

**ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE LYON**

Année 2007 - Thèse n°

**Utilisation du sorgho  
en alimentation animale**

**THESE**

Présentée à l'UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON I  
(Médecine - Pharmacie)  
et soutenue publiquement le 1<sup>er</sup> juin 2007  
pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

par

*Nicolas DEHAYNIN*  
Né le 18 avril 1977  
à *Seclin (59)*



**ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE LYON**

Année 2007 - Thèse n°

**Utilisation du sorgho  
en alimentation animale**

**THESE**

Présentée à l'UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON I  
(Médecine - Pharmacie)  
et soutenue publiquement le 1<sup>er</sup> juin 2007  
pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

par

*Nicolas DEHAYNIN*  
Né le 18 avril 1977  
à *Seclin (59)*



**DEPARTEMENTS ET CORPS ENSEIGNANT DE L'ENVL**  
**Directeur : Stéphane MARTINOT**

	PR EX	PR 1	PR 2	MC	Contractuel, Associé, IPAC et ISPV	AERC	Chargés de consultations et d'enseignement
<b>DEPARTEMENT SANTE PUBLIQUE VETERINAIRE</b>							
Microbiologie, Immunologie, Pathologie Générale	Y. RICHARD		A. KODIO	V. GUERIN-FAUBLEE D. GREZEL			
Pathologie infectieuse			A. LACHERETZ M. ARTOIS	J. VIALARD			
Parasitologie et Maladies Parasitaires	MC. CHAUVÉ	G. BOURDOISEAU		MP. CALLAIT CARDINAL L. ZENNER			
Qualité et Sécurité des Aliments			P. DEMONT C. VERNOZY	A. GONTHIER S. COLARDELLE			
Législation et Jurisprudence			A. LACHERETZ				
Bio-informatique - Bio-statistique				P. SABATIER ML. DELIGNETTE K. CHALVET-MONFRAY			
<b>DEPARTEMENT ANIMAUX DE COMPAGNIE</b>							
Anatomie			T. ROGER	S. SAWAYA	C. BOULOCHER ME. DUCLOS		
Chirurgie et Anesthésiologie		JP. GENEVOIS	D. FAU E. VIGUIER D. REMY		S. JUNOT (MCC) K. PORTIER (MCC) C. DECOSNE-JUNOT (MCC)	C. CAROZZO	
Anatomie-pathologique/Dermatologie-Cancérologie			C. FLEURY	T. MARCHAL	P. BELLI D. PIN		
Hématologie		C. FOURNEL			D. WATRELOT-VIRIEUX (MCC)		
Médecine interne		JL. CADORE		L. CHABANNE F. PONCE M. HUGONNARD C. ESCRIOU			I. BUBLOT
Imagerie Médicale					J. SONNET (MCC)		
<b>DEPARTEMENT PRODUCTIONS ANIMALES</b>							
Zootéchnie, Ethologie et Economie Rurale		M. FRANCK		L. MOUNIER			
Nutrition et Alimentation				D. GRANCHER L. ALVES DE OLIVEIRA G. EGRON			
Biologie et Pathologie de Reproduction		F. BADINAND	M. RACHAIL-BRETTIN	S. BUFF P. GUERIN	AC. LEFRANC		G. LESOBRE P. DEBARNOT D. LAURENT
Pathologie Animaux de Production		P. BEZILLE	T. ALOGNINOVA	R. FRIKHA MA. ARCANGIOLI D. LE GRAND			
<b>DEPARTEMENT SCIENCES BIOLOGIQUES</b>							
Physiologie/Thérapeutique				Jl. THIEBAULT JM. BONNET-GARIN			
Biophysique/Biochimie		E. BENOIT F. GARNIER		T. BURONFOSSE			
Génétique et Biologie moléculaire			F. GRAIN	V. LAMBERT			
Pharmacie/Toxicologie Législation du Médicament		G. KECK	P. JAUSSAUD P. BERNY				
Langues						C. FARMER T. AVISON	
<b>DEPARTEMENT HIPPIQUE</b>							
Pathologie équine		JL. CADORE		A. BENAMOU-SMITH			
Clinique équine		O. LEPAGE		A. LEBLOND		M. GLANGL	



**A Monsieur le Professeur BAVEREL,**

Professeur à la Faculté de Médecine et de Pharmacie de Lyon,  
qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.  
Hommages respectueux.

**A Madame le Professeur MORAND-EGRON,**

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon,  
qui a encadré ce travail et m'a accordé sa confiance.  
Sincère reconnaissance.

**A Monsieur le Professeur BERNY,**

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon,  
qui a consenti avec sympathie à participer à ce jury de thèse.  
Sincères remerciements.



Merci à ceux qui m'ont appris à ne jamais abandonner.

Merci aux médecins et au personnel soignant du COL de Lille.

En hommage à mes parents et à l'amour qu'ils ont pour mes sœurs et moi.

En mémoire de mon grand-père paternel  
et des journées à 5 francs de l'heure, dans le terrain de couches.

Merci aux quelques personnes de l'INRA, du CIRAD et d'Arvalis, ainsi que de ProSorgho et des entreprises productrices de semences de sorgho, que j'ai pu contacter par téléphone ou par courrier électronique. Elles m'ont toutes répondu avec beaucoup de patience et de sympathie et m'ont apporté des compléments d'informations très intéressants pour la rédaction de ce travail. Leurs noms sont cités à la fin de la liste des références bibliographiques.

# Table des matières

Table des matières .....	9
Table des illustrations .....	11
Liste des tableaux .....	11
Liste des figures .....	12
Liste des abréviations .....	13
Introduction .....	15
I. Etude général du sorgho .....	17
A. Classification botanique .....	17
B. Morphologie .....	17
C. Répertoire des sorghos.....	20
D. Origines et diffusion.....	22
E. Production.....	24
F. Utilisation.....	26
G. Economie.....	29
H. Culture .....	30
II. La situation du sorgho en France .....	35
A. Les variétés disponibles.....	35
B. Production.....	36
C. Utilisation .....	39
D. Economie.....	40
E. Culture .....	41
III. Les valeurs alimentaires du sorgho.....	45
A. Bases de connaissances .....	45
B. Ingestibilité, digestibilité et fibres .....	46
C. Apport énergétique .....	48
D. Apport protéique.....	49
E. Minéraux .....	51
F. Vitamines .....	52
G. Facteurs antinutritionnels .....	54
1. Les tanins.....	54
2. Acide phytique .....	56
H. Facteurs bénéfiques .....	58
IV. Toxicité du sorgho.....	61
A. Toxicité cyanhydrique.....	61
1. Etude de l'agent toxique .....	61
a) Origine.....	62
b) Concentration dans la plante.....	62
c) Facteurs de risque.....	64

d) Facteurs d'amélioration .....	65
2. Etude clinique de l'intoxication cyanhydrique .....	66
a) Appréciation du danger .....	66
b) Toxicocinétique.....	66
c) Mécanisme d'action toxique.....	67
d) Dose toxique .....	68
e) Symptômes et lésions .....	70
f) Diagnostic différentiel .....	71
g) Examens complémentaires.....	71
h) Traitement .....	72
i) Prophylaxie .....	74
j) Formes subaiguës et chroniques .....	74
B. Toxicité liée aux nitrates.....	76
1. Etude de l'agent toxique .....	76
a) Origine.....	76
b) Concentration dans la plante .....	76
c) Facteurs de risque.....	77
d) Facteurs d'amélioration .....	77
2. Etude clinique de l'intoxication par les nitrates.....	77
a) Appréciation du danger .....	77
b) Toxicocinétique.....	78
c) Mécanisme d'action toxique.....	78
d) Dose toxique .....	79
e) Symptômes et lésions .....	80
f) Diagnostic différentiel .....	81
g) Examens complémentaires.....	81
h) Traitement .....	82
i) Prophylaxie .....	82
j) Formes subaiguës et chroniques .....	82
V. Adaptation aux régimes des différentes espèces domestiques -----	85
A. Ruminants.....	85
B. Porcins .....	88
C. Volailles.....	89
D. Equins .....	91
E. Carnivores.....	92
Conclusion -----	95
BIBLIOGRAPHIE -----	97
Communications personnelles : -----	108

# Table des illustrations

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Masse de 1000 grains de 5 céréales, d'après [3] et [85]-----	19
Tableau 2 - Production de sorgho-grain des 10 principaux producteurs mondiaux en 2005, d'après [89] -----	24
Tableau 3 - Répartition de la consommation mondiale de sorgho-grain entre alimentations humaine et animale en 2003, d'après [89]-----	27
Tableau 4 - Les 7 pays principaux consommateurs de sorgho-grain à destination de l'alimentation humaine en 2003, d'après [89]-----	27
Tableau 5 - Les 7 pays principaux consommateurs de sorgho-grain à destination de l'alimentation animale en 2003, d'après [89]-----	27
Tableau 6 - Masses des échanges de sorgho-grain dans le commerce international en 2003, d'après [89] -----	30
Tableau 7 - Principaux pays exportateurs de sorgho-grain en 2003, d'après [89]-----	30
Tableau 8 - Principaux pays importateurs de sorgho-grain en 2003, d'après [89] -----	30
Tableau 9 - 27 des 40 variétés de sorgho-grain actuellement autorisées en France d'après [43]-----	35
Tableau 10 - Production et rendement des principales cultures céréalières françaises en 2005, d'après [96] -----	36
Tableau 11 - Production et rendement des cultures fourragères annuelles françaises en 2005, d'après [96] -----	37
Tableau 12 - Les six départements principaux producteurs de sorgho (grain et fourrage confondus) en France en 2005, d'après [96] -----	38
Tableau 13 - Besoins thermiques du sorgho et du maïs en fonction de leur précocité, d'après [15] et [67] -----	41
Tableau 14 - Comparaison des rendements et des besoins d'irrigation du sorgho et du maïs, d'après [7] -----	42
Tableau 15 - Digestibilité de la cellulose et valeur d'encombrement par kg MS du sorgho fourrager au cours de son développement, d'après [56] -----	47
Tableau 16 - Valeurs énergétiques du sorgho et du maïs (exprimées par kg MS), d'après [56] et [100]-----	49
Tableau 17 - Valeurs protéiques du sorgho et du maïs consommés par les ruminants (en g/kg MS), d'après [56] et [100]-----	50
Tableau 18 - Teneurs en Ca et P dans le sorgho (en g/kg MS), d'après [56] et [100] -----	52
Tableau 19 - Teneurs en tanins de plusieurs variétés françaises de sorgho, d'après [44], [28], [59] respectivement-----	56
Tableau 20 - Influence de l'apport en KNO <sub>3</sub> sur la toxicité de la plante de sorgho, d'après [90]-----	65
Tableau 21 - Doses létales du KCN par injection parentérale et par voie orale, d'après [97]-----	68
Tableau 22 - Estimation simplifiée de la quantité létale de 2 fourrages-----	69
Tableau 23 - Echelle de toxicité du sorgho fourrager, d'après Hugues, cité par [97]-----	69
Tableau 24 - Toxicité des sels de nitrates et de nitrites par voie orale, d'après [20] et [68]-----	79

## Liste des figures

Figure 1 - Détail d'un champ de sorgho grain [N. Dehaynin] -----	18
Figure 2 - Plante à plusieurs thalles [N. Dehaynin]-----	18
Figure 3 - Panicule de sorgho [N. Dehaynin]-----	18
Figure 4 - Grains en cours de maturation [N. Dehaynin] -----	18
Figure 5 - Les épillets des 5 races fondamentales du <i>S. bicolor</i> , d'après [47] -----	21
Figure 6 - Panicules types du <i>S. bicolor</i> , d'après [47] -----	21
Figure 7 - Evolution de la production mondiale de sorgho-grain de 1985 à 2003, d'après [89]-----	25
Figure 8 - Evolution des rendements de sorgho-grain dans les pays développés et en développement de 1985 à 2005, d'après [89] -----	26
Figure 9 - Evolution de 1985 à 2003 de la production et des consommations humaine et animale de sorgho-grain au niveau mondial, d'après [89]-----	28
Figure 10 - Evolution de 1989 à 2005 des productions céréalières et fourragères de sorgho en France, d'après [96]-----	37
Figure 11 - Evolution de 1989 à 2005 du rendement des cultures céréalières et fourragères de sorgho en France, d'après [96] -----	38
Figure 12 - Carte des départements français ayant produit plus de 30 000 q de sorgho (grain et fourrage confondus) en 2005, d'après [96] -----	39
Figure 13 - Molécule de tanin hydrolysable, d'après [73]-----	54
Figure 14 - Molécule de tanin condensé, d'après [73]-----	54
Figure 15 - Complexe de phytate et $Zn^{2+}$ , d'après [73]-----	57
Figure 16 - Structure de base des hétérosides cyanogénétiques, d'après [73] -----	61
Figure 17 - Molécule de durrhine, d'après [73]-----	61
Figure 18 - Equation de prévision de l'énergie métabolisable du sorgho pour le coq, en fonction de la concentration en tanins, d'après [28]-----	90

Les photographies des figures 1 à 4 ont été prises par moi-même, dans le Rhône et dans l'Isère.

# Liste des abréviations

AFNOR = Association française de normalisation

CIRAD = Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

FAO = Food and agriculture organization of the United Nations

GEVES = Groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences

GNIS = Groupement national interprofessionnel des semences et plants

INRA = Institut national de la recherche agronomique

ADL = acid detergent lignin (g/kg)

CUD = coefficient d'utilisation digestive

EM = teneur en énergie métabolisable (kilocalories/kg MS)

ha = hectare

Hb = hémoglobine

IV = intra-veineux

metHb = méthémoglobine

MS = matière sèche (g/kg)

Mt = million de tonnes

MV = matière verte

NDF = neutral detergent fibre (g/kg)

PDI = protéines digestibles dans l'intestin

PDIE = PDI dont la part d'origine microbienne correspond à l'énergie de l'aliment fermentée dans le rumen (g/kg)

PDIN = PDI dont la part d'origine microbienne correspond à l'azote de l'aliment dégradé dans le rumen (g/kg)

PO = *per-os*

ppm = partie par million (1 mg/kg = 1 mg/L (eau) = 1 ppm)

PV = poids vif

q = quintal

UE = unité d'encombrement

UF = unité fourragère

vit = vitamine



## **Introduction**

Le sorgho [*Sorghum bicolor*] est une plante d'origine tropicale de la famille des Graminées. Le rôle de ses grains est important dans l'alimentation des habitants de ces régions, voire primordial en conditions semi-arides. Le sorgho est également cultivé dans beaucoup d'autres régions du Monde, pour être distribué sous forme de grains ou de fourrage dans l'alimentation des animaux domestiques. C'est le cas en France, où les prédispositions naturelles de la plante, à supporter les conditions de culture difficiles, peuvent être mises à profit pour réduire la consommation d'eau liée à l'irrigation, ainsi que les charges qui y sont associées.

L'objectif de cette synthèse bibliographique est de souligner les avantages et les inconvénients de l'incorporation du sorgho dans une ration alimentaire animale. En effet, cette démarche ne peut pas être improvisée, tant sur les plans agronomique, que zootechnique. Et sur ce deuxième aspect, car non seulement, et comme tout autre aliment, il faut l'intégrer dans un mélange tendant vers un équilibre optimal dans l'apport d'énergie, d'azote et des autres valeurs alimentaires fondamentales. Mais en plus, il faut prendre en compte les facteurs anti-nutritionnels et même toxiques que cette plante synthétise au cours de son développement.

Cette étude commence par la présentation du sorgho et de son importance mondiale, tant par sa production que par son utilisation. Cela avant de se concentrer sur les variétés françaises et les particularités de leurs usages céréaliers et fourragers, dans notre pays. Le côté zootechnique est ensuite abordé avec l'analyse détaillée des valeurs alimentaires des différents produits du sorgho. Puis se pose la question de leur toxicité et des précautions permettant de la diminuer. Avant d'envisager, finalement, leur intérêt dans le rationnement de plusieurs espèces d'animaux domestiques, aux besoins alimentaires totalement différents.



# **I. Etude général du sorgho**

Comme toutes les plantes cultivées, il est possible de caractériser le sorgho par son appartenance et ses propriétés botaniques, par des données économiques et agronomiques.

## **A. Classification botanique**

[16], [39], [60]

Il n'existe pas un, mais des sorghos. Ils ne forment pourtant qu'un petit groupe : *Sorghum sp.*, au sein de la vaste famille à laquelle ils appartiennent : les Graminées. Parmi ces Graminées, certaines, dont le sorgho, sont d'intérêts tout particulier, car leurs fruits fournissent 50% de l'apport énergétique dans l'alimentation humaine : il s'agit des céréales.

Les grains des céréales sont des fruits au sens botanique du terme, puisqu'ils sont constitués d'une graine enveloppée par un péricarpe sec, adhérent et indéhiscents. Cette graine est constituée d'un embryon : une gemmule et une radicule, associées à un unique cotylédon très modifié en position latérale. Le tout est accompagné d'un organe de réserve, l'albumen, qui constitue l'essentiel du volume de la graine et qui motive la culture des céréales. Sa consistance est en partie vitreuse et en partie farineuse. La proportion de ces deux parties influe sur l'utilisation alimentaire que l'on peut en faire.

Phylogénétiquement, ce sont la canne à sucre et le maïs qui sont les plus proches parents du sorgho. D'où l'intérêt de multiples comparaisons, au cours de cette étude, avec le maïs, dont la culture est une des plus développées en France.

## **B. Morphologie**

[16], [25], [85]

L'ensemble des espèces du genre sorghum sont des plantes herbacées, comme la majorité des graminées. Elles se composent de tiges robustes et dressées, garnies de feuilles plates et se terminent par une grande inflorescence rameuse (Figure 1). Les plus grandes variétés s'élèvent jusqu'à 5 m de haut, avec une tige de 4 cm de diamètre, alors que les plus petites atteignent 50 cm à maturité. Elles possèdent un système racinaire puissant, capable de descendre rapidement à une grande profondeur du sol (jusqu'à 2 m) pour y extraire l'eau et les éléments minéraux. Cette particularité leur procure des qualités de rusticité et de grande résistance à la sécheresse.

Hormis les variations de taille à maturité, il existe un extraordinaire polymorphisme dans le nombre de talles qui accompagnent la tige principale (Figure 2), la composition des tissus internes, le nombre et la taille des feuilles, leur couleur, les ramifications de l'inflorescence (Figure 3) et le nombre d'épillets qu'elle porte (entre 2000 et 4000). C'est pourquoi les descriptions varient selon les auteurs et restent relativement floues. Pour toutes ces variations, on connaît maintenant plutôt bien les facteurs d'influence, au premier rang desquels se trouve la génétique. Le climat joue bien sûr un rôle important.



**Figure 1 - Détail d'un champ de sorgho grain [N. Dehaynin]**



**Figure 2 - Plante à plusieurs thalles [N. Dehaynin]**



**Figure 3 - Panicule de sorgho [N. Dehaynin]**



**Figure 4 - Grains en cours de maturation [N. Dehaynin]**

Le nombre de talles par plante est élevé dans les variétés fourragères (jusqu'à une dizaine) et nul chez les hybrides sélectionnés, cultivés pour le grain. Dans ce cas, les conditions de culture vont également avoir une influence : la densité allant dans le sens d'une tige unique. Celle-ci grandit en émettant des nœuds (sous contrôle de la durée du cycle végétatif) et en s'allongeant entre ces nœuds (sous contrôle génique). Leurs tissus internes sont secs ou juteux, insipides ou sucrés.

Les feuilles sont longues et minces, de 1 à 13 centimètres de largeur pour 30 à 135 cm en longueur. Elles sont en nombre important, réparties sur toute la tige, parfois plus d'une trentaine. Leur couleur est associée avec certains caractères internes. Ainsi une nervure centrale blanche ou jaune signe une variété à tige sèche, tandis que chez les sorghos juteux la coloration est verte avec souvent une fine bande centrale blanche. Des feuilles à nervure brune sont plus rares, mais sont l'expression d'une mutation de la lignine, qui améliore la valeur fourragère des pailles. Sous l'action des attaques parasitaires ou de blessures, des tâches se manifestent sur les feuilles. Si ces tâches sont de couleur rouge, elles caractérisent un sorgho de type *anthocyané*. Si elles sont de couleur jaune, elles désignent un sorgho de type *tan* (voir chapitre I.F).

L'inflorescence est une panicule (Figure 3), de forme allongée ou pyramidale, totalement lâche ou très compacte. A partir d'un axe central, le rachis, partent des ramifications primaires, qui portent des ramifications secondaires. Il peut y avoir jusqu'à trois niveaux de ramification. A l'extrémité de chacune, un racème porte une paire d'épillets, l'un pédicellé et stérile, l'autre sessile et fertile. Ce sont ces derniers qui sont dénombrés à une valeur comprise entre 2000 et 4000. Ils comportent deux fleurs, dont une seule est complète et donnera un fruit après fécondation (Figure 4).

Les grains n'échappent pas à cette considérable diversité. Ils sont ovales ou arrondis, gros de 4 à 8 mm de diamètre. Leur couleur varie de blanc ou jaune pâle à brun-rouge profond, en passant par différentes tonalités de rouge et de brun. A maturité, ils peuvent être cachés, recouverts de glumes, ou au contraire complètement découverts. L'organisation interne est la même que pour les grains de toutes les graminées : embryon et albumen recouverts d'un péricarpe, mais les écarts de taille d'une variété à l'autre ont une influence sur leur valeur alimentaire.

En meunerie, on caractérise les céréales par le poids des 1000 grains et la densité. Les valeurs pour le sorgho sont inférieures à celles des céréales ordinaires, mais s'en rapprochent (Tableau 1).

**Tableau 1 - Masse de 1000 grains de 5 céréales, d'après [3] et [85]**

céréale	masse de 1000 grains
sorgho	25 à 30 g
blé, orge, seigle	50 g ou plus
maïs	500 g ou plus

L'intervalle restreint, donné par le Tableau 1, est valable pour la majorité des variétés, mais on en décrit également dont le poids des 1000 grains étend cette fourchette de 3 à 80 g. L'intérêt nutritionnel que représente cette observation est de nature mathématique : en effet, le rapport amande/enveloppes est d'autant plus faible que le grain est petit. Or ces enveloppes constituent un "indigestible glucidique" qui déprécie la ration des monogastriques et dont il faut tenir compte dans les calculs.

La taille n'est pas le seul facteur à intervenir sur le plan nutritionnel : la couleur jaune de l'endosperme (l'albumen) est souvent synonyme de meilleure valeur alimentaire, alors que

la présence d'un testa, enveloppe de la graine, de couleur brune, est plutôt un indice péjoratif. Il est facile de sélectionner les variétés à albumen jaune et sans testa, mais on perd alors des capacités de résistance aux moisissures, entre autres, ce qui n'est pas souhaitable dans certaines régions du monde.

Taille, forme et couleur des caryopses sont sous contrôle génique et permettent, par observation visuelle, l'appréciation de la valeur nutritive globale (plutôt meilleure pour les grains plus clairs donc) et la différenciations des races de sorgho, comme le développe le chapitre suivant.

## C. Répertoire des sorghos

[25], [47], [85]

Le genre *Sorghum* réunit de nombreuses espèces et sous-espèces, nous ne retiendrons ici que trois taxons d'intérêt principal : *Sorghum bicolor* (L.) Moench, anciennement appelé *S. vulgare*, et *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf sont des sous-espèces de *S. bicolor*, cultivées pour l'alimentation humaine et animale. *Sorghum halepense* est une espèce sauvage, mais bien connue car dangereuse pour les herbivores. [21], [53], [88]

Le grand nombre de sorghos cultivés et l'extrême variation de leurs formes rend leur classification très difficile. Pour un inventaire complet et détaillé du genre, il faut se reporter au travail de Snowden, qui date de 1936 [104]. Mais l'ensemble des taxons qu'il a recensé est impossible à utiliser dans la pratique : il dénombre exactement 31 espèces, 158 variétés et 523 cultivars différents. Impossible pour les agronomes de retenir autant de noms et surtout leurs critères de reconnaissance spécifiques. Ceux-ci n'étant pas toujours très significatifs, pour ne rien arranger.

Actuellement, on préfère utiliser la classification de Harlan et de Wet [47], établie en 1972. Partant du principe que les différentes populations de sorgho cultivés se prêtent mieux à un classement en parallèle, plutôt que hiérarchique selon Snowden, et en imaginant un système suffisamment simple pour reconnaître un plant de sorgho en regardant sa panicule, ils ont divisé la sous-espèce *Sorghum bicolor* (L.) Moench en cinq races ou groupes fondamentaux :

bicolor, guinea, caudatum, kafir et durra.

Secondairement, on distingue dix races intermédiaires, qui sont les combinaisons des cinq fondamentales :

- guinea-bicolor, caudatum-bicolor, kafir-bicolor, durra-bicolor ;
- guinea-caudatum, guinea-kafir, guinea-durra ;
- kafir-caudatum, durra-caudatum ;
- kafir-durra.

Enfin, ils précisent le nom de six races dites sauvages, pour compléter leur inventaire :

Arundinaceum, aethiopicum, virgatum, verticilliflorum, propinquum, shattercane.

En premier lieu, la méthode consiste en l'observation de l'épillet. C'est le caractère physique le moins influencé par les conditions environnementales et qu'on peut donc être sûr de reconnaître sans erreur. Harlan et de Wet décrivent sept types d'épillets de base : cinq

portant les noms des cinq races fondamentales (Figure 5), plus un type sauvage et un type shattercane. Ces derniers n'étant malheureusement pas représentés ici.

Dans un second temps, l'observation de la panicule doit permettre de préciser l'identification, notamment pour les hybrides. Il y a neuf types d'inflorescences : de 1 à 7 correspondant à des formations de plus en plus compactes et 8 et 9 différant par l'absence de rachis. Le type 1, extrêmement diffus, regroupe exclusivement des variétés sauvages. Les types 8 et 9 regroupent, entre autres, les variétés appelées sorgho à balai (Figure 6).

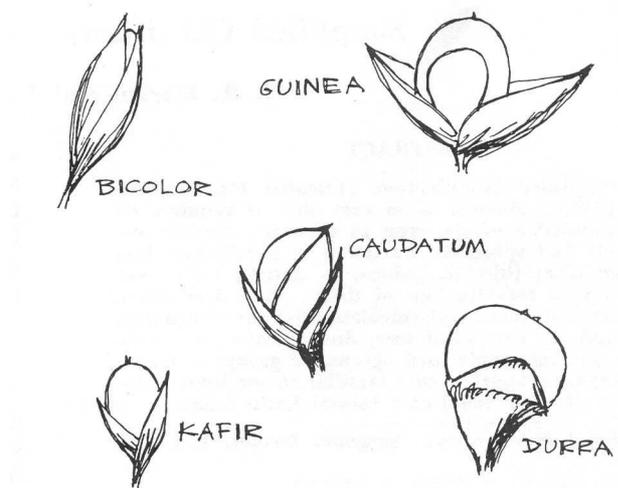


Figure 5 - Les épillets des 5 races fondamentales du *S. bicolor*, d'après [47]

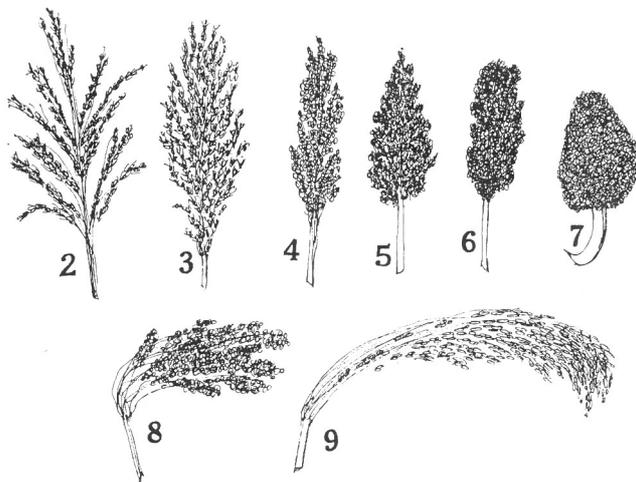


Figure 6 - Panicules types du *S. bicolor*, d'après [47]

Cette classification n'est sans doute pas parfaite, mais perdure jusqu'ici. [27], [30], [41]

- les bicolors sont les sorghos aux caractères les plus primitifs, les plus proches des variétés sauvages. Leur panicule est lâche et leurs grains, très petits, sont enveloppés par des glumes couvrantes et adhérentes. C'est une race complexe, hétérogène. On y trouve de nombreuses variétés qui se distinguent par leurs formes et leurs destinations. Ils n'ont pas de distribution

géographique ni d'adaptation écologique nettes, ils sont présents partout où on peut cultiver le sorgho dans le monde ;

- les *guineas* malgré leur grande taille et leur panicule lâche doivent être considérés comme hautement spécialisés et évolués. Leurs épillets n'ont plus rien à voir avec les formes sauvages: ils portent un grain elliptique, pris dans des glumes ouvertes. Ce sont les sorghos typiques d'Afrique de l'Ouest, mais ils sont aussi cultivés en Afrique australe. Ils comptent certaines variétés adaptées aux zones pluvieuses et d'autres aux zones sèches (exceptées les plus désertiques), qui en font un groupe très vaste et cosmopolite, mais avec un caractère photopériodique marqué pour chaque variété. Cette race est d'abord appréciée pour la qualité de ses grains. On y distingue plusieurs types, dont le type *margaritifera*, caractérisé par des grains petits et vitreux, le type *gambicum* à gros grains assez vitreux et le type *guineense* à gros grains peu vitreux ;

- les *caudatums* forment la race la plus importante de toutes, en terme de diversité. Et les races intermédiaires à "composante caudatum" sont aussi très importantes. Leur panicule a une forme variable, mais absolument pas aléatoire : compacte dans les zones sèches et ouverte dans les régions à fortes précipitations. Leurs grains sont dissymétriques, aplatis sur la face ventrale et bombés sur la face dorsale (turtle-backed grains en anglais). Ils sont surtout cultivés en Afrique du Centre et de l'Est et produisent beaucoup de grains, mais souvent farineux et de médiocre qualité. Par contre, les races intermédiaires x-caudatum ont hérité d'excellentes capacités de production et de qualité de grain. La plupart des hybrides modernes cultivés dans les pays occidentaux appartiennent à cette race ;

- les *kafirs* sont des sorghos peu diversifiés, de taille plutôt courte, peu ou non photopériodiques. Leur panicule est compacte et cylindrique, leurs grains sont symétriques avec des glumes de taille variable. On en trouve surtout en Afrique australe, très peu dans l'hémisphère nord. Ils sont intéressants pour leur précocité ;

- les *durras* sont les plus spécialisés et les plus évolués de tous les sorghos sur de nombreux points. Ils ont une panicule compacte souvent portée par un pédoncule croisé et des grains globuleux aux glumes petites et adhérentes. Ils se distinguent par la grosseur de leur grain et leur résistance à la sécheresse : ce sont les variétés qu'on peut faire pousser dans les régions les plus sèches. Les durras se rencontrent essentiellement en Afrique de l'Est, au Proche et Moyen-Orient et en Inde. Ils constituent d'ailleurs la quasi totalité des récoltes de sorgho dans ces régions. Ce sont généralement des plantes tardives, mais, étonnement, incluent aussi la forme la plus précoce de toutes. Les berceaux écologiques des races guinea et durra sont tellement différents que rien ne devrait les réunir, la race intermédiaire guinea-durra est extrêmement rare.

## D. Origines et diffusion

[3], [25], [85]

Si l'origine tropicale du sorgho est définitivement acquise, une localisation plus précise et le sens de son extension géographique restent sujets à controverse. Les conclusions des études résumées ici doivent être considérées comme les hypothèses les plus probables, au vu des connaissances actuelles.

De manière certaine, le sorgho et le mil, auquel on l'associe souvent, ont servi primitivement de nourriture aux humains. D'abord grâce aux races sauvages, puis par culture parallèlement à l'apparition des peuples sédentaires. Les choix de ces hommes se portant certainement sur des "céréales à bouillies" dont le mil et le sorgho représentent le type.

Les plus vieux restes authentifiés sont antérieurs à 6000 avant J.C. et laissent penser que la domestication du sorgho date environ de cette période. Cette découverte est intervenue à la frontière du Soudan et de l'Égypte, proche de la région du sud-est du Sahara, où on observe la plus grande variation dans le genre *Sorghum*. C'est sans doute là le berceau de cette domestication, à partir de la race sauvage *verticilliflorum*.

Par la suite, on envisage trois centres géographiques, à partir desquels la culture du Sorgho s'est diversifiée sur le continent africain : à l'ouest, donnant la race *guinea* ; à l'est, donnant les races *caudatum* et *durra* ; et au sud, origine de la race *kafir*. Les sorghos actuels d'Afrique centrale et australe sont très proches de ceux de la République-Unie de Tanzanie et plus éloignés de ceux de l'Afrique de l'Ouest, les forêts équatoriales ayant constitué un obstacle efficace à cette expansion.

Le sorgho a pu gagner le continent asiatique, dès le troisième millénaire avant notre ère. Sa présence est attestée dans la péninsule arabique vers -2500 et en Inde vers -1800. Au début, il était vraisemblablement transporté dans les bateaux comme aliment de bord. Les sorghos de l'Inde sont proches de ceux de l'Afrique du Nord-Est et de la côte située entre la pointe de la Somalie et le Mozambique. Il est possible que le sorgho soit arrivé en Chine par les routes de la soie, où il s'est à nouveau diversifié, comme en témoigne l'originalité des variétés *Kaoliang*, appartenant à la race *Bicolor*.

La plante est adoptée en Europe, à l'époque de l'empire romain, rapportée d'Orient et d'Afrique, parmi toutes les marchandises empruntant ces routes commerciales majeures. Puis elle émigre vers le "nouveau monde", avec les colons et les esclaves, à partir du XVI<sup>e</sup> siècle, mais n'y diffuse véritablement qu'au XIX<sup>e</sup>, notamment aux États-Unis d'Amérique. L'histoire fut probablement similaire en Australie.

En France, on cultive le sorgho, dès le début du Moyen-Âge. C'est une culture qui n'a que peu d'importance et qu'on associe avec celle du mil, celui-ci étant implanté là depuis le néolithique. D'ailleurs ces deux céréales sont communément regroupés sous le terme de millets. Ils servent tous deux à nourrir les hommes, mais surtout leurs animaux domestiques quand les autres céréales plus nobles ne leur faisaient pas défaut. Christophe Colomb ramène le maïs en Europe en 1492. Cette céréale va très vite se développer dans tout le bassin méditerranéen et éclipser presque totalement sorgho et mil, auxquels il est comparé en raison de ses caractères botaniques et agronomiques. Il prend souvent les noms de gros mil, gros millet, millet des Indes. Les paysans continuent, malgré tout, de faire pousser un peu de sorgho à balai, dont l'usage alimentaire est devenu secondaire. [10], [48], [86]

Cette situation change brusquement après la seconde guerre mondiale. Les premiers essais de l'INRA commencent en 1948, à Montpellier et à Clermont-Ferrand, afin de sélectionner des variétés adaptées aux sols et aux climats français, avec des rendements concurrençant les autres céréales. Ces recherches aboutissent rapidement à la création d'hybrides très précoces et dont la productivité en hausse permet de commencer les tests sur de grandes surfaces en 1960. Dans le même temps, l'industrie d'aliments du bétail est en pleine expansion et offre des débouchés plus importants au sorgho par la fabrication d'aliments composés. La production augmente significativement pendant les 15 années qui suivent pour se stabiliser aux valeurs que l'on connaît encore actuellement. [14]

## E. Production

[25], [85], [89]

Les données qui vont suivre, portant sur la production et la consommation mondiales du sorgho sont issues des statistiques officielles de la FAO [89] et ne peuvent être considérées que comme les meilleures estimations disponibles. Si dans les pays les plus développés, les statistiques agricoles prêtent parfois à critique, en Afrique et en Asie, le produit n'entre pas dans des circuits commerciaux, étant utilisé en auto-consommation. Aujourd'hui encore, les chiffres exposés pour les pays en développement ne sont que des estimations très approchées. De plus, ces données ne portent que sur les grains de sorgho. Les parties vertes de la plantes, utilisées comme fourrage, ne sont pas prises en compte à ce niveau.

Comme cela a déjà été évoqué précédemment, le sorgho est une céréale des pays chauds de la zone inter-tropicale, avec une précocité et une adaptation à la photopériode qui le restreint, pour bon nombre de ses variétés, à pousser exclusivement dans des régions précises de ces pays. Sa zone de production représente une bande qui cerne pratiquement le globe, en passant par la Chine et l'Inde, l'Afrique toute entière, le sud des Etats Unis et l'Amérique latine. En Europe, il pousse jusqu'au 46° parallèle Nord. En Océanie, l'Australie est le seul producteur important : la culture se concentre dans le Queensland et le nord du New South Wales.

En 2005, la production mondiale totale de sorgho-grain a été estimée à près de 57 millions de tonnes (Mt), le plaçant ainsi au cinquième rang des productions céréalières (entre les 10 et 12<sup>e</sup> rangs toutes espèces végétales confondues), mais bien loin des trois premières : maïs, blé et riz ont tous trois une valeur comprise entre 600 et 700 Mt. La surface utilisée pour y parvenir est de 42,7 millions d'hectares, le rendement moyen de la culture mondiale du sorgho s'élève donc à 13,3 quintaux par hectare (q/ha).

C'est une culture africaine par excellence, puisque c'est là qu'on y consacre la plus grande superficie, mais les plus gros producteurs "individuels" sont les Etats-Unis d'Amérique : près de 10 Mt, 17% de la production mondiale, grâce à des rendements, évidemment, bien plus élevés. Les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> rang sont occupés par le Nigeria et l'Inde (8 Mt chacun). Au final, 10 pays totalisent ensemble 80% de la production mondiale (Tableau 2). La France occupe le 24<sup>e</sup> rang, mais avec un excellent rendement de 52,5 q/ha.

**Tableau 2 - Production de sorgho-grain des 10 principaux producteurs mondiaux en 2005, d'après [89]**

Rang	Pays	Production (t)	% de la production mondiale	% cumulés
1	États-Unis d'Amérique	9 847 680	17,3%	17,3%
2	Nigeria	8 028 000	14,1%	31,5%
3	Inde	8 000 000	14,1%	45,6%
4	Mexique	6 300 000	11,1%	56,6%
5	Argentine	2 900 000	5,1%	61,7%
6	Soudan	2 600 000	4,6%	66,3%
7	Chine	2 592 800	4,6%	70,9%
8	Éthiopie	1 800 000	3,2%	74,1%
9	Australie	1 748 000	3,1%	77,1%
10	Brésil	1 529 600	2,7%	79,8%

La production mondiale est globalement décroissante depuis 20 ans. La baisse dans les pays développés n'est pas compensée par la trop faible progression dans les pays en développement (Figure 7). Cette évolution rejoint celle de la consommation et sera commentée dans le chapitre correspondant (I.F).

Le contraste entre ces deux "parties" du Monde appelle d'autres observations. Dans les régions riches, on pratique l'irrigation et l'application d'engrais, le rendement de la plante est pratiquement quatre fois plus élevé. Leur production est pourtant presque quatre fois moindre. Cette constatation est reprise dans le chapitre *économie* (I.G).

L'étude de l'évolution de ces rendements sur les vingt dernières années met en évidence un phénomène assez particulier (Figure 8). Alors qu'il n'y a, pour ainsi dire, pas de variation dans les résultats des pays en développement, la courbe des pays développés, elle, montre d'importantes fluctuations. Poussée au maximum par l'utilisation de l'irrigation et des intrants minéraux, la plante devient extrêmement sensible aux facteurs climatiques, parasites, etc. Ses résultats sont donc très bons, mais imprévisibles. Au contraire, au sein d'un système agricole traditionnel, dans des conditions difficiles, elle montre toute sa robustesse, avec des résultats certes moyens, mais extrêmement constants.

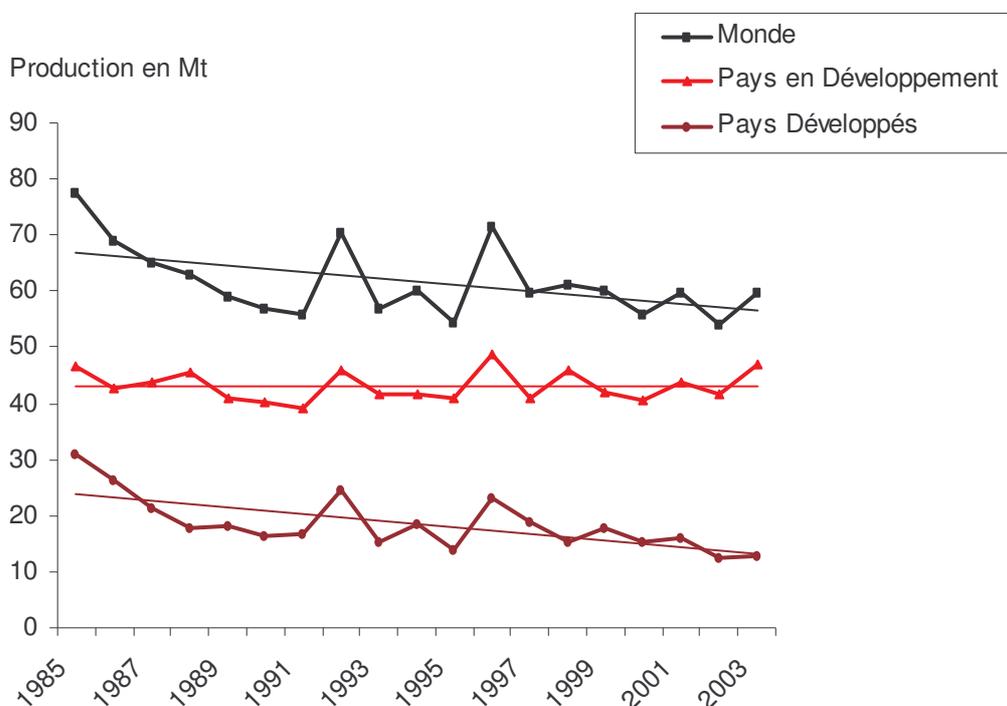


Figure 7 - Evolution de la production mondiale de sorgho-grain de 1985 à 2003, d'après [89]

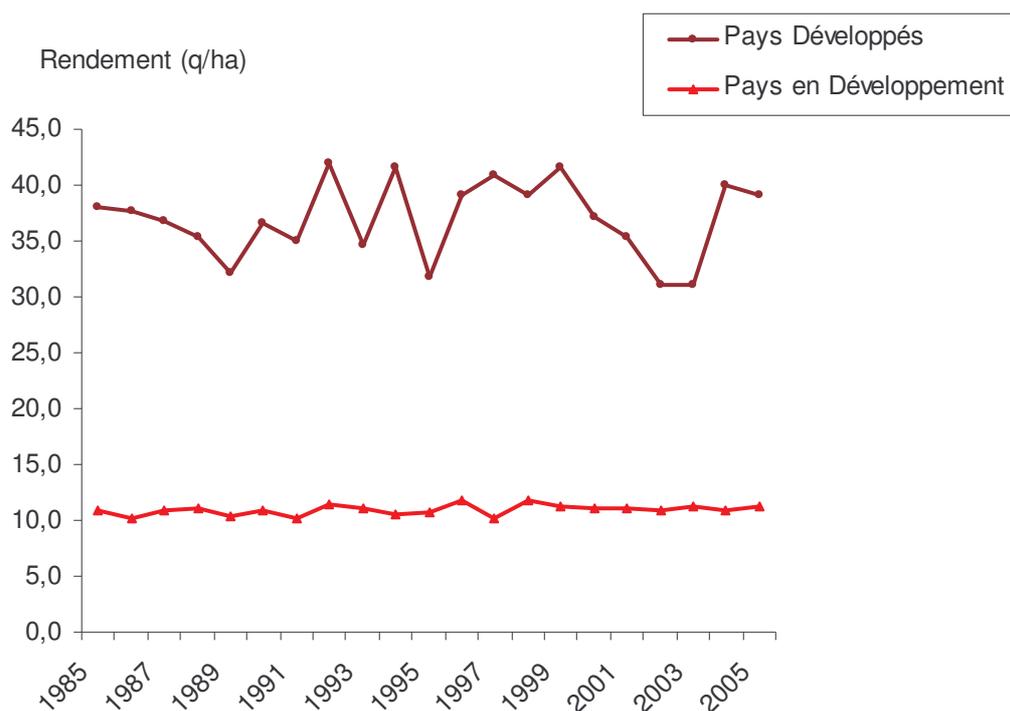


Figure 8 - Evolution des rendements de sorgho-grain dans les pays développés et en développement de 1985 à 2005, d'après [89]

## F. Utilisation

[85], [89]

Avant toute considération d'ordre zootechnique et vétérinaire, il ne faut pas oublier qu'aujourd'hui dans le monde, comme depuis des siècles, le grain de sorgho est une source d'alimentation primordiale pour des centaines de millions d'humains (Tableau 3). Avec le mil, ils constituent d'importantes denrées alimentaires de base dans les régions tropicales semi-arides d'Asie et d'Afrique. Ils restent les principales sources d'énergie, de protéines, de vitamines et de minéraux pour les habitants les plus pauvres de ces régions.

La deuxième utilisation du sorgho est en fait la première en terme de volume : l'alimentation animale à partir des grains dépasse celle des humains de 2 Mt, en 2003 (Tableau 3). L'alimentation animale à partir du fourrage est tout simplement incalculable, au niveau mondial. La différence entre consommation humaine et consommation animale (des grains donc) était plus marquée par le passé (Figure 9). L'ensemble de la consommation mondiale se répartit donc comme suit : 45% à l'alimentation animale et 41% à l'alimentation humaine. Les 14% restant étant des pertes ou utilisés comme semences, voire sous d'autres formes encore, qui seront détaillées plus loin (I.F).

Ces chiffres nécessitent des précisions. Comme précédemment, la consommation de sorgho des pays en développement n'a rien à voir avec celle des pays développés : elle est quatre fois plus élevée, c'est à dire à peu près la même différence que pour la production (voir explication dans le chapitre I.G). Le ratio alimentation humaine / alimentation animale renforce cette impression de déséquilibre : les pays plus riches ne le cultivent ou ne l'importent qu'à destination de l'alimentation animale ou presque, tandis que dans les pays plus pauvres cette consommation ne représente que 2/3 de la part qui rentre dans le circuit des ressources humaines (Tableau 3).

Seule la Chine, parmi les gros producteurs, consomme les grains de sorgho sans distinction entre la population et l'élevage (Tableau 4 et Tableau 5).

**Tableau 3 - Répartition de la consommation mondiale de sorgho-grain entre alimentations humaine et animale en 2003, d'après [89]**

	Production (t)	Alimentation Animale (t)	Alimentation Humaine (t)
Monde	59 621 399	26 593 549	24 515 470
Pays Développés	12 723 593	9 735 054	399 300
Pays en Développement	46 897 806	16 858 495	24 116 170

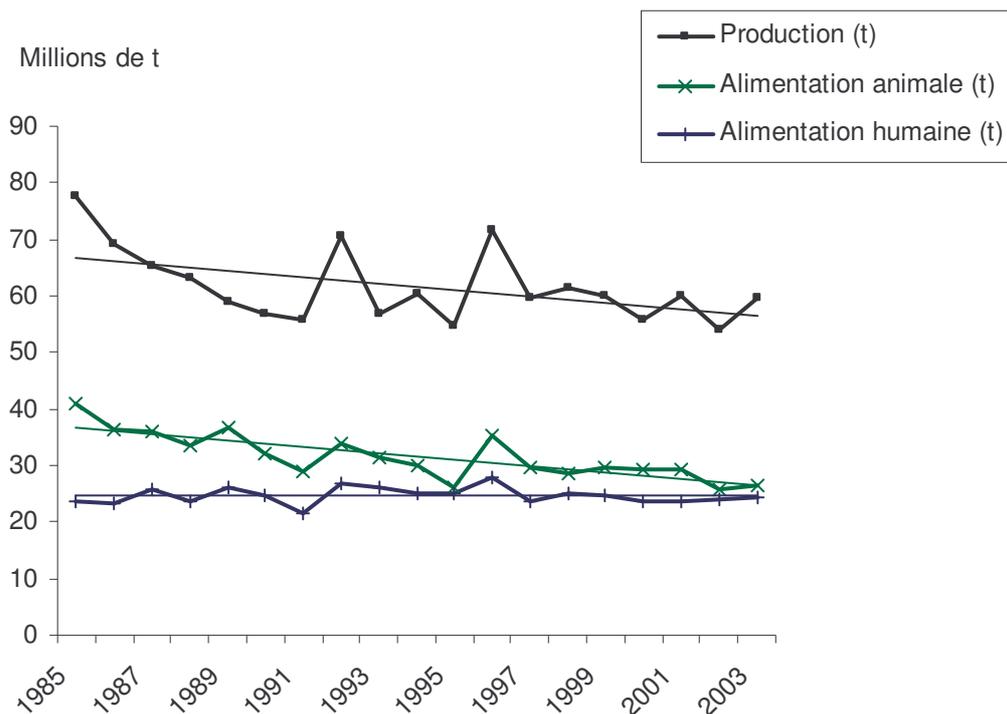
**Tableau 4 - Les 7 pays principaux consommateurs de sorgho-grain à destination de l'alimentation humaine en 2003, d'après [89]**

	Production (t)	Alimentation Humaine (t)
Inde	7 330 000	6 452 447
Nigeria	8 028 000	5 588 891
Soudan	5 188 000	2 621 075
Éthiopie	1 650 000	1 600 566
Chine	2 879 542	1 299 212
Burkina Faso	1 610 255	1 129 949
Mali	650 000	563 019

**Tableau 5 - Les 7 pays principaux consommateurs de sorgho-grain à destination de l'alimentation animale en 2003, d'après [89]**

	Production (t)	Alimentation Animale (t)
Mexique	6 462 200	9 615 920
États-Unis d'Amérique	10 445 900	5 100 000
Argentine	2 684 780	1 977 202
Japon	0	1 490 102
Australie	1 465 000	1 368 876
Chine	2 879 542	1 350 042
Brésil	1 754 970	704 122

La courbe de l'évolution de ces données sur vingt ans laisse apparaître une légère baisse de consommation en élevage animal (Figure 9), cela rejoint la baisse de production déjà évoquée plus haut. C'est en fait l'utilisation en alimentation animale dans les pays développés, qui a diminué. Toutes les autres courbes ont une allure constante (données non présentées). On peut quand même en déduire une baisse de l'intérêt des humains pour ce produit, car la population mondiale a bien augmenté ces vingt dernières années, mais ne consomme pas plus. Dans cette optique, l'absence de progression de l'utilisation du sorgho en alimentation humaine traduit une baisse de la consommation de cette céréale.



**Figure 9 - Evolution de 1985 à 2003 de la production et des consommations humaine et animale de sorgho-grain au niveau mondial, d'après [89]**

Nuance dans la nuance : la croissance démographique s'observe avant tout dans les villes, milieu dans lequel on n'accepte plus de consacrer le temps et l'énergie nécessaires pour préparer les aliments à base de sorgho. Ajouté à l'instabilité de l'offre et la faible disponibilité des produits transformés, notamment la farine, comparée aux autres denrées alimentaires, les ménagères privilégient blé, maïs et riz, à peine plus chers (voire moins chers) malgré les coûts d'importation. Mais la consommation alimentaire du sorgho par habitant dans les zones productrices rurales est restée considérablement plus élevée que dans les villes. C'est pourquoi cette céréale conserve une importance capitale en alimentation humaine.

Ce sont généralement les gros grains à endosperme corné que l'on préfère pour la consommation humaine. Ils rentrent dans des préparations sous forme entière ou, plus souvent, après décorticage et mouture. En zone rurale, ces traitements sont réalisés au mortier et au pilon par les femmes, c'est une tâche assez pénible. La farine obtenue entre dans la composition de bouillies épaisses (le tô d'Afrique de l'Ouest), de pains non levés, de couscous, de beignets. Le sorgho peut aussi entrer dans la composition de boissons, principalement des bières artisanales en Afrique (les dolos) et une sorte de vin en Chine. L'industrie essaie, tant bien que mal, de fournir sous une forme pratique les produits de base (farines et semoules) destinés à la confection des plats traditionnels, en zone urbaine prioritairement. Pour d'autres produits, plus élaborés : pains, biscuits, bières, on incorpore le sorgho dans des mélanges avec d'autres céréales.

Concernant l'utilisation en alimentation animale, les chiffres exposés plus haut désignent la distribution des grains principalement aux volailles et aux porcins. Les parties vertes restantes de la plante servent de fourrages pour les herbivores, au même titre que les variétés fourragères cultivées spécialement à cet effet. Cet usage échappe aux statistiques, au niveau mondial, mais des chiffres sont disponibles dans le chapitre consacré à la France. Ces fourrages sont exploités en vert ou après conservation (foin ou ensilage). En cas

d'affouragement en vert, ou également de pâturage, il est impératif de prendre en compte un risque d'empoisonnement du bétail. Un composé toxique est présent dans les parties végétatives des plantes jeunes ou surtout suite à une reprise de croissance. Mais c'est un risque que l'on peut prévoir, à défaut de le maîtriser (voir chapitre IV).

Les résidus de la plante : tiges, feuilles et panicules égrenées, sont en importance variable selon la race du sorgho, la variété, la fertilité du sol... Outre leur usage alimentaire pour les animaux, ils peuvent également servir aux hommes de combustible ou de matériau de construction.

A cela s'ajoutent d'autres utilisations du sorgho, à caractère industriel ou artisanal, qui donnent lieu à la sélection de types particuliers :

- sorghos papetiers dont la tige riche en fibres est utilisée pour la fabrication de papier ou de panneaux de construction ;
  - sorghos à grains riches en amidon utilisés pour préparer des colles, des adhésifs ou du dextrose ;
  - sorghos sucriers qui peuvent produire des bio-carburants ou qui, selon la composition en oses du jus de la moelle, donnent des sirops ou du sucre cristallisable [87] ;
  - sorghos à balai dont la hampe fructifère (panicule) dépouillée de ses grains sert à faire des balais durs ;
  - sorghos tinctoriaux dont les tiges et feuilles riches en pigments anthocyanés donnent après broyage et macération une teinture rouge utilisée en tannerie ou en poterie (par opposition le caractère *tan* désigne l'absence d'anthocyanines, préférable en alimentation).
- [25], [26]

## G. Economie

[25], [85], [89]

Le marché économique du sorgho-grain est très peu développé et il n'y a pas de commerce du fourrage. Cela représente entre 6 et 7 Mt, en 2003, à l'échelle mondiale (Tableau 6). Il n'y a également que très peu de pays ayant développé un marché à un niveau national. C'est donc une production qui est le plus souvent auto-consommée sur l'exploitation, cultivée par des paysans assez pauvres (du moins en Afrique et en Asie), qui ne trouvent pas de débouché quand ils ont la chance de connaître une année excédentaire. La raison qui explique cet état économique est le manque de considération envers cette céréale dite secondaire, qu'on associe à la pauvreté.

L'observation détaillée des chiffres renforcent ces constatations : il y a un quasi monopole des Etats-Unis qui réalisent près de 80% du total des exportations mondiales, environ 5 Mt en 2003. Sachant qu'ils pratiquent un prix de soutien sur la production intérieure, cela assure également une relative stabilité internationale du cours du sorgho. Etonnamment, la France est le 4<sup>e</sup> exportateur mondial, avec 208 000 t (soit la presque totalité de ses récoltes, cette année là, mais il y a des variations selon les années et cela est précisé dans le chapitre II). Viennent ensuite la Chine et le Soudan, exportant respectivement 109 000 et 12 000 t, soit une infime partie des 8 Mt cumulées qui poussent sur leurs territoires. Les résultats des autres pays asiatiques et africains sont encore moins bons, cela illustre bien le phénomène de consommation locale évoqué plus haut (Tableau 7).

On compte deux pays gros importateurs : le Mexique et le Japon (Tableau 8). Le premier malgré sa production conséquente, mais qui profite de la proximité du leader du marché et le deuxième qui n'en produit pas du tout, mais qui l'utilise à grande échelle également (Tableau 5). Les pays de l'Union Européenne participent pour une part importante

à ce commerce mondial, avec 1 Mt en 2003, soit 16% du flux total (Tableau 6). Masse dans laquelle sont comptés les échanges intra-communautaires, notamment entre la France et l'Espagne (données non présentées). Il est amusant de constater que la France en importe un millier de tonnes, bizarrerie des équilibres économiques (Tableau 8).

**Tableau 6 - Masses des échanges de sorgho-grain dans le commerce international en 2003, d'après [89]**

	Production (t)	Importations (t)	Exportations (t)
Monde	59 621 399	6 555 173	6 339 281
Union Européenne	420 378	1 065 295	228 783

**Tableau 7 - Principaux pays exportateurs de sorgho-grain en 2003, d'après [89]**

	Production (t)	Exportations (t)
États-Unis d'Amérique	10 445 900	5 003 816
Argentine	2 684 780	646 518
Brésil	1 754 970	302 407
France	231 372	208 789
Chine	2 879 542	109 537
Soudan	5 188 000	12 369
Pays-Bas		12 298

**Tableau 8 - Principaux pays importateurs de sorgho-grain en 2003, d'après [89]**

	Production (t)	Importations (t)
Mexique	6 462 200	3 381 351
Japon	0	1 490 123
Espagne	29 100	679 357
Italie	158 206	251 164
Israël	30 150	126 324
Chine	2 879 542	71 285
Colombie	260 005	69 157
[...]		
France	231 372	1 056

## H. Culture

[14], [25], [26], [83]

Il ne s'agit pas ici de faire un cours d'agronomie, mais de comprendre les contraintes qui amèneraient à choisir ou refuser cette plante.

D'un point de vue pratique, on peut distinguer quatre phases dans le cycle de vie du sorgho (comme pour les autres céréales d'ailleurs) :

1 – Germination et émergence : les semences ont une faible vigueur germinative. Les conditions idéales pour les faire démarrer sont un sol chaud et humide, ameubli en profondeur et finement préparé en surface. Avec une terre à plus de 20°C et après une bonne pluie de 20

mm, le coléoptile émerge du sol en 3 à 4 jours. En climat tempéré, il faut compter 1 à 2 semaines ;

2 – Développement végétatif : stade de croissance intense et autotrophe de la plante. La température optimale pour elle est située vers 33-34°C. C'est la phase durant laquelle le sorgho est le plus résistant à la sécheresse, on pense que ses racines peuvent pomper de l'eau jusqu'à 1,80 m en profondeur. L'initiation florale se produit généralement lorsque la plante est haute de 50 à 60 cm. La panicule se développe et la floraison intervient quand elle est entièrement déployée. La poursuite du développement végétatif qui intervient après et qui peut être importante (par élongation des tiges notamment) est uniquement assurée par la croissance cellulaire ;

3 – Floraison : étape critique. En effet, cela n'aura lieu que si la période diurne, dans un cycle de 24 heures, est inférieure à une valeur critique. Celle-ci se situe entre 12 et 13 heures pour les variétés tropicales et au delà de 14 heures pour les hybrides des zones tempérées. De plus, c'est le moment de sensibilité maximale des sorghos à la sécheresse et aux températures basses. Mais si toutes ces conditions sont bien réunies, la fécondation des fleurs est très rapide, car la plante est autogame (à plus de 90%). D'ailleurs la viabilité du pollen est très courte, entre 2 et 4 heures ;

4 – Remplissage du grain et maturité : dure de 30 à 50 jours après la pollinisation. Les grains passent par un stade laiteux, puis pâteux avant d'atteindre la maturité (vitreux) et, le plus souvent, ils n'ont pas de dormance. En cas de sécheresse, il y a contribution de la matière carbonée constitutive des tiges pour assurer le remplissage des grains, cela provoque bien sûr un affaiblissement de la plante, qui devient plus sensible aux maladies. A l'inverse, il ne faut pas que cette maturité intervienne en pleine saison des pluies sous peine de voir moisir la récolte sur pied.

Malgré des aptitudes remarquables, il faut quand même préciser qu'aucun génotype de sorgho ne peut être classé comme universellement résistant à la sécheresse. On est capable de prévoir assez précisément les besoins en eau du sorgho et c'est un critère qu'il faudra également prendre en compte au moment du choix des semences. Bien sûr, ce sont des valeurs influencées par des facteurs environnementaux non contrôlables et en premier lieu la pluviométrie : en cas de fortes périodes de sécheresse, les variétés à forte masse végétative évaporent plus. Compte tenu de tous les aléas, pour une variété de cycle court, il faut une pluviométrie bien répartie située entre 500 et 600 mm ; 650 à 800 mm pour une variété de cycle moyen, 950 à 1100 mm pour une variété de cycle long, si l'on veut assurer le rendement optimal dans des conditions de bonne fertilité des sols.

Certaines régions en Afrique pratiquent l'irrigation, mais pas sur les variétés locales, car celles-ci ne font alors que produire plus de paille. Il est nécessaire d'importer des semences de lignées pures ou hybrides, mais d'origine étrangère. D'une manière générale, en agriculture traditionnelle africaine, quand les conditions sont trop sèches, c'est la culture du mil qui prédomine (à l'inverse, le maïs s'impose dès que l'humidité annuelle est suffisante).

L'exemple le plus remarquable, de par les conditions extrêmes de culture qui ont été affrontées, se situe sur le plateau du Sarir, en plein désert Libyen. Au début des années 1980, sur un sol sableux mais compact pouvant être considéré comme inerte et recevant 10 mm de pluie par an, grâce à un gros travail de fertilisation et d'irrigation, des agronomes du CIRAD ont réussi à récolter entre 40 et 70 q/ha ! A un prix de revient certes double de celui du marché international.

Toute la difficulté réside donc dans le choix d'une variété dont le photopériodisme et les besoins hydriques soient compatibles avec le terroir sur lequel on veut l'implanter.

Il existe encore un point très délicat à gérer, une fois la récolte engrangée : la succession. Le sorgho est traité comme une plante annuelle bien qu'il s'agisse d'une plante pérenne, et dans les tropiques on peut le récolter plusieurs fois par an. Cela est surtout vrai

pour les sorghos fourragers, mais il est possible, après une récolte de grains, de couper les tiges pour stimuler une culture de repousses. Le système racinaire peut supporter jusqu'à deux ou trois cycles cultureux. Il est assez rare de travailler ainsi... La pratique habituelle passe par une mise à nu du champ avant de reprendre l'année suivante. La difficulté rencontrée alors en zone tempérée ou tropicale n'est pas la même, mais pourtant pénalisante dans les deux situations. Dans le premier cas, la recherche de forts rendements avec cette plante à cycle de végétation très court s'avère épuisant pour le sol. Ce n'est pas recommandé en tête de rotation. Dans le second cas, l'utilisation d'un sol sableux à faible activité biologique ne favorise pas l'élimination de substances toxiques, libérées par la décomposition des résidus (racines, tiges, feuilles). Cela entraîne un effet dépressif du sorgho sur la culture qui lui succède, et notamment sur le sorgho lui-même. C'est un phénomène appelé allélopathie. La solution est de planter du mil, ou mieux de pratiquer une jachère, quand c'est possible.

Malgré une production nettement moindre, comparée à celles du blé, du riz, du maïs, le rôle du sorgho dans l'alimentation mondiale reste vital. Il nourrit des humains et des animaux de rente, dans des proportions variables selon les régions, mais reste considéré comme céréale secondaire et associé à la pauvreté.





## II. La situation du sorgho en France

Sans reprendre toutes les données générales, citées précédemment, ce chapitre met en relief les statistiques et les pratiques agricoles spécifiques aux variétés de sorgho, cultivées en France.

### **A. Les variétés disponibles**

Comme dans les autres pays producteurs dans le monde, il est possible de cultiver, en France :

- des variétés spécialisées pour leurs grains et moissonnées comme les autres céréales plus communes ;
- des variétés spécialisées pour leur masse végétale, fauchées et distribuées comme fourrage.

La plupart des variétés de sorgho-grain, en France, appartiennent aux races caudatum et kafir-caudatum. Les variétés fourragères sont partagées entre l'espèce *S. sudanense* et la race bicolor dans l'espèce *S. bicolor* [communication personnelle]. Mais le milieu professionnel agricole ne s'intéresse qu'aux variétés elles-mêmes et surtout à leur précocité. Le marché des semences est réglementé, et même soumis à autorisation ministérielle [95]. Comme pour toutes les plantes cultivées en France, c'est un marché privé sous contrôle public. Ceci afin de garantir l'identité et la pureté variétale, les qualités technologiques et sanitaires, et également la traçabilité des produits. [42]

Il existe, à l'heure actuelle, 40 variétés de sorgho-grain inscrites dans le *Catalogue français des espèces et variétés* [43] et donc officiellement disponibles pour les agriculteurs français (Tableau 9). Mais en pratique, les catalogues commerciaux des semenciers ne les reprennent pas toutes. L'offre de semence évolue rapidement : beaucoup de variétés sont commercialisées quelques années puis disparaissent et sont remplacées par d'autres [106]. Les sélectionneurs apportant régulièrement des améliorations à leurs caractères agronomiques.

Plus de la moitié des variétés inscrites dans le *Catalogue français des espèces et variétés*, y sont depuis moins de 10 ans, preuve d'une certaine innovation dans ce domaine. La plus ancienne, Argence, est inscrite depuis 1981. Elle sert d'ailleurs souvent de référence, en raison du changement qu'elle a marqué dans la valeur alimentaire du sorgho. [54]

**Tableau 9 - 27 des 40 variétés de sorgho-grain actuellement autorisées en France d'après [43]**

<u>Tardif</u>	<u>Demi-précoce</u>	<u>Précoce</u>	<u>Très précoce</u>
Aralba	Aquarius	Arakan	Drop
Brise	Aréna	Argence	Friggo
Fulgus	Profus	Arlys	Québec
Kinggo	Solaris	Artaban	
Sibelus		Burggo	
Tramontane		Classus	
Triumph		DK 18	
Vanoise		Garonne	
Vivarais		Jimggo	
		Queyras	
		Zephyr	

Pour ce qui est du sorgho fourrager, 9 variétés sont autorisées en France, d'espèce *S. sudanense* ou hybride "*S. sudanense* x *S. bicolor*" : Alpilles, Barsudan, Ludan, Lussi, Piper, Soleillade, Vercors (2 autres sont appelées à disparaître). L'INRA est mainteneur pour le sorgho fourrager Piper, appartenant au domaine public et variété de référence pour ses qualités alimentaires. [97]

## B. Production

[7], [96]

Le sorgho n'est pas une culture indigène. Il a fallu la création d'hybrides adaptés aux conditions climatiques pour qu'il s'implante réellement en France, à partir de la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

En 2005, la culture des variétés à grains occupe la 6<sup>e</sup> place des productions céréalières du pays (en quantité de grains produite, comme en surface dédiée), avec près de 264 000 t (Tableau 10), mais c'est un résultat inférieur à ceux enregistrés pendant les années 1990 à 2000. Cette production est très restreinte comparée à celle du blé, du maïs ou de l'orge. Elle est, de ce fait, parfois négligée par les coopératives agricoles [communication personnelle].

**Tableau 10 - Production et rendement des principales cultures céréalières françaises en 2005, d'après [96]**

Céréale	Superficie (ha)	Rendement (q/ha)	Production récoltée (q)
Total blé <sup>12</sup>	4 859 319	71,69	368 779 643
Total maïs <sup>3</sup>	1 662 640	82,47	137 119 640
Total orge et escourgeon <sup>2</sup>	1 602 409	64,50	103 365 002
Triticale	330 376	54,20	17 906 702
Total avoine <sup>2</sup>	111 378	45,43	5 060 913
Sorgho	50 824	51,91	2 638 350
Seigle	31 447	47,38	1 490 111
Riz	17 880	57,30	1 024 660
[...]			
TOTAL TOUTES CEREALES	9 180 124	69,82	641 018 531

<sup>1</sup> dur et tendre

<sup>2</sup> d'hiver et de printemps

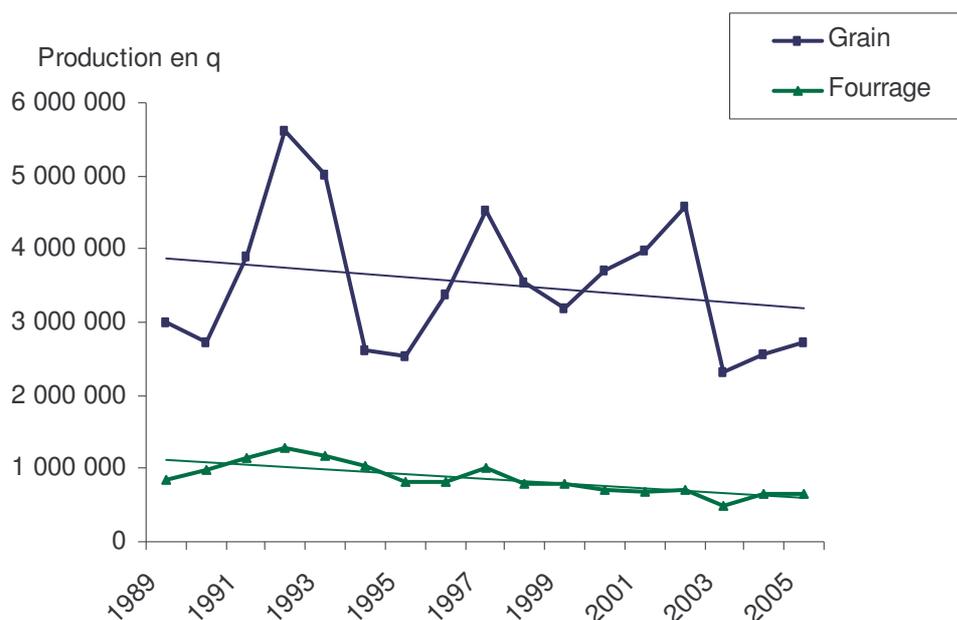
<sup>3</sup> grains et semences

En culture fourragère, le tonnage annuel en matière sèche de sorgho semble dérisoire par rapport à la production du maïs destiné à l'affouragement et à l'ensilage (Tableau 11). Le maïs fourrager est actuellement la base incontournable de l'alimentation animale en France. Des agronomes ont montré que le sorgho peut soutenir la comparaison des valeurs alimentaires en élevage laitier, et qu'on peut envisager de l'utiliser davantage pour diversifier la production de fourrage. [36]

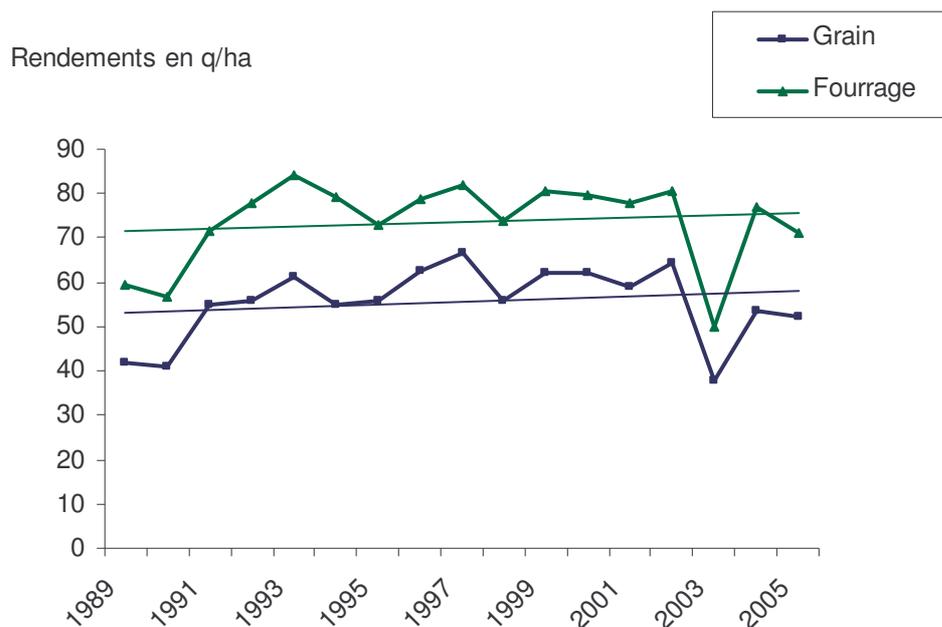
**Tableau 11 - Production et rendement des cultures fourragères annuelles françaises en 2005, d'après [96]**

Espèce fourragère	Superficie (ha)	Rendement (q/ha)	Production récoltée (q)
Maïs fourrage et ensilage (plante entière)	1 388 779	115,17	159 956 935
Ray-grass	153 807	54,24	8 343 870
Colza fourrager	26 728	39,02	1 043 180
Sorgho fourrage	9 252	70,70	654 200
Trèfle incarnat	1 520	91,01	138 350
Autres fourrages annuels	90 721	0,00	3 507 226
<b>TOTAL FOURRAGES ANNUELS</b>	<b>1 670 807</b>	<b>103,92</b>	<b>173 643 761</b>

Depuis la fin des années 80, la production est en baisse, pour le grain comme pour le fourrage (Figure 10), contrairement à l'évolution générale de la culture céréalière ou fourragère (données non présentées). Pourtant les rendements sont plutôt en hausse (Figure 11) et leurs courbes suivent l'allure générale des courbes de rendement "toutes céréales" et "fourrages annuels" respectivement (données non présentées).



**Figure 10 - Evolution de 1989 à 2005 des productions céréalières et fourragères de sorgho en France, d'après [96]**



**Figure 11 - Evolution de 1989 à 2005 du rendement des cultures céréalières et fourragères de sorgho en France, d'après [96]**

Les six départements les plus gros producteurs de sorgho (grain et fourrage confondus) fournissent un peu plus de 50% des récoltes nationales (Tableau 12). Cinq de ces départements sont dans le quart sud-ouest de la France. Pour simplifier, on peut considérer qu'il y a trois grandes régions productrices : la première est la vallée de la Garonne, puis la vallée du Rhône (sauf son embouchure), enfin le Pays de Loire (Figure 12).

**Tableau 12 - Les six départements principaux producteurs de sorgho (grain et fourrage confondus) en France en 2005, d'après [96]**

Département	Production (en q)	Part de la production nationale
Haute-Garonne	408 800	12,42%
Gers	392 200	11,91%
Tarn	258 000	7,84%
Drôme	246 000	7,47%
Tarn-et-Garonne	229 500	6,97%
Lot-et-Garonne	184 000	5,59%

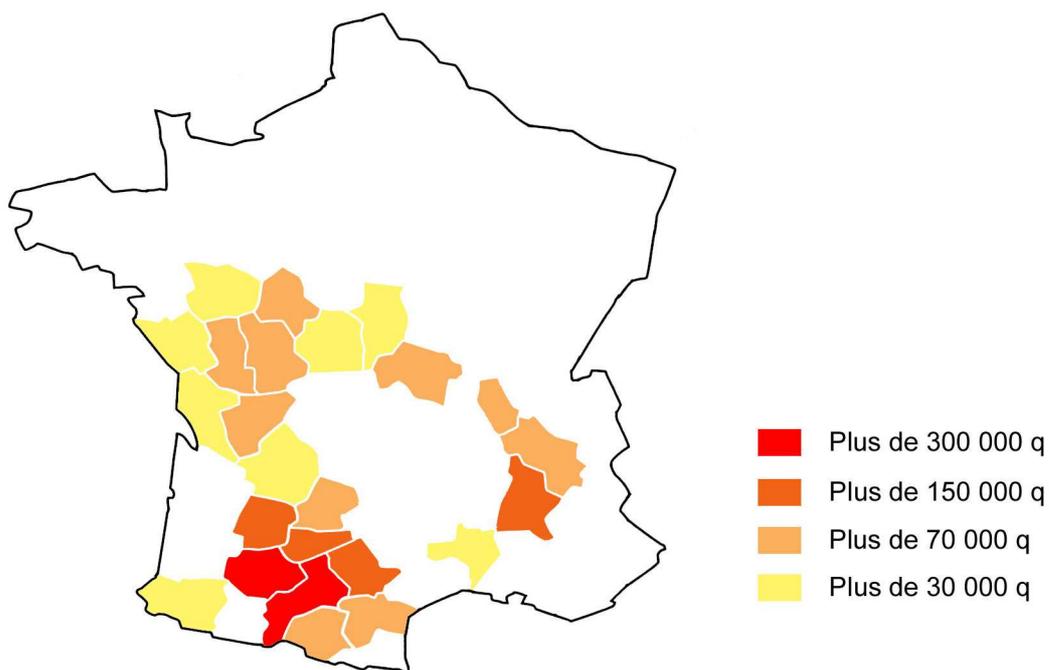


Figure 12 - Carte des départements français ayant produit plus de 30 000 q de sorgho (grain et fourrage confondus) en 2005, d'après [96]

La carte de la Figure 12 est simplifiée puisque ne sont représentés que 24 départements. Il y en a une quarantaine d'autres dans lesquels le ministère de l'Agriculture recense une production de sorgho. Ces derniers totalisent ensemble moins de 12% du total national.

## C. Utilisation

[3], [56], [65]

Aucune utilisation du sorgho pour l'alimentation humaine n'est connue en France. Des essais ont été menés, mais n'ont jamais abouti à une quelconque application commerciale [communication personnelle]. Il existe par contre quelques utilisations industrielles anecdotiques : pâte à papier [5] ; mais néanmoins parfois séculaires : balais [10]. Tout le sorgho utilisé en France est donc presque exclusivement destiné à l'alimentation animale.

Les grains sont destinés avant tout aux monogastriques : porc et volailles.

Les fourrages sont destinés aux herbivores (et en pratique surtout aux ruminants). Si on les exploite en vert : pâturage ou affouragement à l'auge, des précautions sont à prendre en termes de pratiques culturales et lors de la récolte (voir chapitre IV). On peut aussi leur appliquer les méthodes de conservations habituelles. Bien que certaines variétés aient des tiges un peu épaisses, elles répondent bien à la pratique de la fenaison ou de la déshydratation. Cette deuxième méthode n'ayant que peu d'intérêt en raison de la dépense énergétique qu'elle implique. Enfin, l'ensilage constitue le mode de conservation et d'exploitation de choix : le plus souvent on utilise des variétés de sorgho-grain, récoltées entières, hachées en fines particules, stockées humides (30-35% de matière sèche) en condition anaérobie. La

production d'acide lactique, par les bactéries lactiques présentes sur le fourrage, entraîne une rapide baisse de pH du milieu et inhibe le développement et l'activité de la flore butyrique, responsable des putréfactions. Cette méthode permet la conservation d'un aliment de qualité nutritionnelle stable. L'ensilage de maïs, qui sert de référence, permet dans bien des exploitations, non seulement de nourrir les animaux 9 mois sur 12, mais surtout d'entretenir la production laitière, qui implique des besoins très élevés. Le sorgho est une plante qui s'ensile facilement et permet un gain de temps de 10 à 15% par rapport à l'ensilage de maïs, en raison d'une plus grande facilité de hachage de la plante. Par contre, cette caractéristique est parfois la cause d'une finesse de hachage excessive, dont les conséquences sont exposées dans le chapitre V.A. L'ensilage du sorgho présente un deuxième avantage très important, car il permet d'éliminer une grande partie de la toxicité potentielle de la plante (chapitre IV).

Plusieurs variétés françaises de sorgho-grain ont la particularité d'avoir des tissus végétatifs sucrés. De plus, leur rendement de biomasse est supérieur à celui des autres variétés classiques. Elles sont présentées par leurs sélectionneurs comme des variétés spécialement destinées à l'ensilage. Ces sorghos-grain sucriers sont d'un usage encore restreint actuellement. [communication personnelle]

## D. Economie

[7], [89]

Seul le grain est commercialisé, le fourrage étant plutôt destiné à un usage *in situ*. A part pour l'année 2003, les débouchés du sorgho sont répartis de façon à peu près équivalente entre les exportations et les marchés intérieurs. La France fournit presque la totalité du sorgho qui est échangé entre les pays membres de l'Union Européenne. L'Espagne profite avantageusement de sa proximité avec la région Midi-Pyrénées, principale productrice, et absorbe la majeure partie des exportations françaises.

Sur les marchés intérieurs, le seul véritable débouché reste la fabrication d'aliments composés. En 2004, les 2/3 de la consommation nationale sont à l'actif de l'industrie de l'alimentation animale. Mais cette proportion était plus élevée quand la production était à un meilleur niveau. Le reste est acheté directement par des groupements d'agriculteurs éleveurs.

Pour ce qui est des revenus pour l'agriculteur, une enquête a été réalisée en 2004, par ARVALIS - Institut du végétal, auprès de 21 producteurs, possédant déjà une bonne expérience de la conduite de sorgho, répartis dans les 3 principaux bassins de production français. En voici une partie des conclusions : en étant peu exigeante en eau et en intrants, cette culture est tout à fait compétitive comparée au maïs irrigué. Et en système sec, le sorgho soutient la comparaison avec le tournesol, notamment dans les zones où les rendements de l'oléagineux sont limités. De plus son introduction dans les rotations permet de diversifier les assolements.

En conduite irriguée, les charges (eau, semences et insecticides) sont de l'ordre de 330 €/ha dans le cas du sorgho alors qu'elles dépassent 530 €/ha dans le cas du maïs. Cette différence de charge permet de compenser les différences de rendement qui existent entre ces deux cultures. Le sorgho se révèle donc particulièrement intéressant dans les régions dans lesquelles les rendements en maïs plafonnent à 110 q/ha ou dans lesquelles l'irrigation est difficile.

En système sec, les charges opérationnelles sont analogues entre tournesol et sorgho, de l'ordre de 230 €/ha. L'oléagineux se vend nettement plus cher que la céréale, mais la différence de rendement, à l'avantage du sorgho, donne finalement des marges brutes comparables, dans la plupart des exploitations agricoles qui produisent les deux.

## E. Culture

[7], [15], [83]

La culture du sorgho rencontre une difficulté importante sur le plan agronomique : la plante est très sensible au froid.

Il y a trois règles à respecter :

- au semis, éviter les températures inférieures à 8°C ;
- à la floraison, éviter les températures minimales inférieures à 8°C ;
- à la récolte, éviter le gel à maturité.

Pour éviter ces risques, 8 années sur 10, par exemple dans la région lyonnaise, il faut semer après le 10 mai et récolter avant le 20 octobre. Si la floraison est complète avant le 20 août, on est à peu près sûr d'éviter des températures minimales inférieures à 8°C.

Pour pouvoir récolter des grains arrivés à maturité (et à 25% d'humidité) avant le 20 octobre dans le Rhône, il faut semer entre le 19 et le 30 mai. En respectant ces plages, on ne peut envisager d'utiliser que des variétés précoces et très précoces. Dans des régions plus septentrionales ou dans le Massif Central, la date de fin de semis, calculée pour éviter 8 ans sur 10 les risques de gel avant récolte, devient inférieure à la date de début de semis. La culture ne peut être envisagée, sauf en prenant le risque d'un rendement médiocre 1 an sur 2.

La précocité est assimilée, en France, à la somme des températures journalières moyennes nécessaire à la plante pour exprimer son potentiel de croissance (Tableau 13).

**Tableau 13 - Besoins thermiques du sorgho et du maïs en fonction de leur précocité, d'après [15] et [67]**

	Besoins thermiques du sorgho	Besoins thermiques du maïs
Très précoce	1550 – 1650	< 1700
Précoce	1650 – 1750	1680 – 1740
Demi-précoce	1750 – 1850	1740 – 1870
Tardif	1850 – 1950	1870 – 2090

La plante est réputé pour sa sobriété. Cela se vérifie aussi en France et peut être mis à profit. Son puissant système racinaire est capable d'exploiter les réserves du sol mieux que la plupart des autres espèces cultivées, et son système végétatif est capable de réduire fortement ses pertes par évapotranspiration. En système sec, le rendement est bien sûr lié à la profondeur du sol et donc à la réserve disponible. En sols très profonds, le rendement attendu est systématiquement supérieur à 60 q/ha, voire compris entre 80 et 90 q/ha dans le sud de l'Isère et du Rhône. En culture irriguée, la limite est le niveau de rendement du sorgho lui-même. Mais pour atteindre leur productivité optimale, il faut apporter 303 mm d'eau au maïs quand le sorgho se contente de 126 mm dans les mêmes conditions pédo-climatiques (Tableau 14, moyennes calculées par ARVALIS sur 3 campagnes successives).

**Tableau 14 - Comparaison des rendements et des besoins d'irrigation du sorgho et du maïs, d'après [7]**

	2002	2003	2004	Moyenne
Volumes d'eau d'irrigation (mm)				
Sorgho	107	151	114	126
Maïs	248	325	318	303
Rendements réalisés (q/ha)				
Sorgho	89,6	85,9	90,9	88,6
Maïs	116,9	105,0	123,0	114,7

Il ne faut pas le prendre pour une assurance tout risque à la sécheresse, mais il concurrence le maïs en situation d'irrigation restreinte [40] et surtout il est plus souple : des décalages de quelques jours dans ses tours d'irrigation ne portent pas à conséquences, il n'est pas nécessaire de lui donner la priorité [65]. Le sorgho a donc pleinement sa place dans les assolements du sud de la France, car son introduction favorise l'économie d'eau et la diversification des rotations.

Les agriculteurs français disposent de quelques variétés de sorgho, diversifiées par leurs caractéristiques et répondant aux divers besoins des activités d'élevages. En raison de sa sensibilité au froid, le sorgho n'est adapté qu'à trois grandes zones du sud et de l'ouest de la France. Mais, en conditions propices, il présente des avantages qui justifient pleinement sa présence dans le système agricole français.





### **III. Les valeurs alimentaires du sorgho**

Les valeurs nutritionnelles, des aliments en général et du sorgho en particulier, sont des données numériques exprimant les apports énergétiques, protéiques, minéraux et vitaminiques, participant à la couverture des besoins du consommateur. A l'inverse les facteurs anti-nutritionnels ont une action négative, qui dévalorise ces apports.

#### **A. Bases de connaissances**

[56]

La connaissance des valeurs nutritives d'un aliment est essentielle à plus d'un titre. Les animaux de rente, rarement laissés à l'entretien, sont, au contraire, poussés à des performances de production nécessitant un état de santé optimal. Cela n'est envisageable qu'à la condition, nécessaire mais non suffisante, de leur fournir une ration alimentaire la plus équilibrée possible. Toute imprécision se paye très rapidement en production, voire en pathologie. Les excès ne sont pas plus souhaitables que les carences, car le gaspillage entraîne également des pertes économiques en contradiction avec les objectifs de l'élevage, voire peut même être toxique (exemple parmi d'autres : l'acidose).

On dispose pour cela de nombreuses publications, dont la plus complète, concernant les ruminants et contenant les tables de la valeur nutritive de la plupart des aliments, éditée par l'INRA [56]. Ces tables regroupent des moyennes et il est rappelé que certaines données sont moins précises ou plus difficiles à estimer que d'autres. De plus, on sait qu'il existe des variations dues au milieu extérieur ou à l'année de récolte, voire à des combinaisons de facteurs.

Ainsi, les céréales, notamment, font l'objet d'analyses annuelles au terme des récoltes et de la mise en silo [84]. Ceci afin de permettre aux exploitants (industriels de l'alimentation animale, agriculteurs, ...) de se baser sur des estimations les plus précises et les plus actuelles possible. Cela ne dispense pas ces mêmes professionnels de faire analyser leur propre aliment, s'ils souhaitent des valeurs absolument exactes.

Mais une analyse de routine n'est possible que s'il existe une équation de prévision de la valeur nutritive pour le produit. Ces équations sont totalement spécifiques de chaque espèce végétale mais également de son cycle de végétation, s'il s'agit d'un fourrage, et spécifiques également au consommateur. Il n'existe pas d'équation quand le produit n'a pas été étudié ou quand sa valeur énergétique n'est pas liée à sa composition chimique. Par conséquent, il ne peut pas figurer non plus dans les tables de valeurs nutritives.

C'est encore actuellement le cas pour la plante entière du sorgho-grain. Cela en raison d'une trop grande variabilité phénotypique d'une variété à l'autre, ainsi que des "réponses" aux conditions environnementales également mal documentées [36]. De nouvelles tables sont en cours de rédaction, mais il est peu probable d'y trouver prochainement ces informations. Des études récentes de l'INRA de Lusignan apportent un début de connaissance en la matière, mais ne peuvent certainement pas servir de référence [35]. Leurs conclusions apportent quand même un éclaircissement très important sur le sujet et seront développées dans le chapitre V *Adaptation aux régimes des différentes espèces domestiques*.

Dans les calculs de ration, on utilise des valeurs rapportées à la part de matière sèche, en raison des variations du taux d'humidité dans les aliments fourragers, l'eau n'ayant pas de valeur nutritive. Parfois, dans le cas des concentrés, ce sont les valeurs de l'aliment brut qui

sont données dans la littérature. Par soucis de clarté, la suite de cet exposé se basera essentiellement sur des valeurs pour la matière sèche des produits, sauf indication contraire.

Récoltés à maturité, les grains de céréales, et donc de sorgho, doivent se rapprocher le plus possible d'un taux de matière sèche de 84%. Il est fréquent que la valeur soit inférieure à ce minimum légal, il faut alors ventiler, voire sécher (ventilation chaude) les grains pour assurer leur conservation<sup>1</sup>. Lorsqu'on récolte la plante entière pour l'ensiler, l'appétence du produit est maximale à 35% de MS. En culture fourragère, l'INRA rapporte des valeurs comprises entre 15% et 27% de MS selon le stade de développement de la plante.

## **B. Ingestibilité, digestibilité et fibres**

[29], [56]

Un aliment ne remplit son rôle que si l'animal le mange et peut le digérer. Un aliment concentré, comme une céréale, est généralement bien consommé par tous les animaux, sauf en cas de perturbation par un facteur antinutritionnel, par exemple. Pour ce qui est des fourrages, cela devient un peu plus compliqué. On parle alors d'ingestibilité pour désigner la quantité volontairement ingérée par un ruminant recevant ce fourrage à volonté comme seul aliment. La digestibilité est la proportion, de l'aliment brut ou de ses nutriments, assimilable par l'organisme au cours du passage dans le tube digestif.

Ces deux paramètres sont fortement liés à la morphologie de la plante (feuilles, tiges et épis) et à la composition des parois cellulaires de ces organes, c'est à dire les fibres du végétal. Les constituants essentiels des parois sont la cellulose (environ 30% de la MS totale de la plante) et les hémicelluloses, indispensables pour les herbivores et surtout les ruminants, indigestibles pour les autres. Elles fournissent de l'énergie uniquement grâce à l'action de la flore du rumen, ou du cæcum chez les équidés. Mais au cours du vieillissement de la plante, les parois cellulaires s'épaississent et s'incrustent de lignine, polymère de composés phénoliques hydrophobes. Celle-ci est non seulement indigestible, mais elle constitue en plus une barrière à la digestion des parois du fourrage par les microbes du rumen.

La digestibilité de la cellulose du sorgho fourrager passe ainsi de 72%, pendant la montaison, à 48%, pendant la floraison, puis remonte un peu et se stabilise (Tableau 15). Il n'y a pas de données statistiques officielles concernant le sorgho grain, mais il est admis qu'elles sont assez proches de celles-ci. Si on analyse l'ensemble de la matière organique, la variation est moins forte, car les constituants intra-cellulaires (glucides de réserve, protéines, lipides, minéraux, vitamines...) ont une digestibilité très élevée, voire totale.

Les constituants intra-cellulaires étant très rapidement digérés, reste dans le rumen la cellulose plus ou moins lignifiée, qui ne pourra le quitter qu'après avoir été réduite en petites particules sous l'action de la rumination et de la dégradation microbienne. La lignine ralentissant bien sûr ces transformations. On parle alors d'un effet d'encombrement, qu'on exprime en UE, unités d'encombrement, et qui augmente quand la digestibilité des fibres diminue. Or il faut faire de la place pour amener à nouveau de la nourriture, c'est pourquoi l'ingestibilité dépend à peu près des mêmes critères que la digestibilité et varie en sens inverse de l'effet d'encombrement (Tableau 15). Les unités d'encombrement sont spécifiques à une production, c'est à dire pour les moutons (UEM), les bovins laitiers (UEL) et les autres bovins (UEB).

---

<sup>1</sup> Dans le cas du maïs qui est récolté à 60-70% de MS, on peut aussi le stocker en l'état à l'aide d'un conservateur.

Précisons que la baisse de digestibilité s'accompagne, dans un premier temps, d'une augmentation de consommation pour pallier au manque d'énergie assimilée par l'organisme. Mais le phénomène s'inverse rapidement, car le volume du rumen ne suit pas cette évolution.

**Tableau 15 - Digestibilité de la cellulose et valeur d'encombrement par kg MS du sorgho fourrager au cours de son développement, d'après [56]**

Sorgho fourrager	CUD CB	UEM	UEL	UEB
montaison	72%	1,04	1,02	1,03
1 semaine avant épiaison	66%	1,22	1,09	1,16
début épiaison	64%	1,25	1,10	1,18
épiaison	62%	1,38	1,14	1,26
floraison	48%	1,39	1,14	1,27
stade grain laiteux	57%	1,38	1,14	1,27

Pour être plus précis, la digestibilité et l'ingestibilité d'un fourrage dépendent essentiellement du stade de végétation<sup>1</sup> et de l'âge de la plante, bien plus que de l'année et du lieu d'étude. En comparaison, le maïs garde une digestibilité très constante dans le temps. Son ingestibilité l'est un peu moins et se rapproche de celle du sorgho, à maturité.

Quelle que soit l'exploitation qu'on en fait, mais surtout en vue d'une conservation, la décision de faucher ou moissonner le champ repose sur un compromis entre d'une part les facteurs ingestibilité/digestibilité/valeur nutritive (liés entre eux) et, d'autre part, le facteur productivité végétale. Celle-ci augmente avec l'âge de la plante, mais la valeur alimentaire diminue et en réduit le bénéfice.

De nombreuses recherches ont porté sur le développement de variétés synthétisant moins de lignine, pour réduire l'importance du compromis entre qualité et quantité. Mais cette sélection est simplement impossible, car le dosage du composé dans la plante (ADL/NDF) a une corrélation mathématique beaucoup trop faible avec la digestibilité *in vivo*. Les interactions avec le reste du matériel génétique empêchent toute prévision.

En 1924, une mutation naturelle du maïs, appelée "brown midrib" en raison d'une nervure brune sur les feuilles, a été isolée et analysée. Ce caractère récessif modifie la composition de la lignine et en diminue la teneur dans les plantes. Il existe plusieurs mutations brown midrib, affectant le maïs, mais aussi les sorghos et les mils, qui sont alors significativement plus digestibles que leurs témoins isogènes normaux. Les sorghos bmr12 sont les plus efficaces en terme d'amélioration de la digestibilité. Ce caractère a été l'objet de nombreuses études pendant les années 1970 jusqu'au début des années 1980. Mais les conclusions n'ont finalement jamais été positives, car l'amélioration de digestibilité est fortement pénalisée par une importante baisse de production, due à un rendement agronomique inférieur et surtout des pertes de plantes qui versent avant la récolte. En effet, la diminution de rigidité des tiges les rend plus fragiles face aux intempéries. On ne peut éliminer ce défaut, car la digestibilité et la tenue des tiges ne sont pas des caractères indépendants, et sont liés inversement l'un par rapport à l'autre à la présence de lignine. Avec les formidables progrès obtenus sur les rendements depuis 20 ans, on peut imaginer que les brown midrib connaîtront un regain d'intérêt, mais ce n'est pas encore le cas en Europe, ni aux Etats-Unis. [11]

Ainsi un compromis entre les optima de qualité et de quantité demeure incontournable.

<sup>1</sup> Le stade de végétation ne concerne que le sorgho fourrager et non la plante à grains, puisque cela désigne le cycle de repousse après coupe et récolte. La digestibilité des repousses est légèrement inférieure à celle de la plante dans son 1<sup>er</sup> cycle, mais cette valeur diminue moins vite dans le temps.

La valeur des fourrages conservés dépend en premier lieu de la valeur au moment de la récolte, puisque les parois n'évoluent, à priori, plus ensuite. Elle dépend, dans un 2<sup>nd</sup> temps, de la technique de conservation pour garder stables les constituants intra-cellulaires et pariétaux :

- la fenaison entraîne des pertes de matière organique soluble, en premier lieu. On peut observer des pertes supplémentaires, si le foin est stocké trop humide et s'échauffe. Au mieux, l'ingestibilité est conservée, mais la digestibilité diminue ;
- la déshydratation ne modifie pas la composition chimique du fourrage, mais le hachage qui lui est associé accélère le transit des particules, diminuant ainsi leur exposition à la digestion de la flore ruminale. L'ingestibilité augmente mais la digestibilité des parois diminue ;
- l'ensilage diminue peu ou pas la digestibilité du fourrage, sauf en cas de très mauvaise conservation ou de pertes d'éléments nutritifs solubles dans les jus. On note étonnamment une meilleure ingestibilité de l'ensilage de sorgho par rapport au maïs conservé de même. Là aussi, cette inversion de rapport est expliquée par la finesse de hachage supérieure pour le sorgho, malgré une plus forte lignification. Cela ne s'applique pas pour les variétés sucrées, peut être à cause de l'action antinutritionnelle des tanins en quantité plus élevée dans leurs grains. [65]

## C. Apport énergétique

[52], [56], [100]

Il existe plusieurs notions de valeur énergétique pour un même produit.

L'énergie brute, exprimée en kilocalories, est le seul paramètre énergétique propre de l'aliment, c'est à dire indépendant de l'animal qui le consomme. Ainsi, par exemple, l'EB du sorgho fourrager reste constante au cours de sa maturation, alors que sa digestibilité et d'autres paramètres nutritionnels diminuent.

EB grain : 4509 kcal/kg MS

EB fourrage : 4200 à 4300 kcal/kg MS

Mais cette donnée a surtout un usage théorique, puisque chaque catégorie de consommateurs profite différemment d'un même aliment. Il faut donc un système adapté à chaque régime : on exprime généralement l'apport énergétique chez les monogastriques non herbivores en kcal d'énergie métabolisable (EM), tandis que l'unité fourragère (UF), correspondant à l'apport énergétique d'un aliment de référence, est appliquée aux herbivores. On distingue les UFL pour les femelles laitières, les UFV pour les allaitants et les UFC pour les équins.

Calculer ces données nécessite des expérimentations fastidieuses avec des animaux, dont la collecte de leurs excréta pendant plusieurs jours. Elles ne sont pas toujours facilement réactualisables.

Dans le cas du sorgho, la valeur énergétique des grains est élevée (Tableau 16) en raison de l'amidon qu'ils renferment, comme toutes les céréales. Elle est sensiblement égale à celle du maïs dans une ration de ruminants, légèrement inférieure pour les porcs, mais supérieure pour les volailles, pour lesquelles il s'agit même de la céréale à la valeur d'énergie métabolisable la plus élevée. [28], [100]

Les sorghos fourragers sont moins riches en énergie que les maïs fourragers. A noter qu'entre les deux plantes, le sorgho se déprécie encore plus avec la lignification et la baisse de digestibilité (Tableau 16), alors que le maïs ne subit que peu ce phénomène et progresse même, grâce au remplissage des grains en amidon.

Il manque bien sûr les valeurs du sorgho-grain plante entière. En raison de données trop variables, il est actuellement impossible de faire une synthèse valable.

**Tableau 16 - Valeurs énergétiques du sorgho et du maïs (exprimées par kg MS), d'après [56] et [100]**

	grains		fourrages	
	sorgho	maïs	sorgho	maïs
Ruminants	1,21 UFL 1,22 UFV	1,23 UFL 1,23 UFV	0,81 à 0,69 UFL 0,74 à 0,61 UFV	0,87 à 0,93 UFL 0,81 à 0,88 UFV
Equins	1,24 UFC	1,30 UFC	?	?
Porcins	3838 à 3884 kcal EM	3831 à 3970 kcal EM	(sans objet)	(sans objet)
Volailles	3734 à 3815 kcal EM	3623 à 3704 kcal EM	(sans objet)	(sans objet)

Dans les cas de conservation des fourrages, on peut s'attendre à diverses évolutions :

- la fenaison entraîne des pertes de 0,05 à 0,3 UFL/kg MS chez les graminées en général, et encore plus si le foin s'échauffe ;
- la déshydratation ne doit pas causer de perte ou presque des éléments solubles, si elle est bien réalisée. Mais la diminution du temps de digestion, par accélération du transit dû au hachage des parois, entraîne inmanquablement une perte énergétique ;
- dans un ensilage de bonne qualité, la valeur énergétique est conservée. La digestibilité moindre par rapport au maïs (mesures *in vivo* sur moutons) permet d'estimer une différence de 0,14 UFL/kg MS, en faveur de celui-ci. Tandis que d'autres mesures situent la valeur de l'ensilage de sorgho dans un intervalle compris entre 0,73 et 0,81 UFL/kg MS (plante ensilée à 30% MS, stade grain laiteux-pâteux), ce qui est homogène avec la première estimation. L'utilisation de variétés sucrées déprécie encore légèrement ces résultats. [65]

L'INRA Lusignan ne se prononce pas sur les valeurs UF, mais signale une quantité moindre d'amidon dans ses ensilages de sorgho comparés à ceux de maïs. [35]

Les professionnels de la filière utilisent parfois les équations de prévision de la valeur énergétique de l'ensilage de maïs pour avoir une valeur approchée de leur sorgho. Un des semenciers français a accepté de me fournir un rapport d'analyse pour un ensilage de sorgho grain sucrier, lui attribuant des valeurs de 0,83 UFL/kg MS et 0,71 UFV/kg MS. J'ai également relevé une estimation comprise entre 0,87 et 0,90 UFL/kg MS, sur une brochure commerciale, toujours pour une variété sucrée, sans précision des conditions de mesures et d'analyses. Ces chiffres ne sont cités ici qu'à titre purement indicatifs.

## D. Apport protéique

[52], [56], [73]

La teneur protéique des végétaux, exprimée simplement en g/kg MS de l'aliment, est plus dépendante des conditions de culture que l'énergie et la digestibilité déjà abordées. De plus, les produits végétaux sont généralement moins bien pourvus en protéines qu'en énergie

et la tendance est particulièrement marquée avec les céréales. Le sorgho ne fait pas exception à la règle et doit être considéré comme un aliment à faible apport protéique dans la ration.

Le système PDI (protéines digestibles dans l'intestin), propre aux ruminants, illustre parfaitement cette situation : PDIN < PDIE (Tableau 17) pour le sorgho comme pour toutes les céréales. Dans le rumen, l'azote est le substrat limitant de la synthèse protéique microbienne. C'est pourquoi il faut compléter le sorgho par un autre aliment riche en azote, pour en tirer tout le potentiel.

**Tableau 17 - Valeurs protéiques du sorgho et du maïs consommés par les ruminants (en g/kg MS), d'après [56] et [100]**

	sorgho		maïs	
	PDIN	PDIE	PDIN	PDIE
grain	77	101	74	97
fouillage : montaison	119	93	62	79
fouillage : stade grain laiteux	43	64	55	78
fouillage : stade grain vitreux	-	-	46	77

En terme d'apport protéique, les grains de sorgho priment légèrement sur le maïs (Tableau 17). Mais chez les monogastriques, la digestibilité moyenne des acides aminés est moins élevée et ils n'en profitent pas complètement. [59], [93]

Dans le fourrage, on observe une diminution importante des valeurs PDI au cours du cycle végétatif (Tableau 17), liée à la diminution de la digestibilité de la plante et ainsi comparable à la perte de valeur énergétique, qui se produit pendant le même temps. En comparaison, le maïs a une teneur protéique inférieure à celle du sorgho quand la plante est jeune, mais la diminution au cours de la maturation est moins marquée, grâce à la constance de sa digestibilité.

Il manque là aussi les données relatives au sorgho-grain plante entière.

La conservation ne permet pas de sauvegarder la totalité de la teneur protéique des fourrages :

- la fenaison fait perdre une partie de l'azote soluble, et peut rendre indigestibles une partie des constituants pariétaux en cas d'humidité mal contrôlée et d'échauffement ;
- la déshydratation a tendance à favoriser la digestibilité protéique, mais le hachage et l'accélération du transit entraîne un défaut de digestion microbienne, et une perte de PDI par conséquent ;
- l'ensilage est normalement moins néfaste que les deux autres méthodes. La valeur du sorgho ainsi conservé est estimée entre 58 et 67 g PDIN/kg MS et entre 62 et 68 g PDIE/kg MS. On garde donc un aliment de meilleur taux protéique que l'ensilage de maïs (50 g PDIN et 68 g PDIE/kg MS) et aussi un peu plus équilibré entre azote et énergie fermentescible. Les valeurs PDI ne sont pas aussi bonnes avec les sorghos-grain sucriers, parmi ceux qui ont été étudiés jusque là. [65]

L'INRA Lusignan retrouve cette tendance en dosant une quantité de protéines totales à l'avantage de l'ensilage de sorgho grain, et intermédiaire entre celui-ci et le maïs pour la variété sucrée. [35]

Le document, déjà cité précédemment, émanant d'un semencier français, indique une analyse à 62,7 g PDIN/kg MS et 68,7 g PDIE/kg MS, avec les équations spécifiques à

l'ensilage de maïs. Tandis que la brochure commerciale annonce 60 g PDIN et 75 g PDIE/kg MS, ce qui semble un peu surprenant.

La qualité de l'apport protéique n'est pas uniquement une question de valeur de matière azotée assimilable. Plus encore que l'apport protéique alimentaire, les besoins en acides aminés indispensables dépendent de l'origine génétique et des performances zootechniques des animaux, mais aussi des conditions d'alimentation et d'environnement.

Malgré cela, il y a quand même des tendances générales qui permettent de caractériser un aliment hors contexte : comme pour l'ensemble des céréales, les grains de sorgho sont limités par un déficit en lysine. Ce n'est pas la seule molécule en défaut, mais c'est la plus importante en raison de son caractère strictement indispensable. D'une manière générale, les protéines des céréales ne sont pas très bien pourvues en acides aminés indispensables, surtout en comparaison d'autres types de graines, comme celles des plantes oléagineuses par exemple. Le sorgho fait exception pour la leucine, qu'il contient en quantité relativement importante, particularité partagée avec le maïs [59]. A noter que les protéines des fourrages sont bien pourvues en acides aminés indispensables, mais leur digestibilité diminue au cours de la maturation de la plante.

Les concentrations de l'ensemble des acides aminés du sorgho sont assez constantes d'un cultivar à l'autre, et assez proches de celles d'un maïs normal. A l'inverse, l'étude des taux de digestibilité est nettement plus complexe, avec des différences variétales significatives au sein de chaque espèce végétale, notamment pour les porcins. On peut donc difficilement établir de comparaison entre les différents grains. [59], [93]

En conséquences, l'alimentation des monogastriques doit être spécifiquement adaptée en tenant compte des défauts, dont notamment celui de la lysine. En pratique, même si les connaissances à ce sujet sont de plus en plus précises [57], la solution la plus simple reste souvent de prendre une marge de sécurité au niveau des contraintes nutritionnelles et des données analytiques. Chez les ruminants à production moyenne, il est peu probable qu'un acide aminé soit limitant, car les protéines microbiennes couvrent à elles seules une part élevée, sinon la totalité, des besoins de l'animal et leur équilibre en acides aminés indispensables est correct pour la croissance et le lait. Par contre, des risques de déséquilibre existent chez les animaux à haut niveau de production.

## **E. Minéraux**

[52], [56], [73]

Les éléments minéraux sont classés qualitativement en macro<sup>1</sup> et oligo-éléments<sup>2</sup> selon les besoins des animaux. Il n'y a pas de différence inter-spécifique par rapport à ce classement. Certains aliments peuvent couvrir les besoins de quelques éléments, mais aucun n'est suffisant pour apporter la totalité des minéraux nécessaires, à plus forte raison pour des animaux à niveau de production élevé (vache laitière, poule pondeuse).

Les teneurs en macro-éléments dans les grains de sorgho sont comparables à celles des autres céréales. Comme elles, le sorgho-grain est carencés en la plupart des éléments minéraux.

---

<sup>1</sup> calcium, phosphore, magnésium, sodium, potassium, chlore, soufre.

<sup>2</sup> fer, zinc, manganèse, cuivre, cobalt, iode, molybdène, sélénium.

Pour les fourrages, les tables de l'INRA [56] ne comportent que les valeurs de concentration en calcium et en phosphore. On constate que la teneur en Ca est beaucoup plus élevée dans le fourrage que dans le grain de sorgho (Tableau 18).

**Tableau 18 - Teneurs en Ca et P dans le sorgho (en g/kg MS), d'après [56] et [100]**

	grains de sorgho	sorgho fourrager
Calcium	0,35	3,5 à 7,5
Phosphore	3,24	2,5 à 4

Le sorgho fourrager peut satisfaire les besoins en Ca et P de ruminants laissés à l'entretien. La digestibilité des minéraux apportés par les fourrages est assujettie au taux de lignification des parois, au même titre que l'énergie et les protéines. Ainsi leur disponibilité réelle est inférieure aux valeurs analytiques brutes exposées dans le Tableau 18 et ne suffit pas dans le cadre d'une production laitière ou d'une croissance, même modeste.

Le sorgho-grain peut être distribué aux monogastriques ou comme concentré pour les ruminants. Dans tous les cas, des complémentations sont nécessaires. L'apport de phosphore pose toujours davantage de problème que pour les autres éléments minéraux. Ce ne sont pas les solutions de supplémentation qui font défaut, mais leur utilisation doit être raisonnée sur deux plans : cet élément coûte beaucoup plus cher que le calcium ou le sodium et l'excès de phosphore dans une ration alimentaire est donc néfaste sur un plan économique pour l'élevage. Mais cela est également néfaste sur le plan écologique, car éliminé sous forme de phosphate il est polluant dans l'environnement.

La difficulté ne s'arrête pas là, car le phosphore contenu dans les grains est à 70% sous forme de phosphore phytique, c'est à dire inclus dans la structure moléculaire des ions phytates (facteur antinutritionnel dont l'importance est détaillée dans le chapitre III.G.2) et donc peu disponible pour l'animal qui les consomme, selon l'espèce. Les tiges et les feuilles des fourrages par contre ne contiennent pas de phytates.

Le sorgho ne contient quasiment pas de phytases endogènes, à la différence du blé et plus encore du seigle, dans lesquels ces enzymes améliorent beaucoup la disponibilité du phosphore et de nombreux autres oligo-éléments. Les porcs peuvent utiliser une petite partie du phosphore sous sa forme phytique. Les volailles ne l'utilisent pratiquement pas. Chez les ruminants, la flore du rumen produit des phytases bactériennes et permet ainsi à son hôte d'assimiler l'élément minéral libéré.

Tout cela justifie la nécessité de connaître la teneur de ces éléments dans l'aliment (Tableau 18), au même titre que les autres facteurs évoqués précédemment, afin de trouver les compromis les plus efficaces possibles en terme de complémentation.

## **F. Vitamines**

[52], [56], [73], [85]

Ces molécules sont caractérisées par des besoins faibles (généralement de l'ordre du ppm) en étant totalement indispensables, car elles jouent le rôle de cofacteurs dans un très grand nombre de réactions physiologiques. Les carences sont à l'origine de symptômes très

variables et généralement peu spécifiques. Les observations cliniques n'apportant au mieux que des présomptions.

Les concentrations alimentaires comme les besoins des consommateurs sont difficiles à déterminer avec précision. Les premières varient en fonction des conditions de culture, du traitement réalisé sur la plante ou de son mode de conservation. Enfin, les valeurs mesurées lors des analyses dépendent aussi de la méthode de dosage. Les chiffres de composition suivants servent donc surtout à déterminer une tendance. Les valeurs sont données pour le produit brut.

Le grain de sorgho est une source relativement riche de vitamines hydrosolubles du groupe B. Les concentrations de thiamine (vit. B1 = 4 ppm), de riboflavine (vit. B2 = 1,3 ppm) et de niacine (37 ppm) dans le sorgho sont comparables à celles du maïs. Les autres vitamines du complexe B présentes dans le sorgho en quantités significatives sont la pyridoxine (vit. B6 = 5 ppm), l'acide folique (0,19 ppm), l'acide pantothénique (12 ppm) et la biotine (vit. H = 0,23 ppm). [100]

Le sorgho-grain, consommé comme concentré, n'est pas source de vitamine C. Cela n'est important que pour les populations humaines qui le consomment, puisque seuls les humains, les primates et les cobayes ne synthétisent pas cette vitamine naturellement. On trouve par contre dans la graine de sorgho des quantités détectables de vitamines liposolubles, à savoir D, E et K. Leur concentration n'est pas très différente de ce qu'on trouve dans le maïs.

La vitamine A constitue, par contre, une différence notable, car le sorgho n'en contient pas du tout, à la différence du maïs. Certaines variétés de sorgho à endosperme jaune contiennent du bêta-carotène qui pourrait être transformé en vitamine A. Mais compte tenu du caractère photosensible des carotènes et de la variabilité due aux facteurs environnementaux, ce précurseur de la vitamine A est négligeable.

Dans le cas du fourrage, les données sont trop variables pour en tirer des moyennes exploitables. De plus, elles diminuent avec l'âge de la plante et au cours de la fenaison.

Les apports vitaminiques dans l'alimentation sont rarement suffisants, concernant les monogastriques, quelle que soit la vitamine et quel que soit l'aliment. Les ruminants, eux, profitent d'une synthèse importante de vitamines du groupe B, par leur flore digestive. Mais, de toute façon, les besoins des animaux changent selon la nature et le niveau de leur production, selon leur alimentation et selon leur état sanitaire... D'une manière générale, on supplémente donc toutes les rations, en se basant sur les recommandations de la littérature, qui incluent une marge de sécurité suffisante. L'objectif étant de satisfaire les besoins des producteurs les plus exigeants.

## G. Facteurs antinutritionnels

### 1. Les tanins

[44], [73], [81], [85]

On considère traditionnellement que les grains de sorgho sont dévalorisés par leur teneur en tanins. Ces molécules sont des polymères de polyphénols, à caractère hydrophile, de masse supérieure ou égale à 500 daltons. Il n'y en a pas dans les parties végétatives de la plante. Elles n'ont rien de spécifique au sorgho, mais le sont plus largement au règne végétal. Le thé, le raisin et le vin, consommés quotidiennement par la population humaine, en contiennent de grandes quantités. Il existe deux types de tanins, les uns hydrolysables, portant peu à conséquence ; les autres, dits condensés, étant défavorables sur le plan nutritionnel.

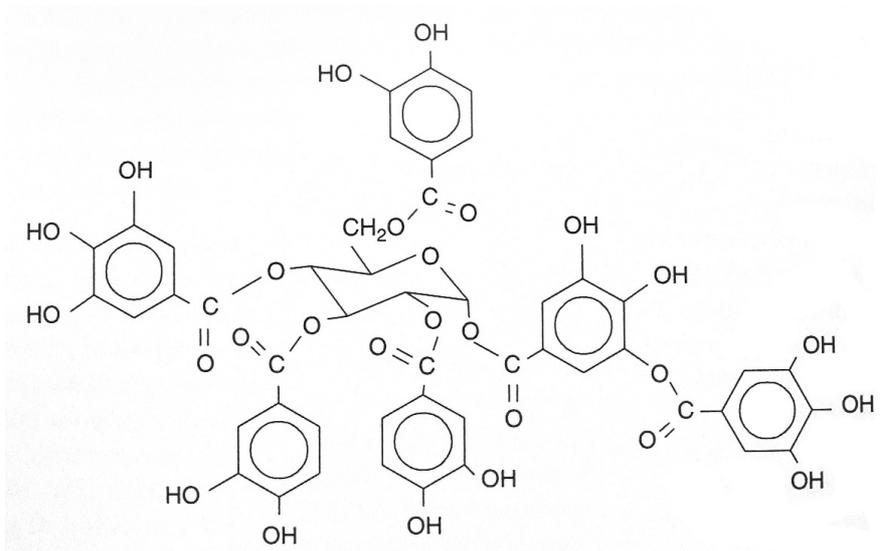


Figure 13 - Molécule de tanin hydrolysable, d'après [73]

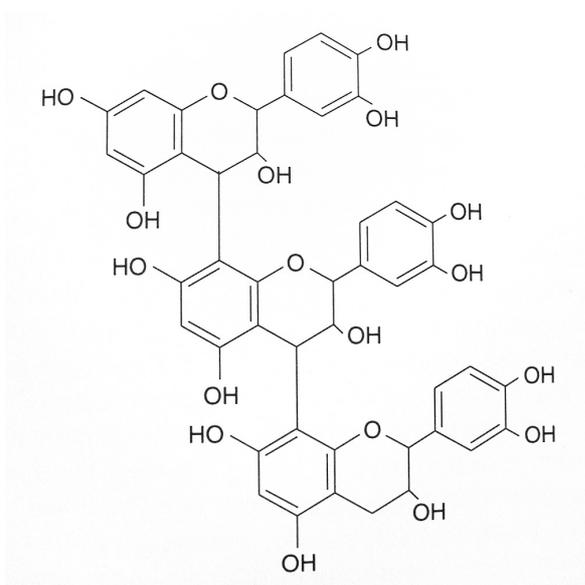


Figure 14 - Molécule de tanin condensé, d'après [73]

Les variétés de sorgho riches en tanins contiennent généralement le type condensé. La particularité de ces facteurs antinutritionnels est de se lier aux protéines et de les faire précipiter, au sein même de la graine puis, surtout, dans la lumière du tube digestif, formant ainsi des complexes résistants aux attaques enzymatiques. Cette propriété confère à l'aliment un caractère astringent et diminue ainsi fortement son appétence. La sensation de dessèchement de la muqueuse buccale, provoquée par la formation de complexes entre les tanins et les amylases salivaires, est donc fortement pénalisante dans le cadre de l'alimentation animale, car toute baisse d'ingestibilité diminue l'intérêt de l'aliment. Dans un ordre d'idée pour le moins comparable, l'astringence du sorgho a été une préoccupation importante pour l'industrie de la brasserie, en raison du renforcement de l'impression d'amertume qu'elle provoque, rendant la bière inconsommable...

La digestibilité des grains riches en tanins est également affectée, pour deux raisons :

- les nutriments complexés échappent à la digestion et sont perdus pour le consommateur ;
- l'activité des enzymes digestives, précipitant également avec les polyphénols, est diminuée.

Il est probable que la fuite de nutriments ainsi que la diminution de digestion enzymatique, outre les protéines, concerne également l'amidon et un certain nombre de glucides, des acides aminés isolés, des acides gras, des acides nucléiques et des minéraux. Bien que les quantités soient, dans ce cas, moins importantes.

Les tanins n'ont pas de fonction connue dans la croissance ni dans la reproduction de la plante. Mais dans les régions semi-arides, où à part les mils et les sorghos il est presque impossible de faire pousser quoi que ce soit efficacement, les cultures contenant des tanins sont les seules à ne pas être dévastées par les oiseaux. Il semble que cela protège aussi en partie contre le développement de moisissures.

On trouve d'autres composés phénoliques dans les grains :

- des acides phénoliques, libres ou liés sous forme d'esters, concentrés dans les couches extérieures de la graine ;
- des flavonoïdes, aussi appelés anthocyanines, qui sont les monomères polyphénoliques des tanins condensés. Ils sont universellement présent dans les végétaux terrestres, auxquels ils donnent des couleurs et des propriétés tinctoriales pour certains (voir chapitre I.F *étude générale du sorgho / utilisation*).

Ces molécules, comme les tanins, interviennent dans la capacité de la plante à empêcher en partie la croissance des moisissures sur ses graines. Et, bien qu'elles ne fassent pas précipiter les protéines, elles ont également un faible pouvoir antinutritionnel, qui s'ajoute à celui des tanins. [37]

Si, dans le cas des attaques de récoltes par les oiseaux, la présence des tanins est effectivement souhaitable, en zone tempérée, on ne subit pas ce genre de fléau, et les inconvénients se font plus sentir que les avantages. De nombreuses méthodes physiques ou chimiques de détoxification des grains riches en tanins ont été étudiées, avec relativement peu de succès. Soit par manque d'efficacité, soit en raison du coût financier trop élevé. La supplémentation en acides aminés porteurs de groupements -méthyl, et principalement la méthionine, accélère l'hydrolyse des tanins en glucide et acide 4-O-méthyl-gallique. Mais cela ne concerne que les tanins hydrolysables et non les condensés. De plus, il n'y a pas d'intérêt économique, là non plus, comparé à l'usage d'une autre céréale.

La seule véritable avancée en la matière est l'usage des variétés pauvres en tanins. Aujourd'hui, elles sont cultivées partout dans le monde où les conditions du milieu le permettent. C'est à dire où les oiseaux ne constituent pas un facteur de pertes majeures et à condition d'avoir une variété adaptée au couple photopériode/températures du terroir. En France, elles sont apparues dans les catalogues des semenciers au début des années 1980, avec

la variété Argence, qui existe toujours officiellement, bien que dépassée sur le plan agronomique par des hybrides plus récents. Annoncée comme "sans tanins", le succès de cette variété fut déterminant. Avec des valeurs alimentaires bien supérieures (voir chapitres V.B et V.C), tous les producteurs de sorgho ont cultivé des variétés "sans tanins" par la suite.

Il n'existe pas de publication officielle dans laquelle sont recensées les concentrations en tanins des variétés françaises de sorgho et les semenciers affirment simplement qu'il n'y a plus de tanins dans le sorgho [communication personnelle]. C'est presque vrai, mais cela mérite des précisions. Les variétés cultivées actuellement ont une concentration du facteur antinutritionnel non nulle, mais inférieure au seuil à partir duquel la valeur énergétique des grains est dépréciée [59]. Plusieurs études sur des porcs et des poulets placent ce seuil autour de 0,25% de tanins condensés dans les grains (soit 2,5 g/kg MS) [66], [73]. Il semble que les variétés de sorgho grain sucrier fassent exception à la règle, mais elles sont plutôt destinées à un usage en ensilage de la plante entière. [65]

Les valeurs du Tableau 19, relevées dans plusieurs publications, n'ont pas pour vocation de constituer un comparatif, d'autant qu'elles concernent des variétés quasiment plus (voire plus du tout) cultivées actuellement. Mais elles donnent un aperçu de la notion de "pauvres en tanins" (les auteurs utilisaient la méthode de dosage AFNOR dans les trois cas).

**Tableau 19 - Teneurs en tanins de plusieurs variétés françaises de sorgho, d'après [44], [28], [59] respectivement**

Variétés	Concentration en tanin dans les grains
Argence	0,23%
moyenne d'une enquête nationale en 1989 et 1990, sur plusieurs variétés (non précisées)	0,06%
Aralba, DK 34, DK 26, Taxus	< 0,05%

Le faible niveau de tanins qui persiste actuellement dans les grains ne perturbe pas la digestion normale des nutriments du sorgho.

## 2. Acide phytique

[52], [56], [73], [85]

L'acide phytique ou acide myo-inositol hexaphosphate est un phosphoglucide, un noyau myo-inositol substitué par 6 groupements dihydrogénophosphate et possédant ainsi 12 fonctions acide. Les phytates sont les anions de l'acide phytique. Les multiples charges négatives, qu'ils peuvent accumuler, leur confèrent une forte capacité de liaison, qui se traduit par la formation de complexes avec des protéines et des cations multivalents (notamment  $Ca^{2+}$ ) (Figure 15). Ces molécules constituent le principal stock de phosphore dans les grains des céréales en général (mais avec une grande variabilité intra-espèce) et l'ensemble est totalement insoluble au pH physiologique : le phosphore phytique, comme les minéraux complexés sont biologiquement indisponibles pour les monogastriques. Cela représente une influence notable sur les propriétés nutritives des aliments.

Dans la plante, seuls les grains contiennent de l'acide phytique. Pour le sorgho la proportion moyenne est de 70% de P phytique [100], ce qui correspond à 2,27 g de phosphore théoriquement indisponible par kg de matière sèche (et environ 8 g d'acide phytique /kg MS).

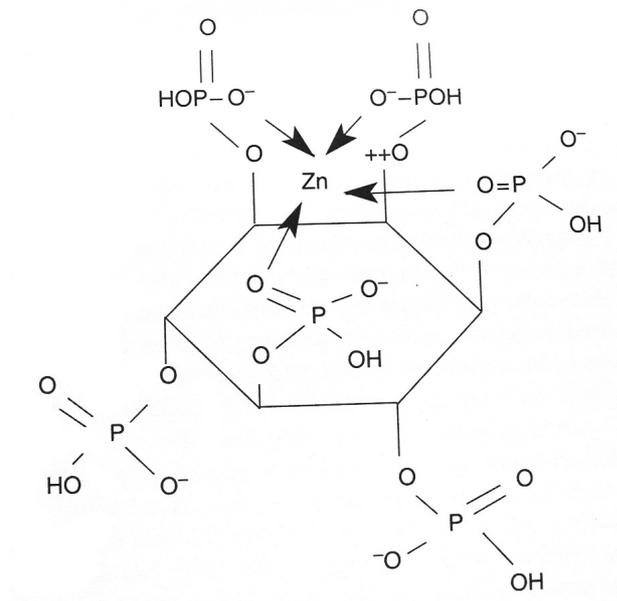


Figure 15 - Complexe de phytate et  $Zn^{2+}$ , d'après [73]

Cet état est maintenant bien connu et il n'y a plus de raison pour que les aliments industriels soient carencés à la suite d'une sous-estimation des besoins de supplémentation, du phosphore en premier lieu. Mais cette fuite pose quand même un double problème aux élevages porcins et avicoles :

- la perte de nutriments et d'oligo-éléments parfois onéreux, dans un contexte où les coûts de production sont déterminants pour la réussite de l'entreprise ;
- le passage dans les effluents de petites quantités de phosphates, s'ajoutant à la teneur déjà importante de ces polluants environnementaux.

Seule une attaque enzymatique permet d'hydrolyser les phytates et de libérer le phosphore (sous forme de phosphate) et les minéraux complexés, afin de les rendre disponibles pour le consommateur. Les ruminants profitent des phytases bactériennes actives dans leur rumen et valorisent ainsi bien mieux cette source de minéraux. Certaines espèces céréalières contiennent des phytases endogènes, la mieux pourvu étant le seigle. L'activité phytasique du sorgho est de 30 UI/kg [100], une valeur comparable à celle du maïs, mais qui est très faible voire négligeable comparée à celle du blé (de 250 à 1000 UI/kg) et surtout du seigle (plus de 5000 UI/kg). Pour donner un sens à ces valeurs, on peut noter que l'activité phytasique du blé tendre permet d'améliorer la disponibilité du phosphore de 15% (par rapport à la teneur brute des grains en P). [58], [109]

Sur ce principe, les industriels de l'alimentation animale peuvent faire le choix de compléter un mélange pour porcins ou volailles avec des phytases exogènes, fongiques notamment. D'autant plus que les phytases endogènes des matières premières sont en grande partie détruites, quand on leur applique des traitements thermiques, et qu'à activité in vitro égale, les phytases microbiennes se révèlent deux fois plus efficaces in vivo. Les avantages de cette méthode répondent bien aux problèmes évoqués plus tôt :

- puisque l'optimisation d'une source de P déjà présente permet de réduire la supplémentation;
- puisqu'on récupère également les oligo-éléments chélatés ;
- et puisqu'on réduit les fuites de phosphates dans les fèces. [12], [58]

D'autres composés du sorgho nuisent à son utilisation alimentaire, non pas en diminuant sa valeur nutritive, mais par une action toxique réelle pour le consommateur. Cela fait l'objet d'un chapitre spécifique (IV).

## H. Facteurs bénéfiques

[8]

Du fait de son importance dans l'alimentation humaine des populations tropicales, le sorgho a fait l'objet d'études qui ont permis de mettre en évidence, dans les grains, des facteurs bénéfiques pour la santé du consommateur. Aussi appelés éléments phytochimiques (traduction un peu simpliste du terme anglais *phytochemicals*), ce sont des produits non essentiels à une alimentation équilibrée mais apportant des améliorations sensibles sur la santé et le traitement des maladies. Tout comme pour le vin, les nombreux composés phénoliques du sorgho n'ont pas qu'une activité antinutritionnelle. Leur présence, ainsi que celle de phytostérols et de policosanols, confère au grain une activité anti-oxydante in vitro, comparable à d'autres fruits et céréales. Cela représente un potentiel certes restreint, mais pourtant non négligeable dans la prévention des maladies cardio-vasculaires, du cholestérol et de certains cancers, pour les humains comme pour les animaux.

En plus de ses bonnes qualités agronomiques, le sorgho a de très bonnes qualités nutritionnelles, comparables aux autres céréales sur de nombreux points. Il a aussi des imperfections, voire des défauts. Les sélectionneurs ont réussi à éliminer celui des tanins, mais d'autres points négatifs sont plus difficiles à contrôler car inclus dans un ensemble de caractères interagissant parfois négativement entre eux. Dans ces situations, le choix du compromis est parfois plus efficace que la recherche de performances.





## IV. Toxicité du sorgho

La toxicité potentielle du sorgho est connue depuis l'Antiquité et a été étudiée en détail depuis. Si la connaissance des valeurs alimentaires est indispensable sur les plans zootechnique et économique, des erreurs d'appréciation du risque d'intoxication par l'acide cyanhydrique ou par les nitrates ont des conséquences d'ordre médical, immédiates et sévères.

### A. Toxicité cyanhydrique

#### 1. Etude de l'agent toxique

[80], [97]

Les sorghos font partis d'un groupe très vaste de plantes, dites cyanogénétiques, qui synthétisent, pendant une période de leur développement, un hétéroside porteur d'un groupement cyanyle (-CN) (Figure 16). L'hydrolyse de ces molécules, par l'action d'une glucosidase, libère de l'acide cyanhydrique (HCN), connu comme l'un des produits les plus toxiques qui soient. Il existe plusieurs dizaines d'hétérosides cyanogénétiques différents.

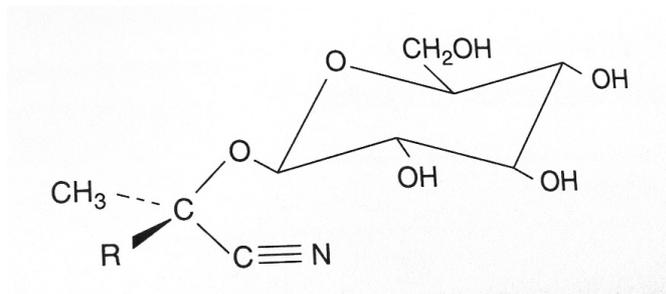


Figure 16 - Structure de base des hétérosides cyanogénétiques, d'après [73]

L'hétéroside du sorgho est propre à cette plante : il s'agit de la durrhine (Figure 17). Cette molécule fut isolée pour la première fois en 1902.

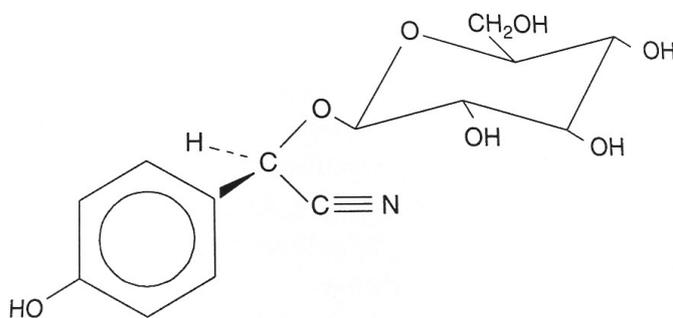


Figure 17 - Molécule de durrhine, d'après [73]

## a) Origine

[3], [80]

Les plantes cyanogénétiques sont très nombreuses, en particulier parmi les spermaphytes (qu'elles soient sauvages, cultivées ou ornementales). Mais on en trouve aussi parmi les fougères, sous certaines conditions, parmi les champignons ou les algues. En tout, plus de 2650 espèces sont répertoriées comme telles. [22]

Le laurier-cerise, plante ornementale accidentellement consommée par les herbivores, et le manioc, aliment primordial pour de nombreuses populations humaines des zones tropicales, sont des exemples d'autres plantes cyanogénétiques très répandues et susceptibles de provoquer de graves intoxications.

La fonction précise des hétérosides cyanogénétiques pour la plante est toujours inconnue : on sait qu'ils constituent une étape intermédiaire de certaines chaînes de synthèse d'acides aminés (la durrhine est issue de la tyrosine), mais on sait également qu'ils ne sont pas indispensables au développement normal de la plante dans laquelle on les trouve. [22], [45]

La durrhine existe dans toutes les espèces de sorghos cultivés ou sauvages. On la trouve dans les parties vertes du végétal, feuilles et tiges, les grains matures n'en contiennent pas (par contre, aucun auteur ne précise que les grains non matures n'en contiennent pas). La durrhine, comme les hétérosides cyanogénétiques en général, n'a pas de toxicité propre, mais c'est l'acide cyanhydrique, qu'elle libère par hydrolyse, qui est particulièrement dangereux.

Cette réaction a lieu en deux temps :

- l'intervention d'une  $\beta$ -glucosidase, spécifique de l'hétéroside, catalyse la libération de glucose et de para-hydroxy-mandélonitrile ;
- le nitrile est ensuite hydrolysé par l'hydroxymandélonitrile lyase (ou plus simplement oxynitrilase) en para-hydroxy-benzaldéhyde et acide cyanhydrique. Bien que cette deuxième hydrolyse se produise aussi spontanément, en milieu basique et à température ambiante. [45]

Dans une plante en bon état, il y a généralement très peu de HCN sous forme libre (c'est d'autant plus important qu'il est dangereux pour la plante elle-même). La durrhine est intégralement stockée dans les cellules épidermiques du sorgho, alors que le couple d'enzymes responsables de son hydrolyse se trouve presque exclusivement dans le mésophylle. L'utilisation de l'hétéroside dans le métabolisme général de la plante sous-entend donc qu'il existe des transferts moléculaires d'un tissu à l'autre. Un dégagement massif de HCN se produit si la plante est broyée : par piétinement ou par la mastication, par exemple. [63]

## b) Concentration dans la plante

[3], [97]

Pour évaluer la toxicité des plantes cyanogénétiques, on procède à une digestion enzymatique de l'hétéroside puis à un dosage de HCN libéré. Les résultats d'analyses sont donc exprimés en concentration de HCN dans la plante. [113]

Il n'existe pas actuellement en France de "recensement" officiel du potentiel toxique des différentes variétés de sorgho, comme c'est le cas pour d'autres informations qu'on trouve dans le *catalogue français des espèces et variétés* [43], par exemple. Il est possible que la variabilité de ce potentiel soit un obstacle important à l'élaboration d'une telle synthèse. Il n'y a pas de recherches en cours à ce propos, en tout cas, au sein des organismes que j'ai

contactés. Les communications technico-commerciales des semenciers font parfois mention de cette toxicité, mais restent très vagues, se contentant au mieux d'une comparaison de leur produit avec la variété Piper, considérée comme la moins toxique connue, ou d'une simple mention "ne pas faire pâturer". [communication personnelle]

La toxicité du sorgho varie au gré de nombreux facteurs intrinsèques :

- l'espèce : les *S. sudanense* sont moins toxiques que les *S. bicolor* ;
- la variété : d'une manière générale, les variétés de petite taille et les variétés les plus tardives sont plus toxiques. La toxicité des sorghos est conditionnée par au moins 5 gènes différents, mais la sélection sur ce critère est rendue complexe, car l'expression de ces gènes est influencée par d'autres caractères génétiques (précocité de maturité entre autres) et modifiée par des facteurs environnementaux [22]. Les différences variétales dépassent parfois les différences spécifiques ;
- l'individu : des variations individuelles ont été constatées par de nombreux auteurs. Il est possible de mesurer des différences de teneur parfois importantes entre des plantes cultivées côte à côte, dans les mêmes conditions, et cueillies au même moment et au même âge ;
- l'âge de la plante est le facteur le plus important. Pour tous les végétaux cyanogénétiques et le sorgho en particulier, le potentiel cyanhydrique passe par un maximum puis diminue avec l'âge à partir d'un certain stade, variable selon les espèces. Chez les sorghos, ce stade se situe aux environs du 40<sup>e</sup> jour, pour une taille de 40 cm environ. Puis le taux de durrhine diminue jusqu'à la pleine épiaison pour se stabiliser ensuite à un niveau minimum [90] ;
- la localisation dans la plante : les feuilles du sommet, donc les plus jeunes, sont beaucoup plus toxiques que les inférieures, elles mêmes plus toxiques que la tige qui les porte. De même, la moitié distale de ces feuilles concentre plus de durrhine que la moitié proximale. Par conséquent, le testage d'échantillons portant seulement sur les feuilles ne peut convenir à l'évaluation de la teneur en HCN des plantes entières, car la valeur serait ainsi surestimée. [45]

Les deux derniers facteurs se rejoignent. Il est possible que la diminution dans le temps, du taux de durrhine dans le sorgho, soit attribuable à l'augmentation du poids des parties de plantes à faible teneur (tissus lignifiés).

La variété Piper (*S. sudanense*) est peut être la moins toxique parmi les sorghos cultivés. A titre de référence, sa teneur en HCN a déjà été mesurée à 40 mg/kg de matière verte, dans une plante de 50 cm de hauteur. Et il y a très peu de différence entre les feuilles du haut en bas de la tige [97]. D'une manière générale, on considère que les sorghos fourragers peuvent être consommés par les animaux, s'ils mesurent au moins 70 cm de hauteur et qu'ils n'ont pas subi de conditions de culture défavorables. [51]

### c) Facteurs de risque

[3], [62], [97], [102]

Comme toute plante, le sorgho est dépendant de l'environnement dans lequel il pousse et cela influe également sur le potentiel toxique de ses feuilles.

La toxicité est liée, sinon proportionnelle, à l'activité anabolique des cellules de la plante, plus exactement au métabolisme azoté dans les feuilles en croissance. Ainsi, plus la maturité est précoce, plus tôt l'accumulation de durrhine est ralentie, plus tôt commence la diminution naturelle de la concentration en hétéroside, plus vite la plante est consommable. Mais, à l'inverse, tout facteur extérieur susceptible :

- de retarder la croissance
- d'entraîner une reprise de croissance rapide
- d'exacerber le métabolisme azoté

se révèle néfaste.

La sécheresse retarde la croissance et des pieds rabougris peuvent concentrer 2,5 fois la teneur normale en durrhine, à un âge donné.

Les lésions infligées aux plantes par piétinement, par exemple, mais aussi par les insectes, retardent leur croissance et favorisent une activité métabolique supplémentaire, nécessaire à la cicatrisation des tissus.

En cas de chute de la température, tant que celle-ci reste supérieure à 0°C, on ne note aucune augmentation de teneur en durrhine. Mais si la dépression se prolonge, la croissance est bien sûr retardée ainsi que la dilution du facteur toxique. A l'apparition des gelées, de 0° à -2°C, la teneur en durrhine augmente parfois nettement. Toutefois, il est difficile d'en mesurer l'amplitude et la durée, car cela dépend de l'alternance de ces gelées et des redoux. Si l'épisode de froid est unique et court, on mesure une augmentation du taux d'HCN de 1 à 6 jours après la gelée. La teneur passe alors par un pic, souvent égal au double de la valeur initiale, puis diminue à un taux plus bas que celui qui précédait le gel. Les effets d'un gel plus important, avec des températures inférieures à -5°C, sont différents : les plantes sont gelées et meurent, on assiste alors à une diminution rapide de la teneur en HCN, qui finit par devenir nulle.

La pluie qui met fin à une longue période de sécheresse marque une reprise de croissance et de toxicité très importante pour la plante. C'est un événement sur lequel il faut porter la plus grande attention.

Les regains, après la fauche ou le pâturage, sont plus toxiques que les thalles du cycle précédent, en raison de la reprise intensive de la croissance et de la cicatrisation des tissus.

La photosynthèse, source d'énergie du végétal et liée à l'ensoleillement, donne un rôle important à ce dernier. Ainsi les réactions anaboliques, et donc la concentration en durrhine, passent par un maximum en milieu de journée. La mesure de teneur en HCN peut alors être jusqu'à 30% plus élevée que les valeur du matin ou du soir.

Enfin, la nature du sol constitue une influence notable. En particulier, par la teneur en nitrates que le sorgho peut y trouver. La molécule azotée exerce une influence sur l'activité des enzymes responsables de la synthèse de durrhine (Tableau 20). Cette influence est d'autant plus perceptible quand la plante est âgée et ne devrait plus, à priori, accumuler d'hétéroside cyanogénétique. L'apport de nitrates fait pourtant à nouveau augmenter le potentiel toxique du sorgho. [22], [90], [117]

**Tableau 20 - Influence de l'apport en KNO<sub>3</sub> sur la toxicité de la plante de sorgho, d'après [90]**

Teneur du sol en nitrates	Stade de développement du sorgho	Teneur en HCN (en ppm dans la plante fraîche)
très pauvre	40 cm et fleurie	0
moyen	130 cm à l'épiaison	20
très riche	210 cm presque à maturité	90

Les traitements herbicides ont le même type d'effet. L'utilisation de produits comme le 2,4-D impose un temps d'attente de plusieurs jours, avant de pouvoir exploiter le sorgho traité.

Ces facteurs extrinsèques à la plante doivent donc être pris en compte avec sérieux, en particulier l'alternance sécheresse / pluie. Mais il ne faut pas oublier que le facteur variétal reste quand même le plus déterminant de tous et dépasse les influences du milieu extérieur. [97], [117]

#### **d) Facteurs d'amélioration**

[3], [97]

La diminution de toxicité du sorgho pour les herbivores peut être abordée par deux voies différentes : favoriser la diminution de la teneur en durrhine dans la plante ou empêcher les animaux de consommer une trop grande quantité du précurseur toxique.

Pour favoriser la diminution de la teneur en durrhine dans le sorgho, l'apport de phosphates dans le sol est conseillé, car on a observé qu'ils ont l'effet inverse des nitrates.

Dans le cadre d'une exploitation en vert, la croissance de la plante au delà de la floraison ne constitue pas une assurance, mais réduit fortement le risque. Il faut se montrer par contre très prudent vis à vis des repousses. Les pratiques de conservation sont très bénéfiques en ce sens, car l'HCN est très volatil. Il se disperse donc dans l'atmosphère après l'hydrolyse enzymatique de la durrhine. C'est notable lors de la fenaison, et encore plus marqué avec l'ensilage. Cela s'ajoute qu'au fait que, généralement, on ensile des plantes quand elles ont atteint une certaine maturité. Toutefois, si la valeur initiale était très élevée, de l'acide cyanhydrique libre peut se dégager au cours des manipulations précédant la distribution aux animaux. Il est donc conseillé de pelleter l'ensilage un moment avant de le distribuer.

Pour empêcher les animaux de consommer une trop grande quantité du précurseur toxique, il faut avant tout ne pas faire consommer les plantes à végétation retardée ainsi que les plantes abîmées. En été, il est préférable de ne pas laisser les animaux pâturer pendant la journée. Ces précautions permettent de contourner les facteurs de risque.

On peut également agir dans le but de "diluer" le fourrage toxique, en lestant les animaux avec d'autres aliments. Cela permet d'éviter une consommation excessive et trop rapide de sorghos (la question de la vitesse d'ingestion joue effectivement un rôle, qui est détaillé dans le chapitre IV.A.2.d)). La teneur en durrhine n'est pas répartie uniformément dans la plante et la dose toxique peut être dépassée si, au pâturage, certains animaux ne consomment que les feuilles les plus jeunes. La distribution à l'auge de plantes fauchées limite le tri et augmente la consommation des tissus végétaux moins appétants, mais moins toxiques.

Enfin, si le doute subsiste, il est intéressant de faire analyser un échantillon du fourrage pour connaître la valeur exacte de sa teneur potentielle en HCN, et pouvoir l'utiliser avec un maximum de sécurité. [102]

## **2. Etude clinique de l'intoxication cyanhydrique**

### **a) Appréciation du danger**

[50]

L'intoxication par l'acide cyanhydrique est extrêmement grave, et touche avec la même sévérité toutes les espèces animales et les humains. Dans le cas où l'origine du toxique est la plante de sorgho, on peut considérer que cela ne concerne que les herbivores.

### **b) Toxicocinétique**

[23], [50], [80]

L'hydrolyse de la durrhine et la libération d'HCN commence lors du broyage de la plante, qui permet le mélange avec les glucosidases du mésophylle.

#### Absorption

L'acide cyanhydrique libre diffuse à travers la peau et les muqueuses. L'absorption gastro-intestinale et le passage dans la circulation générale sont très rapides.

L'inhalation de HCN sous forme gazeuse est encore plus remarquable et comparable à l'administration par voie intra-veineuse : la mort est foudroyante.

#### Distribution

HCN garde sa forme acide au pH sanguin et diffuse à travers les membranes cellulaires et la barrière hémato-méningée. Le toxique est distribué très rapidement à tous les organes richement vascularisés.

#### Transformation

En premier lieu, HCN réagit avec HCl dans le milieu acide de l'estomac des monogastriques. Ils forment ainsi de l'acide formique, toxique moins dangereux que HCN.

In vitro comme in vivo, HCN réagit avec la cystéine pour former l'acide 2-iminothiazolidine-4-carboxylique, molécule sans conséquence pour l'organisme.

Au niveau du sang, une partie de l'acide cyanhydrique est séquestré dans les hématies, où les molécules établissent des liaisons faibles avec l'hémoglobine et surtout la méthémoglobine (forme oxydée de l'hémoglobine, naturellement présente dans l'organisme à hauteur de 1 à 2% de la quantité d'hémoglobine totale [103]). La cyanhémoglobine et la cyanméthémoglobine sont des complexes instables et n'empêchent pas suffisamment la diffusion de HCN pour stopper l'intoxication. Mais cette affinité joue un rôle de tampon et fait gagner un peu de temps à l'organisme, qui se détoxique par une 4<sup>e</sup> voie.

La voie essentielle de détoxication est celle des thiocyanates (SCN<sup>-</sup>), qui sont 200 fois moins toxiques que HCN. Cette réaction est catalysée par une enzyme, la thiosulfate-sulfur-

transférase ou rhodanèse, et se produit principalement dans le foie. Cependant d'autres organes tels que le rein et les muscles contiennent également cette enzyme. Elle nécessite un donneur de soufre, comme la méthionine ou la cystéine.

Signalons également que l'hydroxocobalamine (forme modifiée de la vitamine B<sub>12</sub>) fixe avidement HCN pour donner de la cyanocobalamine (vitamine B<sub>12</sub>) et que cette réaction est une autre voie utilisée pour le traitement médical de l'intoxication (voir chapitre IV.A.2.h)).

### Elimination

Les voies principales d'élimination sont au nombre de 4 : respiration, miction, défécation, éructation.

La voie respiratoire permet d'éliminer HCN libre (odeur d'amande amère dans le souffle de l'animal au moment de l'agonie), mais de façon trop lente pour détoxifier l'organisme. L'acide formique est métabolisée en CO<sub>2</sub>, mais cette participation concerne moins de 2% du toxique initial.

L'éructation permet aux ruminants d'éliminer également HCN libre.

La voie urinaire est sans aucun doute la plus importante pour éliminer :

- HCN libre, mais cela ne concerne que quelques espèces (rat, chien, humain) ;
- l'acide 2-iminothiazolidine-4-carboxylique, qui représente jusqu'à 15% du toxique initial ;
- la cyanocobalamine, avec une capacité de détoxification de l'ordre de 50% ;
- les thiocyanates, qui passent également par voie fécale et emportent 80% (en cumulant les 2 voies) de l'acide cyanhydrique initialement absorbé. On trouve aussi des thiocyanates dans la sueur, la salive et surtout dans le lait, mais cela ne le rend pas inconsommable.

Ces différentes voies de détoxification permettent au mouton d'éliminer 2 mg d'HCN par kg de poids vif et par heure.

### **c) Mécanisme d'action toxique**

[50], [97]

Les ions CN<sup>-</sup> libérés par HCN ont une très grande affinité pour les ions Fe<sup>3+</sup> et Cu<sup>2+</sup> que l'on trouve dans de nombreuses enzymes ou coenzymes. Ainsi en ajoutant de l'acide cyanhydrique au milieu dans lequel se trouvent des coupes de tissus vivants ou des suspensions de cellules, on peut constater la diminution, puis l'arrêt, de consommation d'oxygène de la préparation. Ce phénomène se produit avec toutes les cellules, qu'elles soient animales ou végétales. Il est dû à l'inhibition des oxydations aérobies des cellules par l'acide cyanhydrique, qui agit au niveau de la cytochrome oxydase. Cette ferro-cuproprotéine est le dernier maillon de la chaîne respiratoire : elle oxyde le cytochrome c pour pouvoir réduire le dioxygène, accepteur final d'électrons.

La cytochrome oxydase est présente dans toutes les cellules, ce qui explique la toxicité universelle de HCN. Cependant, les différents tissus n'ont pas tous la même sensibilité à une concentration donnée de HCN. Les organes les plus riches en enzymes et ayant la plus grande activité respiratoire sont les plus sensibles : en 1<sup>er</sup> lieu la rétine et le cerveau, secondairement le cortex rénal, puis les muscles, le foie, le cortex surrénal. Les symptômes dominants de

l'intoxication cyanhydrique sont d'ordre respiratoire et nerveux, en raison de la haute sensibilité du myélocéphale, siège des fonctions autonomes de l'organisme.

L'atteinte de la cytochrome oxydase explique pourquoi l'évolution de la clinique peut être aussi brutale, comparée à celle de l'asphyxie : lors de celle-ci, la chaîne respiratoire s'arrête au bout de quelques minutes après avoir épuisé toute trace d'oxygène disponible. CN<sup>-</sup> provoque un blocage instantané de la chaîne respiratoire, ne laissant à la cellule que la faible réserve d'ATP dont elle dispose et qu'elle épuise en quelques secondes (voire dixièmes de seconde) [103]. Dès lors, tout s'enchaîne par interactions physiologiques et métaboliques : les modifications de rythmes cardiaque et respiratoire, d'origines centrales, provoque une alcalose respiratoire par l'hyperventilation initiale. Cela se transforme rapidement en acidose métabolique, due à l'accumulation d'acide lactique, produit par le métabolisme cellulaire anaérobie. Enfin la défaillance cardiaque terminale provient de l'action directe de l'acide cyanhydrique.

#### d) Dose toxique

[23], [80], [97]

La toxicité de l'acide cyanhydrique et de ses plus proches dérivés est très élevée (Tableau 21). On observe une sensibilité légèrement variable au cyanure de potassium, chez les animaux domestiques : les équins sont plus sensibles que les ruminants. Il existe également une variabilité propre à la voie d'absorption : la voie orale réduit de 5 à 10 fois la toxicité.

**Tableau 21 - Doses létales du KCN par injection parentérale et par voie orale, d'après [97]**

	Injection parentérale	Administration orale
Cheval	1 mg/kg PV	4 à 8 g/animal
Bovins	1,5 à 2 mg/kg PV	6 à 8 g/animal
Ovins	2 à 2,3 mg/kg PV	-

Mais il convient de différencier la toxicité de l'acide cyanhydrique libre de celle de l'acide cyanhydrique libérée par hydrolyse d'un hétéroside cyanogénétique. En effet, dans le cas du sorgho, les ruminants sont plus sensibles à la durrhine que le cheval.

Chez les monogastriques, le pH acide de l'estomac détruit les glucosidases endogènes de la plante cyanogénétique. En même temps, une partie des molécules HCN, libérées sous l'effet de la mastication, réagit avec HCl du contenu stomacal pour devenir de l'acide formique.<sup>1</sup>

A l'inverse, dans un rumen, le milieu aqueux au pH proche de la neutralité est favorable à l'hydrolyse rapide de l'hétéroside. De plus, la flore ruminale fournit des glucosidases bactériennes qui accélèrent la libération de l'acide cyanhydrique.

Dans ces conditions, la dose létale orale de HCN, initialement sous forme d'hétéroside, se situe donc à 2 mg/kg PV.

<sup>1</sup> Sur ce principe, la cuisson du manioc n'élimine pas l'hétéroside du tubercule, mais doit permettre, en théorie, de détruire les glucosidases et de disperser l'acide cyanhydrique volatil, pour le manger en toute sécurité.

En imaginant 2 sorghos fourragers, dont la teneur en HCN est connue, on peut illustrer cette estimation par la correspondance en masse de fourrage (ou matière verte MV) nécessaire pour tuer un bovin de 600 kg et un ovin de 50 kg (Tableau 22).

**Tableau 22 - Estimation simplifiée de la quantité létale de 2 fourrages**

	Fourrage 1	Fourrage 2
hauteur du sorgho	50 cm	85 cm
concentration en HCN	90 mg/kg MV	50 mg/kg MV
quantité létale de fourrage pour un bovin	13,3 kg MV	24 kg MV
quantité létale de fourrage pour un ovin	1,1 kg MV	2 kg MV

Mais ce calcul ne tient pas compte du temps, nécessaire à l'ingestion de l'aliment, pendant lequel l'organisme élimine une partie de HCN ingéré, par les différentes voies d'élimination. Un mouton élimine 2 mg de HCN /kg PV en une heure.

Dans le cas d'une ingestion lente, la dose létale de HCN (durrhine) en fonction du temps, pour le mouton, est d'environ 4,5 mg/kg PV/h.<sup>1</sup>

En appliquant ces estimations à la consommation d'un bovin, au pâturage dans des conditions normales, on peut conclure :

la teneur létale en HCN dans le sorgho est située autour de 200 mg/kg MV.<sup>2</sup>

Le Tableau 23 donne une échelle de toxicité du sorgho fourrager en fonction de sa teneur en HCN.

**Tableau 23 - Echelle de toxicité du sorgho fourrager, d'après Hugues, cité par [97]**

teneur en HCN en ppm de MV (15% MS)	toxicité probable
0 à 40 mg/kg	toxicité très faible
40 à 75 mg/kg	toxicité faible
75 à 115 mg/kg	toxicité moyenne (douteuse)
115 à 150 mg/kg	toxicité forte (dangereuse)
plus de 150 mg/kg	toxicité très forte (très dangereuse)

Ces données ne peuvent être précisées davantage, car la sensibilité des animaux au toxique ne varie pas uniquement sur des critères d'espèce. Mais également selon l'état de santé individuel, selon les autres aliments préalablement ingérés et selon une possible accoutumance. En trois semaines, on peut augmenter progressivement les doses de fourrage toxique pour atteindre une dose à priori létale, sans symptômes d'intoxication.

<sup>1</sup>  $2,3 + 2 \approx 4,5$

<sup>2</sup> 50 à 60 kg de fourrage par jour, consommés en 8 heures, soit environ 7 kg/h, par un bovin de 500 kg.  
Dose létale de HCN sur une heure :  $500 \times 3 \text{ mg/kg PV/h} = 1500 \text{ mg/h}$ . (3, car le bovin est plus sensible)  
Teneur létale du foin en HCN :  $1500 / 7 \approx 200 \text{ mg/kg}$

De plus, même si les plantes contiennent rarement d'acide cyanhydrique libre, une mauvaise méthode de récolte peut favoriser l'hydrolyse préalable de la durrhine et rendre HCN disponible immédiatement pour l'animal. La toxicité du fourrage est alors plus élevée pour la même quantité d'hétéroside cyanogénétique au départ. Ainsi, par exemple, le hachage des plantes avec une ensileuse amène à distribuer un aliment dont on a fortement augmenté l'ingestibilité, mais également la teneur en HCN libre. Les conditions sont réunies pour provoquer un accident. [68]

### e) Symptômes et lésions

[23], [55], [62], [68], [97]

Une forme suraiguë est produite par administration et absorption rapide d'une dose fortement supérieure à la dose létale. Elle provoque la mort en une à deux minutes par inhibition brutale des centres de la moelle allongée. On n'observe presque aucun symptôme.

Dans le cas d'un sorgho à la toxicité particulièrement élevée, le temps de latence, avant apparition des premiers symptômes, peut se réduire à ¼ d'heure après la mise au pâturage. L'animal présente alors d'importants troubles

respiratoires : dyspnée et polypnée ;

nerveux : ataxie et tremblements évoluant vers des convulsions. On note alors une posture en opisthotonos, des yeux réversés et en mydriase, les muscles présentent des contractions cloniques et toniques successivement ;

digestifs : sialorrhée, vomissements, relâchement des sphincters anal et vésical, tympanisme (non systématique) ;

circulatoires : tachycardie puis bradycardie, turgescence des veines jugulaires, muqueuses congestionnées de couleur rouge clair.

Puis le tonus musculaire s'inverse et devient paralysie flasque, la température corporelle chute autour de 36°C, la respiration ralentit jusqu'à devenir agonique avant de s'arrêter, précédant de peu l'arrêt cardiaque.

Si la dose de toxique absorbé est moins importante, les mêmes symptômes avec une expression moindre sont observés. La dyspnée est de type expiratoire (extension de l'encolure et participation des muscles abdominaux), avec une légère baisse de la fréquence, qu'on explique par une hypocapnie et une alcalose respiratoire. Dans ce cas, la guérison est possible et l'animal récupère en quelques heures sans séquelles.

Les lésions observées lors d'une autopsie sont difficiles à caractériser.

Extérieurement, on note un œil brillant à la pupille dilatée.

Au niveau interne, il est probable de trouver une congestion généralisée de tous les organes et notamment un œdème pulmonaire. Ces signes, accompagnés de pétéchies, d'hémorragies sous-épithéliales, voire d'un signe de l'araignée sur le tissu sous-cutané, ne permettent que de

conclure à une anoxie tissulaire et la mort par asphyxie. Le plus remarquable étant la coloration rouge vif du sang artériel et veineux, mais cela peut ne pas apparaître, dans le cas d'évolutions lentes. Chez les ruminants, le contenu du rumen a une odeur d'amande amère.

Il n'y a pas d'hémolyse, mais l'histologie peut révéler une concentration élevée de pigments ferriques dans les organes et une atrophie des cellules nerveuses au niveau du myélocéphale.

L'étude des lésions ne sera donc que d'un faible secours à l'établissement du diagnostic, les lésions microscopiques étant difficiles à identifier et les lésions macroscopiques n'étant pas spécifiques.

## **f) Diagnostic différentiel**

[55], [92]

Les circonstances habituelles de cette intoxication font qu'elle implique généralement plusieurs animaux, exprimant des signes cliniques spectaculaires, avec des commémoratifs de consommation de sorgho, mais ceux-ci ne sont pas nécessairement fournis lors de la découverte du cas (consommation de *S. halepense* passé inaperçu dans un pré, par exemple).

Les hypothèses à inclure dans le diagnostic différentiel comportent les intoxications par les méthémoglobinisants, les inhibiteurs des cholinestérases, les organochlorés, le métaldéhyde. Et également des affections non toxicologiques telles que les entérotoxémies, à écarter à l'autopsie, l'œdème et l'emphysème pulmonaires aigus, qui sont en général moins alarmants.

Un tableau clinique aussi atypique qu'un animal présentant de façon isolée des symptômes frustes, peut apparaître chez un éleveur connaissant bien le sorgho et prenant suffisamment de précautions pour éviter les conditions "normales" d'intoxication. Il faut, dans ce cas, distinguer les symptômes liés à HCN d'autres atteintes plus individuelles : l'anaphylaxie ou des troubles métaboliques tels que hypocalcémie, hypophosphorémie, hypokaliémie (bien que les troubles respiratoires ne soient pas habituels lors de troubles métaboliques).

## **g) Examens complémentaires**

[18], [64], [116]

Si l'animal est vivant, une simple prise de sang veineux permet d'observer un sang de couleur rouge vif, caractéristique d'une hyper-oxygénation, due à l'arrêt de la respiration cellulaire.

Si l'animal est mort, le diagnostic expérimental peut servir à mettre en évidence le toxique : dans le contenu digestif ou dans les organes des cadavres.

La rapidité d'évolution est telle qu'une grande partie de la source toxique se trouve encore dans le rumen ou l'estomac et le duodénum après la mort, surtout dans le cas de plantes cyanogénétiques. Mais la présence de glucosidase et la volatilité de HCN impliquent de prendre certaines conditions de prélèvement. L'immersion des prélèvements dans une solution de chlorure mercurique à 1 à 3% permet de bloquer les enzymes responsables de l'hydrolyse des hétérosides. On peut également se contenter de congeler les prélèvements s'il est possible de le faire rapidement après l'autopsie.

Malgré la présence résiduelle d'une quantité importante du toxique dans le tube digestif, la diffusion du toxique est suffisamment rapide pour qu'on puisse le mettre en évidence dans la plupart des tissus. Il faut par contre trouver des quantités suffisantes de HCN pour conclure à la mort par intoxication cyanhydrique, car il n'est pas rare de trouver ce toxique chez des animaux morts d'une toute autre cause. Dans les cadavres en putréfaction, des traces d'HCN apparaissent durant les 7 premiers jours. Elles seraient dues à la présence de *Pseudomonas*, *Citrobacter* et *Proteus alkaligenes* qui peuvent libérer de l'acide cyanhydrique.

Si la mort de l'animal est suffisamment récente, le foie est l'organe le plus représentatif de la quantité d'HCN ingéré. Il concentre environ 40% de la concentration toxique initiale (pour l'animal). Ainsi un résultat de 1,4 ppm d'HCN dans le foie permet de conclure que la molécule est responsable de l'empoisonnement de l'animal, dans un contexte épidémiologique ou clinique évocateur. Dans un contenu ruminal, en raison de l'activité des *Pseudomonas*, le seuil devrait plutôt être placé à environ 10 ppm.

En cas d'examen post-mortem un peu tardif, il vaut mieux rechercher HCN sur du tissu musculaire, où les altérations cadavériques sont moins rapides. Le chlorure mercurique, en solution à 1%, permet de conserver aussi les tissus animaux.

La réaction de Guignard, avec utilisation de bandelettes de papier picrosodé, est souvent citée dans la littérature, pour la mise en évidence de HCN dans un prélèvement. C'est une réaction très spécifique et semi-quantitative, mais par contre peu sensible. Elle est surtout complexe à mettre en oeuvre et donc difficile à réaliser sur le terrain.

En conclusion, les trois valeurs à retenir et qui permettent de conduire au diagnostic d'intoxication cyanhydrique :

- teneur des plantes ingérées > 500 ppm de MS ;
- teneur du contenu du rumen  $\geq$  10 ppm ;
- teneur du foie  $\geq$  1,4 ppm.

## **h) Traitement**

[50], [55], [62], [68], [97]

Les possibilités de traitements, quand l'évolution n'est pas trop rapide, sont réparties en 3 catégories :

- les dérivés soufrés, pour accélérer la voie des thiocyanates ;
- les méthémoglobinisants, pour augmenter la capacité de tampon de l'hémoglobine entre HCN et la cytochrome oxydase, car HCN a plus d'affinité avec la forme oxydée du couple Hb/metHb ;
- les sels et complexes cobaltiques, pour chélater efficacement le toxique.

Parmi les dérivés soufrés, le **thiosulfate de sodium** (ou hyposulfite de soude) en solution à 25% est efficace et peu toxique.

A administrer en IV, à la dose de 3 g/100 kg PV.

On peut en fait augmenter cette dose jusqu'à 66 g/100 kg pour une meilleure efficacité, sans danger pour l'animal, avec relais PO à 1/10<sup>e</sup> de cette dose toutes les heures si nécessaire. Pour les carnivores, il est recommandé de monter jusqu'à 1 g/kg, toujours en IV.

La spécialité pharmaceutique injectable HYPOSULFENE<sup>®</sup>, qui contenait cette molécule, n'existe plus, il faut avoir recours à une préparation magistrale en pharmacie, malheureusement peu compatible avec l'urgence de la situation.

La réaction de transformation des HCN en SCN<sup>-</sup> est lente et dans le cas d'une intoxication aiguë, elle est insuffisante. Aussi faut-il utiliser un traitement plus rapide, permettant de maintenir l'organisme pendant la durée de cette détoxification.

Parmi les méthémoglobinisants, le premier est le **nitrite de sodium**. Il est très actif par voie parentérale, il exerce une action curative certaine, à condition de ne pas dépasser 30% de metHb (voir chapitre IV.B.2). Son utilisation est donc délicate.

La posologie recommandée est de :

20 mg/kg pour les carnivores domestiques et les petits ruminants,  
4 à 15 mg/kg pour les grands animaux.

Quand on n'a rien d'autre sous la main, le **bleu de méthylène** est de faible efficacité, mais on peut l'essayer à la posologie de 10 mg/kg PV, en IV, quelle que soit l'espèce (sauf le chat).

Parmi les sels et complexes cobaltiques, deux molécules ont un intérêt thérapeutique majeur. Elles ont une large distribution dans l'organisme.

L'**EDTA** (éthylène diamine tétracétate) existe en sel mono ou dicobaltique, le deuxième est le plus actif. C'est un antidote très puissant, qui permet expérimentalement la neutralisation de doses au moins égales à 40 fois la dose létale. Mais des auteurs lui attribuent des effets secondaires hémodynamiques délétères, limitant peut-être son utilisation à haute dose [98], [99]. De plus, le mouton a une sensibilité spécifique au cobalt, qui rend dangereuse l'utilisation de ces dérivés chez cet animal. [80]

Expérimentalement, il a été utilisé avec succès à la posologie de 2 à 5 mg/kg, selon l'état clinique. Il existe une spécialité pharmaceutique humaine injectable KELOCYANOR<sup>®</sup>, contenant 300 mg par ampoule de 20 mL. Cette forme serait donc utilisable quel que soit l'animal, même sur les bovins et les chevaux adultes.

Mais d'autres prescriptions sont beaucoup plus élevées :

de 20 à 25 mg/kg en médecine vétérinaire [68] et  
de 10 à 15 mg/kg en médecine humaine. [6], [99]

Dans ce cas la forme galénique à 300 mg / 20 mL ne peut plus être utilisé sur les grands animaux, par manque de commodité : il faudrait 20 à 40 ampoules pour un animal de 600 kg.

L'**hydroxocobalamine** est une forme proche de la cyanocobalamine (également appelée vitamine B<sub>12</sub> et naturellement porteuse d'un groupement cyanyl).

In vitro, l'affinité de HCN pour l'hydroxocobalamine est supérieure à son affinité pour la cytochrome oxydase. In vivo, les deux molécules réagissent rapidement pour former de la cyanocobalamine, vit B<sub>12</sub> non toxique. Le tout est éliminé rapidement par voie urinaire.

La toxicité de l'hydroxocobalamine est très faible (sauf pour les ovins), il semble ne pas y avoir de limite à son utilisation. [97], [98], [99]

Il n'existe pas de spécialité pharmaceutique vétérinaire utilisable. Les quelques produits commerciaux contenant de l'hydroxocobalamine ne sont pas du tout destinés à être utilisés dans un contexte d'intoxication et sont donc bien trop sous-dosés à cet effet.

La pharmacie humaine dispose d'une forme galénique spécialement destinée au traitement des intoxications cyanhydriques, CYANOKIT<sup>®</sup> contient 2,5 g d'hydroxocobalamine lyophilisée. La posologie recommandée,

de 75 à 150 mg/kg renouvelable à la demande [6], [17], [97],

ne permet pas de traiter des grands animaux avec cette spécialité.

L'utilisation de plusieurs produits simultanément permet d'obtenir un effet synergique et pas seulement additionnel. L'action rapide des méthémoglobinisants ou des dérivés du cobalt, associé au thiosulfate de sodium qui a une faible toxicité, une action lente mais durable, permet ainsi une détoxification complète de l'organisme. Ainsi l'association de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de NaNO<sub>2</sub> (pour peu qu'on puisse faire préparer ces deux préparations assez rapidement) est particulièrement indiquée dans le cas de l'intoxication des herbivores, par la consommation de sorghos trop riches en durrhine.

Dans le cas d'une intoxication concernant les carnivores domestiques, un dérivé du cobalt est préférable au NaNO<sub>2</sub> et l'ajout d'une oxygénothérapie, inutile de façon isolée, renforce également les synergies.

A ces traitements étiologiques, on peut ajouter un traitement symptomatique constitué par des analeptiques cardiorespiratoires, du sérum glucosé hypertonique, une corticothérapie (pour stimuler le métabolisme glucidique), associés à un complexe vitaminique.

### **i) Prophylaxie**

La prophylaxie des intoxications par l'acide cyanhydrique repose sur les précautions à prendre dans l'utilisation du sorgho (voir chapitres IV.A.1.c) et IV.A.1.d)), et des plantes cyanogénétiques en général. Une ration riche en glucides et en énergie permet de réduire la sensibilité de l'animal, par rapport à de faibles doses de toxique, mais ne le protège pas d'une intoxication sévère.

### **j) Formes subaiguës et chroniques**

[80], [97]

Les intoxication subaiguës ou chroniques liées à l'HCN sont rares chez les animaux domestiques. Expérimentalement, la recherche de cet état aboutit soit à un phénomène d'accoutumance et d'échappement, soit à la mort en quelques jours dans des conditions proches d'une intoxication aiguë.

Une affection rare et grave est décrite par plusieurs auteurs. Observée aux Etats-Unis, en Australie et en Inde, elle concerne principalement des chevaux, mais des bovins et des ovins ont également été atteints. Tous ont en commun le pâturage de sorghos (fourragers ou à grain) pendant une période variable. Cela se manifeste sur des animaux adultes, mais de tous âges et des deux sexes, par l'apparition progressive d'une ataxie liée à une faiblesse des membres pelviens. Les troubles nerveux sont accompagnés d'incontinence urinaire (non décrite sur les ovins) qui peut se compliquer d'une cystite sévère, notamment chez les équins. Des avortements et des malformations congénitales complètent la clinique. Dans tous les cas, les animaux perdent en conformation, mais garde une température, une vigilance et un appétit normal. La mortalité est faible, entre 0 et 2%, et principalement imputée à la cystite, mais tous

les traitements mis en place sur les chevaux ont été inefficaces. Les animaux, pour la majorité des individus atteints, ont récupéré lentement et spontanément après changement de nourriture, mais aucune guérison complète n'a été observée parmi les équins. Les lésions macroscopiques révélées lors des autopsies sont uniquement une vessie distendue par l'urine et le dépôt de sédiments, aux parois très épaissies et congestionnées, voire hémorragiques et purulentes. L'histologie met en évidence des dégénérescences axonales et des myélopathies dans la matière blanche du système nerveux central. Cela touche principalement la moelle épinière, avec une gravité croissante en zones lombaire et sacrée.

Si la cause exacte de cette affection n'est pas vraiment établie, il apparaît que les sorghos consommés étaient, pour la plupart, des plantes riches en hétéroside cyanogénétiques: cultures à grain, période de sécheresse, dégâts causés par des sauterelles ou des moisissures... [2], [19], [72], [75], [114]

Les symptômes et lésions nerveuses précédemment citées ressemblent à l'ataxie nutritionnelle tropicale, décrite depuis longtemps en médecine humaine. Des recherches ont prouvé que la consommation de manioc en est la cause principale. Cette maladie se caractérise par l'apparition de myélopathies, affectant les nerfs optiques et vestibulo-cochléaires, mais aussi des nerfs périphériques de façon plus variable. On peut en produire un modèle expérimental chez des primates, par injection de quantités croissantes de KCN. [2]

La médecine humaine décrit d'autres manifestations de toxicité chronique de l'acide cyanhydrique. Celles-ci ont été recherchées également chez les animaux domestiques. Les thiocyanates issus de la transformation de HCN sont des antithyroïdiens puissants. En inhibant le captage de l'iode par le thyrocyte, ils sont susceptibles d'exercer une action goitrogène. Sur le plan biochimique, cela se traduit par un défaut de la concentration sérique en hormones T3. Ce défaut est imputable à l'action anti-thyroïdienne des thiocyanates, qui exercent aussi probablement un effet inhibiteur sur la conversion périphérique des hormones T4 en T3. Les conséquences de ce défaut en facteurs thyroïdiens sont, entre autres, une baisse de la sécrétion de l'hormone de croissance ainsi qu'une diminution du nombre de récepteurs tissulaires à cette hormone. Cela affecte la croissance et l'entretien de la masse musculaire corporelle, d'autant que la consommation d'acides aminés soufrés pour la détoxification de l'organisme ajoute un facteur limitant supplémentaire [105]. Cela est donc parfois observé au sein des populations humaines, qui consomment du manioc. Toutefois, si ce phénomène a pu être provoqué expérimentalement chez des herbivores consommant des sorghos fourragers, il n'a jamais été observé en conditions naturelles. [85]

La consommation de manioc peut induire une toxicité chronique à l'encontre des cellules  $\beta$  des îlots de Langerhans du pancréas. Cette atteinte a pour conséquence le développement d'un diabète insulino-dépendant. Mais, à nouveau, on n'observe pas cette affection chez les herbivores consommant des sorghos fourragers (il est d'ailleurs possible que la cause ne soit pas HCN, mais l'hétéroside cyanogénétique propre au manioc). [105]

Des effets chroniques de l'acide cyanhydrique sont observables dans l'environnement et surtout dans les cours d'eau, sur les bords desquels sont installées des usines travaillant avec des cyanures. Gageons que cela ne s'applique plus dans un certain nombre de pays développés, en dehors de situations accidentelles malheureuses et qui ne relèvent pas de la chronicité [61]. Dans ces conditions, des effets subcliniques et écologiques peuvent être observés sur les populations aquatiques : principalement des perturbations de la reproduction, de la croissance... A long terme, l'équilibre des populations des rivières est modifié, par la sélection des espèces naturellement plus résistantes aux effets du polluant. [80]

## **B. Toxicité liée aux nitrates**

### **1. Etude de l'agent toxique**

[68], [115]

Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) sont la base de la nutrition azotée dans le règne végétal. Extraites du sol, ces molécules sont réduites en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), puis réduites à nouveau en ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Cette dernière forme est utilisée, entre autres, dans la synthèse des acides aminés et donc des protéines végétales.

Pour les animaux, les sels de  $\text{NO}_3^-$  n'ont pas de valeur alimentaire, et sont au contraire irritants pour les muqueuses. Les sels de  $\text{NO}_2^-$  sont un poison méthémoglobinisant, beaucoup plus grave que leur forme oxydée.

#### **a) Origine**

[50], [62]

Les nitrates sont absorbés par ingestion :

- d'eau polluée riche en nitrates ;
- de fourrages contenant des plantes riches en nitrates ;
- d'engrais à base de nitrates (ammonium ou potassium).

De nombreuses plantes ont la faculté d'accumuler les nitrates et de devenir toxiques pour les herbivores qui les consomment. C'est le cas du sorgho, comme d'autres graminées, y compris le blé ou le maïs sous des conditions particulières, et aussi de légumineuses, de crucifères... Comme pour la durrahine, ce sont les formes fourragères qui concentrent  $\text{NO}_3^-$  et qui se révèlent dangereuses. Il n'y a pas de nitrates dans les grains.

Les nitrites ne s'accumulent pas, leur réduction est plus rapide que leur formation dans les tissus végétaux.

#### **b) Concentration dans la plante**

[62], [102], [116]

Plus encore que pour la durrahine et HCN, il n'est pas possible de donner de valeurs moyennes à la teneur en nitrates du sorgho. Les facteurs de variation sont trop nombreux : variété, stade végétatif, humidité et composition du sol, climat... Pour ne citer que les principaux.

Il apparaît pourtant que les variétés tardives accumulent plus la molécule que les variétés précoces et il existe une corrélation positive entre la concentration en  $\text{NO}_3^-$  et la quantité de matière azotée totale dans la plante. [107]

La réduction des nitrates en nitrites est catalysée par la nitrate-réductase et nécessite beaucoup d'énergie. Cela explique que, contrairement à la durrahine,  $\text{NO}_3^-$  est plus concentré dans les tiges et les tissus conducteurs que dans les feuilles, dans lesquelles la photosynthèse est plus importante. Pour la même raison, le 1/3 inférieur de la plante est plus dangereux que la partie supérieure et le potentiel toxique est plus élevé la nuit que le jour.

D'une manière générale, les plantes se développant dans des conditions favorables normales ne doivent pas poser de problème. Des précautions doivent être prises quand elles rencontrent les situations constituant des facteurs de risque.

### **c) Facteurs de risque**

[13], [102], [115]

La réduction des nitrates nécessite de l'énergie lumineuse, de l'humidité et différents cofacteurs enzymatiques minéraux (Mo, Fe, Cu). La sécheresse comme la diminution du temps d'éclairement ralentit l'activité de la nitrate-réductase et fait que le substrat s'accumule par défaut d'élimination.

La pluie après une période de sécheresse marquée est certainement le plus à craindre, comme dans le cas de la toxicité cyanhydrique. Mais dans ce cas, parce que la plante absorbe alors un maximum de nitrates dans le sol grâce à ses racines. Si les jours suivants présentent des conditions climatiques normales, il faut quand même compter de 7 à 14 jours avant de pouvoir faire pâturer la parcelle par des animaux.

Deux points particuliers sont des facteurs de risques, mais sont contrôlables par l'éleveur. Premièrement, la fertilisation azotée et l'application d'herbicide (de type 2,4-D) favorisent la disponibilité des nitrates dans le sol et par conséquent son accumulation dans la plante (sorgho ou autre) qui y pousse. Deuxièmement, il faut éviter autant que possible une densité trop importante des animaux, car ils sont alors poussés au sur-pâturage et à consommer les tiges les plus basses et les plus potentiellement toxiques.

### **d) Facteurs d'amélioration**

[102]

En cas de doute sur la teneur en nitrates dans une parcelle à faucher, une bonne précaution consiste à relever la hauteur de coupe d'une quinzaine de centimètres, afin de laisser la base des tiges et également un certain nombre d'adventices, susceptibles elles aussi d'accumuler le toxique.

Lester les animaux avec un fourrage pauvre en  $\text{NO}_3^-$  avant de les laisser pâturer ou mélanger ce fourrage avec le sorgho distribué à l'auge permet de réduire la charge toxique et d'exploiter la récolte normalement.

La conservation par ensilage permet de réduire la concentration en nitrates d'un fourrage de 40 à 60%. Attention toutefois, cette diminution peut se révéler insuffisante dans le cas d'un aliment initialement très toxique. La fenaison, par contre, n'est pas une méthode de détoxification valable dans ce cas.

Enfin, il est tout à fait possible de faire analyser un échantillon du fourrage pour connaître la valeur exacte de sa teneur en  $\text{NO}_3^-$  et pouvoir l'utiliser avec un maximum de sécurité.

## **2. Etude clinique de l'intoxication par les nitrates**

### **a) Appréciation du danger**

[20], [115]

Cette intoxication concerne toutes les espèces animales et les humains. Dans ce dernier cas, il s'agit surtout de la consommation d'eau polluée ou de la manipulation d'engrais sans précaution. L'intoxication par les nitrates liée à la consommation de sorgho, par contre, ne concerne que les herbivores.

Les intoxications aiguës causées par les nitrates sont relativement peu dangereuses pour les monogastriques en comparaison des effets observés chez les ruminants, à moins d'atteindre une dose mortelle très élevée. Les équins sont dans une situation intermédiaire. Dans le rumen ou le cæcum, les nitrates sont réduits en nitrites, nettement plus toxiques. Les deux intoxications sont alors indissociables et doivent être traitées simultanément. Le pronostic doit être réservé quand l'atteinte est très sévère.

## **b) Toxicocinétique**

[20], [115]

### Absorption

Une partie des ions  $\text{NO}_3^-$  est résorbée par la muqueuse digestive, tandis que le reste exerce une toxicité locale. Les nitrites formés par l'action de la flore ruminale sont également résorbés et sont rapidement retrouvés dans le sang.

### Distribution

$\text{NO}_3^-$  et  $\text{NO}_2^-$  sont des molécules hydrosolubles et traversent peu les membranes cellulaires. Ils restent principalement dans le secteur extracellulaire. Par contre les nitrites sont également présents à l'intérieur des hématies où ils exercent leur effet toxique.

### Transformation

Dans le rumen (et le cæcum des chevaux), les nitrates sont réduits en nitrites, puis en ammoniacque par l'action des enzymes bactériennes. Mais la deuxième réduction est beaucoup plus lente que la première et la concentration en  $\text{NO}_2^-$  augmente rapidement. Expérimentalement, l'administration de dose massive de  $\text{NO}_3^-$  peut aboutir à la formation de  $\text{NO}_2^-$  chez les monogastriques. Mais cette observation ne se répète pas systématiquement.

Une partie des nitrites sont oxydés en nitrates, dans le sang.

### Élimination

L'élimination des nitrates est fécale pour la fraction non résorbée et urinaire pour les ions passés dans la circulation générale. Les nitrites sont également éliminés par les reins et même beaucoup plus rapidement que leur forme oxydée (leur demi vie plasmatique est d'environ 1/2 heure).

## **c) Mécanisme d'action toxique**

[20], [115]

$\text{NO}_3^-$  n'a pas de toxicité systémique, mais est irritant pour la muqueuse digestive.

$\text{NO}_2^-$  exerce principalement une action méthémoglobinisante. Dans les hématies, les nitrites oxydent l'ion ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) contenu dans l'hème de l'hémoglobine en ion ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ), rendant la molécule incapable de transporter l'oxygène. Les systèmes physiologiques de réduction de la méthémoglobine sont rapidement saturés et une anoxie générale se développe progressivement dans l'organisme.

On observe également une toxicité directe des  $\text{NO}_2^-$  sur le système nerveux et sur l'endothélium des vaisseaux sanguins aboutissant à une vasodilatation, responsable d'une brusque chute de la tension artérielle, voire d'un choc hypovolémique.

#### d) Dose toxique

[20], [50], [68]

Il est difficile de donner précisément une valeur de toxicité des nitrates, car elle varie :

- avec l'espèce - les ruminants sont plus sensibles que les équins, eux mêmes plus sensibles que les autres monogastriques, en raison de l'oxydation de  $\text{NO}_3^-$  en  $\text{NO}_2^-$  ;
- avec l'âge - les veaux non sevrés sont plus proches physiologiquement des monogastriques que des ruminants et sont donc moins sensibles que les adultes ;
- avec le mode d'intoxication - les nitrates sont plus disponibles biologiquement en solution aqueuse que dans les fourrages ;
- avec l'alimentation - le jeûne augmente la toxicité, les aliments concentrés la diminuent.

Le Tableau 24 permet de constater la différence de sensibilité des espèces aux sels de nitrates et nitrites, administrés purs par voie orale. Il permet également de comparer la toxicité de  $\text{NO}_3^-$  avec sa forme réduite  $\text{NO}_2^-$ , plus dangereuse pour toutes les espèces.

**Tableau 24 - Toxicité des sels de nitrates et de nitrites par voie orale, d'après [20] et [68]**

Nitrates	Nitrites
DL bovins = 409 à 750 mg/kg PV DL ovins = 409 à 574 mg/kg PV	DL bovins = 67 à 170 mg/kg PV DL ovins = 67 mg/kg PV
DL équins = 1 à 2 g/kg PV	
DL <sub>50</sub> rats = 5 g/kg PV	DL porcins = 50 à 54 mg/kg PV DL <sub>50</sub> rats = 60 mg/kg PV

Les doses toxiques des nitrates contenus dans les fourrages sont plus élevées que celles présentées dans le Tableau 24, et approchent la valeur de 1 g/kg PV. En pratique, on considère que la concentration des  $\text{NO}_3^-$  dans le fourrage doit être inférieure à 1% de la matière sèche, pour pouvoir le distribuer sans risque aux herbivores.

Mais l'eau consommée par les animaux peut éventuellement contenir aussi des nitrates. Dans ce cas, la somme des sources dépasserait le seuil de toxicité et entraînerait des troubles. De l'eau contenant jusqu'à 100 ppm de  $\text{NO}_3^-$  est sans risque pour les ruminants consommant une alimentation pauvre en nitrates. Un niveau supérieur à 200 ppm est potentiellement dangereux pour les femelles gestantes. (Le taux maximum de nitrates dans l'eau, admis en France, est de 50 ppm)

En cas de doute, il est prudent de faire analyser l'eau et le fourrage pour se faire une idée de l'apport total en nitrates consommés par les animaux.

## e) Symptômes et lésions

[20], [62], [68]

Les symptômes propres aux nitrates sont observés chez les monogastriques, qui manifestent des troubles essentiellement digestifs. Les herbivores présentent les mêmes symptômes, mais le plus souvent accompagnés des perturbations systémiques dues aux nitrites.

Les nitrates sont irritants et congestionnants pour le tractus digestif et provoquent des hémorragies intestinales. On observe des signes de douleurs abdominales, de la salivation, de la diarrhée (parfois hémorragique), des vomissements (même chez les ruminants [92]). Ces troubles ont pour conséquence une déshydratation pouvant mener à un collapsus mortel.

Les nitrites ont un effet direct sur les systèmes nerveux et circulatoires, ainsi que sur l'hémoglobine du sang, des effets indirects respiratoires sont observés consécutivement :

symptômes nerveux et circulatoires : tachycardie, vasodilatation brutale (surtout chez les équins), faiblesse musculaire, ataxie, légère hypothermie possible ;

symptômes sanguins : méthémoglobinémie donnant au sang une couleur brun-chocolat caractéristique. Au fur et à mesure que le taux de metHb augmente, les muqueuses (notamment vaginale) se décolorent, puis deviennent grisâtres et enfin gris-brunâtres [74]. Dans certains cas, cette coloration apparaît avant que les autres signes cliniques ne soient réellement perceptibles et constitue un élément de détection et de prévention d'un stade plus grave de l'intoxication.

symptômes respiratoires : dyspnée quand le taux de metHb atteint 30%.

A partir de ce stade, les efforts physiques ou le stress peuvent être fatals en aggravant l'asphyxie de l'animal. Des convulsions ou un coma asphyxique marque une méthémoglobinémie dépassant 70 à 80%. La mort survient peu de temps après. La durée d'évolution pour l'ensemble de ces symptômes est comprise entre 2 et 10 heures.

En l'absence d'évolution fatale, les femelles gestantes ont une forte probabilité d'avorter dans les 3 à 7 jours qui suivent l'épisode toxique, en raison de l'anoxie fœtale.

Une évolution suraiguë est possible mais rare, avec mort sans symptômes en 1 à 4 heures.

A l'autopsie, des lésions inflammatoires et hémorragiques de l'estomac, marquées par l'action irritante des ions  $\text{NO}_3^-$ , sont le seul signe particulier observé chez les monogastriques (non herbivores) et ressemblent à celles observées lors d'une intoxication par le sel.

Cette gastrite est présente également chez les herbivores, chez lesquels on observe d'autres lésions congestives sur de nombreux organes. Une coloration foncée de la carcasse, liée à la méthémoglobinémie, constitue l'élément dominant. Les muqueuses, notamment digestives, sont cyanosées. Des ecchymoses et des pétéchies sont réparties dans tout l'organisme et en particulier sur la trachée. Le cœur est souvent dilaté et les poumons, de teinte brunâtre, peuvent garder les traces d'un oedème. La couleur brun chocolat du sang peut parfois être difficile à distinguer.

## **f) Diagnostic différentiel**

[92], [115]

Dans sa phase terminale, l'asphyxie et les troubles nerveux provoqués par les nitrates/nitrites peuvent être confondus avec l'action de l'acide cyanhydrique. L'anamnèse et la couleur du sang doivent permettre de privilégier une des deux hypothèses.

D'autres causes toxiques peuvent être considérées comme responsables de la clinique observée : les inhibiteurs des cholinestérases, les organochlorés, le métaldéhyde, le DNOC (dinitro-ortho-crésol, aujourd'hui d'usage interdit) ou encore les autres toxiques méthémoglobinisants, tels que le chlorate.

Enfin, une réaction anaphylactique, un emphysème ou un œdème aigu du poumon doivent également faire partie des hypothèses.

Au cas où les données épidémiologiques et cliniques ne permettent pas d'établir un diagnostic, un réponse rapide au traitement par le bleu de méthylène constitue alors un élément de quasi-certitude.

## **g) Examens complémentaires**

[64], [116]

Des examens complémentaires peuvent s'avérer utiles dans le cas de l'intoxication par les nitrites, mais moins par les nitrates. Comme on l'a vu, les deux sont indissociables chez les herbivores et les analyses ont alors une importance.

La teinte brunâtre des muqueuses peut ne pas être différentiable visuellement d'une cyanose, provoquée par une affection cardio-respiratoire non toxique. L'agitation à l'air libre d'un échantillon de sang doit permettre l'oxygénation de l'hémoglobine. Le retour à une couleur rouge vif est une situation normale, l'absence de changement indique une probable conversion du transporteur en méthémoglobine. De façon plus précise, un véritable dosage de la méthémoglobine est possible. Le prélèvement doit alors être conservé dans un tube avec EDTA et congelé. Ces deux méthodes permettent d'éliminer ou non les toxiques méthémoglobinisants de la liste des hypothèses. Mais, par contre, la mise en évidence de méthémoglobine ne suffit pas pour établir un diagnostic d'intoxication par une plante riche en nitrates. L'autre intérêt du dosage biochimique est qu'il permet de connaître la gravité de l'intoxication, utile pour émettre un pronostic. [13], [18]

Une recherche qualitative des nitrites, eux-mêmes, peut être réalisée grâce à une simple bandelette urinaire, dans divers liquides biologiques : urine, plasma, ou, lors d'une autopsie, liquide péritonéal ou péricardique, voire humeur aqueuse de l'œil. Celle-ci devrait être privilégiée surtout dans le cadre d'une analyse réalisée par un laboratoire. Les nitrates et les nitrites y sont protégés des réactions d'autolyse qui commencent rapidement dans les autres parties du corps, après la mort. [62], [115]

Enfin, pour une recherche vraiment précise de la source du toxique, il est nécessaire de recourir à des analyses de l'eau et des aliments, voire à une diagnose végétale auprès d'un laboratoire d'alimentation, à partir des aliments ou de contenu ruminal. [18], [115]

## **h) Traitement**

[62], [68]

Le traitement d'une intoxication due uniquement aux nitrates sera appliqué aux carnivores domestiques ou aux porcins. Il est de type symptomatique, avec l'utilisation de pansements gastro-intestinaux, antispasmodiques et antidiarrhéiques si besoin.

Chez les herbivores, il est nécessaire de traiter en plus les conséquences de l'intoxication par les nitrites. Pour réduire la méthémoglobine et retrouver une hémoglobine fonctionnelle, l'antidote est le **bleu de méthylène** en solution à 1 à 4%, par injection intraveineuse,

jusqu'à 9 mg/kg chez les bovins,  
5 mg/kg dans les autres espèces.

Répéter les injections si besoin, en réduisant la posologie à 1 à 5 mg/kg pour éviter de provoquer une hémolyse.

En complément du bleu de méthylène, il est possible d'utiliser l'**acide ascorbique**, vitamine C, même si l'intérêt de celle-ci est parfois remis en cause.

Sa posologie est de 5 à 10 mg/kg, en IV, renouvelable également.

Un traitement non spécifique des autres symptômes est conseillé :

- adrénaline ou dopamine et perfusion salée ou glucosée, contre l'état de choc provoqué par la vasodilatation (surtout chez les équins) ;
- analeptiques cardiorespiratoires ;
- antibiothérapie orale, voire simple acidification du rumen avec du vinaigre, pour inhiber l'activité bactérienne et ainsi réduire la production de nitrites à la source.

## **i) Prophylaxie**

[20], [62]

La prophylaxie des intoxications par les nitrates repose sur le contrôle de la quantité de polluant contenu dans l'eau et les aliments, distribués aux animaux (voir chapitre IV.B.2.d)). Si le risque est un peu élevé, il convient de diluer le fourrage, en le mélangeant avec un autre fourrage peu toxique, et d'éviter dans la mesure du possible de le faire consommer par les femelles gestantes.

Un bon équilibre des valeurs alimentaires de la ration et une transition alimentaire adaptée permet également de réduire les risques.

## **j) Formes subaiguës et chroniques**

[20], [62], [68]

L'intoxication chronique des ruminants par les nitrates et nitrites peut être suspectée dans des élevages où on constate des avortements et de l'infertilité, car les nitrites sont responsables non seulement de la formation de méthémoglobine chez le fœtus, mais ils interfèrent également dans la synthèse de progestérone chez la mère.

La baisse de poids des veaux à la naissance, des hypothyroïdies chez les brebis, des signes d'hypovitaminose A, des troubles nerveux plus ou moins furtifs, et l'augmentation du

bruit de fond pathologique d'une manière générale sont également des signes d'appel à la recherche de taux de nitrates trop élevés.

Les parties végétatives du sorgho contiennent deux constituants toxiques, dont les variations de concentration sont prévisibles qualitativement mais ne sont pas maîtrisables. Les deux facteurs influençant le plus significativement la toxicité potentielle de la plante sont, premièrement, la variété, mais il n'existe pas d'informations officielles chiffrées pour le vérifier. Deuxièmement, la pluie qui met fin à une période de sécheresse et qui doit être considérée avec la plus grande attention.



## **V. Adaptation aux régimes des différentes espèces domestiques**

Après le tableau assez sombre dépeint dans le chapitre *toxicité*, il est bon de rappeler que le sorgho est un excellent aliment (concentré ou fourrager), utilisé à très grande échelle depuis longtemps en Amérique, du Nord et du Sud, et en Australie, entre autres... Nous allons maintenant faire le point sur cette qualité.

### **A. Ruminants**

[31], [35], [36], [56], [65]

Parmi les documents consultés pour rédiger cette synthèse bibliographique, peu d'informations concernent l'utilisation du sorgho-grain à titre de concentré chez les ruminants. Son amidon est considéré comme moins digestible que dans les autres grains et dégradé moins rapidement que celui du blé, du maïs et de l'orge. Cela limite son efficacité, mais peut trouver un intérêt dans la recherche de moyens permettant de limiter les phénomènes d'acidose.

La digestibilité ruminale de l'amidon de sorgho varie selon sa composition : les albumens farineux ou cireux sont proches de 80% et significativement plus digestibles que les albumens cornés ou mixtes (48% et 68%). [106]

Les traitements technologiques appliqués aux grains ont également une influence notable sur la disponibilité de l'amidon. Le floconnage améliore la digestibilité des grains de façon plus efficace qu'un simple broyage. Ces méthodes permettent de valoriser des stocks de grains de mauvaise qualité [78]. Cela n'a, par contre, pas d'influence significative sur la croissance des veaux, mais en fait météoriser 1 sur 5. Dans cet objectif, l'intérêt escompté n'est pas au rendez vous. [1]

Les chiffres très précis des tables de l'INRA permettent de prévoir de façon optimale l'utilisation des sorghos fourragers dans la ration des ruminants. Ces valeurs sont celles du fourrage exploité en vert, donc applicables aux pratiques du pâturage et de l'affouragement immédiat à l'auge. Mais cela ne constitue pas une étude comparative, avec l'utilisation d'autres aliments, qui manque à cet exposé. A ce niveau, une fois prises toutes les précautions vis à vis de la toxicité, le choix du sorgho sera vraisemblablement une question de prix de revient. Par contre, les connaissances actuelles ne permettent pas de prédire la valeur de ces fourrages après une conservation en foin ou en ensilage. Cette 2<sup>ème</sup> méthode de stockage dont l'importance a déjà été évoquée (voir chapitre II.C) concerne le sorgho fourrager et aussi le sorgho-grain plante entière. Ce dernier constitue un sujet de recherche pour de nombreuses personnes depuis longtemps, en France et dans beaucoup de pays.

C'est en effet un sujet récurrent depuis plus de 40 ans et qui ne progresse qu'à petits pas. La raison de cette lenteur tient sans doute à la complexité du sujet, qui n'a rien de spécifique au sorgho puisque le maïs, que l'on maîtrise tellement mieux, est encore l'objet de mises à jour régulières. La prévision de la valeur énergétique de la céréale plante entière à la récolte avec des outils fiables est indispensable pour mieux ajuster la complémentation au niveau énergétique recherché dans la ration. Cette précaution est encore plus indispensable pour éviter le gaspillage énergétique, moins visible que la baisse des performances laitières.

Car la marge économique est autant, sinon plus, liée à la baisse des coûts de concentrés qu'à l'amélioration des performances laitières individuelles.

Dès les années 1960, on dispose de nombreux résultats de recherches comparant les ensilages de sorgho et maïs en alimentation des vaches laitières, et concluant sur un défaut de digestibilité principalement des grains du sorgho [3]. De nos jours, on tâtonne encore puisqu'on ne dispose toujours pas d'équation de prédiction de la valeur alimentaire du sorgho grain utilisé en plante entière comme fourrage et la comparaison avec l'ensilage de maïs est toujours de rigueur.

L'INRA de Lusignan y travaille depuis 2003 et leurs études opposent du sorgho cultivé en sec à un maïs irrigué. La productivité est systématiquement à l'avantage de ce dernier, tout à fait logiquement. Mais en 2004, le rendement des deux sorghos est tout de même remarquables pour une culture en sec (14 t MS/ha et 18 t MS/ha pour la variété sucrée) et avec des coûts de production à l'hectare inférieurs de plus de 200 €, sans compter le gain en eau. La qualité des trois types d'ensilages (2 sorgho, 1 maïs) est très proche sur les plans de la digestibilité *in vitro* et des taux de fibres. Les sorghos fournissent moins d'amidon, mais plus de protéines.

Les aliments sont distribués *ad libitum* à trois lots homogènes de huit vaches prim'holstein en lactation, pendant quinze semaines. La ration est complétée par un concentré riche en azote et un deuxième concentré énergétique à hauteur de 3 à 5 kg/j selon la production de chaque animal. Le maïs est également complété par 50 g d'urée /j/animal.

Au final, les vaches consomment plus d'ensilage de sorgho normal que de maïs (19,9 contre 17 kg MS/j respectivement) pour une production de lait égale (30 kg/j). Cela traduit une moindre efficacité alimentaire de l'ensilage de sorgho. Les taux protéiques sont identiques (3,21%), le taux butyreux est à l'avantage du sorgho (4,26% contre 4,01%), ainsi que la moyenne de reprise de poids des animaux <sup>1</sup> sur la durée de l'étude (29 contre 20 kg).

Le sorgho grain sucrier se révèle moins performant que son homologue normal, comme cela avait déjà été constaté en 2003. La plante avait alors beaucoup souffert de la sécheresse (en l'absence totale d'irrigation rappelons-le), mais il avait suffi de compléter l'ensilage de sorgho avec 1 kg de blé /j/animal pour obtenir une ration suffisante pour entretenir une lactation proche de celle du lot témoin.

Le sorgho grain plante entière est donc capable, en région Poitou-Charentes, d'un rendement intéressant sans aucune irrigation et pour un coût de production réduit. Conservé en ensilage, il a assuré une efficacité alimentaire suffisante pour que des prim'holstein fournissent un lait de meilleure qualité et en quantité identique au lot témoin, nourri au maïs.

Comme on l'a vu précédemment (dans *Valeurs alimentaires III.B*), tous les ruminants, quelle que soit la production (lait ou viande), consomment spontanément plus d'ensilage de sorgho que de celui du maïs. Pour les brebis allaitantes, cet excès a été chiffré à 19,5%. Et bien sûr, la lignification des tissus (dans une certaine mesure) ne fait qu'aggraver le problème, de même que la complémentation avec du foin de luzerne pour les jeunes bovins en engraissement, qui augmente encore plus cet écart de consommation. Cela s'amointrit pour les vaches laitières en avançant dans la saison de lactation. La finesse de hachage élevée de l'ensilage de sorgho est le principal facteur d'explication de cette meilleure ingestibilité.

Au final, les petits ruminants valorisent bien l'ensilage de sorgho car les grains entiers sont correctement attaqués lors de la rumination et bien dégradés dans la panse. De plus, l'aliment rencontre peu de refus à l'auge. On note des prises de poids et d'état similaires entre

---

<sup>1</sup> Ce point étant très important pour la pérennité de la production d'année en année.

les lots nourris au sorgho et au maïs. L'engraissement des agneaux est comparable, ainsi que les productions laitières caprines (y compris les taux de matières utiles).

Il est quand même recommandé de rationner l'aliment (à hauteur de 90% d'une consommation *ad libitum*) pour éviter le gaspillage lié à la surconsommation, de fournir un fourrage grossier pour prévenir l'acidose et de veiller aux compléments azoté et minéral.

Les jeunes bovins à l'engrais connaissent des croissances équivalentes, mais là aussi avec une consommation de sorgho plus élevée de 7%, pénalisant l'indice de consommation peut être plus parlant pour les éleveurs : 6,57 kg MS/kg gain PV nécessaires avec de l'ensilage de sorgho grain contre 6,14 kg MS d'ensilage de maïs de qualité moyenne (le texte ne précise pas le niveau de qualité de la variété de sorgho).

Pour ce qui est des vaches laitières, on a pu voir que les essais récents de l'INRA étaient très positifs quant à l'usage de cet aliment. D'autres textes, publiés au début des années 1990, font état de résultats moins probants et concluent sur des pertes de valeur alimentaire dues, toujours, à un manque de digestibilité des grains, dont on retrouve une partie (ou en tout cas de l'amidon) dans les bouses. Des épisodes d'acidose entrent également en ligne de compte, pénalisant non seulement la production, mais aussi les taux butyreux et protéique du lait. Acidose induite, toujours, par une finesse de hachage excessive de la plante.

Si ce deuxième problème est facilement corrigible (quand on en connaît l'origine), deux voies ont été explorées pour pallier au premier :

- récolter le sorgho quand le grain a atteint le stade laiteux-pâteux assure une meilleur valorisation énergétique du fourrage, mais la baisse de rendement de la biomasse fait que les performances laitières ramenées à l'hectare restent équivalentes pour les 2 stades de récoltes (7543 et 7694 kg (lait 7%)/ha). [65], [118]

- aux Etats-Unis, des essais comparatifs avec des sorghos "brown midrib" ont été très concluants. Les variétés mutées bmr apportent une efficacité alimentaire supérieure à leurs témoins isogènes normaux, et comparable au maïs en compétition. La différence portant sur les tissus fibreux et non plus sur les grains. Mais l'aspect économique du problème n'est pas évoqué, si ce n'est que le rendement agronomique des bmr est inférieur à la normale. Cela laisse supposer le même résultat ramené à l'hectare, mais ce n'est pas précisé. [9], [38], [82]

Quant aux essais (en fait peu nombreux) à partir de sorghos sucrier, aucun n'a donné complète satisfaction chez les bovins, comme chez les ovins.

Pour résumer, l'ensilage de sorgho grain plante entière est un très bon aliment pour les ruminants en général, notamment si on inclut les coûts de culture et pas seulement les performances zootechniques dans la comparaison. Actuellement les conseils à donner sont de prendre pour repère la teneur en matière sèche de l'épillet plutôt que celle de la partie végétative pour le moment de la récolte ; prendre garde au risque d'acidose ; mettre en place une ration dans laquelle cet aliment n'intervient pas *ad libitum*, car cela n'améliore que trop peu les performances. Cette dernière proposition est, de loin, celle qui demandera le plus de travail.

Les espoirs de développement pour l'avenir passent par une meilleure connaissance du matériel génétique et des performances agronomiques des variétés françaises, pour trouver le meilleur compromis entre qualité du grain et rendement de biomasse, et pour développer peut être des équations de prévisions de la valeur alimentaire des ensilages.

## B. Porcins

[52]

Les porcs sont d'importants consommateurs de céréales, qui constituent jusqu'à 75% de leur ration. Généralement, les grains sont intégrés dans un aliment unique, élaboré pour approcher au mieux les besoins de production de l'animal, sur les plans énergétique, protéique et minéral. Une partie des éleveurs valorisent leur production céréalière, qu'ils complètent avec le reste de l'aliment acheté dans l'industrie. De plus en plus rares sont ceux qui produisent et composent eux mêmes intégralement l'aliment de leurs porcs. [91]

Cette branche de l'élevage est qualifiée d'industrielle, tant les rendements sont calculés au plus juste. La maîtrise des coûts de production est encore plus importante qu'en élevage bovin, c'est une priorité absolue.

Dès le renouveau du sorgho en France, au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle, la céréale est expérimentée pour évaluer son intérêt économique et zootechnique. Des essais de rations comportant jusqu'à 77% de sorgho avaient donné des résultats tout à fait satisfaisants avec la production de porc charcutier maigre d'excellente qualité. Bien que cela s'opposait aux résultats d'autres auteurs qui préconisaient, à cette époque, de limiter à 50% le taux d'incorporation de cette céréale dans les aliments pour porcins, en raison des refus occasionnés par l'astringence des tanins de la graine. [14]

Depuis, l'intérêt, économique et zootechnique, est acquis. Bien que les conclusions des études soient parfois un peu contradictoire en ce qui concerne les limites d'efficacité, surtout en comparaison avec le maïs. En majorité, les auteurs estiment le sorgho comme un très bon ingrédient, à peine moins bon que le maïs (et en dehors de toute considération économique). Avant d'en arriver là, les conclusions ont longtemps été négatives, en raison des interactions dues aux tanins. [59], [66], [101]

Il y a 20 ans, on a introduit les variétés pauvres en tanins en France et c'est à partir de là qu'on a pu calculer précisément l'influence de ces facteurs antinutritionnels. Pour le porc, la digestibilité apparente de l'énergie et de l'azote, au niveau de l'iléon ou de l'ensemble du tractus digestif, est affectée au delà de 2,5 g de tanins /kg d'aliment (soit 0,25%). [66]

La plupart des productions européennes actuelles ont une valeur inférieure à ce seuil. [28], [44]

Mais, de même que ce qui est décrit en production aviaire, il est probable que d'autres composants interfèrent dans la digestibilité des nutriments des céréales en général, et du sorgho en particulier. Ses acides aminés ont une digestibilité imparfaite et les pertes endogènes d'azote sont plus élevées de quelques % dans le cas d'une ration contenant du sorgho, comparée à celles à base de blé, de maïs ou d'orge. Les explications avancées ne sont pas formelles, mais font état d'une corrélation négative entre la digestion iléale de la plupart des acides aminés et la teneur en cellulose brute et en lignine des aliments à base de sorgho. Cela concerne peut être aussi l'excrétion endogène d'azote. De même, dans ces variétés suffisamment pauvres en tanins, la structure de la kafirine <sup>1</sup> pourrait se révéler comme un facteur de variabilité important de la digestion iléale des acides aminés. La nature de l'amidon peut avoir un impact sur l'excrétion endogène spécifique d'azote... On exploite là des analyses

---

<sup>1</sup> La kafirine est la prolamine du sorgho, c'est à dire une protéine de réserve, riche en proline, de médiocre digestibilité. Riche également en acides aminés soufrés formant des ponts disulfure, impliqués dans la dureté du grain. Les proportions de kafirine sont influencées par le génotype et le lieu de culture. Des variations de compositions importantes sont observées dans les lignées parentales et les hybrides. [33], [37], [49], [78]

extrêmement pointues sans lesquelles il n'est pas possible de mettre en évidence ce type d'influence, bien moins flagrante que les pertes dues à la présence de tanins. [33], [57], [59]

Le sorgho est un aliment valable pour les porcs à condition d'être corrigé pour pallier à ses manques, tel le déficit en lysine, propre aux céréales en général et tel les déséquilibres minéraux et vitaminiques auxquels aucun aliment brut n'échappe. On peut constater en pratique, qu'il est utilisé avec succès en atelier naisseur-engraisseur. [71]

Sa légère infériorité sur le plan de l'énergie nette, comparé au maïs, est comblé par la différence de prix qui désavantage ce dernier. La seule vraie faiblesse qui limite son utilisation par les fabricants d'aliments est la production agricole annuelle restreinte, qui ne permet pas d'assurer un approvisionnement constant [communication personnelle]. L'Espagne, principal importateur de sorgho français pour sa propre filière porcine, émet régulièrement le même "reproche". [7], [94]

## C. Volailles

[52]

La filière avicole rejoint celle du porc sur beaucoup de points de comparaison. Les oiseaux consomment une alimentation riche en céréales, les éleveurs leur distribuent principalement des aliments composés industriels. Les coûts de production sont calculés et surveillés avec beaucoup d'attention, d'où l'intérêt d'utiliser une nourriture conçue pour être parfaitement adaptée aux besoins des animaux et éviter le gaspillage.

De fait, on peut trouver le même genre d'études et de publications à propos du sorgho dans l'alimentation aviaire et porcine. Les textes de l'une de ces spécialités étant régulièrement cités par l'autre, et réciproquement.

La plupart des auteurs s'accordent à dire que les variétés de sorgho pauvres en tanins sont bien utilisées par les volailles. La valeur nutritionnelle est voisine de celle d'un maïs et peut convenir pour un aliment complet dans lequel on incorporerait une seule et unique céréale comme source d'énergie. Toutefois l'absence de xanthophylles leur est préjudiciable et il faut impérativement en compléter la ration. Les précurseurs de la vitamine A sont indispensables aux pondeuses pour la pigmentation du jaune de leurs œufs et aux poulets de chair pour la pigmentation de leur viande. [28], [44], [54], [73]

De même que dans la littérature concernant le porc, la plupart des essais sur le sorgho sont des comparaisons avec le maïs et évaluent l'influence des tanins sur la digestibilité de l'aliment.

Les analyses de la production céréalière française au cours de plusieurs campagnes agricoles entre 1980 et 1990 ont permis d'établir une équation de prévision de l'énergie métabolisable du sorgho pour le coq, en fonction de la concentration en tanins (Figure 18). Les conclusions sont également que les variétés pauvres en tanins sont devenues prépondérantes en 10 ans, que le sorgho fournit la plus haute valeur d'EM coq de l'ensemble des céréales de France, testées en 1989-1990 <sup>1</sup>, et que l'équation ne servira finalement plus à grand chose.

---

<sup>1</sup> c'est toujours le cas en 2002. [100]

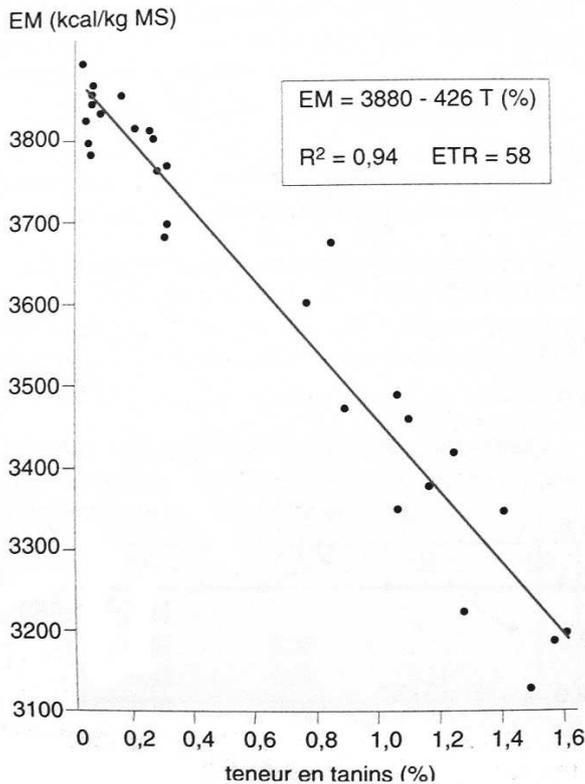


Figure 18 - Equation de prévision de l'énergie métabolisable du sorgho pour le coq, en fonction de la concentration en tanins, d'après [28]

En effet, ces facteurs antinutritionnels n'influencent plus significativement la digestibilité de l'énergie et des protéines chez les volailles, si leur concentration est inférieure à 2,6 g/kg (soit 0,26%) [73], une valeur semblable à la référence donnée pour le porc. La plupart des productions européennes actuelles ont une valeur inférieure à ce seuil. [28], [44]

Les publications, mettant en évidence la corrélation négative existant entre la teneur des grains en tanins et la digestibilité énergétique et protéique, laissent également apparaître une très forte variabilité des performances zootechniques des oiseaux. Parfois même pour une même concentration du facteur antinutritionnel dans deux lots différents. Fort de ce constat, il apparaît comme probable que d'autres composés endogènes interfèrent dans l'utilisation réelle des nutriments du sorgho. Cette hypothèse rejoint celles qui ont été faites à propos des résultats chez le porc, mais, ici, elle porte plutôt sur les nombreux autres polyphénols, de faible masse moléculaire, entrant dans la constitution du sorgho. [33], [73], [81]

A nouveau, cette variabilité, même si elle est réelle, est sans commune mesure avec les pertes imputables aux fortes teneurs en tanins, qui existaient encore il y a 25 ans.

Des expériences de remplacement de l'aliment complet par une céréale plus un complément protéique séparé ont aboutit aussi bien à des réussites qu'à des échecs, pour le sorgho comme pour d'autres céréales. Les mauvais résultats étaient par exemple des animaux atteignant un poids vif inférieur à ceux du lot témoin. Les céréales se différenciant des aliments complémentaires par leurs teneurs en protéines et en énergie métabolisable, les propriétés de l'un peuvent influencer sur l'ingestibilité de l'autre. Le principal problème rencontré alors est celui du rapport protéines / énergie du régime effectivement ingéré par le poulet. Il peut être différent de celui d'un aliment complet et ne pas permettre d'obtenir les mêmes

performances de croissance et/ou des qualités de carcasse comparables. Dans d'autres cas, les performances de croissance ne sont pas différentes de celles du témoin, mais une surconsommation énergétique et une sous-consommation protéique entraînent une augmentation de la teneur en gras abdominal de la carcasse et une diminution des rendements en filets. [79]

Il faut quand même retenir, que ce n'est pas le facteur "sorgho" qui est considéré là comme facteur d'échec et qu'au contraire, il est possible de formuler une ration équilibrée et efficace avec du sorgho entier et un complément titrant entre 40 et 50% de protéines brutes, pour l'alimentation de poulets de chair.

Il est même possible de remplacer une partie des protéines d'un tourteau de soja par du gluten feed de sorgho dans un aliment poussin. Une substitution totale est néfaste, mais à 25% on n'observe pas de différence significative. A 50%, la différence est perceptible, mais le rapport perte d'efficacité sur gain économique reste quand même en faveur du gluten feed de sorgho [77]. Reste qu'en France, on accepte mal un avantage économique au détriment notoire de l'efficacité zootechnique.

On mesure à peu près les mêmes valeurs nutritionnelles dans le cadre d'une utilisation par d'autres volailles et palmipèdes. Ainsi on peut utiliser la valeur EM coq dans les calculs de rationnement des pintades et des cailles du Japon. Alors que les canards et les dindes profitent mieux de la céréales que les poulets (mais le résultat peut être attribué à une moindre sensibilité de ces espèces aux tanins, qui n'étaient pas absents des grains utilisés dans ces expériences). [32], [34], [69]

La même conclusion que précédemment, pour l'utilisation chez le porc, est formulable pour les volailles : le sorgho présente un intérêt économique et zootechnique réel en élevage avicole, mais mal exploité actuellement par l'industrie de l'alimentation animale en raison de volumes de production trop faibles et trop variables. [94], [communication personnelle]

## **D. Equins**

Les besoins alimentaires des équins sont spécifiques à leur espèce, en raison de leur tube digestif "inversé" par rapport à celui des ruminants. On distingue ensuite différents profils de chevaux : animaux destinés aux activités de selle, animaux sportifs, reproducteurs, animaux de trait et, enfin, animaux destinés à la production de viande. Les besoins alimentaires liés à ces profils sont différents entre eux. [110]

La constante parmi tout cela est peut être le risque de sub-acidose, liée à la consommation de certaines céréales. Les fermentations lactiques favorisent, à plus ou moins long terme, l'apparition de fourbures [70]. Le sorgho, avec l'épaisse enveloppe de ses grains, n'a pas la meilleure disponibilité d'amidon parmi les céréales. Mais à la suite de traitements de transformation, ces mêmes grains sont suffisamment digestibles pour favoriser les fermentations lactiques. [4]

Il est possible de nourrir un cheval avec de l'ensilage de maïs plante entière. Il est donc possible, également, que l'ensilage de sorgho grain plante entière assure un apport alimentaire relativement valable. Cela fait partie des essais menés actuellement par la station expérimentale des Haras nationaux. Ce type d'aliment nécessite une correction en azote, sous peine de faire engraisser l'animal aux dépens de sa masse musculaire. [46], [108]

Quand au sorgho fourrager, l'existence de quelques cas d'ataxie accompagnée de cystite chronique, décrits notamment aux Etats-Unis, doit inciter à en restreindre l'utilisation aux variétés les moins toxiques possible.

## E. Carnivores

[24]

Les carnivores domestiques, comme les autres monogastriques (non herbivores), consomment une alimentation concentrée et ne digèrent pas les fibres. Les protéines sont quasiment exclusivement d'origine animale et l'énergie est issue notamment des céréales mais pas seulement.

Ces animaux ne sont pas naturellement efficaces pour digérer l'amidon. Une cuisson poussée est absolument nécessaire pour leur permettre d'assimiler les glucides de réserve végétaux. Grâce aux traitements de transformation, par la cuisson et l'extrusion entre autres, appliqués par les fabricants industriels de l'alimentation des carnivores, il est possible de les nourrir avec un aliment unique sec (croquettes) ou humide (pâtée), caractérisé par une digestibilité très élevée.

Le sorgho est un ingrédient valable en tant que source d'énergie. Après avoir été soumis aux traitements thermiques classiques, il offre une digestibilité inférieure aux autres céréales, notamment le riz, mais quand même supérieure à la moyenne de digestibilité des nutriments des aliments commerciaux pour chien. Les animaux rejettent des fèces parfaitement compactes et même moins humides qu'avec le riz, ce qui ne manque pas, généralement, de faire la satisfaction de leur propriétaire. Le sorgho est donc une alternative tout à fait valable aux céréales préférentiellement utilisées dans les productions industrielles actuelles. [76], [111], [112]

Pourtant la céréale n'est que très rarement exploitée dans ce domaine. Et même pas du tout en ce qui concerne la composition des produits vendus sur le marché français (enquête personnelle non exhaustive). Les sources d'amidon les plus employées, en France, sont le riz et le maïs, moins fréquemment le blé et l'orge et encore plus rarement le tapioca, réservé à des produits hypoallergéniques très spécialisés.

Il est quand même intéressant de souligner que cette absence d'utilisation pourrait avoir un intérêt dans la gestion des hyper sensibilités alimentaires. Ces réactions immunitaires exacerbées contre un (ou des) ingrédient(s) de la ration ont une incidence très difficile à chiffrer avec exactitude (entre rare et fréquente, selon les auteurs), n'ont pas de prédisposition d'âge, ni de sexe. La race influe un peu, mais aucune n'est épargnée. Elles se manifestent essentiellement par des dermatites.

Les antigènes alimentaires sont, le plus souvent, des protéines, mais l'allergie porte fréquemment sur plusieurs ingrédients. Ceux qui sont communément allergènes sont ceux utilisés le plus couramment dans les "pet foods", puisque cela augmente la probabilité d'exposition. Le diagnostic est thérapeutique et consiste en un régime d'éviction contenant des sources de protéines et de glucides auxquelles l'animal n'avait pas été exposé auparavant. L'orge et le tapioca sont des solutions actuellement disponibles. Le sorgho pourrait être utilisé également, mais n'a pas été testé à cet effet en raison de son absence sur ce marché.

Dans le cadre du traitement d'un animal atteint de diabète sucré, il est plus que conseillé de mettre en place un régime diététique. Celui-ci n'élimine jamais le besoin

d'insuline, mais sert à améliorer son efficacité. Le dosage idéal de protides, glucides, lipides pour les carnivores diabétiques n'a pas été étudié en profondeur. Mais il existe des recommandations basées sur les connaissances en médecine humaine et les connaissances des changements métaboliques des carnivores :

- protéines de haute qualité,
- restriction prudente des lipides chez les animaux obèses,
- glucides à digestion lente.

L'amidon est digéré et absorbé beaucoup moins rapidement que les glucides simples, mais on l'utilise déjà de toute façon.

En comparant la digestion de plusieurs céréales, il apparaît que le riz favorise l'hyperglycémie postprandiale, alors qu'une ration contenant de l'orge ou du sorgho modère cette glycémie et le pic d'insuline qui l'accompagne. Un régime qui minimise le pic de glycémie est préférable, car en atténuant ces fluctuations, on contribue à mieux contrôler le diabète et ses complications. Il s'agit donc bien d'une indication d'utilisation du sorgho (ou de l'orge, à défaut).

Ces observations sont réellement encourageantes mais n'ont, malheureusement, que peu d'intérêts dans la conjoncture actuelle. Les matières premières du marché français (et européen) sont absorbées par les élevages aviaires et porcins.

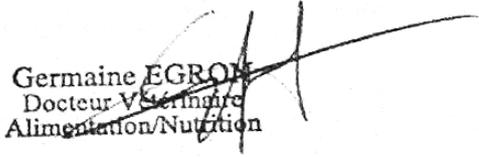
Il n'existe aucune contre-indication zootechnique à utiliser le sorgho dans l'alimentation des animaux domestiques en France. Il s'agit même de la céréale la plus riche en énergie dans le cadre de l'alimentation des volailles et elle pourrait présenter un intérêt certain dans la nutrition médicale des carnivores. Par contre, même si son intérêt en ensilage pour les ruminants est démontré, il est variable et ne peut être rationalisé dans l'état actuel des connaissances.



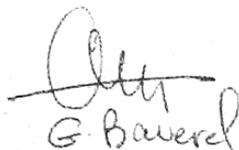
## Conclusion

Le sorgho est connu depuis longtemps en France, mais n'occupe qu'une part très réduite du paysage agricole français. Ce manque d'intérêt envers la céréale, comme envers le fourrage contraste avec les qualités de robustesse et de résistance à la sécheresse, de cette plante d'origine tropicale. Cela peut s'expliquer par des difficultés, posées par le sorgho, non seulement sur le plan agronomique, car la plante est très sensible au froid, mais aussi dans le cadre de son utilisation pour l'alimentation des animaux domestiques. La sélection de variétés pauvres en tanins et la recherche technologique sur les phytases ont permis de s'affranchir des limites liées aux facteurs antinutritionnels, contenus dans les grains. L'utilisation des parties végétatives du sorgho en tant que fourrage reste délicate. Malgré la sélection de variétés à faible teneur en durrhine, précurseur d'acide cyanhydrique, la toxicité potentielle de la plante reste fortement liée aux conditions environnementales. Ces dernières pouvant également favoriser l'accumulation de nitrates dans les tiges et les feuilles. L'ensilage des variétés fourragères et surtout des variétés céréalières en plante entière est une solution très recommandable sur les plans toxicologique et zootechnique. On obtient de cette manière un aliment conservé, débarrassé de sa toxicité potentielle et de valeur alimentaire proche de celle de l'ensilage de maïs. Ce dernier point reste pourtant à étudier plus en profondeur, car il n'existe pas d'équations spécifiques au sorgho, permettant de prédire ses valeurs alimentaires sous cette forme, contrairement au maïs, qui reste la référence en ce domaine.

**Le Professeur responsable  
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon  
Lyon**

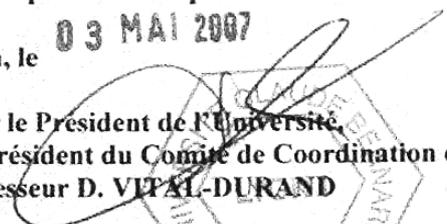
  
Germaine EGROU  
Docteur Vétérinaire  
Alimentation/Nutrition

**Le Président de la thèse**

  
G. Baverel

**Vu et permis d'imprimer**

**03 MAI 2007**  
Lyon, le

  
Pour le Président de l'Université,  
Le Président du Comité de Coordination des Etudes Médicales,  
Professeur D. VEPAL-DURAND

**Vu : Le Directeur  
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de**

  
**LE DIRECTEUR**

**Stéphane MARTINOT**



# BIBLIOGRAPHIE

- 1 - **ABDELGADIR I.E.O., MORRILL J.L.** (1995)  
*Effect of Processing Sorghum Grain on Dairy Calf Performance*  
J. Dairy Sci., 78, 9, 2040-2046
- 2 - **ADAMS L.G., DOLLAHITE J.W., ROMANE W.M., BULLARD T.L., BRIDGES C.H.** (1969)  
*Cystitis and ataxia associated with sorghum ingestion by horses*  
J. am. vet. med. Assoc., 155, 3, 518-524
- 3 - **ADRIAN J., JACQUOT R.** (1964)  
*Le sorgho et les mils en alimentation humaine et animale*  
Vigot Frères éd., Paris, 188 p.
- 4 - **AL JASSIM R.A.M.** (2006)  
*Supplementary feeding of horses with processed sorghum grains and oats*  
Animal Feed Science and Technology, 125, 1-2, 33-44
- 5 - **anonyme** (1994)  
*Du blé et du sorgho dans le papier*  
Le Dauphiné Libéré, 50, 15353 (02/04/1994), page 3
- 6 - **anonyme** (2006)  
*Dictionnaire Vidal - 82ème édition*  
Editions du Vidal, Issy-les-Moulineaux, 2430 p.
- 7 - **ARVALIS** (2005)  
*Proceedings of a conference on : Sorgho : une culture pleine d'atouts dans le cadre de la nouvelle PAC, Paris, 15 février 2005*  
ARVALIS - Institut du végétal, Paris, 8 p. + annexes
- 8 - **AWIKA J.M., ROONEY L.W.** (2004)  
*Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health*  
Phytochemistry, 65, 9, 1199-1221
- 9 - **AYDIN G., GRANT R.J., O'REAR J.** (1999)  
*Brown Midrib Sorghum in Diets for Lactating Dairy Cows*  
J. Dairy Sci., 82, 10, 2127-2135
- 10 - **BALVET D.** (2002)  
*La consommation de productions locales en Bresse de l'Ain : Pratiques et représentations alimentaires*  
Thèse de doctorat de sociologie et anthropologie, Université Lumière, Lyon, 508 p.

- 11 - **BARRIERE Y., GUILLET C., GOFFNER D., PICHON M.** (2003)  
*Genetic variation and breeding strategies for improved cell wall digestibility in annual forage crops. A review*  
Anim. Res., 52, 3, 193-228
- 12 - **BASF** (Page consultée le 10/02/2007)  
*BASF Nutrition Animale*  
[en ligne], Adresse URL : <http://www.basfnutritionanimale.fr>
- 13 - **BEAUCHAMPS J.C.** (1984)  
*Intoxication aiguë par les poisons méthémoglobinisants : contribution au dosage de la méthémoglobine chez les petits ruminants*  
Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté de médecine, Nantes, 78 p.
- 14 - **BONNEMAIRE P.** (1969)  
*Le sorgho grain dans l'alimentation du porc charcutier*  
Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté mixte de médecine et de pharmacie, Toulouse, 55 p.
- 15 - **BONNEMORT C.** (1994)  
*Le sorgho aime le chaud*  
Terroirs, 4, 58-59
- 16 - **BONNIER G., DOUIN R., POINSOT J. (ILL)** (1990)  
*La grande flore en couleurs de Gaston Bonnier*  
Editions Belin, Paris, 1401 p.
- 17 - **BORRON S.W., STONEROOK M., REID F.** (2006)  
*Efficacy of Hydroxocobalamin for the Treatment of Acute Cyanide Poisoning in Adult Beagle Dogs*  
Clinical Toxicology, 44, Supp. 1, 5-15
- 18 - **BOURGEAT M.E.** (1997)  
*Les intoxications végétales chez les petits ruminants*  
Thèse de doctorat vétérinaire, Université Claude Bernard, Lyon, 76 p.
- 19 - **BRADLEY G.A., METCALF H.C., REGGIARDO C., NOON T.H., BICKNELL E.J., LOZANO-ALARCON F., REED R.E., RIGGS M.W.** (1995)  
*Neuroaxonal degeneration in sheep grazing Sorghum pastures*  
J. vet. Diagn. Invest., 7, 2, 229-236
- 20 - **BRUNING-FANN C.S., KANEENE J.B.** (1993)  
*The effects of nitrate, nitrite, and N-nitroso compounds on animal health*  
Vet. hum. Toxicol., 35, 3, 237-253
- 21 - **BUREAU DES RESSOURCES GENETIQUES** (Page consultée le 02/10/2006)  
*BRG - Bureau des Ressources Génétiques*  
[en ligne], Adresse URL : <http://www.brg.prd.fr>

- 22 - **BUSK P.K., MOLLER B.L.** (2002)  
*Dhurrin Synthesis in Sorghum Is Regulated at the Transcriptional Level and Induced by Nitrogen Fertilization in Older Plants*  
 Plant Physiol., 129, 3, 1222-1231
- 23 - **CALMON J.P.** (1988)  
*Intoxications des animaux domestiques par les plantes dans le département du Lot*  
 Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté mixte de médecine et de pharmacie, Toulouse, 208 p.
- 24 - **CASE L.P., CAREY D.P., HIRAKAWA D.A., DARISTOTLE L.** (2000)  
*Canine and Feline Nutrition. A Resource for Companion Animal Professionals. 2nd edition*  
 Mosby, St Louis, 592 p.
- 25 - **CENTRE DE COOPERATION INTERNATIONALE EN RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT, GROUPE DE RECHERCHE ET D'ECHANGES TECHNOLOGIQUES, MINISTERE DES AFFAIRES ETRANGERES** (2002)  
*Mémento de l'agronome*  
 CIRAD, Paris, 1691 p.
- 26 - **CHANTEREAU J., NICOU R.** (1991)  
*Le sorgho*  
 Maisonneuve et Larose, Paris, 159 p.
- 27 - **CIRAD - UMR-PIA** (Page consultée le 24/03/2006)  
*Accueil de l'Umr Pia*  
 [en ligne], Adresse URL : <http://umr-pia.cirad.fr>
- 28 - **CONAN L., METAYER J.P., LESSIRE M., WIDIEZ J.L.** (1992)  
*Teneur en énergie métabolisable des céréales françaises pour les volailles. Synthèse d'enquêtes annuelles*  
 INRA Prod. Anim., 5, 5, 329-338
- 29 - **DEMARQUILLY C., ANDRIEU J.** (1992)  
*Composition chimique, digestibilité et ingestibilité des fourrages européens exploités en vert*  
 INRA Prod. Anim., 5, 3, 213-221
- 30 - **DEU M., GONZALEZ-DE-LEON D., GLASZMANN J.C., DEGREMONT I., CHANTEREAU J., LANAUD C., HAMON P.** (1994)  
*RFLP diversity in cultivated sorghum in relation to racial differentiation*  
 Theor. Appl. Genet., 88, 6-7, 838-844
- 31 - **DO NASCIMENTO W.G., BARRIERE Y., CHARRIER X., HUYGHE C., EMILE J.C.** (2005)  
*Evaluation of sweet grain sorghum silage for dairy cows as an alternative to irrigated maize silage*  
 In : O'MARA F.P. et al. (ed). Proceedings of a conference on : XX International Grassland Conference, Dublin (Eire), 26 juin au 1er juillet 2005, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, page 679

- 32 - **DOUGLAS J.H., SULLIVAN T.W., GONZALEZ N.J., BECK M.M.** (1993)  
*Differential age response of turkeys to protein and sorghum tannin levels*  
 Poultry Sci., 72, 10, 1944-1951
- 33 - **ELKIN R.G. et al.** (1996)  
*Condensed tannins are only partially responsible for variations in nutrient digestibilities of sorghum grain cultivars*  
 J. Agric. Food Chem., 44, 3, 848-853
- 34 - **ELKIN R.G., ROGLER J.C., SULLIVAN T.W.** (1991)  
*Differential response of ducks and chicks to dietary sorghum tannins*  
 J. Sci. Food and Agric., 57, 4, 543-553
- 35 - **EMILE J.C., AL RIFAI M., CHARRIER X., LEROY P., BARRIERE Y.** (2006)  
*Grain sorghum silages as an alternative to irrigated maize silage*  
 In : European Grassland Federation (ed). Proceedings of a conference on : Sustainable grassland productivity, Badajoz (Spain), 3-6 avril 2006
- 36 - **EMILE J.C., CHARRIER X., DO NASCIMENTO W.G., BARRIERE Y.** (2006)  
*Utilisation d'ensilage de sorgho plante entière pour l'alimentation des vaches laitières*  
 In : INRA, Institut de l'Elevage (eds). Proceedings of a conference on : 12e Journées 3R, Paris, décembre 2005
- 37 - **EMMAMBUX N.M., TAYLOR J.R.** (2003)  
*Sorghum kafirin interaction with various phenolic compounds*  
 J. Sci. Food and Agric., 83, 5, 402-407
- 38 - **GRANT R.J., HADDAD S.G., MOORE K.J., PEDERSEN J.F.** (1995)  
*Brown Midrib Sorghum Silage for Midlactation Dairy Cows*  
 J. Dairy Sci., 78, 9, 1970-1980
- 39 - **GRASSE P.P.** (1963)  
*Botanique*  
 Masson et Cie, Paris, 1039 p.
- 40 - **GREMY D.** (2006)  
*L'ensilage de sorgho démontre son efficacité*  
 L'Eleveur laitier, 134, page 36
- 41 - **GRENIER C., BRAMEL-COX P.J., HAMON P.** (2001)  
*Core Collection of Sorghum : I. Stratification Based on Eco-Geographical Data*  
 Crop Sci., 41, 1, 234-240
- 42 - **GROUPE D'ETUDE ET DE CONTROLE DES VARIETES ET DES SEMENCES**  
 (Page consultée le 12/09/2006)  
**GEVES**  
 [en ligne], Adresse URL : <http://www.geves.fr>

**43 - GROUPEMENT NATIONAL INTERPROFESSIONEL DES SEMENCES ET PLANTS (GNIS) (2004)**

*Catalogue français des espèces et variétés - Tome 1 : plantes de grande culture*  
SEDIS, Paris, 235 p.

**44 - GUALTIERI M., RAPACCINI S. (1990)**

*Sorghum grain in poultry feeding*  
World's Poultry Science Journal, 46, 3, 246-254

**45 - HALKIER B.A., MOLLER B.L. (1989)**

*Biosynthesis of the Cyanogenic Glucoside Dhurrin in Seedlings of Sorghum bicolor (L.) Moench and Partial Purification of the Enzyme System Involved*  
Plant Physiol., 90, 4, 1552-1559

**46 - HARAS NATIONAUX (Page consultée le 12/12/2006)**

*Haras nationaux - La station expérimentale*  
[en ligne], Adresse URL : <http://www.haras-nationaux.fr>

**47 - HARLAN J.R., DE WET J.M.J. (1972)**

*A simplified classification of cultivated sorghum*  
Crop Sci., 12, 2, 172-176

**48 - HAUDRICOURT A.G., HEDIN L. (1943)**

*L'homme et les plantes cultivées*  
Gallimard, Paris, 233 p.

**49 - HICKS C. et al. (2001)**

*Genetic analysis of kafirins and their phenotypic correlations with feed quality traits, in vitro digestibility, and seed weight in grain sorghum*  
Cereal chem., 78, 4, 412-416

**50 - HUMPHREYS D.J. (1988)**

*Veterinary toxicology. Third edition*  
Baillière Tindall, London, 356 p.

**51 - INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (1979)**

*Bulletin des variétés - Plantes fourragères*  
INRA, Paris, 338 p.

**52 - INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (1989)**

*L'alimentation des animaux monogastriques : porc, lapin, volailles. 2ème édition*  
INRA, Paris, 282 p.

**53 - INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (Page consultée le 26/09/2006)**

*Index synonymique de la Flore de France*  
[en ligne], Adresse URL : <http://www.dijon.inra.fr/flore-france/index.htm>

- 54 - **JACQUOT L.** (1988)  
*Les matières premières alimentaires*  
In : Rosset R. (éd). L'aviculture française, ITSV, Paris, 375-380
- 55 - **JAMET J.F.** (2004)  
*Une vache Pie-noire tombe et ne peut se relever au retour du pâturage*  
Bull. Group. tech. vét., 23, 8 et 71-72
- 56 - **JARRIGE R.** (1988)  
*Alimentation des bovins, ovins et caprins*  
INRA, Paris, 471 p.
- 57 - **JONDREVILLE C.** (2000)  
*Utilisation digestive des acides aminés des matières premières chez le porc en croissance*  
Thèse de doctorat d'agronomie, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 247 p.
- 58 - **JONDREVILLE C.** (Page consultée le 10/02/2007)  
*Calculer la teneur en P digestible apparent d'un aliment pour porcs à partir des valeurs fournies dans les tables INRA-AFZ*  
[en ligne], Adresse URL : <http://www.inapg.inra.fr/dsa/afz/index.htm>
- 59 - **JONDREVILLE C., VAN DEN BROECKE J., GATEL F., GROSJEAN F., VAN CAUWENBERGHE S., SEVE B.** (2001)  
*Ileal digestibility of amino acids and estimates of endogenous amino acid losses in pigs fed wheat, triticale, rye, barley, maize and sorghum*  
Anim. Res., 50, 2, 119-134
- 60 - **JUDD W.S., CAMPBELL C.S., KELLOGG E.A., STEVENS P.** (2002)  
*Botanique systématique, une perspective phylogénétique*  
De Boeck Université, Paris - Bruxelles, 467 p.
- 61 - **KEMPF H.** (2000)  
*L'Europe va aider la Hongrie et la Roumanie à faire face au désastre écologique*  
Le Monde, (16/02/2000)
- 62 - **KNIGHT A.P., WALTER R.G.** (2001)  
*A Guide to Plant Poisoning of Animals in North America*  
Teton NewMedia, Jackson WY, 367 p.
- 63 - **KOJIMA M., POULTON J.E., THAYER S.S., CONN E.E.** (1979)  
*Tissue distributions of dhurrin and of enzymes involved in its metabolism in leaves of Sorghum bicolor*  
Plant Physiol., 63, 6, 1022-1028
- 64 - **LAJOUS T.** (1995)  
*Le diagnostic clinique et nécropsique des intoxications végétales chez les bovins*  
Thèse de doctorat vétérinaire, Université Paul Sabatier, Toulouse, 189 p.

- 65 - **LEGARTO J.** (2000)  
*L'utilisation en ensilage plante entière des sorghos grains et sucriers : intérêts et limites pour les régions sèches*  
Fourrages, 163, 323-338
- 66 - **LIZARDO R., PEINIAU J., AUMAITRE A.** (1995)  
*Effect of sorghum on performance, digestibility of dietary components and activities of pancreatic and intestinal enzymes in the weaned piglet*  
Animal Feed Science and Technology, 56, 1-2, 67-82
- 67 - **LORGEOU J., MARTIN B.** (2005)  
*Un critère à prendre en considération : précocité des variétés de maïs grain*  
Perspectives agricoles, 309, 66-73
- 68 - **LORGUE G., LECHENET J., RIVIERE A.** (1987)  
*Précis de toxicologie clinique vétérinaire*  
Editions du Point Vétérinaire, Maisons-Alfort, 208 p.
- 69 - **MANDAL A.B. et al.** (2006)  
*Comparative apparent metabolisable energy values of high, medium and low tannin varieties of sorghum in cockerel, guinea fowl and quail*  
British Poultry Science, 47, 3, 336-341
- 70 - **MARTIN-ROSSET W.** (1990)  
*L'alimentation des chevaux*  
INRA, Paris, 232 p.
- 71 - **MARTY D.** (2004)  
*Du sorgho à la place du maïs*  
La France Agricole, (02/04/2004)
- 72 - **MCKENZIE R.A., MCMICKING L.I.** (1977)  
*Ataxia and urinary incontinence in cattle grazing sorghum*  
Aust. vet. J., 53, 10, 496-497
- 73 - **MCNAB J.M., BOORMAN K.N.** (2002)  
*Poultry Feedstuffs. Supply, Composition and Nutritive Value*  
CABI Publishing, Wallingford, 427 p.
- 74 - **MEISSONNIER E.** (1978)  
*Intoxication par les nitrates chez les ruminants*  
Point vét., 6, 30, 67-70
- 75 - **MORGAN S.E., JOHNSON B., BREWER B., WALKER J.** (1990)  
*Sorghum cystitis ataxia syndrome in horses*  
Vet. hum. Toxicol., 32, 6, page 582

- 76 - **MURRAY S.M., FAHEY G.C.JR., MERCHEN N.R., SUNVOLD G.D., REINHART G.A.** (1999)  
*Evaluation of Selected High-Starch Flours as Ingredients in Canine Diets*  
 J. Anim. Sci., 77, 8, 2180-2186
- 77 - **MUSTAFA E.A., EL ZUBEIR E.A.** (1993)  
*Sorghum gluten as a substitute for soybean meal in broiler chick diets*  
 World anim. rev., 76, 58-61
- 78 - **NIKKHAH A., ALIKHANI M., AMANLOU H.** (2004)  
*Effects of Feeding Ground or Steam-Flaked Broom Sorghum and Ground Barley on Performance of Dairy Cows in Midlactation*  
 J. Dairy Sci., 87, 1, 122-130
- 79 - **NOIROT V., BOUVAREL I., BARRIER-GUILLOT B., CASTAING J., ZWICK J.L., PICARD M.** (1998)  
*Céréales entières pour le poulets de chair : le retour ?*  
 INRA Prod. Anim., 11, 5, 349-357
- 80 - **NOUZA, A.** (1984)  
*L'intoxication cyanhydrique. Contribution à l'étude de son diagnostic expérimental chez les ovins*  
 Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté de médecine, Nantes, 104 p.
- 81 - **NYACHOTI C.M., ATKINSON J.L., LEESON S.** (1997)  
*Sorghum tannins : A review*  
 World's Poultry Science Journal, 53, 1, 5-21
- 82 - **OLIVER A.L., GRANT R.J., PEDERSEN J.F., O'REAR J.** (2004)  
*Comparison of Brown Midrib-6 and -18 Forage Sorghum with Conventional Sorghum and Corn Silage in Diets of Lactating Dairy Cows*  
 J. Dairy Sci., 87, 3, 637-644
- 83 - **OLUFAYO A.A., RUELLE P., BALDY C., AIDAOUI A.** (1997)  
*Biomass of grain sorghum (Sorghum bicolor L. Moench) under variable water regime*  
 Biomass and Bioenergy, 12, 5, 383-386
- 84 - **ONIC, ARVALIS** (2005)  
*Qualité du sorgho grain français pour l'alimentation animale - Récolte 2005*  
 ARVALIS - Institut du végétal, Paris, 4 p.
- 85 - **ORGANISATION DES NATIONS UNIES - FAO** (1995)  
*Le sorgho et les mils dans la nutrition humaine*  
 FAO, Rome, 198 p.
- 86 - **ORGANISATION DES NATIONS UNIES - FAO** (1996)  
*France : rapport de pays pour la conférence technique internationale de la FAO sur les ressources phytogénétiques*  
 Leipzig, 1996, 245 p.

- 87 - **ORGANISATION DES NATIONS UNIES - FAO** (2002)  
*Le sorgho à sucre en Chine*  
 Agriculture 21, 5, 2
- 88 - **ORGANISATION DES NATIONS UNIES - FAO** (Page consultée le 01/06/2006)  
*Grassland species*  
 [en ligne], Adresse URL : [http://www.fao.org/index\\_fr.htm](http://www.fao.org/index_fr.htm)
- 89 - **ORGANISATION DES NATIONS UNIES - FAO** (Page consultée le 22/03/2006)  
*FAOSTAT Page d'accueil*  
 [en ligne], Adresse URL : [http://www.fao.org/index\\_fr.htm](http://www.fao.org/index_fr.htm)
- 90 - **PIEDALLU A.** (1923)  
*Le sorgho : son histoire, ses applications*  
 Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, Paris, cité par ADRIAN et JACQUOT, 1964
- 91 - **QUINIOU N. et al.** (2004)  
*Conduites alimentaires appliquées par les éleveurs de porcs lourds en France*  
 Techni Porc, 27, 1, 11-12
- 92 - **RADOSTITS O.M., GAY C.C., BLOOD D.C., HINCHCLIFF K.W.** (2000)  
*Veterinary medicine. A textbook of the diseases of cattle, sheep, pigs, goats and horses. 9th edition*  
 W.B. Saunders, London, 1877 p.
- 93 - **RAVINDRAN V., HEW L.I., RAVINDRAN G., BRYDEN W.L.** (2005)  
*Apparent ileal digestibility of amino acids in dietary ingredients for broiler chickens*  
 Animal Science, 81, 1, 85-98
- 94 - **REBOULLET D.** (2005)  
*Des débouchés assurés et une très bonne valeur alimentaire*  
 Le Journal du Sorgho, 8, page 3
- 95 - **REPUBLIQUE FRANCAISE - MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PECHE** (2004-2006)  
*Arrêtés ministériels portant modification du Catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées en France (semences de maïs et sorgho)*  
 Journal Officiel de la République Française, Paris
- 96 - **REPUBLIQUE FRANCAISE - MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PECHE** (Page consultée le 30/05/2006)  
**AGRESTE**  
 [en ligne], Adresse URL : <http://agreste.agriculture.gouv.fr>
- 97 - **RICKARD C.G.** (1976)  
*Les plantes cyanogénétiques et les intoxications qu'elles provoquent*  
 Thèse de doctorat vétérinaire, Université Paul Sabatier, Toulouse, 123 p.

- 98 - **RIOU B.** (1999)  
*Intoxication par les fumées d'incendie*  
 [en ligne], Adresse URL : <http://www.samu.org>, 15 p.
- 99 - **RIOU B., BERDEAUX A., PUSSARD E., GIUDICELLI J.F.** (1993)  
*Comparison of the hemodynamic effects of hydroxocobalamin and cobalt edetate at equipotent cyanide antidotal doses in conscious dogs*  
 Intensive Care Medicine, 19, 1, 26-32
- 100 - **SAUVANT D., PEREZ J.-M., TRAN G.** (2002)  
*Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage*  
 INRA Editions, Paris, 301 p.
- 101 - **SHELTON J.L., MATTHEWS J.O., SOUTHERN L.L., HIGBIE A.D., BIDNER T.D., FERNANDEZ J.M., PONTIF J.E.** (2004)  
*Effect of nonwaxy and waxy sorghum on growth, carcass traits, and glucose and insulin kinetics of growing-finishing barrows and gilts*  
 J. Anim. Sci., 82, 6, 1699-1706
- 102 - **SHROYER J.** (2006)  
*Beware of high nitrate and prussic acid levels in drought-stressed sorghum*  
 Agronomy e-Updates, 42, 2-5
- 103 - **SILBERNAGL S., DESPOPOULOS A.** (2001)  
*Atlas de poche de physiologie - 3ème édition*  
 Flammarion Médecine-Sciences, Paris, 436 p.
- 104 - **SNOWDEN J.D.** (1936)  
*The cultivated races of sorghum*  
 Adlard & son, ltd, Londres, cité par FAO, 1995
- 105 - **SOTO-BLANCO B., GORNIAC S.L., KIMURA, E.T.** (2001)  
*Physiopathological effects of the administration of chronic cyanide to growing goats - a model for ingestion of cyanogenic plants*  
 Vet. Res. Commun., 25, 5, 379-389
- 106 - **STOCK R.A.** (1999)  
*Nutritional benefits of specialty grain hybrids in beef feedlot diets*  
 J. Anim. Sci., 77, Suppl. 2, 208-212
- 107 - **SUNAGA Y., HARADA H., HATANAKA T.** (2005)  
*Varietal differences in nitrate nitrogen concentration of Sudangrass (*Sorghum sudanense* (Piper) stapf)*  
 Grassland Science, 51, 2, 169-177
- 108 - **TISSERAND J.L.** (1985)  
*Alimentation du cheval. 3ème édition*  
 CEREOPA, Paris, 94 p.

- 109 - **TRAN G., SKIBA F.** (2005)  
*Variabilité inter et intra matière première de la teneur en phosphore total et phytique et de l'activité phytasique*  
INRA Prod. Anim., 18, 3, 159-168
- 110 - **TRILLAUD-GEYL C.** (1995)  
*Utilisation de sous-produits dans l'alimentation du cheval*  
In : Institut du Cheval (ed). Proceedings of a conference on : 21ème journée de la recherche équine, Paris, 1er mars 1995, Institut du Cheval, Paris, 20-29
- 111 - **TWOMEY L.N., PETHICK D.W., ROWE J.B., CHOCT M., PLUSKE J.R., BROWN W., LAVISTE M.C.** (2002)  
*The Use of Sorghum and Corn as Alternatives to Rice in Dog Foods*  
J. Nutr., 132, 1704S-1705S
- 112 - **TWOMEY L.N., PLUSKE J.R., ROWE J.B., CHOCT M., BROWN W., PETHICK D.W.** (2003)  
*The replacement value of sorghum and maize with or without supplemental enzymes for rice in extruded dog foods*  
Animal Feed Science and Technology, 108, 61-69
- 113 - **UNION EUROPEENNE** (1971)  
*PREMIERE DIRECTIVE DE LA COMMISSION du 15 juin 1971 portant fixation de méthodes d'analyse communautaire pour le contrôle officiel des aliments des animaux (71/250/CEE)*  
JO L 155, du 12/7/1971, page 13
- 114 - **VARSHNEY J.P., GUPTA A.K., YADA, M.P.** (1996)  
*Occurrence of ataxia-cystitis syndrome in horses fed on Sorghum vulgare in India*  
Indian vet. J., 73, 9, 985-986
- 115 - **VINCENT P.** (1984)  
*Les intoxications aiguës par les nitrites et les nitrates chez les ruminants. Contribution à l'étude de leur diagnostic de laboratoire*  
Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté de médecine, Nantes, 84 p.
- 116 - **VITREY S.** (2004)  
*Diagnostic des intoxications végétales chez les ruminants*  
Thèse de doctorat vétérinaire, Université Claude Bernard, Lyon, 102 p.
- 117 - **WHEELER J.L., MULCAHY C., WALCOTT J.J., RAPP G.G.** (1990)  
*Factors affecting the hydrogen cyanide potential of forage sorghum*  
Australian Journal of Agricultural Research, 41, 6, 1093-1100
- 118 - **ZAGNI C., GASPARI F., PICCAGLIA R.** (2003)  
*Effect of harvest stage on sorghum silage production*  
In : European Grassland Federation (ed). Proceedings of a conference on : Optimal forage systems for animal production and the environment, Pleven (Bulgaria), 26-28 mai 2003, The British Grassland Society, Cirencester, 322-325

## **Communications personnelles :**

M. Philippe Carré,	ProSorgho
M. Xavier Charrier,	INRA Lusignan
M. Serge Clamins,	Semences de Provence
M. Jean-Claude Emile,	INRA Lusignan
Mme Geneviève Fliedel,	CIRAD
M. François Grosjean,	Arvalis
M. Roeland Kapsenberg,	Cal/West Seeds
M. Bernard Laval,	RAGT
M. Stéphane Luminet,	Caussade Semences
M. Mathias Rouillé,	Semences de Provence

**DEHAYNIN Nicolas**

**UTILISATION DU SORGHO EN ALIMENTATION ANIMALE**

**Thèse Vétérinaire : Lyon, 2007**

**RESUME :**

Le sorgho est cultivé en France, du Sud-Ouest au pays de Loire et dans le bassin rhodannien. Il constitue le 6<sup>e</sup> volume de production céréalière nationale. Les variétés fourragères sont destinées à l'alimentation des ruminants, les grains sont consommées principalement par les monogastriques. Depuis la sélection de variétés à grains sans tannin, les valeurs alimentaires du sorgho sont comparables aux autres céréales et souvent proches du maïs, tout en étant beaucoup plus tolérant au manque d'irrigation que ce dernier. Les parties végétatives de la plante restent caractérisées par une concentration variable en durrhine. Cet hétéroside cyanogénétique libère de l'acide cyanhydrique lors de la digestion et provoque une intoxication gravissime chez les herbivores, contre laquelle les moyens thérapeutiques sont limités pour le vétérinaire praticien. Mais ce danger est prévisible, à défaut d'être maîtrisé, et n'est pas une contre-indication à l'utilisation du sorgho en alimentation animale.

**MOTS CLES :**

- Sorghum bicolor
- Alimentation animale
- Valeurs alimentaires
- Toxicité

**JURY :**

Président :	Monsieur le Professeur G. BAVEREL
1 <sup>er</sup> Assesseur :	Madame le Professeur G. MORAND-EGRON
2 <sup>e</sup> Assesseur :	Monsieur le Professeur P. BERNY

**DATE DE SOUTENANCE :**

1<sup>er</sup> juin 2007

**ADRESSE DE L'AUTEUR :**

34 avenue de l'hippodrome  
69890 La Tour de Salvagny