Composition en carbone, hydrogène, oxygène, azote et cendres de quelques biomasses

Différents procédés de valorisation correspondent aux différents types de biomasse. On distingue les voies biochimiques et les voies thermochimiques.

B – La voie biochimique

Elle est utilisée pour la valorisation des biomasses oléagineuses et à glucides. On trouve principalement trois procédés :

- **la fermentation alcoolique** qui permet la production de méthanol et d'éthanol.
- **l'extraction d'huiles végétales** qui peuvent être utilisées comme biocarburant soit directement ou travaillées (estérification).
- **la digestion anaérobie ou méthanisation.**

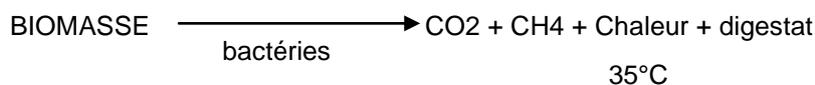
Elle a pour finalité la production de biogaz (un mélange de méthane et de dioxyde de carbone). La biomasse est enfermée dans un digesteur où se trouvent des bactéries. On distingue 3 plages de production de biogaz en fonction de la température.

psychrophile: 15-25 °C

mésophile: 25-45 °C

thermophile: 45-65 °C

Ce sont les digesteurs mésophiles qui sont les plus utilisés (à 38 °C) dans les zones tempérées.



Plusieurs paramètres permettent le contrôle du processus de méthanisation :

- la température : on travaille généralement vers 30-35°C, il faut donc chauffer le réacteur en consommant une partie du méthane produit, ce qui occasionne un coût technologique et une surveillance non négligeable,

Note : Dans les pays tropicaux, la méthanisation peut être réalisée à température ambiante sans chauffage additionnel. La technologie relativement simple rend le procédé de production de biogaz très intéressant pour les pays en développement.

- le pH : la zone optimale est entre 6,5 et 8,0
- la charge organique entrante : pour les déchets très fermentescibles, il faut éviter les surcharges qui risquent d'acidifier le milieu (production d'acides gras volatils AGV)
- la matière que l'on souhaite décomposer doit être très diluée : 85 à 90% d'eau, 10 à 15% de matière sèche
- l'agitation : il faut éviter la production de croûtes et la décantation de particules denses. On utilise un agitateur mécanique, par circulation du milieu ou par injection de biogaz sous pression.

La digestion anaérobie peut être mise en place pour traiter des rejets organiques divers : eaux usées, boues de station d'épuration, déjections animales, déchets d'industries agro-alimentaires, ordures ménagères, etc.

Pour les solides, le taux de digestion de la matière organique va surtout dépendre de la granulométrie et de la teneur en lignine qui va jouer un rôle défavorable. Ce taux peut atteindre 70% de la matière entrante et les temps de séjour appliqués sont généralement de 10 à 20 jours.

Concernant l'utilisation du biogaz : différentes voies sont envisageables : chaleur seule, production d'électricité seule, cogénération, carburant automobile, injection dans le réseau de gaz naturel. La seule fraction valorisable étant le méthane, les autres composants sont inutiles, voire nuisibles, et nécessitent une ou plusieurs étapes d'épuration (notamment pour la vapeur d'eau et le soufre – H₂S).

C - La voie thermo-chimique

La transformation thermo-chimique assure aujourd'hui probablement plus de 95 % de la valorisation de la biomasse lignocellulosique. Les trois voies principales de conversions sont : la gazéification, la combustion et la pyrolyse.

La gazéification du bois consiste à décomposer en présence d'un gaz réactif (air, O₂, CO₂,...) le matériau initial pour obtenir des produits gazeux. A la différence de la pyrolyse, la gazéification met en jeu des réactions d'oxydation partielle du matériau initial. Les produits gazeux obtenus sont principalement composés de H₂, CO, CO₂ et CH₄. Les gaz produits seront brûlés pour la production de chaleur, ou injectés dans un moteur ou turbine pour la production d'électricité.

La combustion du bois est une transformation en présence d'oxygène qui décompose de façon complète le matériau carboné en CO₂ et H₂O tout en libérant de l'énergie. L'agent oxydant employé est toujours de l'oxygène. Les réactions de combustion sont toujours exothermiques.

La pyrolyse : processus primaire de décomposition thermique de la biomasse.

La pyrolyse est une transformation se déroulant en atmosphère inerte (absence d'oxygène). Le matériau initial est ainsi décomposé en une fraction solide (charbon), en liquide (huile) et en gaz. La proportion de ces différents produits est fonction des paramètres que sont, entre autres, la température, la pression, la vitesse de chauffage, le temps de séjour, etc... De façon générale, la température de réaction n'excède pas 600°C.

Au delà de ces utilisations classiques, le charbon peut être utilisé en substitution dans les chaudières pour la production d'électricité. Les liquides peuvent être utilisés dans les moteurs pour la génération d'électricité ou après raffinage dans les transports. Les gaz, quand ils sont valorisés, sont brûlés pour entretenir le processus.

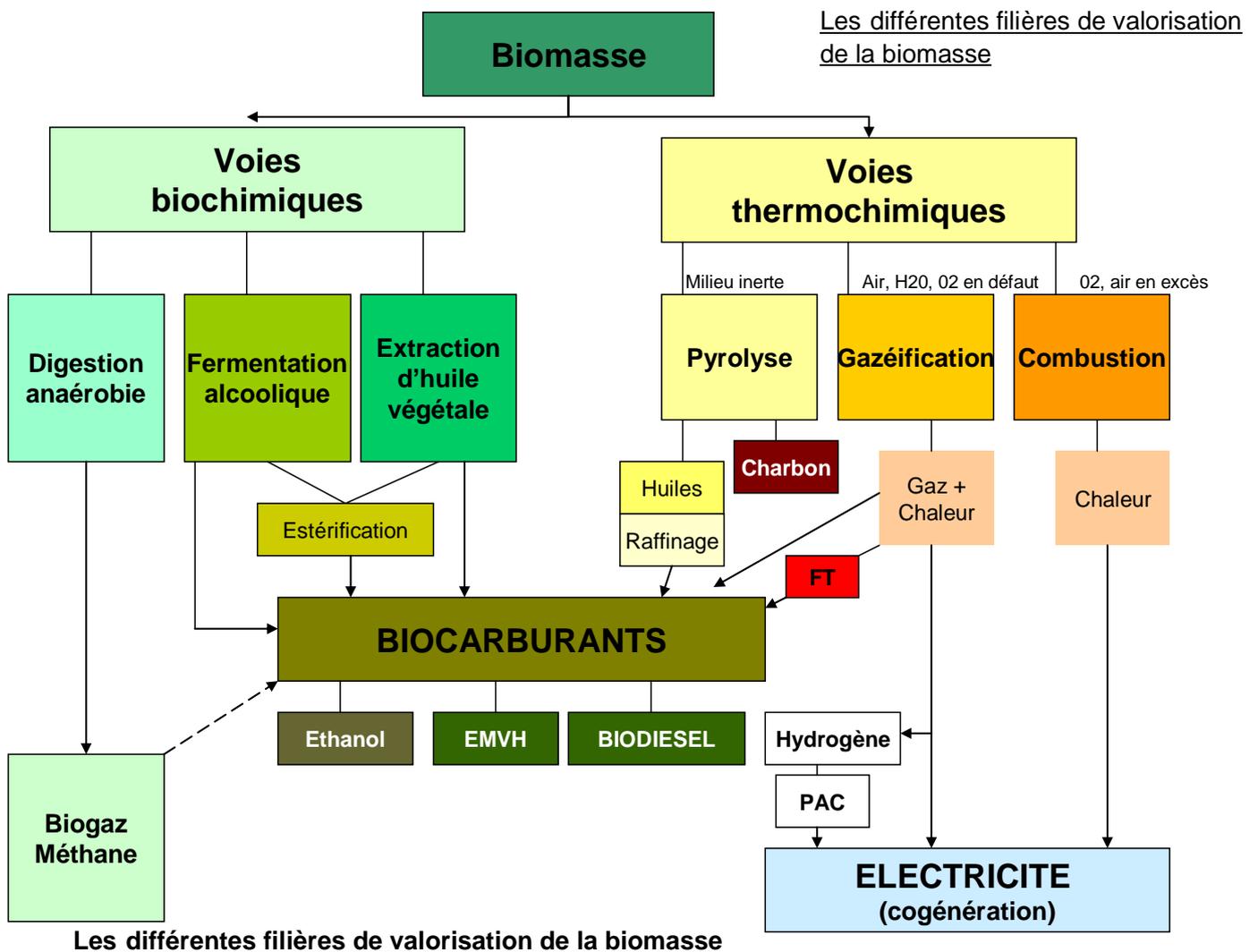
On distingue selon les conditions de réaction :

La pyrolyse lente ou classique : production de charbon de bois

Technique très ancienne. Le charbon de bois est toujours utilisé notamment dans la métallurgie au Brésil ou comme première source d'énergie domestique dans les pays en développement. Les conditions de réactions se caractérisent par de faibles vitesses de chauffage des particules.

La pyrolyse rapide ou flash : production d'huile de pyrolyse.

De développement récent (une vingtaine d'années), elle a pour objectif la production d'un produit liquide énergiquement ou chimiquement valorisable. La vitesse de chauffe des particules est très élevée (quelques centaines à quelques milliers de degrés Celsius par seconde.)



BIBLIOGRAPHIE

- Abulude, F.O., M.O. Ogunkoya, and R.F. Ogunleye, Storage properties of oils of two Nigerian oil seeds *Jatropha curcas* (physic nut) and *Helianthus annuus* (sunflower). *American Journal of Food Technology*, 2007. 2(3): p. 207-211.
- Achten, W., et al. Biodiesel from *Jatropha*: the life cycle perspective. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and Genetics. 2007. Wageningen: Fact Foundation.
- Achten, W.M.J., Verchot, L., Franken, Y.J., Mathijs, E., Singh, V.P., Aerts, R. and Muys, B., *Jatropha* bio-diesel production and use : review, *Biomass and Energy*. 2008, 32 (12): p 1063-1084
- Adam, J., Les plantes à matière grasse. 4, Le ricin, le pourghère. *Encyclopédie d'agriculture tropicale*. 1953, Paris: Société d'editions Géographiques. 127 p.
- Adam, J. and M. Ferrand, Oléagineux de l'Afrique intertropicale française (Afrique noire - Madagascar). Tome I- Culture. *Cahiers encyclopédiques d'outre-mer*. 1956, Paris: Encyclopédie d'outre-mer. 106 p.
- Adam, S.E.I., Toxic effects of *Jatropha curcas* in mice. *Toxicol*, 1974. 2: p. 67-76.
- Adebowale, K.O. and C.O. Adedire, Chemical composition and insecticidal properties of the underutilized *Jatropha curcas* seed oil. *African Journal of Biotechnology*, 2006. 5(10): p. 901-906.
- Aderibigbe, A., Johnson, H.P.S. Makkar, and N.F. K. Becker, Chemical composition and effect of heat on organic matter- and nitrogen-degradability and some antinutritional components of *Jatropha* meal. 1997, Institute for Animal Production in the Tropics and Subtropics (480), University of Hohenheim, D-70593 Stuttgart, Germany
- Adolf, W., H.J. Opferkuch, and E. Hecker, Irritant phorbol derivatives from four *jatropha* species. *Phytochemistry*, 1984. 23 (1): p. 129-132.
- Adriaans, T.M.S., Suitability of solvent extraction for *jatropha curcas*. 2006, Ingenia Consultants & Engineers for FACT Foundation.
- Agarwal, D. and A.K. Agarwal, Performance and emissions characteristics of *Jatropha* oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine. *Applied Thermal Engineering*, 2007. 27(13): p. 2314-2323.
- Ahmed, O.M.M.a.A., S.E.I., Effects of *Jatropha curcas* on calves. *Vet. Pathol*, 1979. 16: p. 476-482.
- Ahmed, O.M.M.a.A., S.E.I., Toxicity of *Jatropha curcas* in sheep and goats. *Res. Vet. Sci*, 1979. 27: p. 89-96.
- Akintayo, E.T., Characteristics and composition of *Parkia biglobbosa* and *Jatropha curcas* oils and cakes. *Biores. Techno*, 2004. 92: p. 307-310.
- Alfonso, J., Reporte final sobre los modulos de viveros y establecimiento de parcelas experimentales de pinon, higuera y girasol en el proyecto piloto de produccion de biocombustibles gota verde. 2007, Por FHIA.
- Aponte, C.H., Estudio de *Jatropha curcas* L. como recurso biotico. 1978, University Veracruz, Xalapa-Enríquez, Veracruz, Mexico.
- Aregheore, E.M., Becker, K and Makkar, H.P.S., Detoxification of a toxic variety of *Jatropha curcas* using heat and chemical treatments, and preliminary nutritional evaluation with rats. *S. Pac. J. Nat. Sci.*, 2003. 21: p. 50-56.
- Aregheore, E.M., H.P.S. Makkar, and K. Becker, Assessment of lectin activity in a toxic and a non-toxic variety of *Jatropha curcas* using latex agglutination and haemagglutination methods and inactivation of lectin by heat treatments. *Journal-of-the-science-of-food-and-agriculture*, 1998. 77(3): p. 349-352.
- Aruna R Prakash, J.S.P., Jitendra Chikara and Girish N. Boricha. Floral Biology and flowering behaviour of *Jatropha curcas*. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and genetics. 2007. Wageningen: Fact Foundation.
- Avila, J.G., Breves Instruções para a cultura da Purgueira. *Repartições Técnica dos serviços Agrícolas, Florestais e Pecuários.*, ed. I.N.d.C. Verde. 1949, Praia.
- Baillon, H., Histoire des plantes. 1874, Paris 5: Hachette.
- Bargale, P.C.a.S., J., 2000, Oil expression characteristics of rapeseed for a small capacity screw press: *Journal of food science technology*. 2000. 37: p. 130-134.

- Basha, S. and M. Sujatha, Inter and intra-population variability of *Jatropha curcas* (L.) characterized by RAPD and ISSR markers and development of population-specific SCAR markers. *Euphytica*, 2007. 156: p. 375-386.
- Baumgart, S. Working paper conference, Belize. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and genetics. 2007. Wageningen.
- Beerens, P., Screw-pressing of *Jatropha* seeds for fuelling purposes in less developed countries, in Department of Sustainable Energy Technology. 2007, Eindhoven University of Technology: Eindhoven.
- Berchmans, H.J. and S. Hirata, Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource Technology*, 2008. 99(6): p. 1716-1721.
- Bhattacharya, A., K. Datta, and S.K. Datta, Floral biology, floral resource constraints and pollinisation limitation in JCL. *pakistan journal of biological sciences*, 2005. 8 (3): p. 456-460.
- Bhojvaid, P.P., Biofuels: towards a greener and secure energy future. *Biofuels: towards a greener and secure energy future*, 2006.
- Biswas S, K.N.a.S.G. Biodiesel: technology and business opportunities. in Proceedings of the biodiesel conference toward energy independence—focus of *Jatropha*, Hyderabad, India, June 9–10. 2006. New Delhi.
- Burkill, I.H., A dictionary of the economic products of the Malay peninsula., ed. V. II. 1996, Kuala Lumpur.: Ministry of Agriculture,.
- Calvino, M., Il "Zicilte" dei Maya. *L'agricoltura Coloniale*, 1925. 19: p. 331-342.
- Cano Asseleih, L.M., R.A. Plumbly, and P.J. Hylands, Purification and partial characterization of hemagglutination from seeds of *Jatropha curcas*. *Journal of food Biochem*, 1989. 13: p. 1-20.
- Chedchant, J., Study on quality and quantity of oil extracted from *jatropha curcas*. 2004, KU Rubber technology laboratory: KAPI.
- Chelmicki, J.d., Varnhagen FA de, *Geografia Cabo Verdiana ou Descripção Geografico-Historica da Prov. in das Ilhas de Cabo verde e guiné*. 1841: Lisboa.
- Chikara, J., A.G., J. S. Patolia and D. R. Chaudhary and Aniruddha Zala. Productivity of *Jatropha curcas* under different spacing. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and Genetics. 2007: Discipline of Phytosalinity, Central Salt and Marine Chemicals Research Institute, G.B. Marg, Bhavnagar 364 002, India.
- Chitra, P., P. Venkatachalam, and A. Sampathrajan, Optimization of experimental conditions for biodiesel production from alkali-catalysed transesterification of *Jatropha curcas* oil. *Energy for sustainable development*, 2005. 9: p. 13-18.
- Correll, D.S. and H.B. Correll., *Flora of the Bahama Archipelago*. 1982, Vaduz: J. Cramer,.
- Cossel, v.J.D., *Seifenherstellung auf der Basis von Purgeira-Oil, Integrierte Entwicklungsmaßnahmen für die Inseln Fogo und Brava/Kap Verde*. 1982: Eschborn.
- Cunha da Silveira, J., Contribution à l'étude du pourghère aux îles du Cap Vert. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 1934. vol.6:n°1: p. p.116-126.
- Da Camara Machado, A., NS. Frick, R.Kreman, H.Katinger, M.Laimer da Camara Machado, Biotechnological Approaches to the Improvement of *Jatropha curcas*, in *Biofuels and Industrial Products from J.curcas*. 1997, Gubitz, Mittelbach, Trabi.
- Daey Ouwens, K., FACT; Francis G., University of Hohenheim, Jan Franken, FACT, Rijssenbeek W., FACT, Riedacker A. INRA, Foidl N., Jongschaap J, *Plant Research International, Position Paper on Jatropha curcas, State of the Art, Small and Large Scale Project Development*. 2007, FACT. p. 7.
- Daniel, J.N., A realistic approach for *jatropha* oilseed production. *Future Energy*, published by the Maharashtra Energy Development Agency, 2005.
- Daniel, J.N. *Jatropha* production options under varied resource conditions. in National Seminar on Biodiesel, 23-24 September. 2005. Chennai, India.
- Datta, M., Mukherjee P, Ghosh B., Jha TB, In vitro clonal propagation of biodiesel plant (*Jatropha curcas* L.). *Current Science*, 2007. 93(10): p. 1438-1442.
- De Lourdes Silva de Lima, R.L.S.S.N.E.d.M. and Beltrão. Growth of *Jatropha curcas* seedlings on containers of different volumes. in Expert Seminar on *Jatropha Curcas* L. Agronomy and genetics. 2007. Wageningen: Fact Foundation.
- Dehgan, B., Experimental and evolutionary studies of relationships in genus *Jatropha* L. (*Euphorbiaceae*), in Dept of botany. 1976, University of California: Davis.
- Dehgan, B., Phylogenetic significance of interspecific hybridization in *Jatropha* (*Euphorbiaceae*). *Systematic Botany*, 1984. vol.9:n 4: p. 467-478.

- Dehgan, B. and B. Schutzman, Contributions toward a monograph of neotropical *Jatropha*: phenetic and phylogenetic analyses. *Annals-of-the-Missouri-Botanical-Garden*, 1994. 81(2): p. 349-367.
- Dehgan, B. and G.L. Webster., Morphology and infrageneric relationships of the genus *Jatropha* (Euphorbiaceae), in *Publications in Botany*, V. 74., Editor. 1979, University of California.
- Droit, S., Recherches sur la graine et l'huile de purgère ou pignon d'Inde (*Jatropha curcas* L.). 1932, Université de Paris-Faculté de pharmacie: Laval. p. 126 p.
- Drummond, O., Purcino, AAC, Cuhna, L.H, de S, Veloso, J de M., *Cultura do pinhao manso*. Belo Horizonte: EPAMIG, 1984.
- Dufaure, C., Leyris, J., Rigal, L., and Mouloungui, Z., , :, A Twin-screw extruder for oil extraction: direct expression of oleic sunflower seeds. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1999. 76: p. 1073-1080.
- Ellis, R.H., Hong, T.D. et Roberts, E.H., *Handbook of Seed Technology for Genebanks*. Volume 1. Principles and methodology. 1985, Rome, Italie.: IBPGR.
- Euler, H. and D. Gorritz, Case Study "*Jatropha* c". 2004, Global Facilitation Unit for Underutilized Species (GFU) and Deutsche Gessellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ): Frankfurt, Germany. p. 63 pages.
- Fact_Fondation, *Jatropha Handbook First Draft*. 2006, p. 45 pages.
- Faria, M.H.G., et al., Cytotoxic and antifungal properties of medicinal plants from Ceara, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 2006. 66(4): p. 1133-1135.
- Ferchau, E., Equipment for decentralized cold pressing of oil seeds. 2000, Folkecenter for Renewable Energy.
- Ferrão, J.E.M. and A.M.B.C. Ferrao, Contribuição para o estudo da semente de purgeira (*Jatropha curcas* L.) de S. Tomé e Príncipe. Garcia de Orta. *Serie de Estudos Agronomicos*, 1984. vol.2:n 1-2: p. 23-31.
- Ferrao, J.E.M., A.M.B.C. Ferrao, and M.T.S. Patricio., *Purgueira da Ilha do Fogo. Composição da semente, algumas características da gordura.*, E.N. 14., Editor. 1982, Universidade Tecnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Secção de Agronomia Tropical.: Lisbonne.
- Foidl, N., Isopropanol injection in extruder. 2007.
- Foidl, N., et al., *Jatropha curcas* L; as a source for production of biofuel in Nicaragua. *Bioresource Technology*, 1996. 58: p. 77-82.
- Foidl, N., et al., *Tempate (Jatropha curcas* L., Euphorbiaceae); in: Z. Herrera Alegria & B. Lanuza R., *Especies para reforestacion en Nicaragua*, Editorial, Hispamer. 1996: Managua. p. 109 - 113.
- Forson, F.K., E.K. Oduro, and E. Hammond-Donkoh, Performance of *jatropha* oil blends in a diesel engine. *Renewable Energy*, 2004. 29(7): p. 1135-1145.
- Freitas, B.d., *A Purgueira e o seu oleo*. 1906, Lisboa: Typographia "a Editora". 119 p.
- Freslon, F., *Presse Bielenberg classique pour le Jatropha - Plans techniques, production et tests*. 2006, USAID - ERI: Fianarantsoa.
- Gaydou, A., et al., Ressources énergétiques d'origine végétale à Madagascar : alcool éthylique et huile de graines oléagineuses. *Oléagineux*, 1982. 37(3): p. 135-141.
- Georges, K., et al., Pest-managing activities of plant extracts and anthraquinones from *Cassia nigricans* from Burkina Faso. *Bioresource Technology*, 2008. 99(6): p. 2037-2045.
- Ghosh, A., J. S. Patolia, D. R. Chaudhary, Jitendra Chikara, S. N. Rao, Dheerendra Kumar, G. N. Boricha and A. Zala, *Discipline of Phytosalinity*, Central Salt and Marine Chemicals Research Institute, G.B. Marg, Bhavnagar 364 002, India. Response of *Jatropha curcas* under different spacing to *Jatropha* de-oiled cake. in *Expert Seminar on Jatropha curcas* L. Agronomy and genetics. 2007. Wageningen.
- Godfrey, G., *Pourriture grise du Ricin, Aubergine, Jatropha, Manioc et Euphorbia Pulcherrima*. *Revue de botanique appliquée à l'agriculture tropicale*, 1923. 3.
- Godin, V., Spensley P., *Oils and Oilseeds*. TPJ Crop and Product Digest, 1971. 1: p. 107-110.
- Gokhale, D. *Jatropha: Experience of Agro-Forestry & Wasteland Development Foundation*, Nashik, India. in *International Consultation on Pro-poor Jatropha Development*. 2008. Rome: Syngenta International.
- Goonasekera, M.M., et al., Pregnancy terminating effect of *Jatropha curcas* in rats. *Journal-of-ethnopharmacology*, 1995. 47(3): p. 117-123.
- Gour, V., Singh B, Swaminathan R, Ponraj V. Production practices including post-harvest management of *Jatropha curcas*. in *Proceedings of the biodiesel conference toward energy independance - Focus of Jatropha*, Hyderabad, India, June 9-10, 2006. 2006. New Delhi.

- Grimm, C., Maes, JM., Arthropod Fauna Associated with *Jatropha curcas* L. in Nicaragua: A Synopsis of Species, their Biology and Pest Status, in Biofuels and industrial products from *J.curcas* (Gübitz, Mittelach, Trabi). 1997.
- Grimm, C., Guharay, F, Potential of Entomopathogenous Fungi for the Biological Control of True Bugs in *J. curcas* L. Plantations in Nicaragua, in Biofuels and industrial products from *J.curcas* - Dbv-Verlag für die Technische Universität Grz, Australia (Gübitz, Mittelach, Trabi). 1997.
- Grimm, C. and A. Somarriba, Suitability of physic nut (*Jatropha curcas* L.) as single host plant for the leaf-footed bug *Leptoglossus zonatus* Dallas (Het., Coreidae). *Journal of Applied Entomology-Zeitschrift Für Angewandte Entomologie*, 1999. 123(6): p. 347-350.
- Gübitz, G., Mittelbach, M.Trabi, M, Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L. *Bioresource Technology*, 1999. 67.
- Hajos, G., et al., Biological effects and survival of trypsin inhibitors and agglutinin from soybean in the small intestine of the rat. *J. Agric. Food Chem.*, 1995. 43: p. 165-170.
- Heller, J., Etude des potentialités génétiques et amélioration des méthodes de culture et de reproduction du pourghère (*Jatropha curcas* L.). 1991, Stuttgart: GTZ. 88 p.
- Heller, J., Untersuchungen über Genetische Eigenschaften und Vermehrung und Anbauverfahren bei des Pürgiernuss (*Jatropha curcas* L.). 1992: Hamburg.
- Heller, J., Physic nut. *Jatropha curcas* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops, in Institute of Plant Genetic and Crop Plant Research, Gatersleben, Germany, and International Plant Genetic Resource Institute, Rome, Italy,. 1996. p. 88 pages.
- Henning, R., Sanankoua, O, Sidibé, Y, Production et utilisation de l'huile végétale comme carburant, rapport annule de Projet. 1996, Ministère des mines de l'énergie et de l'hydraulique, Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie, Projet pourghère DHNE - GTZ: Bamako.
- Henning, R., Ramofafeno, T., Eclairage avec de l'huile *Jatropha*. 2005, PLAE - Atelier de démonstration à Marovoay, 21. 11. 2005.
- Henning, R., Identification, selection and multiplication of high yielding *Jatropha curcas* L. plants and economic key points for viable *Jatropha* oil production costs (Henning paper), in site www.jatropha.de. 2007.
- Hirota, M., et al., A new tumor promoter from the seed oil of *Jatropha curcas* L., an intramolecular diester of 12-deoxy-16-hydroxyphorbol. *Cancer-Research*, 1988. 48(20): p. 5800-5804.
- Holl, M., Gush, MB, Hallows, J, and DB Versfeld, *Jatropha curcas* in South Africa: An Assessment of its Water Use and Bio-Physical Potential. 2007, Report to the Water Research Commission on the project "Investigation into the Impacts of Large-Scale Planting of *Jatropha curcas* on Water Resources, through Process-Based Research and Modelling".
- Jha, T., Mukherjee, P. Datta MM, Somatic embryogenesis in *Jatropha curcas* Linn., an important biofuel plant. *Plant Biotechnology*, 2007: p. 135-140.
- Joker, D., Jepsen, J., *Jatropha curcas* L. Seed Leaflet. Humleback, 2003. 83: p. 1-2.
- Jones, N. and J.H. Miller, *Jatropha curcas*. A multipurpose species for problematic sites, L.r. series, Editor. 1992, World bank.
- Juillet, A.e.a., Les Oléagineux et leurs Tourteaux, P. Lechevallier, Editor. 1955: Paris.
- Kaul, S., et al., Corrosion behavior of biodiesel from seed oils of Indian origin on diesel engine parts. *Fuel Processing Technology*, 2007. 88(3): p. 303-307.
- Kaushik, N., Effect of capsule maturity on germination and seedling vigour in *Jatropha curcas*. *Seed Science and Technology*, 2003. 31(2): p. 449-454.
- Kaushik, N., et al., Genetic variability and divergence studies in seed traits and oil content of *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) accessions. *Biomass & Bioenergy*, 2007. 31(7): p. 497-502.
- Knothe, G., Some aspects of biodiesel oxidative stability. *Fuel Processing Technology Biofuels for Transportation*, 2007. 88(7): p. 669-677.
- Kobilke, H., Untersuchungen zur Bestandesbegründung von Pürgiernuß (*Jatropha curcas* L.). in University. 1989, Hohenheim: Stuttgart.
- Kochhar, S., Kochhar, VP, Singh, SP, Katiyar RS, Pushpangadan, P, Differential rooting and sprouting behaviour of two *Jatropha* Species and associated physiological and biochemical changes. *Current science*, 2005. 89: p. 936-939.
- Kochhar, S., Singh S.P. , Kochhar V.K., Effect of auxins and associated biochemical changes during clonal propagation of the biofuel plant-*Jatropha curcas*. *Biomass and bioenergy*, 2008.
- Koreissi, A.N., F. Maiga, H., Koné, M Marotte, I. Bérubé M. et Goertz., L, Résumé des tests de la presse hydraulique sur le pourghère et le karité. 2005, Ministère de la Promotion de la Femme, de l'Enfant et de la Famille.
- Kpoviessi, D.S.S., Georges C. Accrombessia, Cosme Kossouha, Mohamed M. Soumanoub and Mansourou Moudachirou, Propriétés physico-chimiques et composition de l'huile non

conventionnelle de pourghère (*Jatropha curcas*) de différentes régions du Bénin. 2004, Laboratoire de chimie organique, faculté des sciences et techniques, université d'Abomey-Calavi, 01 BP 526 Cotonou, Bénin.

- Ky Kilea, J., Bgagnane E, Goumbria A, Bidiga I, Karaga A, Rapport de voyage d'étude sur l'utilisation du *Jatropha Curcas* (Pourghère) au Mali du 08 au 15 décembre 2007. 2007, Ministère de l'Environnement du cadre de vie du Burkina Faso, Direction Régionale de l'Environnement et du Cadre de Vie du Centre Est.
- Larochoas, L., (Les huiles siccatives et l'industrie française) Le pourghère. Oléagineux, 1948. vol.3:n 6-7: p. 321-328.
- Liberalino, A.A.A., Bambiia, E.A., Moraes-Santos, T. and Viera, E.C, *Jatropha curcas* L. seeds: Chemical analysis and toxicity. Arq. Biol. Technol., 1988. 31: p. 539-550.
- Liener, I.E., The nutritional significance of plant protease inhibitors. Proc. Nutr, 1979. 38: p. 109-113.
- Liennard, A., Utilisation d'huile de pourghère non esterifiée comme carburant dans les moteurs diesel. 1994, Cirad Sar: Montpellier. p. 13 & annexes.
- Little, E.L. and R.O. Woodbury, Trees of Porto Rico and the Virgin Islands, in Agric Handbook. 1974: Washington DC. p. 416-417.
- Lopez, G., Foidl, G, Foidl, N, Production of Biogas from *J.curcas* Fruitshells, in Biofuels and Industrial Products from *Jatropha curcas*, M.M. G. M. Gubitz, M. Trabi, Editor. 1997. p. 118-122.
- Low, T., Booth, C, The Weedy Truth About Biofuels. 2007, Melbourne: the Invasive Species Council.
- Luo, M.J., et al., Cloning, expression, and antitumor activity of recombinant protein of curcin. Russian Journal of Plant Physiology, 2007. 54(2): p. 202-206.
- Makkar, H.P.S., et al., Studies on nutritive potential and toxic constituents of different provenances of *Jatropha curcas*. Journal-of-agricultural-and-food-chemistry, 1997. 45(8): p. 3152-3157.
- Marfo EK, O.O., Afolabi A, Nutritional evaluation of pawpaw (*Carica papaya*) and flamboyant (*Delonix regia*) seed oils. Nutr Rep Int, 1988. 37(2): p. 303-310.
- Martin, G. and A. Mayeux, Le poughère (*Jatropha curcas* L.) : un carburant possible. Agritrop, 1985. vol.9:n 2: p. 73-75.
- Martinez-Herrera, J., et al., El pinon Mexicano (*Jatropha curcas* L.) una planta promisoriosa para la agricultura en Mexico.; Mexican pine *Jatropha curcas* L.), a promising plant for Mexican agriculture.
- Meher, L.C., D. Vidya Sagar, and S.N. Naik, Technical aspects of biodiesel production by transesterification--a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006. 10(3): p. 248-268.
- Mejia, Cultivo de *Jatropha curcas* y construccion de una planta de biodiesel en San esteban, Olancho, Honduras. 2006, Inversiones San Martín.
- Meshram, P.B.a.K.C.J., A new report of *Spodoptera litura* (Fab.) Boursin (Lepidoptera: Noctuidae) as a pest of *Jatropha curcas* Linn. . Indian Forester, 1994. 120(3):: p. 273-274.
- Minengu, J.d.D. Paper working sessions. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and genetics. 2007. Wageningen.
- Mourgue, M. and Al, Study of the toxicity and localisation of the toxalbumin (curcin) of the seed of *Jatropha curcas*. Bull. Soc. Chim., 1961. 43: p. 505-516.
- Mujumdar, A.M. and A. Misar, Anti-inflammatory activity of *Jatropha curcas* roots in mice and rats. Journal of Ethnopharmacology, 2004. 90(1): p. 11-15.
- Mujumdar, A.M., A.S. Upadhye, and A.V. Misar, Studies on antidiarrhoeal activity of *Jatropha curcus* root extract in albino mice. Journal of Ethnopharmacology, 2000. 70(2): p. 183-187.
- Munch, E., Kiefer J., Le Pourghère (*Jatropha curcas* L., Botanique, écologie, culture (1ère partie), produits de récolte, filières de valorisations, réflexions économique (2ème partie),. 1986, Université de Stuttgart - Hohenheim. p. 276 pages.
- Nasirullah and K.V. Nagaraja, Detection of presence of toxic oils in edible vegetable oils. Oléagineux, 1987. 42(1): p. 35-38.
- Nath, L.K. and S.K. Dutta. Acute toxicity studies and wound healing response of curcain, a proteolytic enzym extract from the latex of *Jatropha curcas*. in Biofuels and Industrial products from *Jatropha curcas*. 1997. Nicaragua.
- Ogbebor, N.O., A.T. Adekunle, and D.A. Enobakhare, Inhibition of *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz) Sac. causal organism of rubber (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) leaf spot using plant extracts. African Journal of Biotechnology, 2007. 6(3): p. 213-218.
- Ogunwole, J.O., Patolia J.S, Chaudahary D.R, Arup Gosh and Chikara J. Improvement of the quality of a degraded Entisol with *Jatropha urcas* L. under an Indian Semi Arid Conditions. in

- Expert seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and genetics, 26-28 march 2007. 2007. Wageningen, The Netherlands: Fact Foundation.
- Openshaw, K., A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. Alternative Energy Development Inc, 2000.
 - Osoniyi, O. and F. Onajobi, Coagulant and anticoagulant activities in *Jatropha curcas* latex. *Journal of Ethnopharmacology*, 2003. 89(1): p. 101-105.
 - Ouédraogo, M., Etude Biologique et Physiologique du Pourghère, *Jatropha curcas* L. 2000, Université de Ouagadougou Burkina Faso: Ouagadougou. p. 290.
 - Pant, K., V.Khosla, D.Kumar&S.Gairola, Seed oil content variation in *Jatropha curcas* Linn. in different altitudinal ranges and site conditions in H.P. *Lyonia*, 2006. 11: p. 31-34.
 - Patolia, J., Jitendra Chikara, A. R. Prakash, Arup Ghosh, D. R. Chaudhary and H. M. and Bhuva. Provenance trial for selection of high yielding *Jatropha curcas* on wastelands. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and Genetics. 2007. Wageningen: Discipline of Phytosalinity, Central Salt and Marine Chemicals Research Institute,.
 - Patolia, J., Arup Ghosh, Jitendra Chikara, D. R. Chaudhary, D.R. Parmar and H. M. and Bhuva. Response of *Jatropha curcas* grown on wasteland to N and P fertilization. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and Genetics. 2007.
 - Peixoto, A.R., *Plantas oleaginosas arboreas*, ed. L. Nobel. 1973, Sao Paulo.
 - Phillips, S., A new record of *Pestalotiopsis Versicolor* on Leaves of *Jatropha curcas*. *Ind. Phytopath*, 1976. 28: p. 546.
 - Prabakaran, A.J. and M. Sujatha, *Jatropha tanjorensis* Ellis & Saroja, a natural interspecific hybrid occurring in Tamil Nadu, India. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 1999. 46(3): p. 213-218.
 - Rahuman, A.A., et al., Larvicidal activity of some Euphorbiaceae plant extracts against *Aedes aegypti* and *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae). *Parasitol Res*, 2007.
 - Rakotavo, T.D., Etude économique de la détermination des coûts de production de *Jatropha curcas* dans quelques zones productrices : Isorana – Ambalavao – Sendrisoa – Tolongoina - Manampatrana. 2005, ERI, Université d'Antananarivo Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques Département Agro-management.
 - Rathore, V. and G. Madras, Synthesis of biodiesel from edible and non-edible oils in supercritical alcohols and enzymatic synthesis in supercritical carbon dioxide. *Fuel*, 2007. 86(17-18): p. 2650-2659.
 - Ratnadass, A., Perspectives de gestion biointensive des foreurs des tiges de sorgho en Afrique de l'Ouest. *Insect Science and its Application*, 1997. vol.17:n 2: p. 227-233.
 - Ratre, S.A., A preliminary study on Physic nut (*Jatropha curcas*L.) in Thailand. *Pakistan Journal of Biological Science*, 2004. 9: p. 1620-1623.
 - Reinhardt, G.I., Becker, K (Univ of Hohenheim), Gosh, A (CSMCRI), Basic data for *Jatropha* production and use - updated version. 2008, IFEU, Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg gGmbH, CSMCRI Central Salt & Marine Chemical Research Institut, Bhavnagar, University of Hohenheim Institut of Animal Production in the Tropics and Subtropics.
 - Renner, A., Zelt, T., Gerteiser, S., Global Market Study on *Jatropha*, final report, prepared for the World Wide Fund for Nature. 2008, The Global Exchange for Social Investment (GEXSI): London/Berlin.
 - Reyadh, M. The cultivation of *Jatropha curcas* in Egypt. in International Expert Meeting. 1997. Cairo.
 - Rietzler, J., TU Ansbach, Germany & H. Brandt. Using *Jatropha curcas* for generating Energy-A study of the properties during processing,. in PPM Pilot Pflanzenoltechnologie Magdeburg e.V. Germany. 2007.
 - Rijssenbeek, W.H.R., Jongschaap R, Lutzeyer HJ, Venturi P. Expert Meeting *Jatropha*, Brussels 07/12/07. 2007. Brussel.
 - Rug, M. and A. Ruppel, Toxic activities of the plant *Jatropha curcas* against intermediate snail hosts and larvae of schistosomes. *Tropical Medicine & International Health*, 2000. 5(6): p. 423-430.
 - Sahler, K., Une analyse : le *Jatropha curcas*, province de Fianarantsoa. Quel développement durable ? Madagascar entre global et local. Mémoire présenté en vue de l'obtention de la maîtrise par Karine SAHLER sous la direction de Mme Bénédicte THIBAUD., in UFR de géographie. 2004, Université de Poitiers: Poitiers.
 - Samba Arona, N.S., Bassirou Diallo, Moustapha Diop, Marone Diatta, Abdou and M.N. Sacor Sarr, Macoumba Diouf. *Jatropha curcas*: seed germination and propagation methods. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and Genetics. 2007. Wageningen: Institut Sénégalais

de Recherches Agricoles (ISRA) - Laboratoire National des Recherches sur les Productions Végétales (LNRPV).

- Sarin, R., et al., Jatropha-Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia. *Fuel*, 2007. 86(10-11): p. 1365-1371.
- Saturnino, H.M., et al., Cultura do pinhao-manso (*Jatropha curcas* L.); Cultivation of *Jatropha curcas* L. Informe Agropecuario, 2005. 26(229): p. 44-78.
- Schmook, B. and L. Serralta-Peraza. *J. curcas* : distribution and uses in the Yucatha peninsula ok Mexico. in *Biofuels and industrial products from Jatropha curcas*. 1997. Managua.
- Shah, S. and M.N. Gupta, Lipase catalyzed preparation of biodiesel from *Jatropha* oil in a solvent free system. *Process Biochemistry*, 2007. 42(3): p. 409-414.
- Shah, S., A. Sharma, and M.N. Gupta, Extraction of oil from *Jatropha curcas* L. seed kernels by combination of ultrasonication and aqueous enzymatic oil extraction. *Bioresource Technology*, 2005. 96(1): p. 121-123.
- Shahidi, F., "Edible oil & fat products: Processing Technologies". *Bailey's Industrial Oil & Fat Products*, ed. I. John Wiley & Sons. Vol. volume 5. 2005, New Jersey.
- Shanker, C., DHYANI, SK, Insect pests of *Jatropha curcas* L. and the potential for their management. *Current Science*, 2006. Vol. 91.
- Sharma, N. Effect on Germination on Raised bed and Sunken bed Nursery in different Provenances of *Jatropha curcas* L. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and Genetics. 2007. Wageningen.
- Sharma, N. *Jatropha* Soil Conditions & Fertilization - Reclamation of ash ponds and cultivation of *Jatropha curcas* using arbuscular mycorrhiza fungi as technology demonstration for biofuel production and environmental cleaning in Chattisgarh state. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and Genetics. 2007. Wageningen.
- Sharma, N., Sarraf A. Pest Disease Management. in Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and genetics. 2007. Wageningen, the Netherland: Published by Fact Fundation.
- Shekhawat Narpat Singh, J.S.R., M. Phulwaria, M.S. Rathore, D. Panwar, and K.R. M.Singh, A. Kackar, H. R. Dagla and H.S. Gehlo. Cultivation of *Jatropha curcas* on wastelands of drought-prone regions: Projections and realities. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and Genetics. 2007. Wageningen: Biotechnology Unit, Department of Botany, Jai Narain Vyas University,.
- Shetty, S., et al., Wound healing activities of Bark Extract of *Jatropha curcas* Linn in albino rats. *Saudi Medical Journal*, 2006. 27(10): p. 1473-1476.
- Siegel, A., Ueber die Giftstoffe zweier Euphorbiaceen, in Medicinal faculty. 1893, Imperial University: Dorpat.
- Singh, I.D., New leaf spot Diseases of two medicinal plants. *Madras Agriculture*, 1983. 70.
- Sivaprakasam, S. and C.G. Saravanan, Optimization of the transesterification process for biodiesel production and use of biodiesel in a compression ignition engine. *Energy & Fuels*, 2007. 21(5): p. 2998-3003.
- Smith, C., et al., The determination of trypsin inhibitor levels in foodstuffs. *J. Sci. Food Agric.*, 1980. 31: p. 341-350.
- Soares Severino, L., R.De Lourdes Silva de Lima, A Bezerra Leao, N.Esberard de Macedo Beltrao. Root system characteristics of *Jatropha curcas* plants propagated through five methods. in Expert Seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and genetics. 2007. Wageningen, the Netherland: Fact Fundation.
- Solsoloy, A.D., et al., Chemical insecticides for cotton pest control. 2000: p. 60.
- Solsoloy, A.D. and T.S. Solsoloy. Pesticidal efficacy of formulated physic nut, *Jatropha curcas* L. oil on pests of selected field crop. in *Biofuels and industrial products from Jatropha curcas*. 1997. Nicaragua.
- Solsoloy, A.D. and T.S. Solsoloy, Insecticide resistance management in cotton in the Philippines. *Philippine Journal of Crop Science*, 2000. 25: p. 26.
- Staubmann, R., Foidl, G, Foidl, N, Lafferty, RM, Valencia Arbizu, VM, Steiner, W., Production of Biogas from *J. curcas* Seeds Press Cake, in *Biofuels and industrial Products from Jatropha curcas*, M. Gubitz, Trabi, Editor. 1997. p. 123-131.
- Staubmann, R., et al. An anti-inflammatory of *Jatropha curcas* leaves. in *Biofuels and industrial products from Jatropha curcas*. 1997.
- Staubmann, R., et al., A complex of 5-hydroxypyrrolidin-2-one and pyrimidine-2,4-dione isolated from *Jatropha curcas*. *Phytochemistry*, 1999. 50(2): p. 337-338.
- Sucher, H., Proyecto biomasa - Guia tecnica para el cultivo del tempate (*Jatropha curcas* L.). 1999, Cooperacion Tecnica de la Republica de Austria con la Republica de Nicaragua.

- Suhas P Wani, T.S.a.T., Biodiesel-based Opportunities to Rehabilitate Degraded Lands and Income Generation, presentation Biopower Wanietal Biodiesel, I. ICRISAT, Editor. 2006.
- Sukarin, W., Y. Yamada, and S. Sakaguchi., Characteristics of physic nut, *Jatropha curcas* L. as a new biomass crop in the Tropics. *Jpn. Agric. Res. Quart.*, 1987. 20(4): p. 302-303.
- Susmel, P., et al., Trypsin inhibitory activity of raw soya bean after incubation with rumen fluid. *J. Sci. Food Agric.*, 1995. 67: p. 441-445.
- Tewari, *Jatropha and biodiesel*. 2007, New Delhi: Ocean Books Ltd.
- Tiwari, A.K., A. Kumar, and H. Raheman, Biodiesel production from *jatropha* oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: An optimized process. *Biomass & Bioenergy*, 2007. 31(8): p. 569-575.
- Ullenberg, A., *Jatropha à Madagascar - Rapport sur l'état actuel du secteur* -. 2007, Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) Madagascar. p. 32 pages.
- Ungaro, M.R., Neto AR, , Óleos, Gorduras e Biodiesel. Considerações sobre pragas e doenças de pinhao-mansô no estado de Sao Paulo, Resumos do 4º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas. in "Biodiesel: Combustível Ecológico", 03 de julho de 2007. 2007. Varginha.
- Ungaro, M.R.G.C.d.G.e.F., IAC, De Moraes L., Centro de Grãos e Fibras, IAC, and C.d.G.e.F. Amadeu Regitano Neto, IAC, Ignácio José de Godoy, Centro de Grãos e Fibras, IAC, ijgodoy@iac.sp.gov.br. Espaçamento e poda na cultura do Pinhao Manso (*Jatropha curcas* L.). in "Biodiesel: Combustível Ecológico", , 03 de julho de 2007 - Resumos do 4º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel -. 2007. Varginha.
- Vaitilingom, G. Extraction, conditionnement et utilisation des huiles végétales pures carburant. in *Enjeux et perspectives des biocarburants pour l'Afrique*. 2007. Ouagadougou.
- Vassiliades, G., Note sur les propriétés molluscicides de deux Euphorbiacées : *Euphorbia tirucalli* et *Jatropha curcas*. Essais en laboratoire Sénégal. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 1984. vol.37:n 1: p. 32-34 + 1 micro-fiche numéro VT_51739.
- Vidal, V.A.C.e.a., *Oleaginosas do Ultramar Portugues*. Junta Invest. Ultramar, 1962. 31: p. 129-145.
- Visser J, A.T., Anaerobic digestion of *jatropha curcas* press cake. 2007, Ingenia Consultants & Engineers. p. 21 pages.
- Vyas, M.T. and C.M. Desai, Utilization of seeds and bark of *Jatropha curcas* L. *Journal of Ind.Chem.Soc.*, 1952. 15: p. 68-73.
- White, C.E., D.R. Campbell, and G.E. Combs, Effect of moisture and processing temperature on activities of trypsin inhibitor and urease in soybeans fed to swine., in *Recent Advances in Antinutritional Factors in legume Seeds.*, T.F.B.v.d.P.a.I.E.L. J. Huisman, Editor. 1989: Wageningen,. p. 230-234.
- Wilbur, A synopsis of *Jatropha*, subsection *Eucurcas*, with the description of two new species from Mexico. *J. Elisha Mitchell Sci. Soc.*, 1997. 70: p. 92-101.
- Zheng, Y.I., Wiesenborn, D. P., Tostenson, K., and Kangas, N., Energy analysis in the screw pressing of whole and dehulled flaxseed. *Journal of food engineering.*, 2005. 66(193-202).
- Zhu, H.P., et al., Preparation of biodiesel catalyzed by solid super base of calcium oxide and its refining process. *Chinese Journal of Catalysis*, 2006. 27(5): p. 391-396.