

Les co-produits de la graine de coton en alimentation du poulet de chair

DIAW M.T.¹, DIENG A.¹, MERGEAI G.², HORNICK J.-L.³

¹ Université de Thiès, Ecole nationale supérieure d'Agriculture, Département Productions animales, km 3, Route de Khombol, BP A296 Thiès, Sénégal

² Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Département Phytotechnie tropicale et Horticulture, Passage des Déportés, 2, 5030 Gembloux, Belgique

³ Université de Liège, Faculté de Médecine vétérinaire, Département Productions animales, Boulevard de Colonster, 20, bât. B43, 4000 Liège, Belgique

Fondation ayant subventionné les recherches

La Commission Universitaire pour le Développement dans le cadre du projet interuniversitaire ciblé portant sur l'« Amélioration de la rentabilité de la filière cotonnière au Sénégal »

Correspondance : Prof. Jean-Luc Hornick, Tél : +32(0)4/366.41.31, Fax : +32(0)4/366.41.22, E-mail : jlhornick@ulg.ac.be

RÉSUMÉ : Les co-produits de la graine de coton ont une très haute valeur nutritionnelle potentielle mais leur composition chimique varie fortement avec les variétés de cotonniers et les divers traitements employés lors de la trituration. Leur utilisation en production de poulets est surtout limitée par la présence de gossypol libre qui peut provoquer des lésions de divers tissus internes mais également réduire les performances de croissance et l'efficacité alimentaire de la ration. Des procédés visant à lier le gossypol libre sont utilisés pour augmenter le taux d'incorporation du tourteau dans les provendes, mais ils ne sont pas sans inconvénients. Le sulfate de fer dénature l'aliment, la supplémentation en lysine est onéreuse alors que la fermentation biologique est très complexe à réaliser et non envisageable à grande échelle. Les variétés exemptes de glandes à gossypol peuvent être facilement incorporées dans les rations et contribuer à la réduction de la demande en aliment protéique. Malheureusement, pour des problèmes de gestion de la culture, peu de travaux ont été menés en alimentation. La production de variétés présentant une inhibition spécifique de la sécrétion de gossypol avant la germination permettrait de les incorporer comme principal aliment protéique dans les provendes.

1. INTRODUCTION

Le cotonnier est une plante de la famille des Malvacées et du genre *Gossypium* qui comporte 49 espèces dont quatre sont cultivées (Mergeai, 2003). Le cycle complet de culture est en moyenne de 175 jours (Parry, 1982 ; Demol, 1992) mais dépend des cultivars et des conditions pédo-climatiques (Parry, 1982). La culture de *Gossypium hirsutum* joue un rôle économique considérable car cette espèce représente près de 95 % de la production mondiale. Son cycle dure en moyenne 140 jours, du semis à la récolte, mais peut atteindre jusqu'à 210 jours en conditions défavorables (Bruinsma, 1987).

Avec une production mondiale qui est actuellement estimée à 27 millions de tonnes (Townsend, 2008), le cotonnier constitue la première plante textile au monde. Sa production comme

sa consommation ont connu ces cinquante dernières années une hausse régulière. La récolte du coton-graine donne en moyenne 40% de fibres et 60% de graines (Développement des agro-industries du Sud, 2006a) dont, selon Diouf (2006), 50% du poids sont constitués d'amandes pures, contre 40 à 45% de coques, le reste étant représenté par le duvet résiduel recouvrant la graine après arrachage des fibres - ou linter.

Cependant, la disponibilité sur le marché des co-produits du coton est tributaire de l'offre et de la demande de coton textile, qui reste le débouché essentiel de la plante (Marquié, 1995). Le coton, en tant que matière première oléoprotéagineuse, est peu utilisé. Les transactions internationales ne portent que sur 2% du commerce des huiles et seulement 1% des graines de coton produites (Estur, 2006).

Pourtant l'huile de coton arrive, avec 4,94 millions de tonnes de production, au 5^{ème} rang mondial de la consommation d'huile alimentaire devant l'huile de palme (4%) et l'huile d'arachide (3%). La production de tourteaux, très riches en protéine, se situe quant à elle au 2^{ème} rang mondial derrière le soja (Développement des agro-industries du Sud, 2006b).

La valorisation du tourteau de coton en production animale est limitée par des facteurs antinutritionnels tels que le gossypol. Ce dernier est présent dans les téguments de la graine. Brancaert et collaborateurs avaient conclu, dès 1968, à l'impossibilité d'utiliser ce produit en quantité égales aux autres aliments protéiques tels que les tourteaux de soja et d'arachide.

Depuis, les recherches se sont poursuivies particulièrement en production de poulets. Cet article présente ainsi une

synthèse des résultats qui ont été rapportés ces dernières années. Après une brève description des divers traitements habituellement appliqués aux graines de coton, une revue sur la composition chimique des tourteaux ainsi que sur les effets du gossypol en production de poulets est proposée. Finalement, divers procédés de remédiations liées à cette substance sont décrits.

1. TRAITEMENTS DES GRAINES DE COTON

Trois types de traitements (thermiques, mécaniques ou chimiques) sont utilisés par les huileries durant le processus d'extraction de l'huile de la graine de coton (Figure 1). Les traitements thermiques utilisent une voie sèche (torréfaction), humide (hydrothermie) ou encore indirecte par extrusion. Lors de la torréfaction, la chaleur est

transmise par conduction (colonne de cuisson), par convection (four conventionnel) ou par rayonnement (Demjanec *et al.*, 1995 ; McKinnon *et al.*, 1995 ; Moss *et al.*, 2000). Ces procédés sont respectivement connus, à l'échelle industrielle, sous les noms de « torréfaction » proprement dite (*roasting* en anglais), d'expansion (ou *popping*) et d'infranisation (*micronisation*). Les traitements hydrothermiques conjuguent l'action de la chaleur à celle d'une hydratation externe sous forme d'eau ou de vapeur à pression réduite (Yu *et al.*, 1999 ; Petit *et al.*, 2002). Le procédé le plus connu est l'autoclavage qui est peu pratiqué sur le plan industriel (Wallace et Falconer, 1992). L'extrusion (cuisson-extrusion) est un processus complexe au cours duquel les graines de coton sont soumises aux effets conjugués de la pression et de la température durant

un temps très court (Alonso *et al.*, 2000) réduisant ainsi la digestibilité de certaines acides aminées suite à des phénomènes de polymérisation (Poncet *et al.*, 2003). Divers tests, comme celui de la lysine disponible et l'indice de disponibilité des protéines (Hsu et Satter, 1995), renseignent sur la qualité du traitement thermique.

Les traitements mécaniques divisent les graines en particules plus petites, par aplatissage, broyage (broyeur à marteaux), ou cisaillement (broyeur à couteaux) améliorant ainsi la surface de contact avec les solvants organiques lors de l'extraction (Ewing *et al.*, 1986 ; Petit *et al.*, 1997 ; Chilliard *et al.*, 2001). Ce traitement permet également de séparer les amandes des coques (Poncet *et al.*, 2003).

La fève obtenue après le traitement mécanique peut être soumise à l'action d'un solvant ou d'une presse pour en extraire l'huile. L'extraction par pression peut se faire sous pression discontinue à froid (PDF) ou pression continue à chaud (PCC). En mode PDF, l'huile est extraite par pressions successives à une température inférieure à 80°C. Le rendement en huile est toutefois faible, les tourteaux (tourteaux de pression) conservent 6 à 12 % de matières grasses. L'extraction sous PCC nécessite d'abord un préchauffage jusqu'à 90°C des graines qui, ensuite, sont pressées dans une vis sans fin où la température atteint jusqu'à 120°C. Le rendement est meilleur qu'avec une PDF et le taux de matière grasse (MG) résiduelles dans les tourteaux (appelés « *expeller* ») se situe entre 4 et 6 %.

Lors d'une extraction au solvant, les lipides sont solubilisés dans des solvants organiques (comme l'hexane) chauffés à 50-60°C puis extraits par percolation du solvant pendant 4 à 5 heures. Il faut ensuite distiller le mélange par chauffage à 115-120°C. Le taux d'extraction est très important et les teneurs en MG dans les tourteaux « déshuilés » sont comprises entre 0,5 et 2,5 %. Ces tourteaux, présentés sous forme de fines particules ou farine, peuvent être réhumidifiés et comprimés en granulés.

2. COMPOSITION CHIMIQUE DES CO-PRODUITS DE LA GRAINE DE COTON

L'huile et le tourteau constituent les dérivés essentiels des graines de coton. D'après Jones (1985), la

Figure 1 : Les divers traitements des graines de coton.

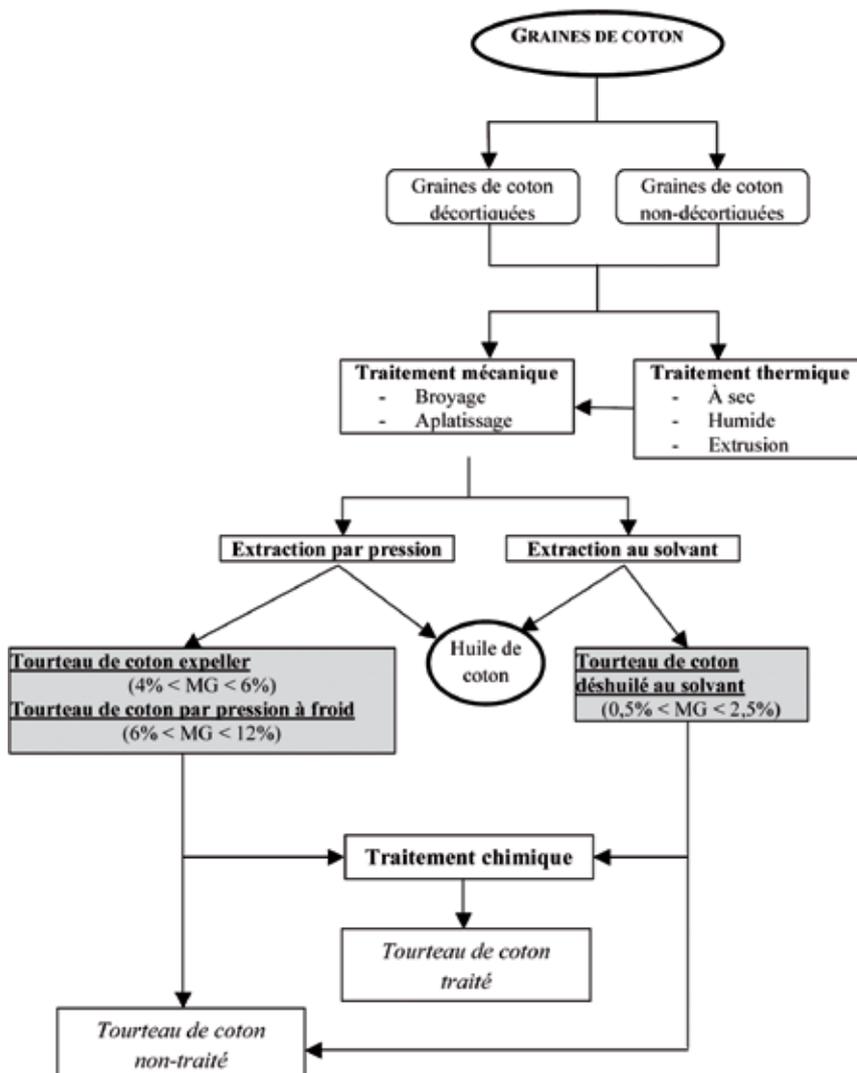


Tableau I: Composition chimique de différents tourteaux (en % de la matière sèche - MS)

NUTRIMENTS	DÉCORTIQUÉ													NON DÉCORTIQUÉ			GLANDLESS DÉSHUILÉ AU SOLVANT			
	EXPELLER								DÉSHUILÉ AU SOLVANT					EXPELLER			SOLVANT			
	1	2	3	4	5	6	7	8	$\bar{X} \pm \sigma$	3	6	9	$\bar{X} \pm \sigma$	3	10	11	$\bar{X} \pm \sigma$	4	5	$\bar{X} \pm \sigma$
Protéine brute	34,2	43,7	37,9	56,0	49,3	44,0	29,7	45,0	42,5 ± 8,3	38,7	46,0	45,0	43,1 ± 3,8	22,0	28,7	30,3	27,1 ± 4,3	49,8	52,0	50,9 ± 1,6
Extrait étheré	7,3	7,4	7,0	2,6	1,9	4,2	4,9	1,5	4,6 ± 2,4	0,3	0,5	7,2	2,7 ± 3,9	7,5	2,0	4,2	4,6 ± 2,7	1,0	1,0	1,0
Fibre brute	18,0	17,6	12,5	15,9	-	12,9	15,7	10,0	14,6 ± 2,9	12,7	15,1	11,0	12,9 ± 2,1	29,0	26,9	26,9	27,4 ± 0,9	14,9	-	14,9
Cendre	5,3	6,1	6,5	8,9	-	-	7,0	6,5	6,7 ± 1,2	6,4	-	9,0	7,7 ± 1,8	5,0	5,3	4,7	5,0 ± 0,2	6,9	-	6,9
EM MJ.kg ⁻¹ *	8,0	9,4	11,8	-	9,3	10,4	10,4	-	9,9 ± 1,3	9,4	11,2	-	10,3 ± 1,2	7,9	-	9,1	8,5 ± 0,8	-	9,1	9,1
Calcium	0,2	0,3	-	-	-	0,2	0,1	0,2	0,2 ± 0,1	-	0,2	-	0,2	-	0,2	-	0,2	-	-	-
Phosphore	0,8	0,9	-	-	-	1,1	0,7	1,2	0,9 ± 0,2	-	1,1	-	1,1	-	0,7	-	0,7	-	-	-

*: Energie métabolisable 1 : Panigrahi et collaborateurs (1989) 2 : El-Boushy and Raternick (1989) 3 : Sharma et collaborateurs (1978a) 4 : Ryan et collaborateurs (1986) 5 : Reid et collaborateurs (1984) 6 : National Research Council (1994) 7 : Shekar-Reddy et collaborateurs (1998) 8 : Watkins et collaborateurs (2002) 9 : Henry et collaborateurs (2001) 10 : Nagalakshmi (1997) 11 : Balogun et collaborateurs (1990).

trituration des graines donnerait 45 % de tourteau, 25 % de coques, et 16 % d'huile. Sauvant et collaborateurs (1994) ont rapporté qu'une tonne de graines de coton fournit environ 200 kg d'huile, 300 kg de coques et 500 kg de tourteaux. La composition chimique des sous-produits de la graine de coton varie selon qu'il s'agit de la graine entière, de l'amande ou du tourteau (Obioha, 1992 ; Atteh, 2002). Les teneurs en nutriments dépendent beaucoup de la méthode d'extraction de l'huile (Goetsch et Owens, 1985 ; Nagalakshmi *et al.*, 2007), des proportions de duvets et de linters (Lennerts, 1988) et du niveau de décortiquage des graines (Balogun *et al.*, 1990).

2.1. Composition chimique des tourteaux de coton

Les tourteaux constituent une source de protéine dont la teneur moyenne, par rapport à la matière sèche, est comprise entre 22,2 % (Sharma *et al.*, 1978a) et 30,3 % (Balogun *et al.*, 1990) pour les tourteaux de coton non décortiqué (TCND) et variant, pour ceux issus de graines décortiquées (TCD) entre 29,7 (Sekhar-Reddy *et al.*, 1998) et 56,0 % (Ryan *et al.*, 1986) (Tableau I). L'extraction au solvant (ou Tourteau de coton déshuilé au solvant -TCDS) donne un produit plus riche en protéine brute (PB) allant de 38,7 (Sharma *et al.*, 1978a) jusqu'à 52,0 % (Reid *et al.*, 1984) avec certaines variétés sélectionnées.

Ces fortes variations résultent du processus d'extraction de l'huile (Goetsch and Owens, 1985 ; Nagalakshmi *et al.*, 2007). En effet, les graines sont parfois délintées avec de l'acide fort avant trituration pour éviter le phénomène de bourrage dans les décortiqueuses. De plus, un décortiquage total ou partiel des graines a parfois lieu, une partie des coques pouvant être réincorporée pour favoriser l'extraction de l'huile. Le tourteau obtenu est donc également plus ou moins riche en fibres et plus ou moins gras.

Les teneurs en fibres brutes (FB) rapportées dans la littérature sont relativement similaires entre les TCDS et les TCD, proches de 15 % de l'aliment sec, mais doublent dans les TCND (Tableau II).

Tableau II: Composition en acides aminés de différents tourteaux de coton (en % de la MS)

NUTRIMENTS	DÉCORTIQUÉ										NON DÉCORTIQUÉ		GLANDLESS DÉSHUILÉ AU SOLVANT		
	EXPELLER							DÉSHUILÉ AU SOLVANT			EXPELLER		SOLVANT		
	1	2	3	4	5	6	$\bar{X} \pm \sigma$	5	7	$\bar{X} \pm \sigma$	2	1	4	$\bar{X} \pm \sigma$	
Arginine	5,9	3,4	4,5	5,9	4,8	5,0	4,9 ± 0,9	5,2	5,1	5,1	2,3	6,1	6,0	6,0	
Glycine/Serine	4,6	3,3	-	4,1	3,7	3,4	3,8 ± 0,6	3,8	3,6	3,7 ± 0,2	-	4,8	4,4	4,6 ± 0,3	
Histidine	-	1,0	-	0,9	1,2	1,2	1,1 ± 0,2	1,2	1,3	1,2	0,4	-	0,9	0,9	
Cystine	0,9	-	0,7	-	0,6	0,8	0,8 ± 0,1	0,7	0,8	0,7 ± 0,1	-	0,5	-	0,5	
Isoleucine	1,8	1,3	1,6	1,7	1,4	1,4	1,5 ± 0,2	1,5	1,5	1,5	0,9	1,3	1,9	1,6 ± 0,4	
Leucine	3,2	2,5	-	2,9	2,4	2,6	2,7 ± 0,3	2,7	2,8	2,7 ± 0,1	1,6	2,0	3,1	2,6 ± 0,7	
Lysine totale	2,3	1,5	1,7	1,9	1,7	2,0	1,9 ± 0,3	1,9	2,0	1,9	1,0	2,3	1,9	2,1 ± 0,3	
Lysine disponible	1,7	-	-	-	-	-	1,7	-	-	-	-	1,8	-	1,8	
Méthionine	0,8	0,4	0,7	0,8	0,6	0,7	0,7 ± 0,2	0,6	0,8	0,7 ± 0,1	0,2	0,7	0,9	0,8 ± 0,1	
Phénylalanine	3,0	2,0	-	2,8	2,4	2,3	2,5 ± 0,4	2,5	2,4	2,4	0,9	2,6	3,1	2,8 ± 0,4	
Thréonine	1,8	1,3	1,6	1,5	1,4	1,3	1,5 ± 0,2	1,5	1,5	1,5	0,9	1,9	1,6	1,8 ± 0,2	
Valine	2,4	2,0	-	2,2	2,0	1,9	2,1 ± 0,2	2,0	2,0	2,0	1,5	1,9	2,5	2,2 ± 0,4	
Tyrosine	1,5	-	-	1,2	1,2	1,3	1,3 ± 0,2	1,5	1,3	1,4 ± 0,1	-	0,7	1,3	1,0 ± 0,4	

1 : Ryan et collaborateurs (1986) 2 : Sharma et collaborateurs (1978a) 3 : El-Boushy and Raterink (1989) 4 : Reid et collaborateurs (1984) 5 : National Research Council (1994) 6 : Watkins et collaborateurs (2002) 7 : Henry et collaborateurs (2001).

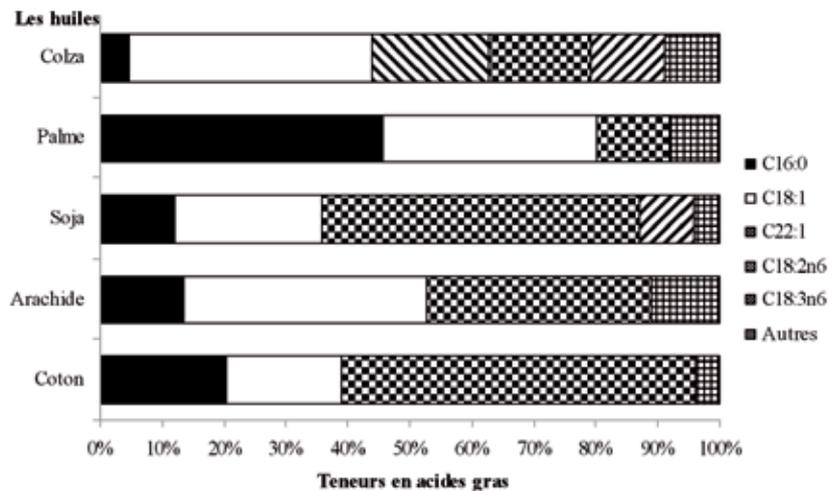
L'efficacité d'extraction de la matière grasse varie d'une installation à une autre, avec des valeurs résiduelles comprises en moyenne entre 1,9 (Reid *et al.*, 1984) et 7,5 % (Sharma *et al.*, 1978a) pour les tourteaux de coton *expeller*. L'extraction au solvant donne les plus faibles teneurs, comprises généralement entre 0,3 (Sharma *et al.*, 1978a) et 1,0 % (Reid *et al.*, 1984). Les teneurs élevées en MG empêchent le bon conditionnement des aliments avec d'importantes pertes de nutriments par oxydation entraînant, chez les poulets, une diminution de la croissance pondérale et une augmentation de l'indice de consommation (IC) (McNaughton et Reece, 1984 ; Dale et Fuller, 1979 ; Pesti *et al.*, 1983 ; Proudfoot et Hulan, 1982 ; Skinner *et al.*, 1992 ; Leclercq et Escartin, 1987).

Les résultats d'analyses effectuées sur les teneurs en acides aminés des co-produits du tourteau de coton (Tableau II) révèlent les faibles teneurs en cystine, méthionine et lysine des protéines de la graine de coton (Nzekwe et Olomu, 1982 cités par Ojewola *et al.*, 2006). Ces acides aminés sont essentiels chez certaines catégories d'animaux comme les volailles et peuvent constituer une limite quand à l'utilisation de cet aliment.

La relative faible digestibilité des protéines et des acides aminés du tourteau de coton en comparaison aux autres aliments protéiques de la volaille a été rapportée par plusieurs auteurs. Sandal (1974), cité par Nagalakshmi et collaborateurs (2007), a rapporté une digestibilité des composés azotés du tourteau de coton non décortiqué comprise entre 26,5 et 47,0 %. Des digestibilités apparentes de 42,0, 47,0 et 36,0 % pour respectivement le tourteau de coton non-décortiqué, décortiqué et déshuilé ont été également rapportées par Sharma et collaborateurs (1978b). Azman et Yimalz (2005) ont évalué la digestibilité des protéines des tourteaux de coton entre 46,0 et 75,0 %.

Watkins et collaborateurs (2002) ont estimé que celle des acides aminés était inférieure à 75,0 %. Des digestibilités de 61,2, 74,2 et 67,2 % ont été respectivement rapportées par Gamboa et collaborateurs (2001a) pour la lysine, la méthionine et la cystine. Pour Fernandez et collaborateurs (1994 ; 1995), l'efficacité d'utilisation de la lysine dans le tourteau de coton est de 64,0 % et celle de la méthionine et de la cystine s'élève à 72,0 %. Des résultats similaires ont été rapportés

Figure 2 : Composition en acides gras des principales huiles alimentaires (Sontag, 1979).



par Lemme et collaborateurs (2004) avec des digestibilités iléales de 65,0, 72,0 et 74,0 % pour respectivement la lysine, la méthionine et la cystine.

Enfin, le tourteau de coton constitue une bonne source de vitamine B1 (thiamine) et de vitamine E (α -tocophérol). Cette dernière a une action antioxydante stabilisatrice à l'égard des acides gras poly-insaturés (PUFA) de la graine de coton.

2.2. Composition chimique de l'huile de coton

L'huile de coton est le standard de référence le plus souvent utilisé dans les tests d'évaluation du goût et de l'odeur des autres huiles alimentaires. Pour les nutritionnistes, une huile diététiquement idéale est composée d'un tiers d'acides gras saturés, un tiers d'acides gras mono-insaturés et un tiers d'acides gras poly-insaturés (Pascal, 1996). L'huile de graine de coton est la plus proche de cette composition (Tableau III).

D'autre part, ses taux élevés d'acide oléique, palmitique et stéarique lui confèrent une certaine stabilité (Pascal, 1996). Il faut noter également que l'huile de coton sans gossypol pré-

sente après raffinage un goût agréable et une composition en acides gras polyinsaturés satisfaisante sur le plan nutritionnel (Kétékou, 1985). Elle est particulièrement riche en acide linoléique (figure 2).

Enfin, l'huile de coton est riche en tocophérols qui sont des antioxydants naturels assurant sa stabilité et sa conservation à long terme. Cette forte teneur en vitamine E (α -tocophérol) fait de cette huile un atout diététique potentiel.

2.3. Le gossypol

Le tourteau de coton est essentiellement valorisé chez les ruminants. Chez les monogastriques et surtout les volailles, son incorporation dans les rations est limitée par la présence de gossypol qui possède une toxicité intrinsèque et diminue également la valeur biologique des protéines (Heywang et Bird, 1955 ; Heywang et Kemmerer, 1966 ; El-Boushy et Raterink, 1989 ; Gamboa *et al.*, 2001a ; 2001b ; Azman et Yilmaz, 2005), par sa teneur en fibres (Phleps, 1966 cité par Gamboa *et al.*, 2001a ; Fernandez *et al.*, 1994 ; 1995 ; Ojewola *et al.*, 2005) et par la présence d'acides gras cyclopropénoïques (acides malvalique

Tableau III : Composition en acides gras des différentes huiles alimentaires habituellement utilisées

Huiles	Acides gras saturés	Acides gras mono insaturés	Acides gras polyinsaturés
Coton	22%	23%	55%
Palme	50%	40%	10%
Soja	15%	25%	60%
Colza	8%	62%	30%
Arachide	20%	59%	21%

Source : Pascal (1996)

et sterculique) qui sont de puissants inhibiteurs de l'activité enzymatique de la $\Delta 9$ désaturase, intervenant dans la transformation des acides gras (Schmidely et Sauvante, 2001).

Le gossypol ($C_{30}H_{30}O_8$) est un produit du métabolisme des plantes du genre *Gossypium*, mais on l'obtient aussi à partir de l'écorce du *Thephesia populnea* qui, comme le cotonnier, est un arbuste de la famille des malvacées (King et De Silva, 1968 cités par Dao, 2000). Le poison est contenu dans des glandes présentes sur toutes les parties du cotonnier (feuilles, tiges, racines et graines) et permet de distinguer les variétés à glandes (« *glanded* ») des variétés sans glandes (« *glandless* »). Le nom « gossypol » a été proposé par Marchlewski à partir de la contraction du nom de genre de la plante (*Gossypium*) et de la principale structure de la molécule (phénol), pour indiquer son origine et sa nature chimique (Marchlewski, 1899 cité par Dao, 2000).

D'un point de vue chimique, le gossypol est un acide faible (Botsoglou et Spais, 1992) et facilement oxydable (Huang *et al.*, 1987 ; Botsoglou, 1991 ; Botsoglou et Spais, 1992). Liposoluble et de formule chimique 1,1', 6,6',7,7'-hexahydroxy-5,5'-diisopropyl-1,3,3'-diméthyl- [2,2'-binaphthalène] -8,8'-dicarboxaldéhyde (figure 3), ce pigment polyphénolique (Huang *et al.*, 1987 ; Henry *et al.*, 2001) comprend quatre noyaux benzéniques avec des ramifications d'isopropène, des hydroxyles, des aldéhydes ou des cétones (Marquié, 1995). Les groupements naphthalènes de la molécule permettent d'obtenir les énantiomères (+) et (-)-gossypol (Huang *et al.*, 1987 ; Henry *et al.*, 2001 ; Gamboa *et al.*, 2001b).

Cependant, le (-)-gossypol présente la plus grande activité optique (Joseph *et al.*, 1986 ; Chen *et al.*, 1987 ; Wang *et al.*, 1987 ; Blackstaffe *et al.*, 1997).

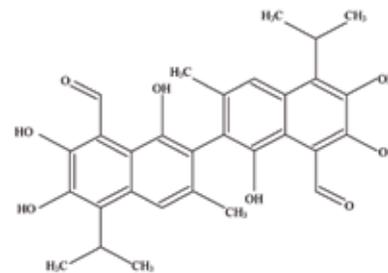
2.3.1. Les teneurs en gossypol dans les co-produits du coton

Dans les graines du cotonnier, le gossypol se présente sous une forme libre (GL) ou liée à des groupements « amines » (Lyman *et al.*, 1959) ou des ions métalliques (Panigrahi *et al.*, 1989) formant ainsi, avec la fraction libre, le gossypol total (GT). La teneur en GT dans les graines est d'origine génétique (Cass *et al.*, 1991 ; Percy *et al.*, 1996). Dans les co-produits les teneurs en GT dépendent du procédé d'extraction et varient entre 0,6 % (Sharma *et al.*, 1978b) et 1,4 % (Panigrahi *et al.*, 1989) dans les TCD et entre 0,3 % (Sharma *et al.*, 1978b) et 0,5 % (Nagalakshmi *et al.*, 2001) dans les TCND (Tableau IV).

Les teneurs en GL varient en moyenne de 0,03 % à 0,3 % (Jones, 1981 ; Calhoun *et al.*, 1995a ; 1995b). Ces fortes variations peuvent s'expliquer par la génétique de la plante (Boatner *et al.*, 1949 cités par Gamboa *et al.*, 2001a ; Percy *et al.*, 1996) et par les conditions environnementales (Pons *et al.*, 1953 ; Stansbury *et al.*, 1956 cités par Gamboa *et al.*, 2001a). En effet, les fortes températures durant le développement de la plante et la période de maturation diminuent les teneurs en gossypol alors que les fortes pluviométries après cette période ont l'effet inverse (Pons *et al.*, 1953 ; Stansbury *et al.*, 1956 cités par Gamboa *et al.*, 2001b).

Dans le tourteau de coton non décortiqué *expeller*, Sharma et collaborateurs (1978b) et Nagalakshmi et collaborateurs (2001) ont rapporté respectivement des teneurs en GL de 0,06 et 0,27 %. Le tourteau de coton décortiqué *expeller* est habituellement beaucoup moins riche en GL (entre 0,02 et 0,19 % (Waldroup et Goodner (1973) ; Gamboa *et al.* (2001b)) que le tourteau déshuilé au solvant (entre 0,047 et 0,53 % (Sharma *et al.* (1978b) ; Waldroup et Goodner (1973)). Cette différence est liée aux variations de

Figure 3 : Structure plane de la molécule de gossypol (Dao *et al.*, 2000)



température, du temps de chauffage, de l'humidité et de la pression durant la trituration (Pons et Guthrie, 1949 ; Pons *et al.*, 1955 cités par Wen-ju *et al.*, 2006 ; Altschul *et al.*, 1958 ; Berardi et Goldblatt, 1969 ; Calhoun *et al.*, 1995b ; Forster et Calhoun, 1995).

De plus, durant l'extraction de l'huile, la rupture des glandes permet aux groupements aldéhydes du gossypol de former des liaisons imines (bases de Schiff) stables avec les groupements amine libres des protéines et peptides et spécialement ceux de la lysine donnant ainsi du gossypol lié (Lyman *et al.*, 1959 ; Baliga *et al.*, 1959 ; Phleps, 1966) qui n'est pas absorbé dans le tractus digestif (Wen-ju *et al.*, 2006).

2.3.2 Les effets du gossypol sur les poulets

En alimentation animale, le gossypol n'est toxique que sous sa forme libre (Couch *et al.*, 1955 ; Smith, 1970 cités par Henry *et al.*, 2001). Le GL peut fixer les très faibles quantités de lysine disponibles dans le tourteau pour former un complexe limitant sa biodisponibilité. Si les teneurs en lysine sont très faibles, le gossypol peut alors inhiber l'activité des enzymes de la lumière intestinale telles que le pepsinogène, la pepsine et la trypsine (Sharma *et al.*, 1978b).

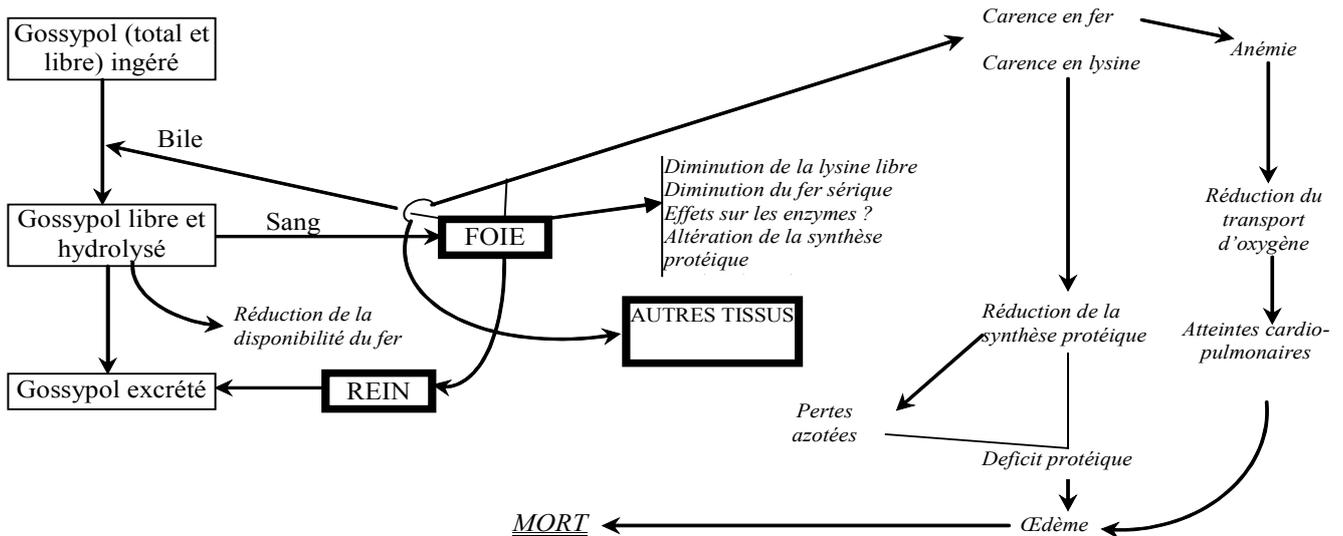
Le GL absorbé par les volailles se lie non seulement aux protéines mais

Tableau IV : Teneur en gossypol (libre et lié) de différents tourteaux de coton (en mg.kg⁻¹)

GOSSYPOL	DÉCORTIQUÉ									NON DÉCORTIQUÉ EXPELLER			GLANDLESS DÉSHUILÉ AU SOLVANT		
	EXPELLER							DÉSHUILÉ AU SOLVANT							
	1	2	3	4	6	7	$\bar{X} \pm \sigma$	4	\bar{X}	4	8	$\bar{X} \pm \sigma$	1	2	$\bar{X} \pm \sigma$
Total	14144		10000	6920		12300	10841 ± 3115	6333	6333	3900	5183	4542 ± 907	362	-	362
Libre	519	426	1700	360	1300	1900	915 ± 701	467	467	600	2700	1650 ± 1485	106	130	118 ± 16

1 : Ryan et collaborateurs (1986) 2 : Reid et collaborateurs (1984) 3 : El-Boushy et Raterink (1989) 4 : Sharma et collaborateurs (1978a) 5 : Nagalakshmi et collaborateurs (2001) 6 : Waldroup et Goodner (1973) 7 : Gamboa et collaborateurs (2001b) 8 : Watkins et collaborateurs (2002)

Figure 4 : Les effets du gossypol dans l'organisme (source : <http://www.unu.edu/unupress/food/8F024e/8F024E11.gif>; 22/12/2009)



aussi aux composés ferriques, tels que le sulfate de fer, présents dans leur organisme (figure 4). En se liant au fer, il inhibe la synthèse de l'hémoglobine et donc la respiration enzymatique (Ferguson *et al.*, 1959 ; Skutches *et al.*, 1973 ; 1974). L'usage des tourteaux de coton en alimentation des animaux monogastriques et principalement de la volaille requiert donc de connaître les teneurs en GL, en lysine et en composés ferriques dans la ration.

Janero et Burghardt (1988) rapportent que le gossypol peut également réagir avec les membranes biologiques en promouvant la formation de radicaux libres avec une diminution des teneurs en antioxydants tels que l' α -tocophérol, le β -carotène, l'acide ascorbique et le glutathion peroxydase (Bender *et al.*, 1988 ; Lane et Stuart,

1990 ; Willard *et al.*, 1995).

Au niveau zootechnique, le gossypol exerce des effets négatifs sur les gains de poids, l'indice de consommation (IC), les taux de ponte et d'éclosion, altère la coloration du blanc et du jaune d'œuf et induit de fortes mortalités (Narain *et al.*, 1961 ; Wal, 1970 ; Tacher *et al.*, 1971 ; Morgan *et al.*, 1988 ; Willard *et al.*, 1995).

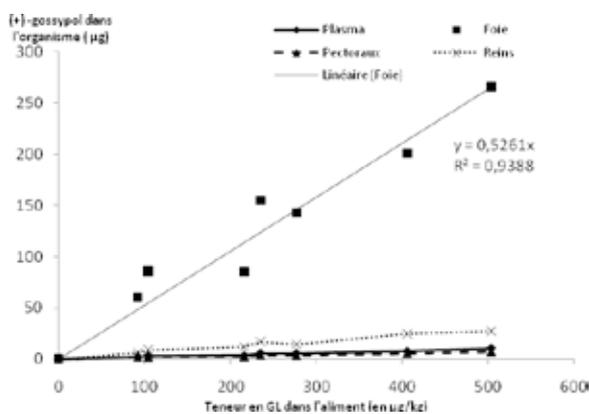
Clawson et Smith (1966) ont observé une diminution de la consommation alimentaire à partir de 244 mg de GL par kg d'aliment. A l'opposé, après avoir détoxifié le gossypol dans l'aliment, Husby et Kroening (1971) ont observé une augmentation de la prise alimentaire atteignant + 3,2 à + 10,7 g d'aliment ainsi qu'une diminution de l'IC.

Le gossypol se concentre de manière quantitative dans le foie (figures 5 et 6).

Les reins et le cœur constituent les seconds organes d'accumulation. Les teneurs en gossypol dans le plasma restent relativement faibles et à l'état de trace dans les muscles pectoraux (moins de 7,4 ppm et 2,5 ppm pour respectivement la (+) et la (-) gossypol). Les figures 7 et 8 donnent, après 3 et 6 semaines d'élevage, les niveaux d'accumulation du gossypol (respectivement la (+) et la (-) gossypol) dans le foie en fonction du taux d'incorporation de tourteau de coton dans l'aliment (Gamboa *et al.*, 2001b).

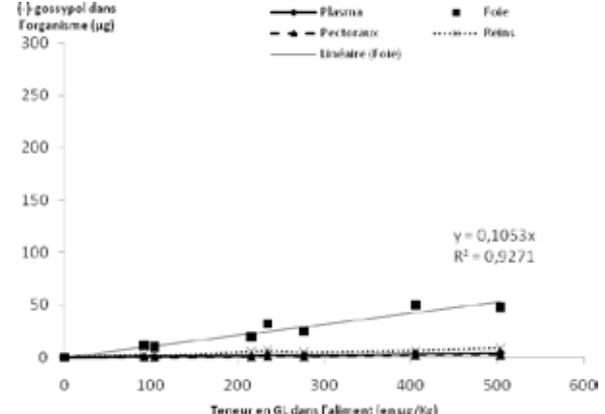
Cependant, les études de Heywang et Bird (1955), Clawson et Smith (1966) et Martin (1990) ont montré que plusieurs facteurs, comme l'âge, la souche de volailles et évidemment le fer et la lysine contenus dans l'aliment peuvent affecter la tolérance des oiseaux au GL.

Figure 5



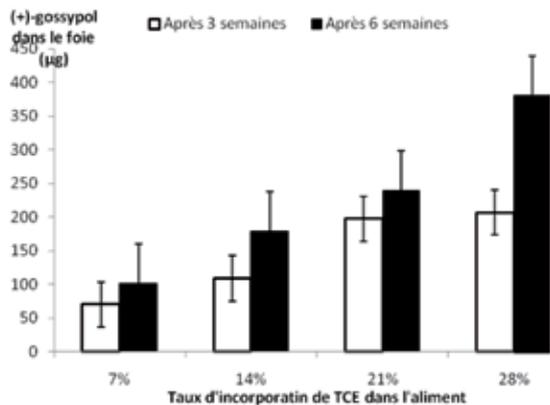
Niveaux de (+)-gossypol dans le plasma (—●—), le foie (—■—), les muscles pectoraux (—▲—) et les reins (—×—) en fonction des teneurs alimentaires (Gamboa *et al.*, 2001a).

Figure 6



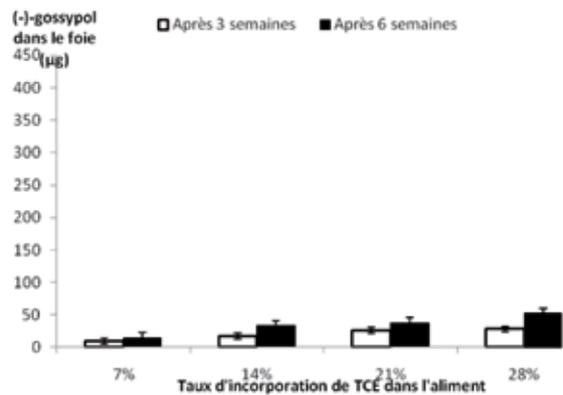
Niveaux de (-)-gossypol dans le plasma (—●—), le foie (—■—), les muscles pectoraux (—▲—) et les reins (—×—) en fonction des teneurs alimentaires (Gamboa *et al.*, 2001a).

Figure 7



Évolution du niveau de (+)-gossypol hépatique en fonction du niveau d'incorporation de tourteaux de coton expeller (TCE) dans la ration (Gamboa *et al.*, 2001b).

Figure 8



Évolution du niveau de (-)-gossypol hépatique en fonction du niveau d'incorporation de tourteaux de coton expeller (TCE) dans la ration (Gamboa *et al.*, 2001b).

3. LA DÉTOXIFICATION DU GOSSYPOL

Les travaux qui ont été menés pour détoxifier le « gossypol-libre » et améliorer la valeur nutritive des rations se sont basés sur divers traitements physique, chimique ou biologique tels que des procédés d'extraction de l'huile au solvant lors de la trituration, la supplémentation en acides aminés ou en vitamines et des travaux en amélioration végétale pour l'obtention de variétés « *glandless* ».

3.1. Le traitement physique

Shah et collaborateurs (1986) ont rapporté que le fait de rincer à l'eau le tourteau de coton durant 30 et 60 minutes entraînait une diminution de sa teneur en GL qui passait de 0,3 % à respectivement 0,18 et 0,12 % avec cependant une baisse de sa valeur protéique. Selon les mêmes auteurs une cuisson de 15 minutes au minimum est deux fois moins efficace. La cuisson à sec est moins efficace puisque du tourteau porté à 130°C pendant une période de 60 et 90 minutes a entraîné une réduction de la teneur en GL qui est passée de 0,09 % à seulement 0,07 % (Mayorga *et al.*, 1975).

Le chauffage à l'autoclave, quant à lui, favorise la fixation du gossypol sur des protéines solubles et des acides aminés, notamment la lysine, formant ainsi un complexe non absorbable par les animaux et réduisant donc la valeur nutritive des aliments (Smith, 1972). L'effet est cependant limité. Nagalakshmi (2002) a rapporté que 45 minutes de chauffage à l'autoclave du tourteau de coton permettaient une

réduction de la teneur en GL de 0,27 à 0,20 % et qu'au-delà aucune diminution significative de cette concentration n'était observée.

Le chauffage à la vapeur quant à lui, réduit significativement aussi les teneurs en gossypol. Après 15 minutes la teneur en GL diminue de moitié environ. Durant la granulation avec de la vapeur à 93°C, une diminution de la teneur en GL de plus de 70 % de la teneur en GL peut être observée (Barraza *et al.*, 1991). Toutefois, les tests menés en aviculture ont montré que, sur le plan physique, l'extrusion et le chauffage sont les procédés les plus efficaces (Henry *et al.*, 2001).

3.2. L'apport d'ions métalliques

L'incorporation de fer dans l'aliment demeure la technique la plus utilisée en aviculture surtout en production d'œufs où la durée de l'élevage fait que le peu de GL dans la ration, s'il n'est pas traité, peut s'accumuler dans l'organisme des animaux (foie, reins, cœur, etc.) et entraîner des incidences négatives sur la production. Le GL est susceptible de fixer les ions métalliques tels que le fer (Fe²⁺) et le calcium (Ca²⁺) pour former des sels à pH neutre, donnant ainsi du gossypol lié (non toxique).

L'addition de sulfate de fer peut ainsi réduire le niveau de gossypol libre du tourteau de coton jusqu'à moins de 0,04 % (Phleps, 1966 cité par Watkins *et al.*, 1993). Des études approfondies ont ainsi montré que l'addition de sulfate de fer dans les rations contenant du tourteau de coton réduisait les effets néfastes du gossypol chez les porcs et les volailles (Panigrahi

et al., 1989 ; Barrazza *et al.*, 1991 ; Panigrahi et Morris, 1991 ; Boling *et al.*, 1998).

Panigrahi et Morris (1991), quant à eux, suggèrent une supplémentation en sels de fer sous forme solide. En effet, le fer solubilisé diminue significativement la prise alimentaire et le taux de ponte (Panigrahi, 1992). De plus, des effets négatifs peuvent être observés lors d'une incorporation excessive dans les provendes (Nagalakshmi *et al.*, 2007). Un seuil d'addition de 100 mg/kg a été proposé par Mc Ghee et collaborateurs (1965) pour les volailles.

L'excès de fer pourrait également réduire l'absorption du phosphore (Cox *et al.*, 1931 ; Deobald et Elvehjem, 1935 ; Mc Donald *et al.*, 1981 cités par Nagalakshmi *et al.*, 2007) ou interférer avec le métabolisme du cuivre (Hill et Matrone, 1961) et du manganèse (Matrone *et al.*, 1959).

El-Boushy et Raterink (1989) ont ajouté 300 à 600 mg/kg de fer à des aliments pour poulets, dosant 0,04 % de GL, avec un taux d'incorporation de tourteau de coton de 24 %. Ils ont observé une augmentation des gains de poids et de l'ingestion mais sans aucune incidence sur l'IC. Par contre, Fletcher et collaborateurs (1953) ont souligné que l'utilisation du fer, du fait de son pouvoir oxydant, entraîne une dénaturation de l'aliment. Son incorporation dans les provendes n'est pas souvent acceptée par les aviculteurs (Henry *et al.*, 2001). En effet, selon Wen-ju et collaborateurs (2006), l'apport de fer donnerait à l'aliment une coloration noire qui aurait une incidence directe sur l'ingestion des oiseaux.

Les sels de calcium sont aussi couramment utilisés pour réduire la teneur en GL dans les tourteaux de coton (Braham *et al.*, 1967 ; Shah *et al.*, 1986 cités par Nagalakshmi *et al.*, 2001). L'apport de 1 % d'hydroxyde de calcium (ou Ca(OH)₂) pour traiter le tourteau de coton a permis à Braham et collaborateurs (1967) de faire passer la teneur en GL de 0,044 à 0,026 %.

3.3. La fermentation biologique

La détoxification par fermentation microbienne est une autre voie d'amélioration de la valeur nutritive des résidus d'extraction de la graine de coton. Wen-ju et collaborateurs (2006) ont utilisé des champignons des espèces *Candida tropicalis*, *Saccharomyces cerevisiae* et *Aspergillus niger* pour réduire la teneur en gossypol du tourteau de coton qui est passé de 549 mg/kg à respectivement 29,8, 63,1 et 81,5 mg/kg.

D'autre part, la détoxification par voie biologique du gossypol s'accompagne d'une amélioration de la teneur en protéine brute (PB) et en acides aminés (Wu et Chen, 1989 et Shi *et al.*, 1998). En effet, l'inoculation du tourteau de coton par *Aspergillus oryzae* et *Aspergillus janus* pendant 48 heures augmente significativement ses teneurs en méthionine et lysine (Aduku et Sell, 1979 cités par Nagalakshmi *et al.*, 2007). L'incorporation de ce tourteau fermenté à raison de 27 % dans une provende améliore les performances pondérales et l'efficacité alimentaire chez les poulets. Zhang et collaborateurs (1990) ont identifié 6 acides aminés (méthionine, lysine, valine, thréonine, isoleucine et leucine) dont les teneurs sont modulées par le processus de fermentation. Les teneurs en méthionine et lysine sont passées de respectivement 0,22 à 0,35 % et de 1,04 à 1,10 % soient 57,4 et 5,6 % d'augmentation, alors que pour l'arginine, une diminution de 2,63 à 2,37 % a été rapportée (Wen-ju *et al.*, 2006). Une augmentation de la digestibilité des différents acides aminés a également été observée par Wen-ju et collaborateurs (2006) avec, pour la méthionine et la lysine, des valeurs qui sont passées de 49,7 à 67,0 % et de 50,1 à 61,2 %.

Cependant, la fermentation du tourteau comme méthode de détoxification du gossypol est encore à l'étude et est limitée par la disponibilité des ressources microbiennes.

3.4. L'extraction au solvant

Les molécules toxiques présentes dans les graines de coton sont toutes solubles dans les solvants organiques comme l'hexane, l'alcool éthylique, une solution aqueuse d'acétone ou l'acide butanolique. L'éthanol entraîne une réduction de la teneur en gossypol dans le tourteau de coton de 70,0% (Hron *et al.*, 1994). Liu et collaborateurs (1981) ont rapporté une réduction des teneurs en gossypol libre et lié de respectivement 0,04 à 0,01 % et 0,55 à 0,32 % pour le tourteau de coton traité à l'éthanol à 50°C.

L'acétone permet également, d'après Pons et Eaves (1971) et Damaty et Hudson (1975), de réduire la teneur en GL du tourteau de coton ; mais Alyevand et collaborateurs (1967) cités par Nagalakshmi et collaborateurs (2007) ont rapporté la persistance de son odeur sur l'aliment et donc son inappétence pour les animaux. L'extraction à l'isopropanol et à l'hexane a réduit le GL du tourteau de coton de 0,06 à moins de 0,01 %, cependant, leur utilisation n'est pas recommandée pour des raisons techniques, économiques et environnementales (Reid *et al.*, 1987).

Dans les huileries, l'extraction au solvant des huiles des graines de coton est couramment utilisée (Damaty et Hudson, 1975 ; Canella et Sodini, 1977 ; Cherry et Gray, 1981 ; Rahma et Narasingo-Rao, 1984) et permet d'obtenir des teneurs variant de 0,03 à 0,14 % de GL et 1,09 à 1,16 % de gossypol lié (Proctor *et al.*, 1968 ; Vix *et al.*, 1971 ; Yu *et al.*, 1993).

3.5. La supplémentation en lysine

En fixant les groupements amines grâce à ses fonctions aldéhydes, le gossypol entraîne une formation du complexe « gossypol-lysine » qui réduit la disponibilité de la lysine (Baliga et Lyman, 1957 ; Tanksley et Knabe, 1981 ; Frank, 1985 ; Ryan *et al.*, 1986 ; Yu *et al.*, 1996 ; Gamboa *et al.*, 2001b ; Azman et Yilmaz, 2005) et diminue la valeur protéique de l'aliment (Watkins *et al.*, 1993). Certains auteurs ont ainsi, à partir d'une supplémentation en lysine, réduit la biodisponibilité du gossypol dans l'organisme animal (Lyman *et al.*, 1959 ; Phleps, 1966 ; Fernandez *et al.*, 1994). Les niveaux de supplémentation s'élèvent à environ 10 % des teneurs en tourteaux de coton dans la ration (Watkins *et al.*, 1993 ; Sekhar-Reddy *et al.*, 1998 ; Henry *et al.*, 2001).

Il faut noter cependant que l'excès de lysine peut accroître les besoins en arginine de la volaille (Zhang *et al.*, 1990 ; Chamruspollert *et al.*, 2002). De plus, la lysine est un acide aminé (AA) coûteux à utiliser, d'autant plus que le GL le rend indisponible.

3.6. La sélection végétale : les variétés *glandless*

Les recherches sur le coton sont également marquées, ces dernières décennies, par les travaux de sélection visant à éliminer les glandes à gossypol sur la plante et surtout sur la graine. En effet, depuis les années 80, les phyto-généticiens sont parvenus à obtenir des variétés de coton quasiment indemnes de glandes à gossypol : ce sont les variétés dites « *glandless* ».

Reid et collaborateurs (1984) rapportent que les teneurs en GL des tourteaux issus de ces cotons sont inférieures à 0,01 %, avec une meilleure digestibilité de la lysine (81,9 % contre 71,7 % pour le coton conventionnel).

En 1994, l'introduction de telles variétés (CSA, GL5, ISA et GL7) en Côte d'Ivoire avait poussé les limites de la culture jusqu'à 60 % des terres emblavées par la culture de coton. En effet, ces variétés possèdent un rendement en fibre supérieur à celui des variétés classiques et permettent leur utilisation en alimentation humaine et animale (Benbouza, 2004). Cependant, l'absence totale de glandes à gossypol se traduit par une nette augmentation de la sensibilité de la plante aux ravageurs avec, comme corollaire, une réduction de la rentabilité de la culture et des conséquences néfastes sur l'environnement par l'application de quantités plus importantes de pesticides. D'après Wen-Ju et collaborateurs (2006), la culture de coton « *glandless* » dans le monde est actuellement inférieure à 0,5 % de la superficie emblavée. Seules les variétés « M124-10 » et « M307-10 », qui présentent un meilleur comportement agronomique, sont encore utilisées. Une solution à ce problème est donc la création de variétés de cotonniers qui présentent des glandes à gossypol sur toute leur partie aérienne excepté la graine.

Certains cotonniers diploïdes sauvages australiens appartenant aux espèces *Sturtia* et *Hibiscoidea* du genre *Gossypium* présentent une inhibition de la synthèse du gossypol au niveau de la graine. Chez ces espèces, les

glandes sont présentes dans la graine mais la synthèse du gossypol ne commence qu'après la germination (Mergeai, 2003). Le transfert de ce caractère chez les espèces de cotonniers cultivés permettrait d'exploiter leur haut potentiel nutritionnel tout en maintenant le mécanisme de défense naturel contre les insectes que constituent les glandes à gossypol dans les organes aériens de la plante.

Vroh-Bi et collaborateurs (1999) ont mis en évidence trois fragments de chromosomes de l'espèce *Gossypium sturtianum* impliqués dans l'expression de l'inhibition spécifique de la synthèse du gossypol dans la graine avec la présence sur au moins un de ces fragments d'un facteur de létalité qui s'exprime à l'état homozygote.

De plus, il existe aujourd'hui des variétés de cotonniers transgéniques dont les teneurs en gossypol sont réduites dans les graines mais avec des concentrations similaires à celles du cotonnier conventionnel dans le reste de la plante, permettant sa défense contre les ravageurs (Sunilkumar *et al.*, 2006). Cependant, les brevets liés à ces variétés constituent encore un obstacle pour la diffusion des résultats (Rathore, 2009).

4. TAUX D'INCORPORATION ET EFFETS ZOOTECHNIQUES

Beaucoup de travaux ont été menés pour déterminer la limite d'incorporation du tourteau de coton dans les rations pour poulets. Les premiers résultats rapportés ont montré que la tolérance des oiseaux au GL dans les provendes varie de 0,016 % (Heywang et Bird, 1955) à 0,1 % (Narain *et al.*, 1960 ; Lipstein et Bornstein, 1964 cités par Nagalakshmi *et al.*, 2007). Cette forte variation du niveau de tolérance au gossypol est liée à l'âge et à la souche de poulets (Heywang et Birds, 1955), à la qualité et à la quantité de protéines dans l'aliment (Narain *et al.*, 1960 ; 1961 cités par Nagalakshmi *et al.*, 2007) et à la composition minérale et surtout en fer de la provende (Bressani *et al.*, 1964).

Jusqu'à 0,01 et même 0,015 % de GL dans l'aliment, les performances des poulets ne sont pas affectées (Smith, 1970 ; Waldroup, 1981 ; Hermes *et al.*, 1983). Azman et Yilmaz (2005) n'ont observé aucun effet significatif sur les performances des poulets avec des rations dont le niveau de GL était inférieur à 200 ppm. Heywang et Kemmerer (1966) et Hermes et col-

laborateurs (1983) ont même élevé ce niveau jusqu'à 250 ppm. Enfin, Couch et collaborateurs (1955) rapportent n'avoir observé aucun effet négatif sur la croissance et la prise alimentaire des volailles avec un aliment contenant 600 ppm de GL.

Toutes choses étant égales, les poulets expriment de meilleures performances lorsque le tourteau de coton est issu de graines décortiquées et lorsqu'il a été obtenu par extraction des lipides au solvant (Sharma *et al.*, 1978b). Avec des taux d'incorporation progressifs de tourteau de coton semi-décortiqué à 0,17 % de GL, El-Boushi et Raterink (1989) ont observé des effets négatifs sur les performances pondérales des poulets au-delà de 8 % d'incorporation.

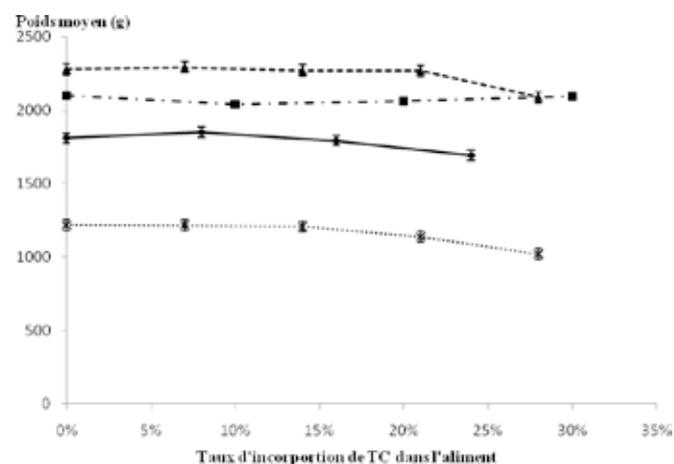
Wal (1970) a conseillé de ne pas dépasser 14 à 15 % de tourteau de coton dans des rations de démarrage de poulets de chair. Sekhar-Reddy et collaborateurs (1998) ont rapporté que le tourteau de coton décortiqué et déshuilé pouvait être incorporé jusqu'à 21 % dans les aliments pour poulets. D'après Njike (1975) et Nzekwe et Olomu (1982), le tourteau de coton (TC) peut substituer de 50 à 75 % du tourteau d'arachide, ce dernier devant apporter 30 à 40 % des protéines de la ration. Le « *National Research Council* » (NRC), quant à lui, fixe la limite d'incorporation du tourteau de coton à 20 % (NRC, 1994). Les limites sont plus élevées avec le TC « *glandless* ». Watkins et collaborateurs (2002) ont incorporé jusqu'à 20 % de tourteau de coton dégossypolé dans la ration sans aucune incidence sur les

performances des poulets, et jusqu'à 30 % si le tourteau a été déshuilé.

Campbell (1988) a rapporté que la substitution totale du tourteau de soja par le tourteau de coton (15 % d'incorporation) entraînait une baisse de la croissance et de l'ingestion des animaux. Cependant, le tourteau de coton déshuilé au solvant pouvait être incorporé à raison de 10 % dans des aliments pour poulets, sans supplémentation en fer (Elangovan *et al.*, 2003). Avec 30 % d'incorporation de TC dans les rations, aucun effet négatif sur les performances pondérales des oiseaux et l'efficacité alimentaire de la ration n'a été observé par Reddy et Eshwaraiah (1987) durant la période de démarrage. Yo (1991) n'a observé aucun effet négatif sur les performances pondérales des poulets recevant une ration contenant jusqu'à 20 % d'amande de graines de coton « *glandless* », malgré une ingestion supérieure pour les aliments contenant le coton.

De plus, la croissance pondérale de poulets n'a pas été affectée par l'incorporation de 15 % de tourteau de coton non-décortiqué (à 0,06 % de GL), bien que l'efficacité alimentaire de la ration ait diminué (Sharma *et al.*, 1978b). L'incorporation jusqu'à 30 % de tourteau de coton (à 0,02 % de GL) par Watkins et collaborateurs (1993) n'a révélé aucun effet négatif sur les performances de croissance des poulets. Cependant, la prise alimentaire a été plus élevée ($P < 0,05$) entraînant ainsi une faible augmentation de l'indice de consommation. Gamboa et collaborateurs (2001b) et El-Boushi et Raternick (1989) n'ont, jusqu'à

Figure 9



Évolution du poids de poulets après 6 semaines d'élevage en fonction du niveau d'incorporation de tourteaux de coton dans l'aliment selon El Boushy et Raternick (1989) (—■—), Watkins et collaborateurs (1993) (—□—), Gamboa et collaborateurs (2001b) (—▲—) et Sekhar Reddy et collaborateurs (1998) (—×—)

des niveaux d'incorporation de tourteau de coton respectivement de 21 % et 16 %, détecté aucun effet négatif sur le poids animaux (respectivement 2269 g et 1793 g, figure 9). Sekhar-Reddy et collaborateurs (1998) ont obtenu des performances plus faibles en substituant le tourteau d'arachide par le TC décortiqué et déshuilé mais n'ont mis en évidence aucun effet significatif sur le poids des animaux avec 21 % d'incorporation dans l'aliment. Les IC obtenus par Gamboa et collaborateurs (2001b) et El-Boushy et Raternick (1989) ont été similaires et très faibles (figure 10) contrairement à celles rapportées par Sekhar-Reddy et collaborateurs (1998) où une efficacité alimentaire de l'ordre de 2,5 a été enregistrée.

Divers traitements ont été appliqués

par les différents auteurs pour atténuer les effets des GL sur les performances zootechniques. El-Boushy et Raternick (1989) ont rapporté qu'un apport de 0,03 % de fer a permis de corriger les baisses de poids observées lors d'une incorporation de 24 % d'un tourteau à 0,17 % de GL (figure 11).

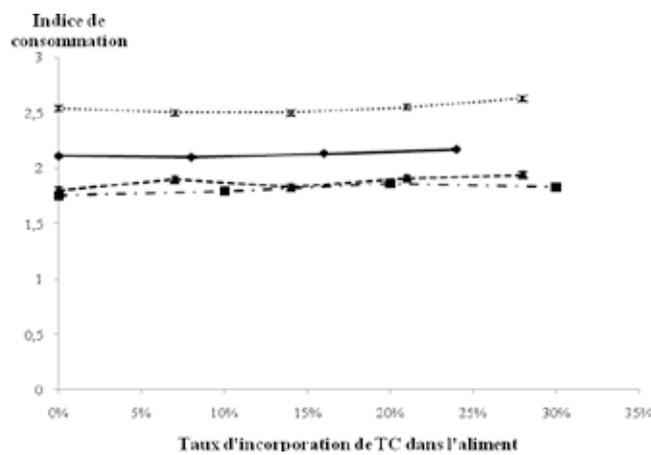
L'apport par Sekhar-Reddy et collaborateurs (1998) de 0,29 % de L-lysine dans un aliment où le tourteau de coton était incorporé à raison de 28 % a eu le même effet correcteur (figure 12) alors que la supplémentation à l'aide de 0,10 % de fer n'a eu que peu d'effets. D'autre part, aucun effet significatif n'a été enregistré par El-Boushy et Raternick (1989) sur l'efficacité alimentaire lors de la supplémentation en fer alors que Sekhar-Reddy et collaborateurs (1998)

ont observé un effet positif avec la lysine (figures 13 et 14).

Ces résultats révèlent une diminution des performances pondérales des poulets et une augmentation de l'indice de consommation à partir de respectivement 150 et 60 ppm de GL dans la ration. À de tels taux, la supplémentation à l'aide de 2 % de lysine permet de corriger ces effets négatifs.

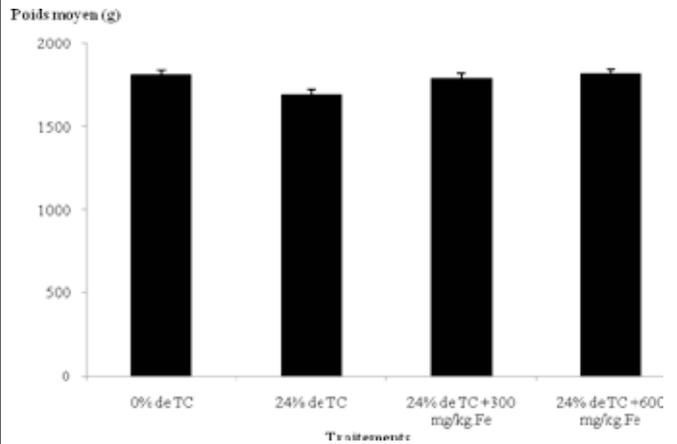
Les études rapportant l'effet du TC sur la qualité de la carcasse et le profil en acides gras des muscles et de la graisse sont rares. Toutefois, Watkins et collaborateurs (2002) ont observé une diminution du rendement carcasse et des quantités de graisses abdominales lors de la substitution totale du tourteau de soja par le tourteau de coton déshuilé au solvant à raison de 30 % de la ration.

Figure 10



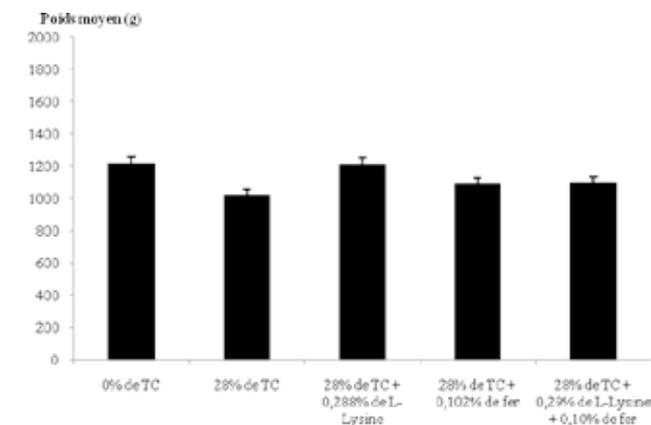
Evolution de l'indice de consommation de poulets après 6 semaines d'élevage en fonction du niveau d'incorporation de tourteaux de coton dans l'aliment selon El Boushy et Raternick (1989) (—■—), Watkins et collaborateurs (1993) (—□—), Gamboa et collaborateurs (2001b) (—▲—) et Sekhar-Reddy et collaborateurs (1998) (—×—).

Figure 11



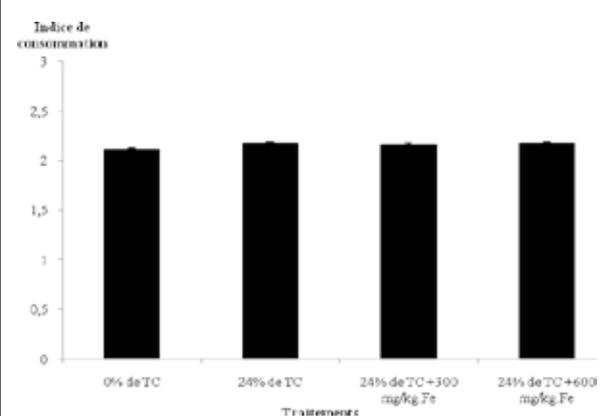
Poids moyens de poulets après 6 semaines d'élevage selon divers traitements du tourteau de coton semi-décortiqué utilisant le fer (El-Boushy et Raternick, 1989).

Figure 12



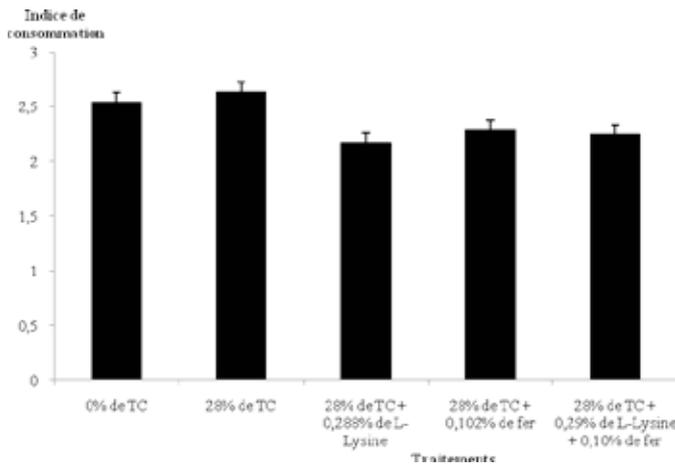
Poids moyens de poulets après 6 semaines d'élevage selon divers traitements du tourteau de coton décortiqué utilisant la lysine et/ou le fer (Sekhar-Reddy *et al.*, 1998).

Figure 13



Indice de consommation de rations avec divers traitements du tourteau de coton semi-décortiqué utilisant le fer sur une période de 6 semaines d'élevage (El-Boushy et Raternick, 1989).

Figure 14



Indice de consommation de rations avec divers traitements du tourteau de coton décortiqué utilisant la lysine et/ou le fer sur une période de 6 semaines d'élevage (Sekhar Reddy *et al.*, 1998).

6. REMERCIEMENTS

Ce travail entre dans le cadre de la thèse de doctorat en Productions animales du projet « PIC » portant sur l'Amélioration de la rentabilité financière de la filière de coton au Sénégal financé par la Commission Universitaire au Développement (CUD) de la Belgique. Les auteurs remercient chaleureusement cette organisation.

ABSTRACT

Cottonseed by-products on broilers production

Cottonseed by-products are very high in nutrients and their chemical composition varies

highly according to the varieties of cotton and the various treatments aiming at extracting oil. Their use in animal nutrition, and particularly in broilers, is especially limited by the free gossypol which can damage various tissues and also decreases the performances of growth and diet efficiency. The incorporation of cottonseed meal in broilers diet may be increased following chemical binding of free gossypol, but these methods have drawbacks. Ferrous sulfate denatures feed and the use of lysine to bind gossypol is limited by the expen-

5. CONCLUSION

La graine de coton présente potentiellement un intérêt nutritionnel élevé en production de poulet. Le gossypol constitue une limite pour la valorisation de cette ressource alimentaire. Les techniques de dégossypolisation ont permis d'atténuer ses effets mais elles présentent de nombreux inconvénients. Les variétés de coton sans gossypol présentent quant-à elles, des problèmes d'ordre phytotechnique. Aujourd'hui, la production de variétés de cotonniers manifestant une inhibition spécifique de la production de gossypol dans la graine permet d'envisager l'incorporation des co-produits de ces graines à des taux particulièrement élevés, susceptibles de concurrencer les tourteaux classiquement utilisés en aviculture.

siveness of this product while the biological fermentation is very complex and inapplicable, as to now, on a large way. Glandless varieties could be incorporated at a very high level in diets and therefore could contribute to decrease the protein feed requirements. Unfortunately, agronomic constraints associated to these crops have limited the research in this way. The production of varieties in which gossypol secretion would be inhibited before the seed germination should alleviate the limitations associated to cotton by-products.

BIBLIOGRAPHIE

- ADUKU A.O., SELL J.L. Fungus-fermented cottonseed meal effect on growth of broilers. *Poult. Sci.*, 1979, **58**, 1030.
- ALONSO R., ORUE E., ZABALZA M.J., GRANT G., MARZO F. Effect of extrusion cooking on structure and functional properties of pea and kidney bean proteins. *J. Sci. Food Agric.*, 2000, **80**, 397-403.
- ALTSCHUL A.M., LYMAN C.M., THURBER F.H. Processed plant protein feedstuffs. Academic Press : New York, 1958, 534 p.
- ALYEVAND F., COLEMAN G., HAISMAN D.R. Fatty odours in food: the reaction between mesityloxide and sulfur compounds in foodstuffs. *Chem. Industry*, 1967, **37**, 1563-1569.
- ATTEH J.O. Principles and practice of livestock feed manufacturing. Adlek Printers Llorin : Nigeria, 2002, 67 p.
- AZMAN M.A., YILMAZ M. The growth performance of broiler chicks fed with diets containing CSM supplemented with Lysine. *Rev. Med. Vet.*, 2005, **156** : Suppl 2, 104-106.
- BALIGA B.P., LYMAN C.M. Preliminary report on the nutritional significance of bound gossypol in cottonseed meal. *J. of Am. Oil Chem. Soc.*, 1957, **34**, 21-24.
- BALIGA B.P., BAYLISS M.E., LYMAN C.M. Determination of free lysine epsilon amino groups in cottonseed meals and preliminary studies in relation to protein quality. *Arch. Biochem. Biophysical*, 1959, **84**, 1-6.
- BALOGUN T.F., ADUKU A.O., DIM N.I., OLORUNJU S.A.A. Undecorticated cottonseed meal

- as a substitute for soybean meal in diets for weaner and growing-finishing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 1990, **30**, 193–201.
- BARAZZA M.L., COPPROCK C.E., BROOKS K.N., WILKS D.L., SAUNDERS R.G., LATIMER G.W. Iron sulfate and feed pelleting to detoxify free gossypol in cottonseed diets for dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 1991, **74**, 3457–3467.
- BENBOUZA H. Introgression chez *Gossypium hirsutum* L. et cartographie au moyen de marqueurs microsatellites des gènes responsables du caractère « *low-gossypol seed and high-gossypol plant* » (PhD Thesis). FUSAGx : Gembloux, 2004, 266 p.
- BENDER H.S., DEROLF S.Z., MISRA H.P. Effects of gossypol on the antioxidant defense system of rat testis. *Arch. Andrology*, 1988, **21**, 59–70.
- BERARDI L.C., GOLDBLATT L.A. Gossypol. In : Lienner IE (Ed.), Toxic constituents of plant foodstuffs. Academic Press : New York and London, 1969, 211–266.
- BLACKSTAFFE L., SHELLY M.D., FISH R. G. Cytotoxicity of gossypol enantiomers and its quinone metabolite gossypolone in melanoma cell lines. *Melanoma Res.*, 1997, **7**, 364–372.
- BOLING S.D., EDWARDS H.M., EMMERT J.L., BIEHL R.R., BAKER D.H. Bioavailability of iron in cottonseed meal, ferric sulfate, and two ferrous sulfate by-products of the galvanizing industry. *Poult. Sci.*, 1998, **77**, 1388–1392.
- BOATNER C.H., CASTILLON L.E., HALL C.M., NEELY J.W. Gossypol and gossypurpurin in cottonseed of different varieties of *G. Barbadense* and *G. hirsutum* and variation of the pigments during storage of the seed. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1949, **26**, 19–25.
- BOTSOGLU N.A. High performance liquid chromatographic method for the determination of free gossypol in chicken liver. *J. Chromatogr.*, 1991, **587**, 333–337.
- BOTSOGLU N.A., SPAIS A.B. Ion-pair, liquid chromatographic analysis of total gossypol in chicken liver. *J. Chromatogr.*, 1992, **33**, 174–176.
- BRAHAM J.E., JARQUIN R., BRESSANI R., GONZALEZ J.M., ELIAS L.G. Effect of gossypol on the iron-binding capacity of serum in swine. *J. Nutr.*, 1967, **93**, 241–248.
- BRANCKAERT R., FAVIER J.C., VALLERAND E. Utilisation du tourteau de coton dans l'alimentation animale. *Zootech.*, 1968, **17** : Suppl 1, 42–50.
- BRESSANI R., ELIAS L.G., BRAHAM J.E. All-vegetable protein mixture for human feeding. 15. Studies in dogs on the absorption of gossypol from cottonseed flour containing vegetable protein mixtures. *J. Nutr.*, 1964, **83**, 209–217.
- BRUINSMA, W. Entomologie appliquée. Le cotonnier. Département de formation en protection des végétaux : Niamey, 1987, 89 p.
- CALHOUN M.C., KUHLMANN S.W., BALDWIN B.C.JR. Cotton feed product composition and gossypol availability and toxicity. In : Eastridge, M. L. (Ed.), Proceeding of National Invitational Symposium on Alternative Feeds for Dairy and Beef Cattle, St Louis, Sept. 24-26, 1995a, 125-145.
- CALHOUN M.C., KUHLMANN S.W., BALDWIN B.C.JR. Assessing the gossypol status of cattle fed cotton feed products. In : Proceedings of the Pacific Northest Animal Nutrition Conference, Portland, 1995b, 147A-158A.
- CAMPBELL L.D. Canola meal as a substitute for cottonseed meal in the diet of broiler chickens. *Nutr. Rep. Internat.*, 1988, **37**, 371–377.
- CANELLA M., SODINI G. Extraction of gossypol and oligosaccharides from oil seed meals. *J. food Sci.*, 1977, **42**, 1218–1219.
- CARD I.E. Poultry production. Lea and Febiger : Philadelphia, 1952, 225 p.
- CASS Q.B., TIRITAN E., MATLIN S.A., Freire E.C. Gossypol enantiomer ratios in cotton seeds. *Phytochem.*, 1991, **30**, 2655-2657.
- CHAMRUSPOLLERT M., PESTI G.M., BAKALLI R.I. Dietary interrelationships among arginine, methionine, and lysine in young broiler chicks. *Br. J. Nutrit.*, 2002, **88**, 655–660.
- CHEN Q.Q., CHEN H., LEI H.P. Comparative study on the metabolism of optical gossypol in rats. *J. Ethnopharmacol.*, 1987, **20**, 31–37.
- CHERRY J.P., GRAY S. Méthylene chloride extraction of gossypol cottonseed products. *J. Food Sci.*, 1981, **46**, 1726–1733.
- CHILLIARD Y., FERLAY A., DOREAU M. Contrôle de la qualité nutritionnelle des matières grasses du lait par l'alimentation des vaches laitières : acides gras trans, polyinsaturés, acide linoléique conjugué. *INRA Prod. Anim.*, 2001, **14**, 323-335.
- CLAWSON A.J., SMITH F.H. Effect of dietary iron on gossypol and on residues of gossypol in porcine liver. *J. Nutr.*, 1966, **89**, 307–310.
- COUCH J.R., CHANG W.Y., LYMAN C.M. The effect of free gossypol on chick growth. *Poult. Sci.*, 1955, **34**, 178–183.
- COX G., DODDS J.M.L., WIGMAN H.B., MURPHY F.J. The effects of high doses of aluminium and iron on phosphorus metabolism. In: Scientific Proceedings of the XXV meeting of the Society of Biological Chemists. *J. of Biol. Chem.*, 1931, **92**, 11.
- DEVELOPPEMENT DES AGRO-INDUSTRIES DU SUD. Chronique des huiles végétales et de leurs dérivés (n°1). [en ligne] (12/2006a) Adresse URL <http://www.dagris.fr/huilecoton.html>, consulté le 22/02/2007.
- DEVELOPPEMENT DES AGRO-INDUSTRIES DU SUD. La lettre de Dagris N°18: Coup de tonnerre à l'OMC. [en ligne] (08/2006b) Adresse URL <http://www.dagris.fr/images/lettre18.pdf>, consulté le 22/02/2007.
- DALE N.M., FULLER H.L. Effects of low temperature, diet density, and pelleting on the preference of broilers for high fat rations. *Poult. Sci.*, 1979, **58**, 1337–1339.
- DAMATY S., HUDSON B.J.F. Preparation of low gossypol cottonseed flour. *J. Sci. Food Agric.*, 1975, **26**, 109-115.
- DAO V.T., GASPARD C., MAYER M., WERNER G.H., NGUYEN

- S.N., MICHELOT R.J. Synthesis and cytotoxicity of gossypol related compounds. *Eur. J. Med. Chem.*, 2000, **35**, 805-813.
- DEMJEANEC B., MERCHEN N.R., CREMIN J.R., ALDRICH C.G., BERGER L.L. Effect of roasting on site and extent of digestion of soybean meal by sheep: I. Digestion of nitrogen and amino acids. *J. Anim. Sci.*, 1995, **73**, 824-834.
- DEMOL, J. La connaissance de la plante. Administration Générale de la Coopération au Développement : Bruxelles, 1992, 247 p.
- DEOBALD H.J., ELVEHJEM C.A. The effect of feeding high amounts of soluble iron and aluminium salts. *Am. J. Physiol.*, 1935, **111**, 118-123.
- DIOUF B. Contribution à l'étude de l'introgession du caractère « inhibition de la synthèse du gossypol uniquement dans la graine » chez le cotonnier cultivé, par la caractérisation de la descendance BC2S1 et BC2S3 de l'hybride trispécifique (HRS) *Gossypium hirsutum* x *G. raimondii* x *G. sturtianum*. (Mémoire). Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture : Thiès, 2006, 60 p.
- EL BOUSHY A.R., RATERINK R. Replacement of soybean meal by cottonseed meal and peanut meal or both in low energy diets for broilers. *Poult. Sci.*, 1989, **68**, 799-804.
- ELANGOVA A.V. MANDAL A.B., JOHRI T.S. Comparative performance of broilers fed diets containing processed meals of Bt, parental Non-BT or commercial cottonseeds. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 2003, **16**, 57-62.
- ESTUR G. Le marché mondial du coton: évolution et perspectives. *Agric.*, 2006, 15, 9-14.
- EWING D.L., JOHNSON D.E., RUMPLER W.V. Corn particle passage and size reduction in the rumen of beef steers. *J. Anim. Sci.*, 1986, **63**, 159-1515.
- FERGUSON T.M., COUCH J.R., RIGDON R.H. Histopathology of animal reactions to pigment compounds-chickens. In : Proc. Conf. Chem. Structure and reactions of gossypol and non-gossypol pigments of cottonseed. National cottonseed products Assoc., Memphis, 1959, 131-141.
- FERNANDEZ S.R., ZHANG Y, PARSON C.M. Effect of overheating on the nutritional quality of cottonseed meal. *Poult. Sci.*, 1994, **73**, 1563-1571.
- FERNANDEZ S.R., ZHANG Y, PARSON C.M. Dietary formulation with cottonseed meal on a total amino-acid versus a digestible amino acid basis. *Poult. Sci.*, 1995, **74**, 1168-1179.
- FLETCHER J.L., BARRENTINE B.F., DREESON L.J., HILL J.E., SHAWYER C.B. The use of ferrous sulfate to inactivate gossypol in the diets of laying hens. *Poult. Sci.*, 1953, **32**, 740-742.
- FORSTER L.A.JR., CALHOUN M.C. Nutrient values for cottonseed products deserve new look. *Feedstuffs*, 1995, **67**, 44.
- FRANK A.W. Food uses of cottonseed protein. *Dev. Food Proteins*, 1985, **5**, 31-80.
- GAMBOA D.A., CALHOUN M.C., KUHLMANN S.W., HAQ A.U., BAILEY C.A. Use of expander cottonseed meal in broiler diets formulated on a digestible Amino acid Basis. *Poult. Sci.*, 2001a, **80**, 789-794.
- GAMBOA D.A., CALHOUN M.C., KUHLMANN S.W., HAQ A.U., BAILEY C.A. Tissue distribution of gossypol Enantiomers in broilers fed various cottonseed meals. *Poult. Sci.*, 2001b, **80**, 920-925.
- GOETSCH A.L., OWENS F.N. The effects of commercial processing method of cottonseed meal on site and extent of digestion in cattle. *J. Anim. Sci.*, 1985, **60**, 803-813.
- HENRYM.H., PESTIG.M., BAKALLI R., LEE J., TOLEDO R.T., EITENMILLER R.R., PHILLIPS R.D. The performance of Broiler chicks fed diets containing extruded cottonseed meal with Lysine. *Poult. Sci.*, 2001, **80**, 762-768.
- HERMES I.H., ASHER N.R., SHULKAMY M.T., SHERSKLE E. The effect of using different levels of decorticated cottonseed meal on the performance of chicks: Growth and feed efficiency of starting chicks. *Ann. Agric. Sci. Ain Shams Univ.* (Egypt), 1983, **28**, 1415-1428.
- HEYWANG B.W., BIRD H.R. Relationship between the weight of chicks and levels of dietary free gossypol supplied by different cottonseed products. *Poult. Sci.*, 1955, **34**, 1239-1247.
- HEYWANG B.W., KEMMERER A.R., Effect of gossypol source and level on chicks growth. *Poult. Sci.*, 1966, **45**, 1429-1430.
- HILL C.W., MATRONE G. Studies on copper and iron deficiencies in growing chickens. *J. Nutr.* 1961, **73**, 425 - 431.
- HRON R.J., WAN P.J., KEEK M.S. Ethanol vapor deactivation of gossypol in cottonseed meal. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1994, **73**, 1337-1339.
- HSU J.T., SATTER L.D. Procedures for measuring the quality of heat-treated soybeans. *J. Dairy Sci.*, 1995, **78**, 1353-1361.
- HUANG L., ZHENG D.K., SI Y.K. Resolution of racemic gossypol. *J. Ethnopharmacol*, 1987, **20**, 13 - 20.
- HUSBY F.M., KROENING G. H. Energy value of cottonseed meal for swine. *J. Anim. Sci.*, 1971, **33**, 592-603.
- JANERO D.R., BURGHARDT B. Protection of rat myocardial phospholipids against peroxidative injury through superoxide (Xantine oxidase) - dependent iron promoted fenton chemistry by the male contraceptive gossypol. *Biochem. Pharmacol.*, 1988, **37**, 3335-3342.
- JONES L.A. Nutritional values for cottonseed meal. *Feedstuffs*, 1981, **53**, 19-21.
- JONES L.A. Gossypol chemistry and plant distribution. In : Jones L.A. (Ed.), Male Fertility and its Regulation. MTP Press Ltd : Lancaster, 1985, 93-110.
- JOSEPH A.E., MATLIN S.A., KNOX P. Cytotoxicity of enantiomers of gossypol. *Br. J. Cancer*, 1986, **54**, 511-513.
- KÉTÉKOU A., Intérêt biologique de l'huile de graine de coton. In : Ketekou A. (Ed), Le cotonnier sans gossypol, une nouvelle ressource alimentaire. IDESSA : Abidjan, 1985, 58-62.

- KING T.J., DE SILVA L.B. Optically active gossypol from *Thespesia populnea*. *Tetrahedron Lett.*, 1968, **3**, 261-263.
- LANE A.G., STUART R.I. Gossypol intake may affect vitamin status of dairy cattle. *Feedstuffs*, 1990, **62**, 13.
- LECLERCQ B., ESCARTIN R. Further investigations on the effects of metabolisable energy content of diet on broiler performances. *Arch. Geflügelk.*, 1987, **51**, 93-96.
- LEMME A., RAVINDRAN V., BRYDEN W.L. Ileal digestibility of amino acids in feed ingredients for broilers. *World Poult. Sci. J.*, 2004, **60**, 423-438.
- LENNERTS L. Oil cakes and oil seeds as raw material for the production of feed mixtures. Seven feedstuffs made from cottonseed. *Olk. Ols Roh. Misch. Prod.*, 1988, **129**, 504-505.
- LIPSTEIN B., BORNSTEIN S. Studies with acidulated cottonseed oil soapstock. 2. Attempts to reduce its gossypol content. *Poult. Sci.*, 1964, **43**, 694-701.
- LIU F.K., JOU S.Y., JUNG L.Y. A new method of detoxification of cottonseed by means of mixed solvent extraction. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1981, **58**, 93-96.
- LODHI G.N., MALIK N.S., ICHHPONANI J.S. Metabolizable energy, nitrogen absorbability and feeding value of expeller processed mustard cake for chicks. *Br. Poult. Sci.*, 1974, **15**, 459-465.
- LYMAN C.M., BALIGA B.P., SLAY M.W. Reactions of proteins with gossypol. *Arch. Biochem. Biophys.*, 1959, **84**, 486-497.
- MARCHLEWSKI L., *J. Prakt. Chem.*, 1899, **60**, 84.
- MARQUIÉ C., ERICH. Le coton glandless : une sécurité alimentaire en période de soudure. Bulletin du réseau TPA 11 CIRAD-CA, 1995, [en ligne] (04/1995) Adresse URL <http://infotpa.gret.org/fileadmin/bulletin/bulletin11/b11p20a21.htm> Consulté le 23/03/07.
- MARTIN S.D. Gossypol effects in animal feeding can be controlled. *Feedstuffs*, 1990, **62**, 14-17.
- MATHUR C.R., AHMED M.T. The feeding value of cottonseed meal screenings in chicks rations. *Indian Vet. J.*, 1969, **46**, 804-806.
- MATRONE G., HARUMAN R.H., CLAWSON A.J. Studies of a manganese-iron antagonism in the nutrition of rabbits and baby pigs. *J. Nutr.*, 1959, **67**, 309-317.
- MAYORGA H., GONZALEZ J., MENCHU J.F., ROLZ C. Preparation of a low free gossypol cottonseed flour by dry and continuous processing. *J. Food Sci.*, 1975, **40**, 1270-1274.
- MCKINNON J.J., OLUBOBOKUN J.A., MUSTAFA A., COHEN R.D.H. Influence of dry heat treatment of canola meal on site and extent of nutrient disappearance in ruminants. *Anim. Feed Sci Technol.*, 1995, **56**, 243-252.
- MCNAUGHTON J.L., REECE F.N. Factors affecting pelleting response : Influence of dietary energy in broiler starter diets. *Poult. Sci.*, 1984, **63**, 682-685.
- MC DONALD P., EDWARDS R.A., GREENHALGH J.F.D. Nutrient requirements of laying hens. In: Feeding Standards for Reproduction and Lactation. Longman: London, 1981, 304 p.
- MC GHEE F., CREGER C.R., COUCH J.R. Copper and iron toxicity. *Poult. Sci.*, 1965, **44**, 310-312.
- MERGEAI G. Forty years of Genetic improvement of cotton through interspecific hybridisation at Gembloux Agriculture University : Achievement and prospects. In : Swanepoel A (Ed), Cotton production for the new millennium - proceedings of the World cotton Research Conference-3, Cape Town, 9 - 13 March 2003. Agricultural research council ; Institute for industrial crops : Pretoria, 2004.
- MORGAN S.E., STAIR E.L., MARTIN T.M., EDWARDS W.C., MORGAN L. Clinical, clinicopathologic, pathologic, and alterations associated with gossypol toxicosis in feeder lambs. *Am. J. Vet. Res.*, 1988, **49**, 493-499.
- MOSS A., ALLISON R., STROUD A., COLLINS C. Evaluation of heat-treated lupins, beans, and rapeseed meal as protein sources for dairy cows. Home Grown Cereals Authority : Londres, 2000, 45 p.
- NAGALAKSHMI D., SASTRY V.R.B., AGRAWAL D.K., KATIYAR R.C.H. Haematological and immunological response in lambs fed on raw and variously processed cottonseed meal. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 2001, **14**, 21-29.
- NAGALAKSHMI D., SASTRY V.R.B., AGRAWAL D.K. Detoxification of undecorticated cottonseed meal by various physical and chemical methods. *Anim. Nutr. Feed Technol.*, 2002, **2**, 117-126.
- NAGALAKSHMI D., SAVARAN V., RAMA R., ARUN K. P., VADALI R. B. S. Cottonseed meal in poultry diets: A review. *Int. J. Poult. Sci.*, 2007, **44**, 119-134.
- NARAIN R., LYMAN C.M., DEYOE C.W., COUCH J.R. Effect of protein level of the diet on free gossypol tolerance in chicks. *Poult. Sci.*, 1960, **39**, 1556 - 1559.
- NARAIN R., LYMAN C.M., DEYOE C.W., COUCH J.R. Paper electrophoresis and albumin/globulin ratio of the serum of normal chicks and chickens fed free gossypol in diet. *Poult. Sci.*, 1961, **40**, 21-25.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL, BOARD ON AGRICULTURE. Nutrient requirements of poultry. 9th revised edition. National Academy Press : Washington, DC, 1994, 176 p.
- NJIKE M.C. Cottonseed meal as substitute for GNC in the diet of baby chicks. In: Njike M.C. (Ed.), Breeds and Nutrition of poultry in Nigeria. Nigerian Branch of World Poultry Science Association : Nigeria, 1975, 59-69.
- NZEKWE N.M., OLOMU J.M. The evaluation of cottonseed as a replacement for groundnut meal in broiler rations. *J. Anim. Prod. Res.*, 1982, **2**, 123-138.
- OBIOHA F.C., A guide to Poultry Production in the Tropics. Acena Publishers : Enugu, 1992, 3-7.
- OJEWOLA G.S., EWA U.E. Response of growing broiler to varying dietary plant protein. *Int. J. Poult. Sci.*, 2005, **4**, 765-771.
- OJEWOLA G.S., UKACHUCKWU S.N., OKULONYE E.I.

- Cottonseed meal as substitute for soybean meal in broiler ration. *Int. J. Poult. Sci.*, 2006, **5**, 360–364.
- PANIGRAHI S., PLUMB V.E., MACHIA D.H. Effects of dietary cottonseed meal with and without iron treatment on laying hens. *Br. Poult. Sci.*, 1989, **30**, 641–651.
- PANIGRAHI S., MORRIS T.R. Effects of dietary cottonseed meal and iron-treated cottonseed meal on different laying hen genotypes. *Br. Poult. Sci.*, 1991, **32**, 21–24.
- PANIGRAHI S. Effects of treating cottonseed meal with a solution of ferrous sulfate on laying hen performance and discolorations in eggs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 1992, **38**, 89–103.
- PANIGRAHI S., PLUMB V.E. Effects of dietary phosphorus of treating cottonseed meal with crystalline ferrous sulphate for the prevention of brown yolk discoloration. *Poult. Sci.*, 1996, **37**, 403–411.
- PARRY G. Le cotonnier et ses produits : Techniques agricoles et productions tropicales. Maisonneuve et Larose : Paris, 1982, 502 p.
- PASCAL G. Les apports quotidiens recommandés en lipides et en acides gras. *OCL*, 1996, **3**, 205–201.
- PERCY R.G., CALHOUN M.C., KIM H.L. Seed gossypol variation within *Gossypium barbadense*. *L. Cotton Crop. Sci.*, 1996, **36**, 193–197.
- PESTIG.M., WHITING T.S., JENSEN L.S. The effect of Crumbling on the relationship between dietary and chick growth, feed efficiency, and abdominal fat pad weights. *Poult. Sci.*, 1983, **62**, 490–494.
- PETIT H.V., RIOUX R., OUELLET D.R. Milk production and intake of lactating cows fed raw or extruded peas. *J. Dairy Sci.*, 1997, **80**, 3377–3385.
- PETIT H.V., TREMBLAY G.F., TREMBLAY E., NADEAU P. Ruminal biohydrogenation of fatty acids, protein degradability, and dry matter digestibility of flaxseed treated with different sugar and heat combinations. *Can. J. Anim. Sci.*, 2002, **82**, 241–250.
- PHLEPS R.A. Cottonseed meal for poultry: From research to practical application. *Poult. Sci.*, 1966, **22**, 86–112.
- PONCET C., RÉMOND D., LEPAGE E., MICHALET-DOREAU B. Comment mieux valoriser les protéagineux et oléagineux en alimentation des ruminants. *Fourrages*, 2003, **174**, 205–229.
- PONS W.A. JR., GUTHRIE J.D. Determination of free gossypol in cottonseed materials. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1949, **26**, 671–676.
- PONS W.A., HOFFPAUIR C.L., HOPPER T.H. Gossypol in cottonseed : Influence of variety of cottonseed and environment. *J. Agric. Food Chem.*, 1953, **1**, 1115–1118.
- PONS W.A., THURBER F.H., HOFFPAUIR C.L. Prepress-solvent extraction of cottonseed, processing conditions and characteristics of products. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1955, **32**, 98–103.
- PONS W.A., EAVES P.H. Aqueous acetone extraction of cottonseed. *U.S. Patent*, 1971, **3**, 157–168.
- PROCTOR J., O'NEILL H.J., RELICH H.G., LEVI R.S., PONS W.A. Physiological evaluation of solvent-treated cottonseed meals in rations for laying hens. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1968, **45**, 393–396.
- PROUDFOOT F.G., HULAN H.W. Feed texture effects on the performance of turkey broilers. *Poult. Sci.*, 1982, **61**, 327–330.
- RAHMA E.H., NARASINGO RAO M.S. Gossypol removal and functional properties of protein produced by extraction of glanded cottonseed with different solvents. *J. Food Sci.*, 1984, **49**, 1057–1060.
- RATHORE K. Safe seed: Food cotton genetically modified to not have toxic gossypol. [en ligne] (04/09/2009) Adresse URL http://www.sciencecodex.com/safe_seed_food_cotton_genetically_modified_to_not_have_toxic_gossypol Consulté le 28/12/2009.
- REDDY R., ESHWARAIAH V. Studies on the utilization of decorticated deoiled, double toasted cottonseed extraction broiler starters. *Indian J. Poult. Sci.*, 1987, **22**, 194–196.
- REID B.L., GALAVIZ-MORENO S., MAIORINO P.M. Comparison of glandless and regular cottonseed meals for laying hens. *Poult. Sci.*, 1984, **63**, 1803–1809.
- REID B.L., GALAVIZ-MORENO S., MAIORINO P.M. Evaluation of Isopropanol-extracted cottonseed meal for laying hens. *Poult. Sci.*, 1987, **66**, 82–89.
- REYNOLDS J.M., TONE J.N. Subchronic oral administration of gossypol-acetic acid (GAA) alters the distribution and utilization of radioiron in male rats. *Drug Chem. Toxicol.*, 1988, **11**, 135–150.
- RYAN J.R., KRATZER F.H., GRACE C.R., VOHRA P. Glandless cottonseed meal for laying and breeding hens and broiler chicks. *Poult. Sci.*, 1986, **65**, 945–955.
- SANDAL D.S. Rapid method for evaluating metabolizable energy of poultry feeds. (PhD Thesis). Punjab Agricultural University : Ludhiana, 1974.
- SAUVANT D., LOSSOUARN J., VERRIER E. Le coton et ses co-produits en alimentation animale. *Rev. Alim. Anim.*, 1994, **482**, <http://www.inapg.inra.fr/dsa/iobdaa/tcoton.htm> Consulté le 14 Mars 2007.
- SCHMIDELY P., SAUVANT D. Taux butyreux et composition de la matière grasse du lait chez les petits ruminants : Effets de l'apport de matière grasse ou d'aliment concentré. *INRA Prod. Anim.*, 2001, **14**, 337–354.
- SEKHAR-REDDY P., SUDHAKAR REDDY P., SATYANARAYANA REDDY P.V.V., SRINIVASA RAO D. Influence of cottonseed cake on the performance of broilers. *Indian J. Anim. Nutr.*, 1998, **15**, 188–193.
- SHAH F.H., SHAH W.H., YASIN M., ABDULLAH N. Detoxification of commercially produced cottonseed meal. *Pakistan J. Sci. Ind. Res.*, 1986, **29**, 380–382.
- SHARMA N.K., LODHI G.N., ICHHPONANI J.S. Cottonseed cake a potential source of vegetable protein for poultry: A review. *Indian J. Anim. Sci.*, 1978a, **48**, 132–140.
- SHARMA N.K., LODHI G.N., ICHHPONANI J.S. Comparative feeding value of expeller processed undecorticated and decorticated cottonseed cakes for growing chicks. *J. Agric. Sci.*, 1978b, **91**, 531–541.

- SHI A.H., ZHANG Y., QU P., YAN J.G., XIAO H.J. Screening and breeding of highly-effected degrading cotton-phenol strains and study on detoxification technology and conditions. *Acta Microbiol. Sinica*, 1998, **38**, 318–320.
- SKINNER, JAMES T., AMY L.W., PARK W.W. Effects of dietary nutrient density on performance and carcass quality of broilers 42 to 49 days of age. *J. Appl. Poult. Res.*, 1992, **1**, 367–372.
- SKUTCHES C.L., HERMAN D.L., SMITH F.H. Effect of I/V gossypol injection on iron utilization in swine. *J. Nutr.*, 1973, **103**, 851–855.
- SKUTCHES C.L., HERMAN D.L., SMITH F.H. Effect of dietary free gossypol on blood components and tissues iron in swine and rats. *J. Nutr.*, 1974, **104**, 415–422.
- SMITH K.J. Practical significance of gossypol in feed formulation. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1970, **47**, 448–450.
- SMITH F.H. Effect of gossypol bound to cottonseed protein on growth on weanling rats. *J. Agric. Food Chem.*, 1972, **20**, 803–804.
- SONTAG N.O.V. Composition and Characteristics of Industrial fats and oils. In : Bailey A.E., Swern D., Formo M.W., Applewhite T.H. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. Wiley : New-York, 1979, 289–477.
- STANSBURY M.F., PONS W.A.JR., DENHARTONG G.T. Relations between oil, nitrogen, and gossypol in cottonseed kernels. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1956, **33**, 282–286.
- SUNILKUMAR G., CAMPBELL L.M., PUCKHABER L., STIPANOVIC R.D., RATHORE K.S. Engineering cottonseed for use in human nutrition by tissue-specific reduction of toxic gossypol. *Appl. Biol. Sci.*, 2006, **103**, 18054–18059.
- TACHER G., RIVIÈRE R., LANDRY C. Valeur alimentaire pour les poussins et les poulets de chair du tourteau de coton sans gossypol. IEMVT : Paris, 1971.
- TANKSLEY T.D., KNABE D.A. Use of cottonseed meal in swine rations. *Feedstuff*, 1981, **52**, 24–27.
- TOWNSEND T. Situation et perspectives du coton. Groupe des produits tropicaux, 2008, pp 5. <http://www.ifap.org/fr/about/documents/CongresMondialAgriculteurs/SituationPerspectivesCoton.pdf>, Consulté le 09/11/2009.
- VIX H.L.E., EAVES P.H., GARDNER H.K.JR, LAMBOU M.G. Degossypolized cottonseed flour the liquid cyclone process. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1971, **48**, 611–615.
- VROH BI I., MAQUET A., BAUDOUIN J.P., DU JARDIN P., JACQUEMIN J.M., MERGEAI G. Breeding for “low-gossypol seed and high-gossypol plants” in uplands cotton. Analysis of triepieces hybrids and back-cross progenies using AFLP and mapped RFLPs. *Theor. Appl. Genet.*, 1999, **99**, 1233–1244.
- WAL J.M. L'utilisation des sous-produits industriels en alimentation animale à Madagascar. Institut d'élevage et de médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux : Madagascar, 1970.
- WALLACE J.R., FALCONER M.L. In vitro studies of conditions required to protect protein from ruminal degradation by heating in the presence of sugars. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 1992, **37**, 129–141.
- WALDROUP P.W., GOODNER T.O. Tolerance levels of free gossypol in layer diets as influenced by iron: gossypol ratios. *Poult. Sci.*, 1973, **52**, 20–28.
- WALDROUP P.W. Cottonseed meal in poultry diets. *Feedstuffs*, 1981, **53**, 21–24.
- WANG N.G., ZHOU L.F. GUAN M.H., LEI H.P. Effects of (-) and (+) – gossypol on fertility in male rats. *J. Ethnopharmacol.*, 1987, **20**, 21–24.
- WATKINS S.E., SKINNER J.T., ADAMS M.H., WALDROUP P.W. An evaluation of low-gossypol cottonseed meal in diets for broilers chickens: Effect of cottonseed meal level and lysine supplementation. *J. Appl. Poult. Res.*, 1993, **2**, 221–226.
- WATKINS S.E., SALEH E.A., WALDROUP P.W. Reduction in dietary nutrient density aids in utilization of high protein cottonseed meal in broiler. *J. Poult. Res.*, 2002, **1**, 53–58.
- WEN-JU Z., ZI-RONG X., JIAN-YI S., XIA Y. Effect of selected fungi on the reduction of gossypol levels and nutritional value during solid substrate fermentation of cottonseed meal. *J. Zhejiang Univ Sci*, 2006, **7**, 690–695.
- WILLARD S.T., NEUENDORF D.A., LEWIS A.W., RANDEL R.D. Effect of free gossypol in the diet of pregnant and postpartum brahman cows on calf development and cow performance. *J. Anim. Sci.*, 1995, **73**, 496–507.
- WU X.Y., CHEN J.X. The utilization of microbes to break down free gossypol in cottonseed meal. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, **22**, 82–86.
- YO T. Utilisation directe des graines de coton décortiquées de variétés sans gossypol dans l'alimentation des poulets de chair en Côte-d'Ivoire, *Revue Elev. Méd. Vet. Pays Trop.*, 1991, **44**, 355–360.
- YU F., BARRY T.N., MOUGHAN P.J., WILSON G.F. Condensed tannin and gossypol concentrations in cottonseed and in processed cottonseed meal. *J. Sci. Food Agric.*, 1993, **63**, 7–15.
- YU F., MCNABB W.C., BARRY T.N., MOUGHAN P.J. Effect of heat treatment upon the chemical composition of cottonseed meal and upon the reactivity of cottonseed tannins. *J. Sci. Food Agric.*, 1996, **72**, 263–272.
- YU P., GOELEMA J.O., TAMMINGA S. Determination of optimal conditions of pressure toasting on legume seeds for dairy industry. I. Effects of pressure toasting on nutritive values of *Lupinus albus* in lactating dairy cows. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 1999, **12**, 1205–1214.
- ZHANG J.Z., SUN Y.H., NIU Z.X., ZHANG W.D., XUE L.H. Studies on the screening of microorganisms for detoxification of gossypol and the effect of detoxification. *J.*