



Influence de l'alimentation sur les performances des oies et la durabilité du système de production du foie gras : effets de la substitution du maïs par du sorgho et de la forme de présentation de l'aliment

Julien Arroyo

► To cite this version:

Julien Arroyo. Influence de l'alimentation sur les performances des oies et la durabilité du système de production du foie gras : effets de la substitution du maïs par du sorgho et de la forme de présentation de l'aliment. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2012. Français. NNT : 2012INPT0163 . tel-04281607

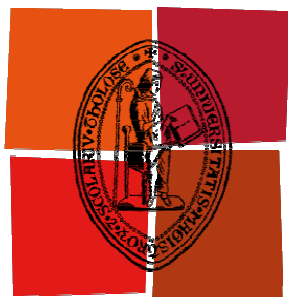
HAL Id: tel-04281607

<https://theses.hal.science/tel-04281607>

Submitted on 13 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Pathologie, Toxicologie, Génétique et Nutrition

Présentée et soutenue par :

Julien Arroyo

Le : 18 décembre 2012

Titre :

Influence de l'alimentation sur les performances des oies et la durabilité du système de production du foie gras : effets de la substitution du maïs par du sorgho et de la forme de présentation de l'aliment

Ecole doctorale :

Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries (SEVAB)

Unité de recherche :

UMR 1289 INRA-INP/ENSAT-ENVT 'TANDEM'

Directeur(s) de Thèse :

Laurence Fortun-Lamothe

Alain Auvergne

Rapporteurs :

Jean-Yves Dourmad

Philippe Lescoat

Membre(s) du jury :

Christine Duvaux-Ponter

René Babilé

Jean-Pierre Dubois

« *Alea jacta est* »

Jules César

Remerciements

Le travail présenté dans cette thèse de doctorat a été réalisé à l'UMR 1289 TANDEM (Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème, Métabolisme).

Dans un premier temps, je remercie les personnes qui me font l'honneur de participer à ce jury :

- Monsieur René BABILE (Professeur émérite de l'Université de Toulouse) qui a accepté la présidence de ce jury.
- Je remercie vivement Messieurs Jean-Yves DOURMAD (Ingénieur de Recherches à l'INRA, UMR INRA-AgroCampus Pegase, Saint-Gilles) et Philippe LESCOAT (Ingénieur de Recherches à l'INRA, UR83 Recherches Avicoles, Nouzilly) pour m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs de cette thèse.
- Merci également à Madame Christine DUVAUX-PONTER (Professeur des Universités, UMR INRA-AgroParisTech MoSAR, Paris) pour m'avoir fait l'honneur d'être examinatrice de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à ma directrice de thèse, Madame Laurence FORTUN-LAMOTHE (Directeur de Recherches à l'INRA, UMR1289 TANDEM), pour son encadrement, ses qualités scientifiques et pédagogiques et surtout ses qualités humaines pour avoir affronté les « personnages » gravitant autour de ce projet. Merci pour m'avoir fait confiance jusqu'à la fin de ma thèse et pour m'avoir dirigé et épaulé sur ce sujet passionnant.

Merci à mon co-directeur de thèse, Monsieur Alain AUVERGNE (Ingénieur de Recherches à l'INPT/ENSAT, UMR 1289 TANDEM), pour avoir accepté de repousser de quelques mois son départ à la retraite et pour m'avoir transmis une partie de son savoir et de sa passion pour la zootechnie.

Merci à Messieurs Jean-Pierre DUBOIS et Philippe GONDONNEAU de l'Association des Eleveurs de Dordogne (ASSELDOR) pour m'avoir fait confiance et pour m'avoir permis de réaliser ce travail via une convention CIFRE.

Je suis très reconnaissant envers l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) et l'interprofession Foie gras (CIFOG) qui ont financé cette thèse.

Dans un second temps, je remercie les personnes qui m'ont fait l'honneur d'être les membres du comité de pilotage de cette thèse : Mesdames Elisabeth BAEZA (Ingénieur de Recherches à l'INRA, UR 83 Recherches Avicoles) et Christine LETERRIER (Directeur de Recherches à l'INRA, UMR Physiologie de la Reproduction et des Comportements), et Messieurs Joël AUBIN (Ingénieur de Recherches à l'INRA, UMR 1069 SAS), Philippe DEBAEKE (Directeur de Recherches à l'INRA, UMR 1248 AGIR) et Xavier FERNANDEZ (Directeur de Recherches à l'INRA, UMR 1289 TANDEM).

A cours de ces années j'ai pu côtoyer de nombreuses personnes que je tiens par ces mots à remercier pour leur aide et leur soutien. Merci à :

- L'équipe de la Ferme de l'oie et plus particulièrement à Mesdames Elisabeth CAZENAVE, Danièle MERILLOUX, Dominique PLASSARD, et Martine VERDIER et à Messieurs Mohamed BIJJA, Jean-Pierre DUBOIS et Franck LAVIGNE, je suis heureux d'avoir travaillé à vos côtés et j'espère continuer dans la même ambiance.
- L'ensemble des périgourdins qui ont pu participer de près voire de très près aux essais zootechniques notamment merci aux personnes des Ateliers de Lavergne de Prats-de-Carlux, de l'Institut du goût du Périgord, de la Coopérative Sarlat Périgord Foie gras et du LEGTA de Périgueux.
- L'ensemble des personnes du « petit monde du foie gras » que j'ai pu rencontrer tout au long de multiples réunions.
- L'équipe de l'UMR 1069 SAS et plus particulièrement Mesdames Coralie HAESE et Aurélie WILFART, et Monsieur Joël AUBIN pour m'avoir accueilli chaleureusement en Bretagne et appris à réaliser des Analyses de Cycle de Vie.
- Aux enseignants de l'Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Agricoles de Bordeaux (ENITAB) et plus spécifiquement Messieurs Didier CHINZI et Benoît GROSSIORD pour m'avoir montré le chemin...

- L'équipe de l'UMR 1289 TANDEM, les personnes ayant pu me côtoyer à l'ENSAT et tous les stagiaires. Je ne citerai personne en particulier car vous avez TOUS contribué, à votre façon, à ce travail. Je ne vous dirai qu'une chose, je ne suis peut-être qu'un « Agri » mais ce fut un immense plaisir de vous avoir côtoyés et j'espère le faire encore pendant quelque temps. MERCI

Un clin d'œil particulier à Corinne PAUTOT, Christine JULIEN et Mickaël REY, sans vous je n'aurais pu arriver jusqu'au bout, nous avons partagé les hauts et les bas voire les très bas ensemble et ce pratiquement tous les jours au cours de ces trois années. Cette thèse même si vous n'en avez écrit aucun mot, j'estime qu'une grosse part vous revient. MERCI

Pour terminer je souhaiterais remercier mes amis...

Ces quelques années n'ont pas été des plus simples, d'un autre côté si c'était facile ce ne serait pas amusant... Donc ces quelques lignes pour vous remercier :

- Vous, mes amis Enitiens de la promo 2006-2009, et principalement toi, Chloé S. qui m'a suivi jusqu'à Toulouse, cela n'a pas été facile tous les jours... mais MERCI. Et toi, Maéva J. qui m'a soutenu et accueilli durant mes séjours Bretons.
- Vous, Anne-Charlotte H. et Maéva P. qui me supportez depuis le CPPBx.
- Vous, mes amis d'enfance, Marion C., Mathilde D., Gaëlle D., Agnès et Thomas T., qui jusqu'aux derniers moments, avez su me changer les idées.

... et ma famille.

Merci pour votre soutien et votre amour, ce travail est pour vous.

J'oubliai... un merci spécial aux quelques 1352 oies, principales protagonistes de ce travail.

Publications scientifiques

- **Publication 1:** ARROYO Julien, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, LAVIGNE Franck, BIJJA Mohammed, FORTUN-LAMOTHE Laurence (2012). Influence of feeding sorghum on the growth, gizzard development and carcass traits of growing geese. **Animal. 6:1583-1589.**
- **Publication 2:** ARROYO Julien, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, LAVIGNE Franck, BIJJA Mohammed, BANNELIER Carole, FORTUN-LAMOTHE Laurence. (2012). Effects of presentation and type of cereals (corn or sorghum) on performance of geese. **Poultry Science. 91:2063-2071.**
- **Publication 3:** ARROYO Julien, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, LAVIGNE Franck, BIJJA Mohammed, FORTUN-LAMOTHE Laurence. The influence of loose-mix feeding on behavior, feed intake and body weight of growing geese. **Poultry Science. Soumise le 08.10.2012.**
- **Publication 4:** ARROYO Julien, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, LAVIGNE Franck, BIJJA Mohammed, FORTUN-LAMOTHE Laurence. Influence of amount and form of sorghum in the diet on the performance of overfed geese. **Animal. Soumise le 24.09.2012.**
- **Publication 5:** ARROYO Julien, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, LAVIGNE Franck, BIJJA Mohammed, BANNELIER C, MANSE H, FORTUN-LAMOTHE Laurence. Effects of substituting yellow corn by sorghum in goose diet on *magret* and *foie gras* quality. **Journal of Animal Science. Soumise le 31.05.2012.**
- **Publication 6:** ARROYO Julien, FORTUN-LAMOTHE Laurence, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, LAVIGNE Franck, BIJJA Mohammed, AUBIN Joël. Environmental influence of maize substitution by sorghum and diet presentation on goose's "*foie gras*" production. **Journal of Cleaner Production. Soumise le 25.09.2012.**
- **Publication 7:** ARROYO Julien, FORTUN-LAMOTHE Laurence. Effets du type de céréales (maïs ou sorgho) et de la forme de présentation de l'aliment (granulé ou mélange) sur la durabilité des ateliers d'élevage d'oies grasses. **En préparation.**
- **Publication 8:** ARROYO Julien, FORTUN-LAMOTHE Laurence, DUBOIS Jean-Pierre, LAVIGNE Franck, AUVERGNE Alain. Conduite alimentaire des oies destinées à la production de foie gras. **INRA Productions Animales. Sous presse.**

Communications en congrès internationaux

- **ARROYO Julien**, FORTUN-LAMOTHE Laurence, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, AUBIN Joël. (2012) Comparison of environmental impacts of corn or sorghum as geese feed in “*foie gras*” production. (Poster); in: Corson, M.S., van der Werf, H.M.G (Eds), Book of Abstracts of the 8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2012), 1-4 October 2012, Saint-Malo, France. INRA, Rennes, France, p. 128.
- **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, LAVIGNE Franck, BIJJA Mohamed, FORTUN-LAMOTHE Laurence. (2010) Effects of sorghum presentation on performance of growing geese. (Poster); XIII European Poultry Conference. Tours, France, 23-27 August 2010. World's Poultry Science Association Journal Volume 66, Supplement. Page 362.

Communications dans des congrès nationaux et des journées d'animation scientifiques

- **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, AUBIN Joël, DEBAECKE Philippe, FERNANDEZ Xavier, BAEZA Elisabeth, LETERRIER Christine, FORTUN-LAMOTHE Laurence. Conception et évaluation de systèmes d'élevage avicole innovant : le cas de la substitution du maïs par du sorgho pour la production de foie gras d'oie. 10èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras. La Rochelle, 26-28 mars 2013. (acceptée en communication orale)
- **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, BIJJA Mohamed, LAVIGNE Franck, BANNELIER Carole, FORTUN-LAMOTHE Laurence. Influence de la présentation (granulé ou fermier) et du type de céréale (maïs ou sorgho) en période de croissance-finition sur les performances des oies. 10èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras. La Rochelle, 26-28 mars 2013. (acceptée en poster)
- **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, BIJJA Mohamed, LAVIGNE Franck, BANNELIER Carole, FORTUN-LAMOTHE Laurence. Influence de la forme et de la quantité de sorgho dans la pâtée de gavage sur les performances des oies. 10èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras. La Rochelle, 26-28 mars 2013. (acceptée en poster)
- **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, BIJJA Mohamed, LAVIGNE Franck, BANNELIER Carole, MANSE Hélène, BARTHEL Juliette, FORTUN-LAMOTHE Laurence. Effets de la substitution du maïs par du sorgho sur la qualité du magret et du foie gras d'oie. 10èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras. La Rochelle, 26-28 mars 2013. (acceptée en poster)

- **ARROYO Julien**, DUBOIS Jean-Pierre, BIJJA Mohamed, LAVIGNE Franck, FORTUN-LAMOTHE Laurence, AUVERGNE Alain. Conduite alimentaire et gestion des transitions alimentaires chez les oies destinées à la production de foie gras. 10èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras. La Rochelle, 26-28 mars 2013. (acceptée en poster)

- **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, FORTUN-LAMOTHE Laurence. (2012) Conception et évaluation de systèmes d'élevage avicole innovant : le cas de la substitution du maïs par du sorgho pour la production de foie gras d'oie. 5^{ème} Journée de la recherche de l'ENSAT. Castanet-Tolosan, 22 Mars 2012.

- **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, BIJJA Mohammed, LAVIGNE Franck, BANNELIER Carole, FORTUN-LAMOTHE Laurence. (2011) Influence de la substitution du maïs par du sorgho pendant les phases d'élevage et de gavage sur les performances des oies. (Poster) Journée de l'école doctorale SEVAB. Toulouse, 27 octobre 2011

- **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, BIJJA Mohammed, LAVIGNE Franck, BANNELIER Carole, FORTUN-LAMOTHE Laurence. (2011) Influence de la substitution du maïs par du sorgho et de la forme de présentation de l'aliment pendant la phase d'élevage sur les performances des oies. (Poster); Journée de l'école doctorale SEVAB. Toulouse, 27 octobre 2011

- **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, BIJJA Mohamed, LAVIGNE Franck, FORTUN-LAMOTHE Laurence. (2010) Influence du mode de présentation d'un aliment à base de sorgho en période de croissance-finition sur les performances des oies. (Poster); Journée de l'école doctorale SEVAB. Toulouse, 27 octobre 2010.

- **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, DUBOIS Jean-Pierre, BIJJA Mohamed, LAVIGNE Franck, FORTUN-LAMOTHE Laurence. (2010) Influence de la présentation de l'aliment en période de croissance-finition sur les performances des oies, Exemple du sorgho. 9èmes Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à foie Gras. Bordeaux, 7-8 octobre 2010.

- LABORDE Marie, PEILLOD Céline, LITT Joanna, BERNADET Marie-Dominique, GUY Gérard, DUBOIS Jean-Pierre, **ARROYO Julien**, AUVERGNE Alain, FORTUN-LAMOTHE Laurence, FERNANDEZ Xavier. (2010) Bilan des innovations techniques visant à assurer la durabilité de la filière palmipèdes à foie gras (Période 2007-2009). 9èmes Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à foie Gras. Bordeaux, 7-8 octobre 2010.

Table des matières

Remerciements	3
Publications et communications issues de la thèse	7
Publications scientifiques	7
Communications en congrès internationaux.....	8
Communications dans des congrès nationaux et des journées d'animation scientifiques	8
Table des matières.....	11
Liste des tableaux	17
Listes des figures	19
Liste des abréviations.....	21
INTRODUCTION GENERALE.....	23
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	27
Chapitre I. Production et élevage des oies destinées à la production de foie gras.....	29
1. La production d'oies en France et dans le monde	29
1.1. Les races d'oies domestiques utilisées dans le monde	29
1.2. La production de foie gras d'oie en France et dans le monde	31
2. Le comportement alimentaire des oies.....	32
3. L'anatomie et la physiologie digestive	34
4. La croissance des oies destinées à la production de foie gras	36
5. Les recommandations alimentaires pour les oies	38
6. L'élevage et la conduite alimentaire	40
6.1. La conduite d'élevage	40
6.2. La conduite alimentaire	41
6.2.1. Démarrage.....	41
6.2.2. Croissance-finition	42
6.2.3. Gavage	43
Chapitre II. Influences d'une modification de la présentation des aliments chez les volailles	47
1. Les différentes modalités d'alimentation non-granulée	47
1.1. Alimentation en libre choix.....	49
1.2. Alimentation mélangée	49
1.3. Alimentation séquentielle.....	50
2. Acceptabilité d'un nouvel aliment	50

2.1.	La vision.....	50
2.2.	L'olfaction.....	51
2.3.	Le toucher	52
2.4.	Le goût	53
3.	Effet de la forme de présentation de l'aliment sur le tractus digestif.....	53
Chapitre III. Utilisation du sorgho chez les volailles, approche comparée avec le maïs.....		57
1.	Le sorgho (<i>Sorghum sp</i>).....	57
2.	Systèmes de culture du sorgho et du maïs.....	61
3.	Les valeurs nutritionnelles du sorgho et du maïs	62
4.	Utilisation du maïs et du sorgho dans l'alimentation des volailles	66
Chapitre IV. La durabilité des systèmes de production agricoles		69
1.	Définitions et concepts de l'agriculture durable	70
2.	Évaluation de la durabilité	71
3.	Démarche et méthodes pour l'évaluation de la durabilité des systèmes de production agricoles	72
3.1.	Démarches participatives	74
3.2.	Démarches normatives : l'analyse du cycle de vie.....	75
3.2.1.	Définition de l'objectif et du champ de l'étude	75
3.2.2.	Analyse de l'inventaire du cycle de vie.....	76
3.2.3.	Évaluation de l'impact environnemental du cycle de vie	76
3.2.4.	Interprétation du cycle de vie	77
ETUDES EXPERIMENTALES.....		79
MATERIEL ET METHODES COMMUNS		81
PARTIE A : Zootechnie et qualité des produits		81
1.	Analyse des aliments expérimentaux.....	83
1.1.	Prélèvement et préparation des échantillons	83
1.2.	Détermination de la composition chimique des aliments.....	83
1.3.	Paramètres physiques des aliments.....	84
1.3.1.	Longueur et diamètre	84
1.3.2.	Taille des particules	84
1.3.3.	Comportement d'hydratation	85
1.3.3.1.	Capacité de gonflement des aliments.....	85
1.3.3.2.	Capacité de rétention hydrique	85
2.	L'élevage, le gavage et l'abattage des oies.....	86
2.1.	Animaux et programme d'alimentation	86
2.2.	Gestion et condition d'élevage.....	87
2.3.	Abattage et éviscération des oies	88
2.4.	Dissection anatomique	89

3.	Mesure du comportement alimentaire : méthode du scan sampling	89
4.	Mesure du volume du jabot	90
5.	Mesure de l'état d'emplument, de salissement et de l'état des pattes.....	90
6.	Analyse des foies gras et des magrets.....	92
6.1.	Classement commercial des foies	92
6.2.	Déveinage et stérilisation des foies.....	92
6.3.	Salage et séchage des magrets	93
6.4.	Rendement technologique des foies gras et des magrets	93
6.5.	Mesure de la couleur des foies et des magrets	94
6.6.	Analyses chimiques des foies et des magrets.....	94
6.6.1.	Prélèvement pour analyse biochimique.....	94
6.6.2.	Détermination de la matière sèche et des matières minérales	95
6.6.3.	Dosage du taux de Matières Azotées Totales (MAT)	95
6.6.4.	Dosage des lipides.....	96
6.6.5.	Composition en acides gras.....	96
6.7.	Analyse hédonique.....	97
7.	Analyses statistiques des données	98
7.1.	Analyses de variance et tests de comparaison des moyennes	98
7.2.	Tests de comparaison de fréquence d'apparition	98
7.3.	Présentation des résultats statistiques	98
	PARTIE B : Evaluation de la durabilité des systèmes.....	99
1.	Evaluation des impacts environnementaux de la production de foie gras	101
1.1.	Objectifs et champs de l'étude.....	101
1.2.	Analyse de l'inventaire du cycle de vie	103
1.3.	Evaluation de l'impact du cycle de vie	104
2.	Evaluation de la durabilité de l'atelier de production.....	106
2.1.	Définition des objectifs et des champs de l'étude.....	106
2.2.	Indicateurs de durabilité.....	108
2.3.	Analyse des données	108
	RESULTATS EXPERIMENTAUX	109
	PARTIE A : Zootechnie et qualité des produits.....	109
I.	Chapitre 1. Etude de la forme de présentation et de la substitution du maïs par du sorgho pendant la phase d'élevage (Essais 1, 2 et 3)	109
1.	Essai 1 - Influence de la forme de présentation du sorgho sur le développement du tractus digestif et les caractéristiques de la carcasse des oies en phase de croissance.	109
1.1.	Objectifs :.....	109
1.2.	Déroulement de l'essai.....	109
1.3.	Principaux résultats.....	110
1.4.	Publication n°1.....	111

2.	Essai 2 - Influence de la substitution du maïs par du sorgho et de la forme de présentation des aliments sur le développement et les performances des oies avant et après gavage.....	131
2.1.	Objectifs.....	131
2.2.	Déroulement de l'essai.....	131
2.3.	Principaux résultats.....	132
2.4.	Publication n°2.....	133
3.	Essai 3 - Influence de la forme de présentation du sorgho sur le comportement alimentaire des animaux au moment des transitions alimentaires	155
3.1.	Objectifs.....	155
3.2.	Déroulement de l'essai.....	155
3.3.	Principaux résultats.....	156
3.4.	Publication n°3.....	157
II.	Chapitre 2. Etude la substitution du maïs par du sorgho pendant le gavage (Essais 4 et 5).....	173
1.	Essai 4 - Etude des modalités pratiques d'incorporation du sorgho dans la pâtée de gavage.....	173
1.1.	Objectifs.....	173
1.2.	Déroulement de l'essai.....	173
1.3.	Principaux résultats.....	174
1.4.	Publication n°4.....	175
2.	Essai 5 - Influence de la substitution du maïs par du sorgho pendant les phases d'élevage et de gavage sur les performances zootechniques des animaux et sur la qualité des produits.....	187
2.1.	Objectifs.....	187
2.2.	Déroulement de l'essai.....	187
2.3.	Principaux résultats.....	188
2.4.	Publication n°5.....	189
2.5.	Annexe	215
	PARTIE B : Evaluation de la durabilité des systèmes de production	219
I.	Approche produit - Impacts environnementaux à l'échelle du produit.....	219
1.	Objectifs	219
2.	Champs d'études	219
3.	Principaux résultats	220
4.	Publication n°6	221
5.	Annexe I	245
6.	Annexe II	249
II.	Approche atelier – Impacts environnementaux, économiques et sociaux à l'échelle de l'atelier de production.....	251
1.	Objectifs	251
2.	Méthode d'évaluation	251
3.	Principaux résultats	252
4.	Publication n°7	253

DISCUSSION GENERALE.....	273
Partie A : Intérêts zootechniques et limites de l'utilisation des céréales sous forme simplifiée et d'une substitution du maïs par du sorgho dans l'alimentation des oies en croissance	274
1. Effets de la forme de présentation de l'aliment.....	274
1.1. Effets de la forme de présentation de l'aliment sur la consommation des animaux et la croissance des animaux.....	274
1.2. Effets de la forme de présentation de l'aliment sur le tractus digestif des animaux.....	277
2. Effets de la céréale.....	279
2.1. Effets du type de céréale sur les performances des animaux.....	279
2.2. Effets de la céréale sur la qualité des produits.....	280
Partie B : Intérêts et limites d'une modification du système d'alimentation des oies sur la durabilité de la production du foie gras.....	283
1. Intérêts et limites de l'utilisation de sorgho dans l'alimentation des oies sur la durabilité de la production du foie gras	283
2. Intérêts et limites de l'utilisation d'aliment sous forme partiellement non granulée dans l'alimentation des oies sur la durabilité de la production du foie gras.....	285
Partie C : Analyse critique des méthodes d'évaluation de la durabilité utilisées	287
PERSPECTIVES	291
1. Maîtrise technique de l'utilisation de graines entières dans l'alimentation des oies.....	292
2. Connaissance des besoins nutritionnels des oies et système d'alimentation.....	293
3. Connaissance du rythme et compréhension des facteurs de régulation de l'ingestion chez l'oie	293
4. Connaissance du développement structurel et fonctionnel du tractus digestif des oies	295
CONCLUSIONS	297
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	299
RESUME / ABSTRACT	327

Liste des tableaux

Tableau 1. Principales souches d'oies domestiques d'après Guy et Buckland (2002).	30
Tableau 2. Estimation de la production européenne de foie gras (en tonnes) d'après CIFOG (2012)(Source : SSP, estimations nationales, Eurofoiegras).	32
Tableau 3. Comportement alimentaire de l'oie d'après Marcilloux et Auffray (1982).....	33
Tableau 4. Recommandations alimentaires en énergie, protéines brutes, acides aminés, minéraux et vitamines pour les oisons en croissance d'après Leclercq et al (1987), NRC (1994) et Auvergne et al (2012).	39
Tableau 5. Conduite alimentaire des oies destinées à la production de foie gras d'après Auvergne et al (2012).	42
Tableau 6. Principaux intrants utilisés, le rendement en matière sèche et de nitrate émis (tout en kg / ha, sauf irrigation en m ³ / ha) pour le maïs et de sorgho	61
Tableau 7. Caractéristiques nutritionnelles élémentaires, exprimées par rapport au produit brut sauf indication contraire, du maïs et du sorgho d'après Sauvante et al (2004).	64
Tableau 8. Facteurs de caractérisation pour quatre catégories d'impacts et quelques émissions vers l'air, le sol et l'eau selon Guinée et al (2002) (mis à jour IPCC 2007).	77
Tableau 9. Partie A Zootechnie et qualité des produits : récapitulatif des essais et des choix expérimentaux au cours des 5 essais réalisés	82
Tableau 10. Conduite alimentaire des oies destinées à la production de foie gras	86
Tableau 11. Partie B : Analyse de la durabilité des systèmes	100
Tableau 12. Grille d'objectifs et critères de durabilités utilisés pour évaluer la durabilité des ateliers d'élevage	107
Tableau 13. Effets de la substitution du maïs par du sorgho en élevage et / ou gavage dans l'alimentation des oies sur l'évaluation hédonique des foies gras entiers en verrine.....	217
Tableau 14. Effets de la substitution du maïs par du sorgho dans l'alimentation des oies en élevage et / ou gavage sur l'évaluation hédonique des magrets séchés non fumés.....	218
Tableau 15. Impacts environnementaux potentiels d'1 kg de foie gras (à la sortie de l'abattoir) en utilisant l'allocation massique (AM) et l'allocation économique (AE).	246
Tableau 16. Impacts environnementaux à la sortie de l'atelier de différentes productions animales en utilisant la méthode de l'allocation économique d'après de Vries et de Boer (2010)	250
Tableau 17. Partie A. Récapitulatif des principaux résultats zootechniques obtenus au cours du travail de thèse	275
Tableau 18. Partie B. Récapitulatif des résultats de durabilité du système en fonction de la stratégie d'alimentation	284

Listes des figures

Figure 1. Répartition (en tonnes) de la production mondiale de foie gras (canards et oies) en 2011 (27 100 t.) d'après CIFOG 2012 (Source : SSP, estimations nationales, Eurofoiegras).....	31
Figure 2. Tractus digestif de l'oie d'après Clemens et al (1975) et Guy et Buckland (2002).	35
Figure 3. Courbe de croissance et de consommation d'oie mâle et femelle (données personnelles)....	37
Figure 4. Représentation schématique du principe des méthodes d'alimentation actuelles et possibles dans la production de volaille (a. alimentation conventionnelle, b. alimentation en libre choix, c. alimentation mélangée et d. alimentation séquentielle), adapté de Noirot et al (1998)	48
Figure 5. Sorghum sp. d'après Warrick (2012).	58
Figure 6. Les trois grandes zones de production de sorgho grain en France (Verdier 2007)	60
Figure 7. Structure de l'amylose (a) et de l'amylopectine (b) d'après Horton et al (2000)	65
Figure 8. Les trois piliers de la durabilité.....	70
Figure 9. Apport quotidien théorique de maïs sec en grammes pendant la période de gavage (d'après Dubois et al 2010).	87
Figure 10. Grilles de notation de l'état des animaux	91
Figure 11. Diagramme de flux des étapes de production du foie gras.....	102
Figure 12. Effets de la substitution du maïs par du sorgho en élevage et / ou gavage dans l'alimentation des oies sur l'évaluation hédonique des foies gras entiers en verrine.....	217
Figure 13. Effets de la substitution du maïs par du sorgho dans l'alimentation des oies en élevage et / ou gavage sur l'évaluation hédonique des magrets séchés non fumés.....	218

Liste des abréviations

1,4 DCB	1,4 dichlorobenzene
a*	note de rouge ($a^* > 0$) dans le système de couleur $L^*a^*b^*$
ACV (LCA)	analyse de cycle de vie (life cycle assessment)
ADL	acid detergent fiber
ADF	acid detergent lignin
b*	note de jaune ($b^* > 0$) dans le système de couleur $L^*a^*b^*$
C-8 :0	acide caprylique
C-14 :0	acide myristique
C-16 :0	acide palmitique
C-16 :1	acide palmitoléique
C-17 :0	acide margarique
C-18 :0	acide stéarique
C-18 :1	acide oléique
C-18 :2 ω 6	acide linoléique
C-18 :3	acide linolénique
C-18 :3 ω 3	acide γ -linolénique
C-20 :0	acide arachidique
C-20 :1	acide gadoléique
C-20 :3 ω 6	acide dihomo- γ -linolénique
C-20 :4 ω 6	acide arachidonique
C-22 :4 ω 6	acide docosatétraénoïque

CO ₂	dioxyde de carbone
EMAn (AMEn)	énergie métabolisable à bilan azotée nul (nitrogen-corrected apparent metabolizable energy)
GLM	general linear model
GMQ (ADG)	gain moyen quotidien (average daily gain)
IC (FCR)	indice de consommation (feed conversion ratio)
L*	paramètre de luminosité dans le système L*a*b*
MAT	matières azotées totales
MEG	mise en gavage
MS (DM)	matière sèche (dry matter)
mth	millithermie
NDF	neutral detergent fiber
PB (CP)	protéines brutes (crude protein)
PO ₄	phosphate
PV (BW ou LW)	poids vif (body weight or live weight)
SO ₂	dioxyde de soufre

INTRODUCTION GENERALE

Les filières agroalimentaires sont souvent mises en cause par les pouvoirs publics et les consommateurs, qui souhaitent l'émergence de modèles alternatifs, plus respectueux de l'environnement, économiquement et socialement acceptables. C'est pourquoi, depuis quelques années, on assiste à l'émergence de modes de consommation dits « plus durables » (Andersson *et al* 1994). En effet, les consommateurs des pays développés exigent de plus en plus des aliments sains, de grande qualité et dont les répercussions sur l'environnement doivent être les moins négatives possibles (Boer 2002).

L'aviculture par ses spécificités et sa diversité, entre productions traditionnelles rationalisées et élevage au paroxysme de l'intensivité, éclaire de manière particulière ces enjeux du développement durable. Les travaux récents ont confirmé que la plus grande partie des coûts environnementaux de cette filière est due à l'alimentation des animaux (Boggia *et al* 2010, Leinonen *et al* 2012a, 2012b). Dans le cas de la filière destinée à la production de foie gras, l'alimentation des palmipèdes repose pour une large part sur l'utilisation du maïs comme source principale d'énergie alimentaire (Guéméné et Guy 2004). Or, cette plante présente l'inconvénient d'être consommatrice en eau durant sa production (Amigues *et al* 2006). Par ailleurs, dans certaines régions, notamment celles où la production de palmipèdes est bien développée (Sud-Ouest de la France), le maïs est souvent produit en monoculture sous irrigation pour optimiser les rendements par rapport aux intrants (engrais, traitements), ce qui accroît la consommation d'eau, entraîne une perte de biodiversité (auxiliaires de culture) et contribue à la détérioration du sol (sols nus en hiver). De plus, le séchage du maïs et son transport entre les lieux de récolte, de séchage, de stockage et d'utilisation sont coûteux en énergie. Enfin, en l'absence de matière première alternative, la rentabilité des ateliers est fortement influencée par les tendances du marché qui ont montré une certaine volatilité au cours de ces dernières années.

Dans ce contexte, le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) qui présente les mêmes caractéristiques nutritionnelles que le maïs (Sauvant *et al* 2004) mais nécessite pour sa production une quantité d'eau bien inférieure (Farré et Faci 2006), semble être un candidat intéressant pour se substituer au maïs. D'après les agronomes, il pourrait être une alternative afin de réduire la vulnérabilité de l'agriculture française face au risque de pénurie d'eau (Amigues *et al* 2006). En effet, cette céréale est souvent cultivée sans irrigation, de plus, suite à la récolte, elle ne nécessite pas de phase de séchage et sa culture peut facilement s'insérer dans un plan de rotation. Même si son prix est fortement indexé sur celui du maïs, le sorgho a une valeur moindre que ce dernier. Cette céréale pourrait donc permettre une amélioration de

la flexibilité des systèmes de production de foie gras, en augmentant le nombre de matières premières utilisables dans l'alimentation des oies.

L'alimentation des volailles est le plus fréquemment distribuée sous forme d'aliments complets en granulés. Cela implique des coûts financiers et environnementaux supplémentaires dûs au transport et au broyage des différentes matières premières. Selon Dozier (2006), le coût du broyage des céréales représente 25 à 30% du coût de fabrication des aliments (hors prix des matières premières). Une présentation de l'alimentation sous forme simplifiée dite « fermière », telle qu'un mélange de grains entiers et d'un granulé complémentaire riche en protéine, pourrait réduire les procédés de fabrication et donc les impacts environnementaux de l'alimentation, tout en améliorant l'acceptabilité sociale des systèmes d'élevage en nourrissant les oiseaux avec un régime considéré comme plus « naturel » (Gabriel *et al* 2003).

Dans ce contexte, ce travail de thèse vise à évaluer les effets i/ du mode d'alimentation (industrielle ou fermière) et ii/ de la substitution du maïs par du sorgho dans la ration alimentaire des oies en phase de croissance et pendant le gavage sur les performances des animaux. Puis nous évaluerons *in fine* iii/ les conséquences de ces modifications sur la durabilité du système d'élevage.

Ce projet a pour originalité de combiner une approche cognitive autour de l'évaluation de la durabilité des systèmes d'élevage des palmipèdes à foie gras et une approche finalisée visant à proposer une évolution dans la conduite de l'alimentation des oies. Ce programme a pour ambition de proposer une innovation dans le système d'élevage afin de réduire l'impact environnemental de la production de foie gras d'oie sans fragiliser sa rentabilité économique ni affecter la qualité des produits, améliorant de ce fait sa durabilité.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I. Production et élevage des oies destinées à la production de foie gras

En France, l'élevage des oies est principalement destiné à la production de foie gras. Par conséquent, le programme d'alimentation des oies en croissance a pour objectif de préparer les oiseaux pour le gavage (Guéméné et Guy 2004). De manière générale, l'élevage de ce palmipède à foie gras peut se décomposer en plusieurs étapes : le démarrage, la croissance-finition et le gavage. De nombreux travaux ont permis de définir un itinéraire technique pour l'élevage (Leprettre *et al* 1997, Dubois *et al* 1998) et le gavage des oies (Lavigne *et al* 2000, Dubois *et al* 2010) qui optimise les performances des animaux. Avant de présenter la conduite alimentaire, nous rappellerons au préalable le comportement, l'anatomie, les besoins nutritionnels et les paramètres de croissance des oies pour la production de foie gras

1. La production d'oies en France et dans le monde

Actuellement, à travers le monde, les systèmes d'élevage des oies sont multiples. En effet, les objectifs de production des oies sont variés : viande, foie gras ou encore production de plumes et de duvet. C'est pourquoi, l'élevage des oies concerne une grande variété d'espèces et de races différentes.

1.1. Les races d'oies domestiques utilisées dans le monde

Plus de 96 races d'oies domestiques ont été décrites et se répartissent principalement dans les pays d'Europe orientale (Guy et Buckland 2002). Les races domestiques européennes et asiatiques proviennent de deux espèces différentes (*Anser cygnoides* et *Anser anser*). L'espèce *Anser cygnoides* est une oie originaire d'Extrême-Orient et la forme domestique est couramment appelée oie de Guinée ou oie de Chine (*Anser cygnoides domesticus*). L'espèce *Anser anser* comporte deux sous espèces : l'oie cendrée de l'Ouest (*Anser anser anser*) et l'oie cendrée de l'Est (*Anser anser rubriostri* ; Kozak *et al* 1997). Les diverses races se distinguent par la couleur de leur plumage, du bec et des pattes, leur poids à l'âge adulte, leur potentiel de production d'œufs (la saison de ponte dure environ six mois) et le poids des œufs (Tableau 1).

On y trouve principalement des oies blanches exclusivement destinées à la chair, et des oies grises utilisées aussi bien pour la chair que pour le gavage, tout au moins en France. A l'intérieur de ces groupes, il existe des souches qui présentent à leur tour des aptitudes différentes au gavage.

Tableau 1. Principales souches d'oies domestiques d'après Guy et Buckland (2002).

Espèce ¹	Souche ou lignée	Couleur du plumage	Couleur du bec	Couleur des pattes	Poids vif adultes (kg)		Nombre d'œufs par ponte	Poids des œufs (g)	Origine et répartition géographique
					Mâles	Femelles			
AA	African	Gris brun	Noir	Orange	9	8			Asie
AA	Embsen	Blanche	Orange	Orange	10	9	40	170	Allemagne
AA	Landes	Grise	Orange	Orange	6	5	40-45		France
AA	Rhin	Blanche	Orange	Orange	6,5	5,5	40		Allemagne
AA	Toulouse	Grise	Orange	Orange	6,8	6,2	30	160	France
AC	Balien Eu				4,5	3,5	125	175	Chine
AC	Chine	Blanche ou fauve	Orange ²	Orange	5,5	4,5	40	120	Chine
AC	Huyon	Blanche		Orange	4	3,5	90	120	Chine
AC	Philippines	Blanche ou brune			2,8	2,3	50		Philippines
AC	Rung Eu				3,5	2,5	155	120	Chine
AC	Wuzhong	Fauve	Noir	Noir	3,4	2,9	30	145	Chine

¹ AA : *Anser anser* ; AC : *Anser cygnoides*

² sauf le bec de la variété fauve

L'oie cendrée sauvage (*Anser anser*) constitue l'ancêtre commun de toutes les populations d'oies impliquées dans la production de palmipèdes gras dans l'Europe de l'Ouest, l'oie cendrée sauvage est la plus corpulente des oies indigènes sur le continent eurasiatique, son poids dépasse les 3 kg et peut aller jusqu'à 4,5 kg pour les mâles. Son poids montre la distance, créée par des siècles de sélection, entre elle et les races domestiques les plus lourdes dépassant les 10 kg pour l'oie de Toulouse (Dunning 1992). La sélection spécifique pour la production de foie gras n'a été entreprise en France que sur deux sites : la station de l'oie d'Artiguères sur l'initiative du Centre Technique de la Conservation des Produits Agricoles (CTCPA) et de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), et du Centre de Sélection des Palmipèdes à Foie Gras (SEPALM) sur l'initiative des groupements de producteurs :

- La station d'Artiguères a utilisé initialement un cheptel d'oies dites « Landaises » de petit gabarit dans lequel l'INRA a sélectionné 2 lignées spécialisées : l'une sur les performances de ponte et l'autre sur l'aptitude à produire du foie gras. Actuellement, le travail de sélection est arrêté sur le site.
- La SEPALM a généré son cheptel de sélection à partir d'animaux collectés sur le terrain dans tout le sud-ouest, et présentant un gabarit important (oie de Toulouse, du Gers ou d'origine landaise). Leurs aptitudes de ponte étaient inférieures à celles des animaux sélectionnés par l'INRA.

Les objectifs de sélection étaient proches pour les deux souches : prolificité et poids de foie gras. La sélection pratiquée à l'INRA se distinguait par la recherche d'un taux de viande élevé (Roussely 2000). Ces souches d'oies sélectionnées ont ensuite été exportées dans de nombreux autres pays européens (Farell 2004).

1.2. La production de foie gras d'oie en France et dans le monde

La production mondiale de foie gras, de canard et d'oie, est évaluée à 27 100 tonnes de foie gras cru en 2011, en progression d'un millier de tonnes par rapport à 2010. Avec environ 25 800 tonnes, la production européenne reste très majoritaire au plan international. La France reste le principal pays de production de foie gras avec 19 900 tonnes suivie de la Bulgarie avec 2 600 tonnes et de la Hongrie avec près de 2 450 tonnes (Figure 1).

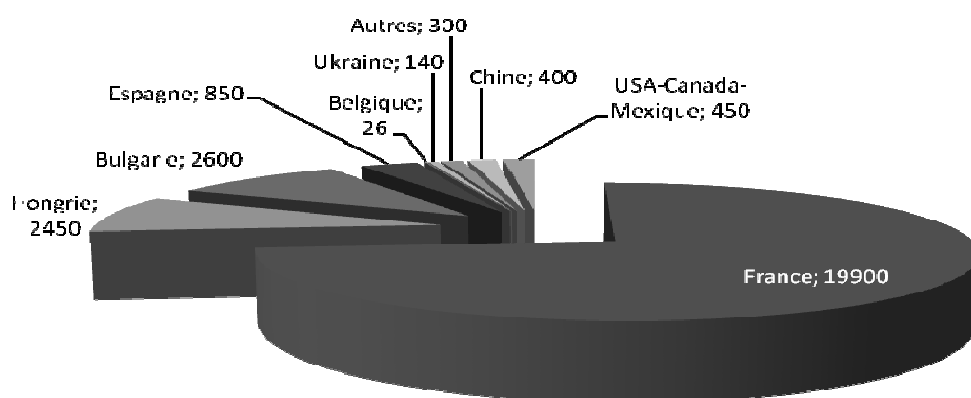


Figure 1. Répartition (en tonnes) de la production mondiale de foie gras (canards et oies) en 2011 (27 100 t.) d'après CIFOG 2012 (Source : SSP, estimations nationales, Eurofoiegras).

La production de foie gras de canard domine le marché mondial du foie gras avec environ 90 % des tonnages. Toutefois, c'est la production d'oies grasses qui reste très dominante en Hongrie, Chine et Ukraine. Des ateliers existent dans d'autres pays : Liban, Maroc, Madagascar, Malaisie... La production de ces pays reste très faible, estimée à 300 tonnes, et est consommée localement (CIFOG 2012).

En France, la production de foie gras d'oie est présente dans quasiment toutes les régions, mais est majoritairement localisée dans le sud ouest (Aquitaine et Midi Pyrénées) avec 83 % du cheptel et dans l'ouest de la France (principalement la Bretagne) avec 12 % du cheptel (CIFOG 2012). Cependant, la production de foie gras d'oie d'origine française est aujourd'hui réduite à l'état de niche (< 5 % des tonnages) sur le marché national du foie gras, tant celui-ci est dominé par le foie gras de canard.

Tableau 2. Estimation de la production européenne de foie gras (en tonnes) d'après CIFOG (2012)(Source : SSP, estimations nationales, Eurofoiegras).

	2011	
	Oie	Canard
Belgique		23
Bulgarie		2600
Espagne		850
France	400	19500
Hongrie	1600	850
Total	2000	23823
Total Foie gras	25823	

L'absence de protection juridique de l'origine géographique pour l'oie laisse cette filière démunie face à un afflux massif de produits importés, en provenance notamment de Hongrie et de Bulgarie : 4316 tonnes importées en 2011, contre 400 tonnes produites en France (Tableau 2).

2. Le comportement alimentaire des oies

L'oie cendrée (*Anser anser*) a été un animal particulièrement étudié par les premiers éthologistes (Oskar Heinroth 1911, Konrad Lorenz 1935). Dans la nature, les oies vivent en groupes sociaux stables. Elles sont monogames avec des liens familiaux forts (Lorenz *et al*

1978, Lamprecht 1987). Les groupes sont structurés par des relations préférentielles entre les membres d'une même famille et en particulier entre oisons d'une même couvée (Frigerio *et al* 2001). La structure hiérarchique est souvent triangulaire : un individu A peut dominer B, B peut dominer C et C peut en retour dominer A. Les familles occupent un rang hiérarchique supérieur aux couples, qui dominent les individus « célibataires » (Raveling 1969, Black et Owen 1986, Lamprecht 1986, Kotrschal *et al* 1993). Les individus communiquent entre eux en émettant de nombreux types de vocalisations. Contrairement aux relations de dominance /subordination, les relations d'affinité structurent les déplacements et le pâturage. Les animaux se déplacent et pâturent en fonction de leurs relations préférentielles, c'est-à-dire que les individus qui ont de fortes affinités se retrouvent à proximité les uns des autres dans les déplacements et/ou dans la consommation d'herbe, formant ainsi des sous-groupes à l'intérieur du groupe (Ramseyer 2009). Les oies passent beaucoup de temps à se reposer (30% du temps) et se toiletter (30% du temps ; Ramseyer 2009). Au repos, les individus sont soit couchés, soit debout sur leur pattes, avec ou non la tête calée sous une aile. Le lissage des plumes permet de conserver la qualité hydrofuge et imperméable du plumage.

Tableau 3. Comportement alimentaire de l'oie d'après Marcilloux et Auffray (1982).

Groupes d'animaux	Période du nyctémère	Quantités d'aliments consommées (g/période)	Nombre de repas par jour	Durée d'un repas (s)	Durée d'intervalle (min)
Tendance diurne	Lumière	119 ± 13	10,2 ± 1,1	111 ± 18	71 ± 9
	Obscurité	76 ± 8	6,4 ± 0,8	120 ± 19	102 ± 11
Tendance nocturne	Lumière	93 ± 10	7,3 ± 1,7	185 ± 30	91 ± 19
	Obscurité	128 ± 11	9,9 ± 1,5	175 ± 40	61 ± 11

Les travaux de Marcilloux et Auffray (1981, 1982), réalisés sur animaux élevés en cages individuelles et nourris avec un aliment semi-liquide, ont permis de distinguer deux catégories d'animaux qui se différencient suivant la partie du nyctémère où leur ingestion est la plus élevée : phase nocturne ou phase diurne (Tableau 3). Ces auteurs ont montré que les oies réalisent en moyenne 9 repas par jour.

Contrairement à la majorité des volailles, l'oie est un animal pâtreur, capable d'ingérer, à l'âge adulte, plus de 1200 g de verdure par jour (Leprettre *et al* 2000a). L'oie préfère les graminées et consomme peu les feuilles de dicotylédones probablement en raison d'une mauvaise dégradation physique de ces feuilles dans le gésier (Moore 1999). Dubois *et al.* (2008) ont montré que le dactyle (*Dactylis glomerata*) permet de mieux concilier

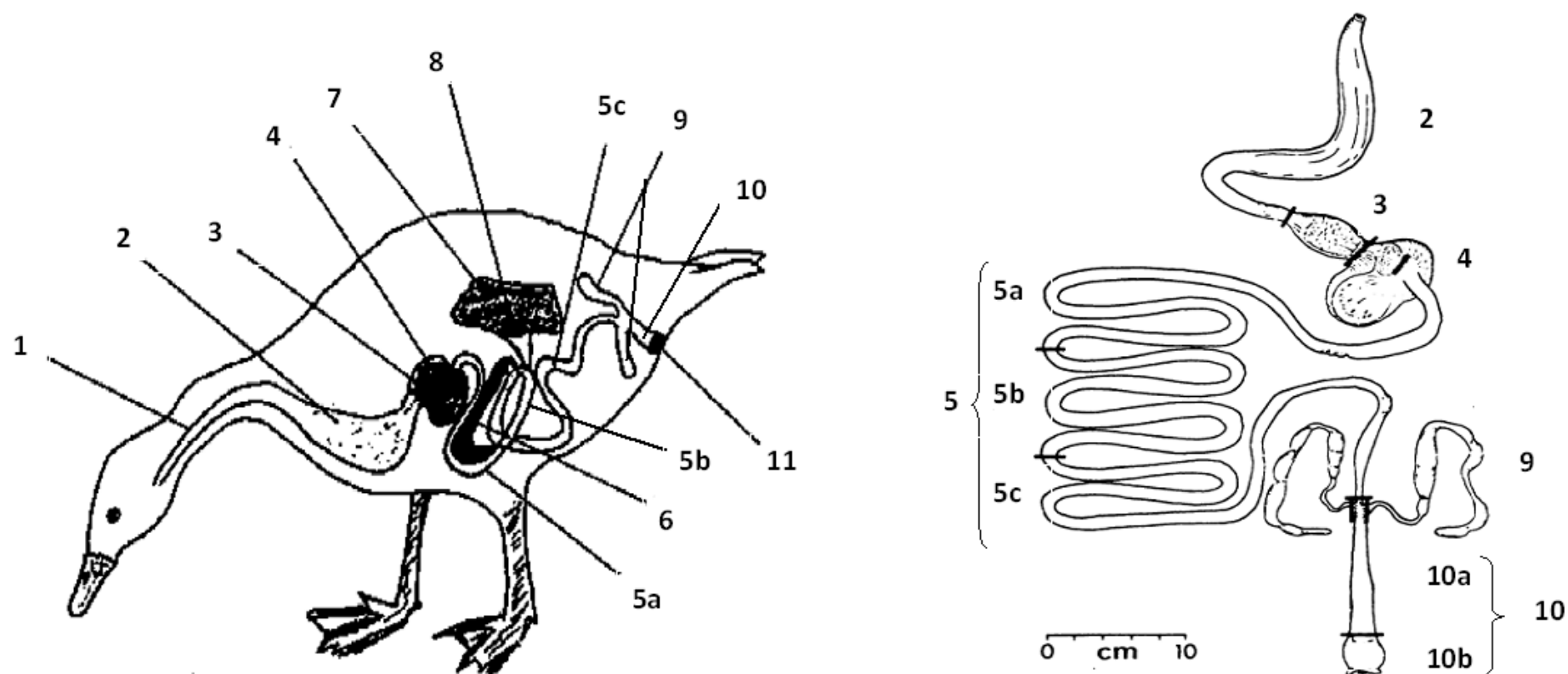
consommation des animaux et résistance du couvert végétal au piétinement des animaux que la fétuque (*Festuca vivipara*), le brome (*Bromus hordeaceus*) ou le ray-grass anglais (*Lolium perenne*).

La consommation de l'oie évolue au cours de sa croissance. Elle est d'environ 70 g d'aliment au cours de la première semaine de vie par jour pour un aliment complet équilibré (2800 kcal/kg d'énergie métabolisable, 20% de protéines), et augmente progressivement pour atteindre près de 400 g/j (2800kcal/kg d'énergie métabolisable, 17% de protéines) au cours de la dixième semaine d'âge (Auvergne *et al* 2012).

3. L'anatomie et la physiologie digestive

Le tractus digestif de l'oie est proche de celui des autres espèces aviaires granivores (Figure 2) à l'exception de trois particularités propres aux volailles herbivores (voir ci-après). L'œsophage de l'oie est relativement long, il possède des glandes à mucus qui lubrifient les aliments et facilitent leur passage. Il s'élargit en forme de fuseau pour constituer un réservoir à nourriture: le jabot. Les aliments passent ensuite dans le proventricule dont la fonction principale est la sécrétion gastrique (acidification, pepsine). La fonction du gésier est d'abord mécanique (broyage des graines) et ensuite digestive : c'est à ce niveau que débute la dégradation des protéines. L'intestin est le site principal de la digestion où interviennent les sécrétions de bile, de sucs pancréatiques et intestinaux. La fermentation microbienne des fibres alimentaires intervient dans les caeca sur une partie des digesta. Mais la majeure partie passe directement vers le cloaque où sont excrétés à la fois les urines et les fèces comme chez tous les oiseaux. Le tractus digestif de l'oie possède trois particularités : i) le jabot est peu développé, à la différence de celui du canard ou de la poule (Sturkie 1986), ii) le gésier est extrêmement musclé et peut développer des pressions atteignant 275 mm de mercure (vs respectivement 180 et 125 mm chez le canard et la poule), iii) les caeca sont très développés (Jamroz *et al* 2001).

L'utilisation d'aliments riches en fibres est rendue possible par i) leur dégradation physique dans le gésier (Moore 1999) et ii) leur fermentation microbienne dans les caeca (Yang *et al* 2009).



1.Œsophage ; 2.Jabot ; 3.Proventricule ; 4.Gésier ; 5. Intestins 5a. Ventricule proximal (duodénum), 5b. Ventricule médian (jéjunum), 5c. Ventricule distal (iléon) ; 6. Pancréas ; 7. Foie ; 8. Vésicule biliaire ; 9. Caecas ; 10.Colon 10a. Rectum, 10b. Cloaque ; 11. Anus

Figure 2. Tractus digestif de l'oie d'après Clemens et al (1975) et Guy et Buckland (2002).

La digestibilité des fibres alimentaires chez l'oie va de 18 à 46% et dépend de la nature des fibres ingérées (Hsu *et al* 1996). On peut noter que cette dégradation assez importante intervient en dépit du fait que le transit digestif est relativement rapide chez l'oie (Guy et Buckland 2002).

Le travail de concassage des aliments dans le gésier est permis par la présence de gravillons qui sont consommés de façon naturelle par les oiseaux. En élevage, ces gravillons (dénommés grit ou « pierres d'estomac ») doivent être mis à la disposition des animaux en quantité suffisante (1kg/100 oies/semaine) pour permettre une utilisation optimum des ressources alimentaires.

4. La croissance des oies destinées à la production de foie gras

L'oie est l'une des espèces de volailles qui a la vitesse de croissance la plus élevée (Leeson et Summers 1997). La croissance et le dépôt protéique des oisons est très rapide, particulièrement durant les quatre premières semaines de vie. En effet, le plumage destiné à la protection face à l'eau et au froid est particulièrement développé chez les oies. Les protéines retenues dans les plumes chez l'animal adulte sont donc élevées (80-90 g de protéines/kg de poids corporel). Entre 2 et 4 semaines d'âge, le taux de protéines conservé dans les plumes est de 33% contre 58% dans la carcasse (Nitsan *et al* 1981). Dubois *et al* (1993, 1996a) ont montré que la croissance pondérale initiale est très forte et que les animaux atteignent en moyenne 4,9 kg pour les mâles et 4,3 kg pour les femelles à l'âge de 8 semaines (poids d'un oison à l'éclosion : 100 g) soit une vitesse de croissance moyenne de 80 g/j. Dans les systèmes d'élevage destinés à la production de foie gras, sous l'effet du rationnement mis en place pour préparer le gavage, le gain de poids s'infléchit notablement après 8 semaines (voir chapitre 6.2. La conduite alimentaire). Ceci se traduit par une stabilisation des écarts de poids entre les mâles et les femelles (+0,62 kg en moyenne chez les mâles). L'écart de croissance entre les sexes semble lié à une différence de format, sans qu'il y ait de différence notable de la vitesse de croissance (Figure 3).

Dubois *et al* (1996a) ont montré que le muscle pectoral a un développement tardif et maximum entre 6 et 12 semaines d'âge (respectivement 50 g et 280 g à 6 et 14 semaines d'âge chez les mâles). A l'opposé, le membre inférieur se développe précocement et n'évolue pratiquement plus après la 8^{ème} semaine (388 g cuisse-pilon sans peau pour les mâles).

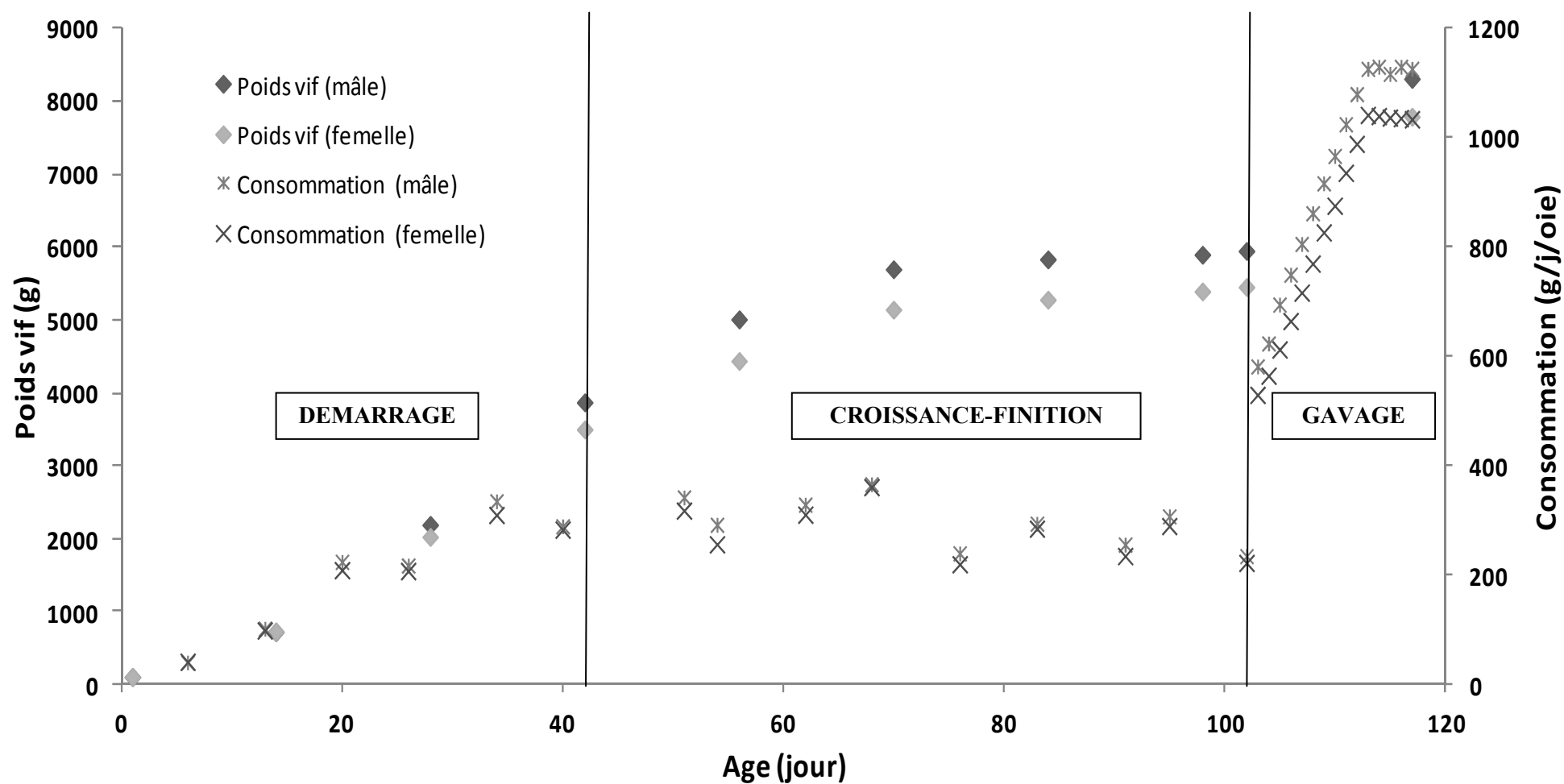


Figure 3. Courbe de croissance et de consommation d'oie mâle et femelle (données personnelles)

Le développement des tissus adipeux intra-abdominal et sous-cutané est continu entre 6 et 14 semaines d'âge et peu affecté par le rationnement (1 067 g à 14 semaines chez les mâles d'après Dubois *et al* (1996a)). L'allométrie de croissance est similaire entre les sexes pour tous les tissus ci-dessus (Dubois *et al* 1996a).

5. Les recommandations alimentaires pour les oies

Comme pour tous les animaux d'élevage, l'équilibre de la ration alimentaire des oies est primordial pour en assurer une valorisation efficace et permettre une croissance optimale des animaux. L'étude des recommandations alimentaires pour les oies en croissance a généralement été décomposée selon trois phases de sa croissance (Tableau 4) : la première allant de 0 à 2 semaines, la seconde de 3 à 5 semaines et la troisième de 6 à 14 semaines. Il existe des données contradictoires dans la bibliographie concernant les recommandations alimentaires pour les oies (Daghir 2008). Celles-ci peuvent être expliquées par les différences de format des animaux entre les souches, les objectifs de production (foie gras, plume, viande, œuf) et les conditions environnementales. Nous présenterons ici une synthèse de travaux les plus cohérents pour la souche utilisée pour la production de foie gras.

Energie et protéines. Les recommandations en termes de valeurs d'énergie métabolisable (EM) et de protéines pendant la première phase sont comprises entre 2 800 et 3 100 kcal EM / kg et entre 20% et 22%. Au cours de la seconde phase, les valeurs des recommandations en énergie et en protéines diminuent (2 750 à 2 900 kcal EM / kg et entre 17 et 19% ; Auvergne *et al* 2012). Enfin, au cours de la troisième phase, les valeurs des recommandations en énergie stagnent (2 800 kcal EM / kg) tandis que les valeurs des recommandations en protéines continuent à diminuer (17%).

Acides aminés. Comme pour les autres volailles, les principaux acides aminés limitants dans l'alimentation des oies sont les acides aminés soufrés (méthionine et cystine), la lysine, le tryptophane et la thréonine. Les valeurs des recommandations en acides aminés soufrés pendant la première phase sont comprises entre 0,79 et 0,85 g / 100g d'aliment. Au cours de la seconde et de la troisième phase, les valeurs des recommandations diminuent (respectivement 0,56 à 0,60 g / 100 g d'aliment et 0,48 à 0,52 g / 100 g d'aliment ; Leclercq *et al* 1987, NRC 1994, Leeson et Summers 1997).

Tableau 4. *Recommandations alimentaires en énergie, protéines brutes, acides aminés, minéraux et vitamines pour les oisons en croissance d'après Leclercq et al (1987), NRC (1994) et Auvergne et al (2012).*

	0-2 semaines	3-5 semaines	6-14 semaines
Energie (kcal EM/kg d'aliment)	2 800 à 3 100	2 750 à 2 900	2 800
Protéines brutes (g / 100 g d'aliment)	20 à 22	17 à 19	17
Acides aminés (g / 100 g d'aliment)			
Lysine	0,89 à 0,95	0,56 à 0,60	0,47 à 0,50
Méthionine	0,4 à 0,42	0,29 à 0,31	0,25 à 0,27
Acides aminés soufrés (g / 100 g d'aliment)	0,79 à 0,85	0,56 à 0,60	0,48 à 0,52
Tryptophane	0,17 à 0,18	0,13 à 0,14	0,12 à 0,13
Thréonine	0,58 à 0,62	0,46 à 0,49	0,43 à 0,46
Minéraux (g / 100 g d'aliment)			
Calcium	0,75 à 0,8	0,75 à 0,80	0,65 à 0,70
Phosphore total	0,67 à 0,7	0,62 à 0,65	0,57 à 0,60
Phosphore disponible	0,42 à 0,45	0,37 à 0,40	0,32 à 0,35
Sodium	0,14 à 0,15	0,14 à 0,15	0,14 à 0,15
Chlorures	0,13 à 0,14	0,13 à 0,14	0,13 à 0,14
Vitamines (UI / kg d'aliment)			
Vitamines A	1500	1500	1500
Vitamines D ₃	200	200	200
Vitamines (mg / kg d'aliment)			
Choline	1500	1000	1000
Niacine	65	35	35
Acide pantothénique	15,0	10,0	10,0
Riboflavine	3,8	2,5	2,5

Minéraux et vitamines. Les valeurs pour les recommandations des principaux minéraux et vitamines sont rapportés dans le tableau 4. Les minéraux les plus limitants sont le calcium et le phosphore comme pour les autres volailles. Pendant les trois premières semaines de vie des animaux, Leclercq *et al* (1987) indiquent que les recommandations en calcium et en phosphore disponibles sont comprises respectivement entre 0,75 g et 0,80 g / 100 g d'aliment et 0,42 g et 0,45 g / 100 g d'aliment, respectivement. Par la suite, ces valeurs diminuent pour être comprises entre 7 et 12 semaines respectivement entre 0,65 g et 0,70 g / 100 g d'aliment et 0,32 g et 0,35 g / 100 g d'aliment pour le calcium et le phosphore disponible.

D'après le NRC (1994), les recommandations nutritionnelles en vitamines sont de 1500 et 200 UI / kg d'aliment respectivement pour les vitamines A et D₃ pendant toute la croissance des animaux.

6. L'élevage et la conduite alimentaire

6.1. La conduite d'élevage

De manière générale, l'oie est un animal résistant et peut être élevé en plein air avec un minimum d'abri et de soins. A travers le monde, il y a beaucoup de petits troupeaux d'oies libres sur de petites exploitations, qui ont souvent pour simple confort, un étang et un refuge contre les prédateurs (renards principalement). Par exemple, en Chine, les oies sont gérées, quelle que soit la taille du troupeau, avec la liberté de sortir de leur bâtiment. De plus, l'oie étant un animal qui valorise les fourrages, elle peut se contenter d'un minimum voire d'aucun apport d'aliment complémentaire (Farell 2004). Toutefois, la productivité des animaux sera évidemment réduite en cas d'apports nutritionnels limités.

En Europe, particulièrement en Hongrie et en France, pour produire du foie gras les oies sont élevées dans des systèmes intensifs sur litière accumulée (paille), sur caillebotis ou en plein air. Les bâtiments peuvent être entièrement fermés avec un accès extérieur clôturé (Farell 2004).

Pendant la phase de démarrage, les oisons sont, en général, élevés en claustration pour faciliter la maîtrise des conditions de température qui sont nécessaires à leur développement (Dubois *et al* 2006 ; Auvergne *et al* 2008b, Auvergne *et al* 2010). L'objectif est qu'il n'y ait pas de choc thermique entre l'ambiance de l'éclosoir et celle du bâtiment d'élevage. Pour ce faire, il convient d'allumer le chauffage au moins 24 heures avant l'arrivée des oisons. La température ambiante doit être maintenue à 28°C pendant la première semaine après l'éclosion et doit être progressivement réduite pour atteindre 22°C à 6 semaines d'âge, après quoi la fourniture de chaleur n'est plus nécessaire. Un radian (4500 mth) pour 150 oisons permet de fournir la chaleur nécessaire au confort thermique des animaux (Dubois *et al* 1998). La réussite d'une bande d'oies dépend en grande partie du succès de cette première phase et elle repose sur les soins qui sont prodigués et de l'attention que l'on porte aux jeunes oisons. (Guy et Buckland 2002). A partir de 5 semaines et au plus tard à partir de 7 semaines d'âge, les animaux ont généralement accès à un parcours extérieur enherbé (10 m² / oie).

En élevage rationnel, la densité des animaux dans les bâtiments, est plus élevée que dans les systèmes extensifs. On recommande généralement une densité de 5 oies / m² au cours de la phase de démarrage et jusqu'à 6 semaines d'âge. Cette densité peut être maintenue jusqu'à la mise en gavage si les autres conditions d'élevage sont favorables (accès à l'eau, à l'aliment, confort thermique ... Leprettre *et al* 2000b). Cependant, travailler avec des densités de 5 oies /

m² nécessite un entretien plus important des litières, pour limiter leur humidification, sous peine d'avoir des animaux présentant des défauts d'emplumement au niveau ventral, au niveau du bréchet et des filets, source de déclassement des carcasses à l'issue du gavage. Il est donc recommandé de réduire la densité d'élevage à 3,5 oies/m² au-delà de 6 semaines d'âge.

La conduite d'élevage nécessite également un matériel adapté afin de fournir et de maîtriser les conditions d'ambiance et d'alimentation nécessaire aux animaux pour exprimer pleinement leur potentiel. Le nombre d'abreuvoirs et de mangeoires nécessaires évolue au cours du temps (respectivement 2 puis 3 abreuvoirs de 110 cm de circonférence et 2 puis 4,5 mangeoires de 190 cm de circonférence pour 60 animaux de 0 à 2 semaines puis de 3 à 14 semaines d'âge).

6.2. La conduite alimentaire

Afin de stimuler la synthèse des lipides et le stockage lipidique dans le foie, caractéristique propre à certains palmipèdes dont les oies, les producteurs ont développé des programmes d'alimentation spécifiques adaptés à la production de foie gras. Pour ce faire, le plan d'alimentation comporte 3 phases distinctes : la phase de démarrage (de 1 à 6 semaines d'âge), la phase croissance-finition (de 7 à 14 semaines d'âge) et la phase de gavage (de 15 à 16 semaines d'âge, Tableau 5).

6.2.1. Démarrage

Les objectifs et les enjeux de cette première phase sont de bien stimuler la phase d'alimentation précoce pour entamer la croissance et ainsi favoriser l'homogénéité de poids des animaux d'un même lot. Durant les deux premières semaines de vie, les animaux reçoivent *ad libitum* une alimentation sous forme de miettes. A partir de la troisième semaine d'âge, les oies reçoivent des aliments sous forme de petits granulés (3 mm de diamètre et 8 mm de longueur).

Tableau 5. Conduite alimentaire des oies destinées à la production de foie gras d'après Auvergne *et al* (2012).

Semaines	Période	Conduite alimentaire « rationnement horaire »	Aliment
1	Démarrage	Ad libitum	Miettes
2		Ad libitum	
3		Ad libitum	Granulé (8 mm de longueur, 3 mm de diamètre)
4		Ad libitum	
5		Ad libitum	
6	Croissance-finition	Ad libitum	Granulé complet (9 mm de longueur, 4 mm de diamètre)
7		Ad libitum	
8		12 h/jour (la nuit)	
9		3 h/jour	Ou
10		2 h/jour	
11		2 h/jour	Céréale + Granulé complémentaire
12		2 h/jour	
13		2 h/jour	
14		3 h/jour	
15	Gavage	2 à 5 repas par jour	Maïs
16			(42% graine entière et 52% de farine)

6.2.2. Croissance-finition

Les objectifs et les enjeux de cette seconde phase sont de terminer la croissance des animaux tout en les préparant à l'alimentation forcée qui sera pratiquée pendant la phase de gavage.

Durant cette période les oisons reçoivent des aliments sous forme de granulés complets équilibrés (4 mm de diamètre et 9 mm de longueur). Mais, tout comme chez le poulet, une alimentation composée d'un mélange de graines entières (le plus souvent une céréale) et d'un complément granulé riche en protéines peut être réalisée. Cette stratégie d'alimentation peut être effectuée soit de manière séquentielle, ces deux fractions sont alors distribuées à deux moments différents de la journée (Bouvarel *et al* 2008, Umar Faruk *et al* 2010), soit en libre choix dans deux mangeoires différentes (Henuk et Dingle 2002, Pousga *et al* 2005), soit sous forme de mélange dans une même mangeoire (Yo *et al* 1997). L'accès à un parcours enherbé pendant la phase de croissance-finition (6 à 14 semaines) contribue peu aux apports alimentaires (Dubois *et al* 2008, Bijja *et al* 2010). Mais pour des oies âgées de plus de 14 semaines, les apports d'aliment concentré doivent être adaptés en fonction de la contribution du parcours herbagé aux apports nutritionnels particulièrement au printemps.

Ainsi, Romanov (1999) n'a rapporté aucune différence dans le poids final des oies (24 semaines d'âge) lorsqu'elles étaient nourries soit avec un aliment concentré (220-250 g / oie / j, 2200 kcal / kg d'aliment) seul sans accès à un pâturage soit avec du maïs (130-150 g / oie / j, 3860 kcal / kg) et un accès à un pâturage (8% de trèfle, 46% de ray-grass et 46% de fétuque).

Afin de préparer les animaux à l'alimentation forcée, un système de rationnement est mis en place à la fin de la phase de croissance-finition. Ce rationnement est dit « rationnement horaire » car c'est le temps d'accès à la mangeoire qui est restreint. Ainsi, à partir de la 9^{ème} semaine d'âge, le temps d'accès à la mangeoire est restreint à la période nocturne (entre 7h00 et 19h00). Puis, de 10 à 11 semaines d'âge, l'accès à l'aliment est restreint à 2h par jour. Enfin, durant les quatre derniers jours avant la mise en gavage, les oies n'ont accès à la mangeoire que 3h/jour (Leprettre 1993, Dubois *et al* 1996b). Cette augmentation de la durée du repas au cours des 3-4 jours qui précèdent le gavage a pour objectif d'accentuer le développement du jabot et de faciliter le gavage (Leprettre *et al* 1997, Guy *et al* 1998). Cette pratique permet en effet une augmentation significative de la quantité d'aliment ingérée (de 200 g/j jusqu'à 400 g/j). Toutefois, les niveaux d'ingestion sont fortement dépendants des conditions environnementales. Ainsi, l'ingestion chute lorsque les températures sont élevées (>25°C ; Meltzer 1987). Un rationnement quantitatif (maîtrise des quantités distribuées) peut également être mis en place pour remplacer ou compléter le rationnement horaire (Leprettre 1993). Celui-ci est moins fréquent car plus délicat à mettre en œuvre. En effet, il suppose de réaliser en permanence un calcul de ration hebdomadaire en fonction des conditions ambiantes et une surveillance de la durée du repas pour permettre une préparation efficace du jabot. Un rationnement trop sévère se traduira par un poids des animaux à la mise en gavage trop faible ainsi qu'une réduction du poids et de la qualité du foie et des magrets (Leprettre, 1993, Dubois *et al* 1996b).

6.2.3. Gavage

Les objectifs et les enjeux de cette dernière phase sont de stimuler la synthèse des lipides et les capacités de stockage dans le foie. Son principe réside dans la consommation excessive de céréales riches en amidon qui fournit une alimentation hyper énergétique. Cette surconsommation d'hydrates de carbone induit la synthèse d'acides gras par le tissu hépatique. Les lipides sont alors stockés dans le foie qui devient de plus en plus gras, parce que le maximum de la capacité d'exportation de ces acides gras est rapidement atteinte (Hermier *et*

al 1999, Cazeils 2000). La mise en gavage des oies a lieu après la 14^{ème} semaine, alors que les animaux pèsent respectivement en moyenne $5,5 \pm 0,03$ kg et $6 \pm 0,03$ kg pour les femelles et les mâles (Rouvier *et al* 1992). Afin d'obtenir de meilleures performances des animaux durant cette phase, il est souhaitable d'avoir des lots d'animaux de poids homogènes (± 100 g) et d'adapter le rythme de gavage et les quantités distribuées à la souche, au développement des animaux et aux objectifs de production (Lavigne *et al* 2000, Dubois *et al* 2010).

La pâtée de gavage distribuée est composée de 590 g de maïs / kg de pâtée dont 248 g de graine entière et 342 g de farine auxquels sont rajoutés 390 g d'eau / kg de pâtée et 20 g d'un complément minéral-vitaminique/kg de pâtée (vitamines, E: 32 UI / kg ; B1 : 4,00 mg / kg; K3 : 2,86 mg / kg et minéraux FeSO_4 : 55,40 mg / kg ; CuSO_4 : 15,00 mg / kg, ZnSO_4 : 40.00 mg / kg ; MnSO_4 : 74,00 mg / kg ; Ca : 2,13 g / kg, Na : 1,44 g / kg ; P : 0,23 g / kg).

Actuellement, le gavage des oies est réalisé pendant une durée de 14 à 18 jours et permet d'obtenir des foies de 850 g en moyenne (poids recherché par les conserveurs). Les recommandations sont de 2,3 à 2,4 kg de maïs / kg de poids vifs à la mise en gavage pour des gavages de 14 à 16 jours et 2,7 à 3,0 kg de maïs / kg de poids vifs à la mise en gavage pour des gavages en 18 jours. Les quantités d'aliment distribuées pendant cette période sont donc plus faibles pour les femelles que pour les mâles en raison de leur poids plus faible : respectivement 12,8 kg et 14 kg d'aliment au total pour les femelles et les mâles (Figure 3). Le maïs reste la principale matière première utilisée pour le gavage, parce que c'est un ingrédient facilement disponible qui présente une teneur élevée en amidon. Or, l'amidon est un des meilleurs substrats pour stimuler la lipogenèse hépatique chez les oiseaux (Guéméné et Guy 2004). De nombreuses autres matières premières, riches en protéines comme le soja (Nir *et al* 1972), en glucides non amylacés comme la figue (Babilé *et al* 1998), ou en lipides comme les tourteaux de noix (Bouiller-Oudot *et al* 2002) ont également été testés pour stimuler la stéatose hépatique mais elles sont moins efficaces que le maïs. En raison de sa disponibilité et de son aire géographique de production, qui se superpose avec le bassin de production du foie gras, le maïs reste donc la principale matière première utilisée pour le gavage des palmipèdes.

L'élevage des oies destinées à la production de foie gras est très technique. En effet, afin de préparer les oies à recevoir une forte quantité d'aliments dans une période courte (gavage), les oies sont soumises tout au long de leur vie à des changements d'aliments et à des rythmes d'accès aux mangeoires évolutifs afin d'augmenter leur capacité d'ingestion. Au cours de notre travail nous nous attacherons à trouver un itinéraire technique permettant d'induire une stéatose hépatique en utilisant des aliments non-granulés et/ou du sorgho.

Chapitre II. Influences d'une modification de la présentation des aliments chez les volailles

1. Les différentes modalités d'alimentation non-granulée

En élevage de volailles, la distribution d'aliments complets sous forme de granulé est le cas le plus fréquemment observé en France pour l'alimentation des animaux. Les volailles reçoivent successivement différents aliments adaptés en taille et en composition pour répondre à leur anatomie et leurs besoins. Les céréales (blé, maïs) représentent la famille de matières premières majoritairement utilisée (jusqu'à 70% de la ration). Mais utiliser des aliments complets implique des coûts liés au transport et au broyage des céréales. Selon Dozier (2002), le coût du broyage des céréales représente 25 à 30% du coût de fabrication des aliments. Différentes alternatives à l'aliment complet ont été proposées dans le but de réduire ces coûts mais également les impacts environnementaux par le biais de la réduction du transport.

L'alternative à l'aliment complet consistant à rajouter des céréales entières dans la ration n'est pas un concept nouveau. Dès le début du 20^{ème} siècle, Kempster (1916) et Rugg (1925) observaient qu'avec une alimentation contenant des céréales entières, les poules pondeuses produisaient plus d'œufs que celles recevant un aliment complet. Malgré cela, très peu de recherches ont été menées sur ce sujet. Aujourd'hui, le développement de ces systèmes est fortement réactualisé en raison de l'inflation du prix des matières premières et de la dépendance des éleveurs aux lois du marché s'ils ne produisent par eux-mêmes leurs matières premières. De plus, l'attraction de nombreux consommateurs vers des produits plus « naturels », dont la production est respectueuse de l'environnement, incite les aviculteurs à réfléchir à de nouveaux modes d'alimentation des animaux.

Les différentes techniques de distribution des aliments alternatives à l'aliment complet, sont toutes basées sur un choix plus ou moins dirigé de l'animal dans l'espace, le temps ou par tri particulière : en alimentation séparée, en mélange ou en alimentation séquentielle (Noirot *et al* 1998 ; Figure 4).

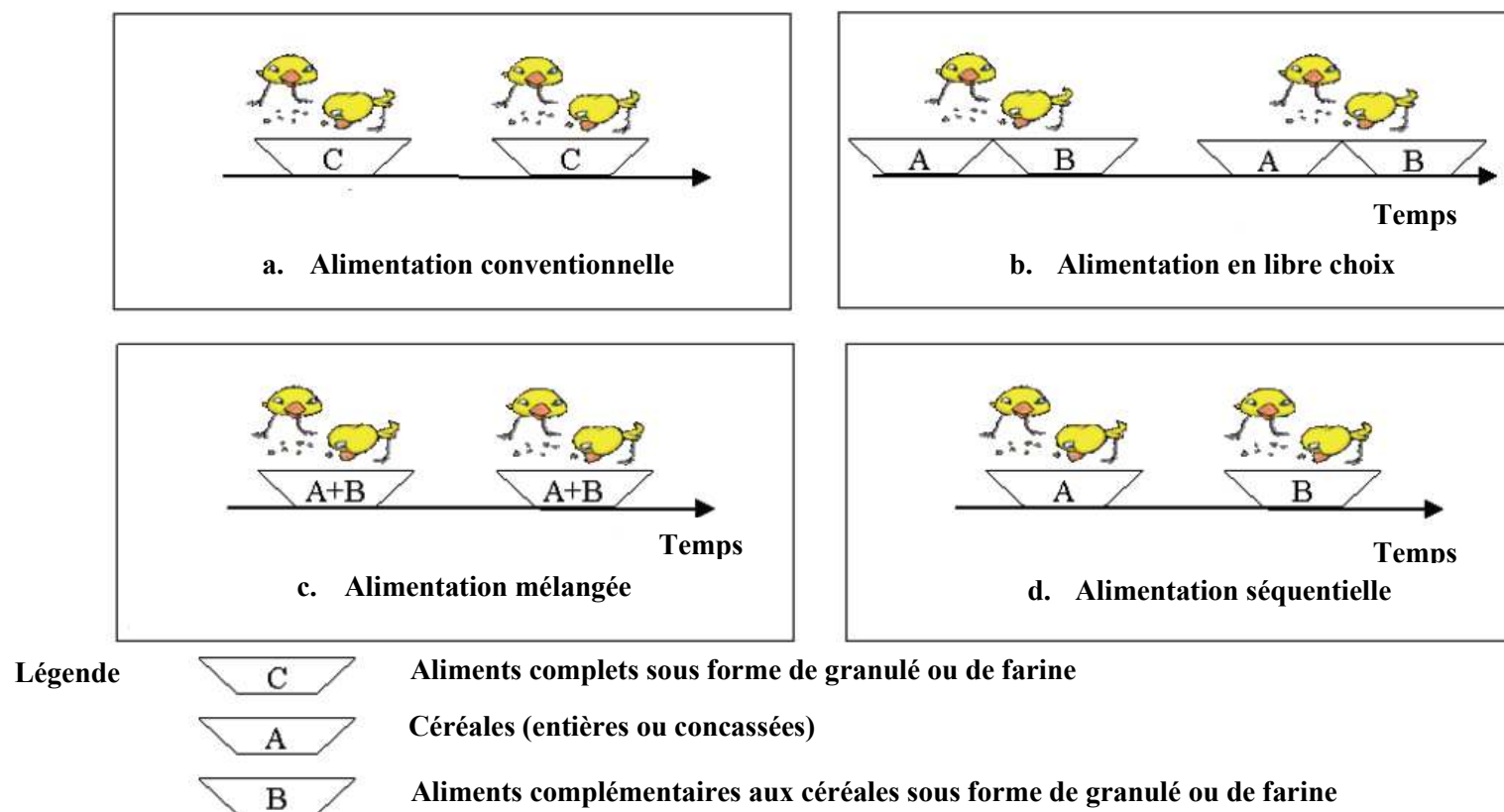


Figure 4. Représentation schématique du principe des méthodes d'alimentation actuelles et possibles dans la production de volaille (a. alimentation conventionnelle, b. alimentation en libre choix, c. alimentation mélangée et d. alimentation séquentielle), adapté de Noirot et al (1998)

1.1. Alimentation en libre choix

La technique d'*alimentation séparée* ou en libre choix, consiste à distribuer simultanément plusieurs aliments (habituellement deux) séparés dans l'espace. Cette technique permet de répondre à la grande variété des besoins individuels des oiseaux au sein d'un troupeau, en permettant d'adapter le régime alimentaire aux besoins et aux préférences des animaux, aux conditions climatiques, tout en ayant des avantages à la fois pratiques et économiques pour l'éleveur (Cumming 1994). Mais avec cette technique, les volailles ne se constituent pas toujours spontanément un régime optimum au regard des intérêts de l'éleveur (majoration du poids et de l'efficacité alimentaire, limitation de l'état d'engraissement). Le principal problème rencontré est celui du rapport énergie/protéines du régime effectivement ingéré par la volaille, qui est souvent supérieur à celui observé avec un aliment complet. L'alimentation séparée entraîne alors une baisse de la vitesse de croissance (Yo *et al* 1997) ou une augmentation de la teneur en gras abdominal (Leeson et Caston 1993). Or, l'augmentation de la teneur en gras abdominal a été montrée comme étant défavorable à la réussite du gavage chez l'oie (Auvergne *et al* 2006). Du fait de la concomitance des variations en énergie et en protéines, l'origine des variations de choix des volailles et notamment des poulets, n'est pas élucidée. Toutefois, suite à une comparaison d'aliments variant en énergie uniquement, il a été montré que les poulets sont capables, sur une longue période (7 à 49 jours d'âge), d'ajuster précisément leur consommation pour maintenir une consommation d'énergie constante (Leeson *et al* 1996).

1.2. Alimentation mélangée

Le *mélange* de céréales et d'un aliment complémentaire dans une même mangeoire est une technique qui permet de réduire les coûts de fabrication et de transport. Cette technique est pratiquée dans le sud-ouest de la France pour l'alimentation de poulets à issus de souches à croissance lente (poulet « label »), avec du maïs broyé mélangé à un aliment complémentaire protéique livré par l'usine d'aliment. Cette technique permet de contrôler la composition de l'ingéré global, et de la moduler en fonction de l'âge des poulets et des performances de croissance. Toutefois, le tri particulier peut devenir un facteur limitant la rentabilité de l'atelier (Noirot *et al* 1998, Chevalier *et al* 2007). L'inconvénient majeur de cette méthode est la possible sélection systématique des aliments par les volailles, ce qui peut

conduire à une augmentation de la variation individuelle en termes d'ingestion et donc de performance (Picard *et al* 1997).

1.3. Alimentation séquentielle

L'alimentation séquentielle (AS) est une autre technique qui consiste à distribuer cycliquement deux aliments de composition nutritionnelle déséquilibrée au cours du nycthémère. Contrairement aux deux techniques décrites précédemment, elle permet de « diriger » l'équilibre du régime, en contrôlant le temps d'accès de chacun des aliments proposés (Bouvarel *et al* 2008, Umar Faruk *et al* 2010).

2. Acceptabilité d'un nouvel aliment

La modification de la présentation des aliments ainsi que la possibilité d'un choix offert aux animaux questionne la notion d'acceptabilité des aliments. Ce sont les signaux sensoriels qui conditionnent les réactions immédiates des animaux vis-à-vis de l'aliment. Ils doivent notamment être capables de discriminer ce qui est comestible de ce qui est toxique (Bouvarel *et al* 2010). Pour cela, les capacités visuelles et tactiles sont particulièrement utilisées par les volailles pour tester leur aliment. Le comportement alimentaire dépend donc de ces différentes perceptions qui interagissent entre elles.

2.1. La vision

La vision est le premier sens sollicité par les volailles pour percevoir l'aliment dans l'environnement. La perception visuelle des particules alimentaires implique des tâches complexes et précises, réalisées rapidement (Picard *et al* 2002). Du fait d'une densité importante de cellules cônes et bâtonnets dans la rétine (Moran 1982), les oiseaux sont capables de percevoir avec une grande acuité les détails des aliments. Par exemple, chez le poulet, la vision latérale est relativement indépendante entre chaque œil et permet une perception précise de détails rapprochés dans deux secteurs situés à une distance angulaire de 34-39° et 61-66° du bec. Cette spécificité permet au poulet de réaliser deux tâches simultanément comme par exemple rechercher de l'aliment et surveiller les dangers potentiels grâce respectivement, aux hémisphères gauche et droit du cerveau (Rogers 1995). Il en est de même chez l'oie (Heppner *et al* 1985).

La couleur est un facteur important chez les volailles. Ainsi, Rogers (1995), Chagneau *et al* (2006) et Lecuelle *et al* (2011) ont montré que les particules brillantes et les particules les plus claires ont la préférence des animaux. De plus, Weeks *et al* (1997) indiquent, une consommation plus importante d'aliments colorés en jaune et en rouge comparés au vert et au bleu chez le poulet de chair. La perception des couleurs et l'effet de celles-ci sur le comportement des volailles dépendent de leur sensibilité spectrale qui est légèrement différente de celle de l'Homme (380 à 700 nm). Ce dernier possède trois types de cônes qui lui permettent de percevoir les trois couleurs primaires, le rouge, le vert et le bleu, et a donc une vision trichromatique, tandis que les oiseaux ont une vision tétrachromatique (Burkhardt 1982, Osorio *et al* 1999). Ils possèdent en effet un quatrième type de cône, qui est sensible à la lumière ultraviolette, et peuvent donc percevoir les trois couleurs primaires, et la couleur ultraviolet (UV).

Ainsi, la vision des oiseaux est un élément important à prendre en considération comme facteur de variation de la prise alimentaire des animaux

2.2. L'olfaction

Le degré de développement de l'épithélium olfactif varie entre les espèces d'oiseaux en relation avec leur régime alimentaire. Ainsi, la taille et la complexité du système olfactif sont plus importantes par exemple chez les espèces carnivores ou piscivores que chez les espèces frugivores ou granivores. Par exemple, le poulet se situe au milieu d'un classement basé sur la taille relative du bulbe olfactif de 124 espèces aviaires (Jones et Roper 1997). Le ratio entre le diamètre du bulbe olfactif et celui de l'hémisphère ipsilatéral est de 15% chez le poulet, le minimum étant de 3% chez la mésange à tête noire, et le maximum de 37% chez le pétrel des neiges (Bank et Cobb 1968, Wenzel 1971). De nombreuses molécules sont perçues et modifient le comportement des volailles (Jones et Roper 1997). Des réactions plus ou moins importantes sont observées selon l'origine (Mabayo *et al* 1996) et la concentration de l'odeur (Burne et Rogers 1996). Ainsi, l'olfaction pourrait jouer un rôle dans le processus de reconnaissance de l'aliment, mais qui paraît toutefois moins important que celui joué par la vision (Jones et Roper 1997). En effet, les réactions vis-à-vis de l'odeur de l'aliment disparaissent rapidement si l'animal ne subit pas d'effet négatif ou positif associé (Picard *et al* 2000). Peu d'études existe chez l'oie, cependant Würdinger (1979), montre que l'oie juvénile commence à réagir aux odeurs dès 11 à 20 h d'âge et tout comme les autres oiseaux,

l'apprentissage et la mémorisation des odeurs se fait tout au long de sa vie et de son expérience.

2.3. Le toucher

Chez les oiseaux, la perception tactile des particules alimentaires est essentiellement faite par le bec, qui dispose d'un équipement sensoriel hautement spécialisé constitué de mécanorécepteurs (corpuscules de Merkel et Herbst) regroupés dans les 15-20 papilles dermiques situées juste sous la couche cornée du bec (Gentle et Breward 1986). La majorité des coups de bec a un objectif purement exploratoire et ne vise pas forcément à prendre, mais plutôt à toucher l'aliment potentiel (Picard *et al* 2000). Chez la poule, par exemple, Yo *et al* (1997) montrent qu'un tiers seulement des coups de bec aboutit à l'ingestion de nourriture. Les caractéristiques physiques comme la taille, la forme et les propriétés de surface des aliments interviennent ainsi dans la prise alimentaire. Les particules consommées ont une taille suffisamment élevée pour être saisies efficacement par le bec (Rogers 1995) quelle que soit la composition du régime (Portella *et al* 1988, Nir *et al* 1994a, Wauters *et al* 1997). Toutefois comme chez beaucoup d'autres espèces, les volailles ajustent leur comportement alimentaire (Collier et Johnson 2004) pour satisfaire leur besoin énergétique. L'alimentation complète sous forme de granulés, a permis ainsi une amélioration de l'efficacité de la prise alimentaire par le bec chez le poulet à croissance rapide (Nir *et al* 1994a et c, Quentin *et al* 2004, Svihus *et al* 2004a). Lors d'une phase de transition alimentaire, impliquant un changement physique de l'aliment, Quentin *et al* (2004) montrent que les poulets de chair ajustent leur préhension en moins de 10 minutes. Chez le dindonneau, le passage de miettes à des granulés, entraîne une diminution immédiate, mais temporaire de l'ingestion avec une augmentation des comportements exploratoires (Lecuelle *et al* 2010).

La dureté des aliments est également un élément à prendre en compte dans la prise alimentaire des volailles. Pour une même taille, des granulés « durs » (0,77 MPa) sont consommés plus rapidement que des granulés plus tendres (0,45 MPa) (Picard *et al* 1997). Néanmoins, une plus forte dureté de l'aliment induit une baisse d'ingestion (-10% ; Nir *et al* 1994c). La rigidité maximale de la particule (N / mm) est également à prendre en compte. Ainsi, Laviron *et al* (2010) observent chez le dindonneau, une réduction immédiate (-25%) de la consommation alimentaire lors du passage d'un granulé tendre à un granulé plus rigide de même taille. Chez les oies, il a été récemment montré que l'ingestion des aliments varie en fonction de l'âge, et surtout de la largeur du bec (Woog *et al* 2012).

Le toucher des oiseaux et la perception des caractères physiques tels que la dureté, la rigidité, la longueur, le diamètre et/ou la rugosité sont des facteurs à prendre en compte comme facteur pouvant modifier la prise alimentaire des animaux.

2.4. Le goût

Le goût joue un rôle important dans la prise alimentaire en permettant à l'animal de déterminer si « l'aliment » est potentiellement toxique ou comestible et nutritif. Or, du fait de l'absence de mastication, la perception gustative est limitée chez l'oiseau. Toutefois, Balog et Millar (1989) montrent que les poulets sont capables de détecter différentes saveurs (umami, sucré, acide, salé et amer), et consomment préférentiellement : l'aspartame (incorporé à 0,13%), puis la saccharine (0,06%), l'acide citrique (6%), le sel (5%) et la quinine (0,10%). Des goûts marqués peuvent donc modifier le comportement alimentaire mais il est souvent difficile dans la pratique de dissocier le goût de l'odeur perçue lors de l'ingestion d'un aliment (Picard *et al* 2000).

3. Effet de la forme de présentation de l'aliment sur le tractus digestif

L'incorporation de céréale entière modifiant la forme de l'aliment distribué aux volailles implique la notion d'adaptabilité du tractus digestif à cette nouvelle présentation. En effet, il a été clairement établi que l'utilisation de grains entiers augmentait l'ingestion et maintenait les performances de croissance des animaux (Yo *et al* 1997, Gabriel *et al* 2008). De plus, cela modifie la structure de l'appareil digestif des volailles notamment le poids du gésier (Cumming 1992, Forbes et Covasa 1995, Banfield *et al* 2002, Plavnik *et al* 2002, Gabriel *et al* 2003, Engberg *et al* 2004) et du pancréas (Banfield *et al* 2002, Engberg *et al* 2004).

L'augmentation du poids du gésier consécutive au passage d'une alimentation granulé à un mélange contenant des graines entières peut être attribué à l'augmentation de la fréquence des contractions (Hill 1971, Roche 1981) nécessaires pour réduire les graines entières en fines particules et leur permettre de passer dans l'intestin grêle. Bien que certaines études signalent la modification de la taille relative des segments intestinaux en fonction de la structure des aliments, les résultats sont contradictoires. Un poids inférieur du duodénum a été rapporté avec du blé entier (Gabriel *et al* 2003) ou avec une alimentation à particules grossières par rapport à une alimentation à particules fines (Nir *et al* 1994b). A l'inverse, Taylor et Jones (2004) observent un duodénum plus long avec du blé entier (200 g / kg dans l'alimentation en

granulés), sans modification de poids. Dans ces études, aucune différence dans la taille du jéjunum et de l'iléon n'a été observée. Toutefois la nature de la céréale a également un rôle important dans le développement des différents compartiments intestinaux. Par exemple, Rodgers *et al.* (2012) ont montré que le poids de l'ensemble du tractus digestif et notamment celui du gésier était plus faible avec du sorgho qu'avec du maïs (Lu *et al* 2011).

Il a également été rapporté chez le poulet que l'utilisation de graines entières, notamment de blé entier, conduit à un pH plus bas du contenu gésical (Gabriel *et al* 2003, Engberg *et al* 2004) et peut conduire à une activité accrue de la pepsine dans ce compartiment digestif. En effet, même si la sécrétion de H⁺ et de la pepsine semble avoir des processus de régulation différents (Burhol 1982), l'ion H⁺ et la pepsine sont produites par les mêmes cellules proventriculaires, les cellules oxynticopeptiques. Le pH plus bas et l'activité de la pepsine potentiellement plus élevée peuvent augmenter la dénaturation et l'hydrolyse des protéines. De plus, l'augmentation du reflux gastro-duodéal, indiqué par un contenu plus élevé d'acide biliaire dans le gésier qu'avec des aliments granulés (Svihus *et al* 2004b), améliore le contact entre le digesta, la pepsine et l'acide chlorhydrique. Ces phénomènes peuvent expliquer l'amélioration de la digestion des protéines qui a parfois été rapportée (Svihus *et al* 2004b). De plus, le plus fort développement mécanique du gésier conduit à une réduction de la taille des particules de digesta dans l'intestin grêle (Svihus *et al* 1997), ce qui peut contribuer à augmenter la digestion de tous les composés alimentaires (Lacassagne *et al* 1991, Crévieu *et al* 1997) comme cela a été observé pour l'amidon (Svihus et Hetland, 2001). L'alimentation avec des graines entières, et notamment avec du blé entier, montre également une augmentation de l'activité amylasique dans le contenu du jéjunum, ce qui contribue à l'amélioration de la digestibilité iléale de l'amidon (Svihus et Hetland 2001, Svihus *et al* 2004b). De plus, Svihus *et al* (2004b) ont signalé une concentration plus élevée des sels biliaires dans le contenu jéjunal. Cette activité sécrétoire accrue (amylase, sels biliaires) peut être également due à une plus grande activité du gésier (Hetland *et al* 2003).

Les céréales entières ont un effet sur le tractus digestif supérieur (le gésier), alors que des modifications de l'intestin semblent être limitées. Les conséquences sur le développement de l'appareil digestif supérieur, peuvent être suffisantes pour que l'animal utilise plus efficacement les grains entiers comme l'ont montré Preston *et al* (2000) et Svihus *et al* (2004b) pour l'énergie métabolisable apparente du blé. Cela peut contribuer à une amélioration de l'indice de consommation (Plavnik *et al* 2002, Engberg *et al* 2004, Gabriel *et*

al 2006). Cependant, l'effet inverse peut également être observé (Preston *et al* 2000, Hetland *et al* 2002, Gabriel *et al* 2003, Svihus *et al* 2004b) soit en raison de dépenses énergétiques plus élevées liées à une activité digestive augmentée (gésier), soit en raison d'une activité alimentaire accrue, due à une augmentation du taux de picorage (Martaresche *et al* 2000).

La prise alimentaire des oiseaux est guidée par des facteurs génétiques, comportementaux, digestifs et métaboliques qui interagissent de manière évolutive au cours du développement des animaux. En conséquence, il semble important de s'intéresser aux comportements des oies lors des changements de forme et de composition de l'aliment que l'on va utiliser.

Chapitre III. Utilisation du sorgho chez les volailles, approche comparée avec le maïs

1. Le sorgho (*Sorghum sp*)

Le genre *sorghum* comprend plusieurs espèces. Le sorgho est une plante herbacée annuelle de la famille des *Poaceae* (Graminées). Il se compose de tiges robustes et dressées, garnies de feuilles plates et se terminent par une grande inflorescence rameuse. 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. Hormis les variations de taille à maturité, il existe un extraordinaire polymorphisme dans le nombre de talles qui accompagnent la tige principale, la composition des tissus internes, le nombre et la taille des feuilles, leur couleur, les ramifications de l'inflorescence et le nombre d'épillets qu'elle porte (entre 2000 et 4000). C'est pourquoi les descriptions varient selon les auteurs et peuvent paraître relativement floues. Les facteurs d'influence de ce polymorphisme sont, au premier rang, la génétique. Le climat joue bien sûr également un rôle important. L'inflorescence est une panicule 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 2 000 et 4 000. Ils comportent deux fleurs, dont une seule est complète et donnera un fruit après fécondation. 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. Phylogénétiquement, ce sont la canne à sucre et le maïs qui sont les plus proches parents du sorgho (Grasse 1963, Bonnier *et al* 1990, Judd *et al* 2002). On distingue principalement deux sorghos (Figure 5) : le sorgho à balai (*Sorghum halepense*) et le sorgho grain (*Sorghum. bicolor*).

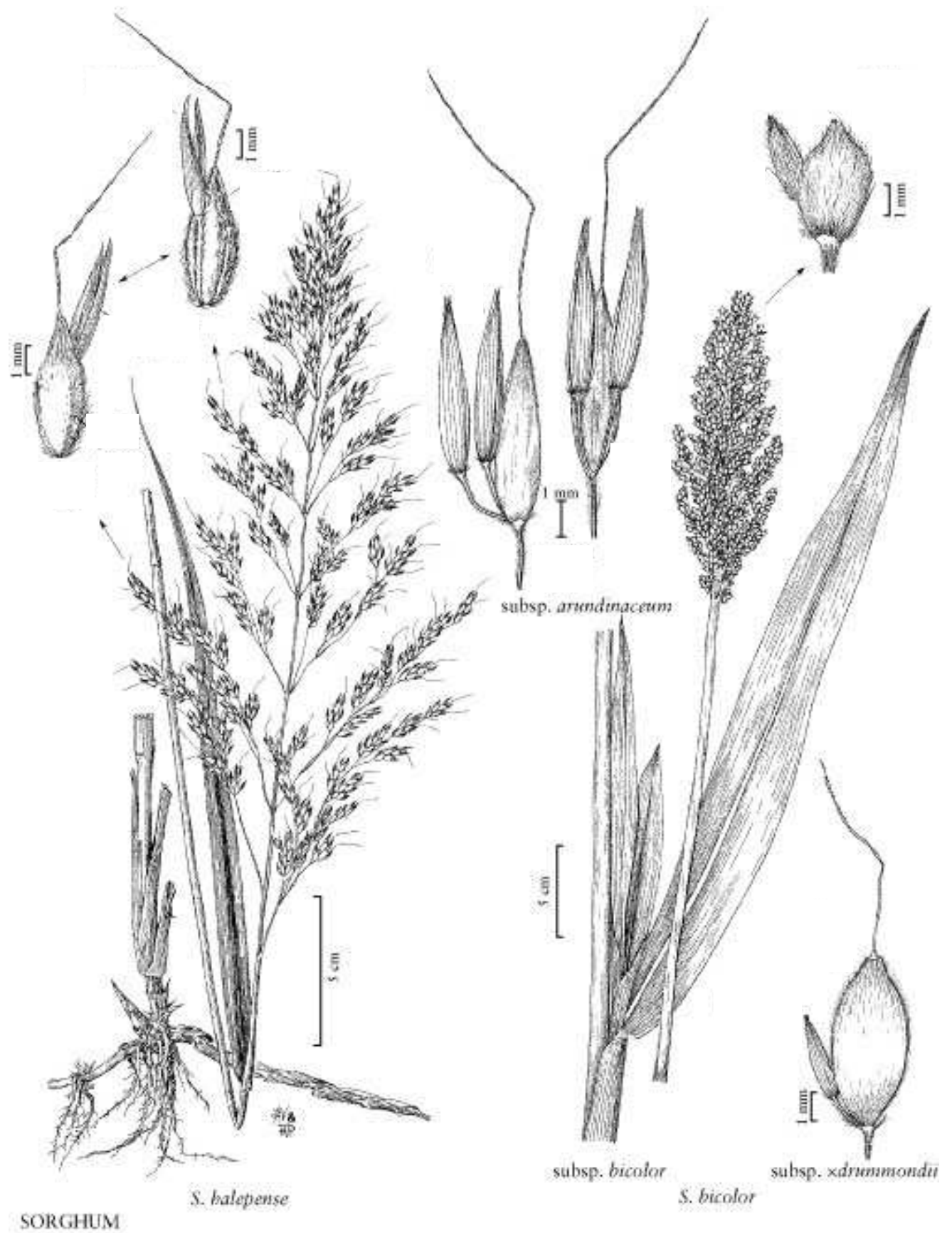


Figure 5. *Sorghum* sp. d'après Warrick (2012).

A l'heure actuelle, il existe 66 variétés de sorgho-grain inscrites au *Catalogue français des espèces et variétés* (GNIS 2012) et donc officiellement disponibles pour les agriculteurs français. 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 (Jacquot 1988). Mais le nombre de variétés évolue rapidement : beaucoup de variétés sont commercialisées quelques années puis disparaissent et sont remplacées par d'autres (Stock, 1999). Les sélectionneurs apportant régulièrement des améliorations à leurs caractères agronomiques.

En France, le sorgho a été cultivé dès le début du Moyen-âge. C'était alors une culture qui n'avait que peu d'importance en volume de production et qu'on associait avec celle du mil, celui-ci étant implanté dans ce pays depuis le néolithique. D'ailleurs ces deux céréales sont communément regroupées sous le terme de millet. Elles servaient toutes les deux à nourrir les hommes, mais surtout leurs animaux domestiques quand les autres céréales plus nobles leur faisaient défaut. Christophe Colomb ramena le maïs en Europe en 1492. A partir de ce moment, la culture de cette céréale va très vite se développer dans tout le bassin méditerranéen et éclipser presque totalement sorgho et mil, auxquels ils étaient comparés en raison de leurs caractères botaniques et agronomiques proches. Il prenait souvent les noms de gros mil, gros millet, millet des Indes (Haudricourt et Hedin 1943, Balvet 2002). Cette situation changea brusquement après la seconde guerre mondiale, avec la réapparition de la culture du sorgho. Ainsi, les premiers essais de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) sur le sorgho commencèrent en 1948, à Montpellier et à Clermont-Ferrand, afin de sélectionner des variétés adaptées aux sols et aux climats français, dans un objectif d'atteindre des rendements concurrençant celui des autres céréales. Ces recherches aboutirent rapidement à la création d'hybrides très précoces et dont la productivité en hausse permit de commencer les tests sur de grandes surfaces en 1960. Dans le même temps, l'industrie des aliments du bétail était en pleine expansion et offrait des débouchés plus importants au sorgho pour la fabrication d'aliments composés. La production augmenta significativement pendant les 15 années qui suivirent pour se stabiliser aux valeurs que l'on connaît encore actuellement : 37 000 ha pour 230 000 tonnes par an (Bonnemaire 1969, Dehaynin 2007) contre 1,5 million d'hectares de maïs pour une sole oscillant entre 15 et 16 millions d'hectares.

La plante est réputée pour sa sobriété. Son puissant système racinaire est en effet 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 en eau disponible. En sols très profonds, le rendement attendu est systématiquement supérieur à 60 qx / ha, voire compris entre 80 et 90 qx / ha dans le sud de l'Isère et du Rhône. En culture irriguée, la limite est le niveau de rendement du sorgho lui-même (120 qx / ha). Mais pour atteindre sa productivité optimale, il faut apporter 303 mm d'eau au maïs quand le sorgho se contente de 126 mm dans les mêmes conditions pédoclimatiques (Amigues *et al* 2006). En France, on peut considérer qu'il y a trois grandes régions productrices de sorgho (Figure 6) : la première est le bassin de la Garonne avec plus de 50% de la production nationale (Zone Sud-Ouest), puis la vallée du Rhône (Zone vallée du Rhône), enfin les Pays de Loire (Zone Atlantique).

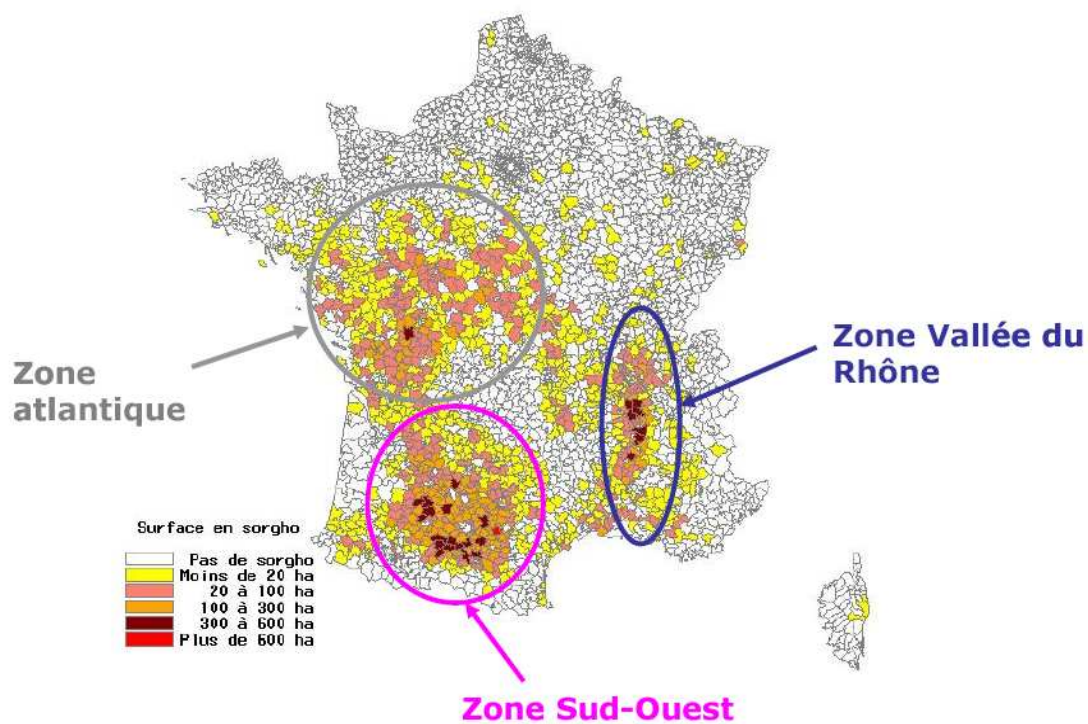


Figure 6. Les trois grandes zones de production de sorgho grain en France (Verdier 2007)

Le sorgho n'est pas la culture « miracle » en situation de sécheresse mais il concurrence le maïs en situation d'irrigation restreinte (Amigues *et al* 2006, Faré et Faci 2006) et surtout sa culture est plus souple, car il est plus économe en eau (environ 45%) que le maïs : des décalages de quelques jours dans son calendrier d'irrigation ne portent pas à conséquence sur le rendement final, au contraire du maïs qui y est très sensible.

2. Systèmes de culture du sorgho et du maïs

Dans les systèmes du grand sud-ouest, 90-95 % du maïs est irrigué à différents niveaux, alors que l'énorme majorité du sorgho n'est pas irriguée. De plus, les besoins en intrants du sorgho sont systématiquement plus faibles que ceux du maïs (de -8% pour l'oxyde de potassium à -35% pour le N minéral) sauf pour l'oxyde de calcium (+199% ; Tableau 6).

Tableau 6. Principaux intrants utilisés, le rendement en matière sèche et de nitrate émis (tout en kg / ha, sauf irrigation en m³ / ha) pour le maïs et de sorgho

	Maïs ¹	Sorgho ²
N minéral	189	68
N	46	23
P ₂ O ₅ (triple superphosphate)	67	21
K ₂ O (oxyde de potassium)	85	8
CaO (oxyde de calcium)	167	333
Semences	20	13
Pesticides (ingrédient actif)	3	2
Diesel	82	76
Eau d'irrigation (m ³ /ha)	760	0
Machines agricoles	21	19
Rendement en grain (matière sèche)	8 820	5525

¹ Irrigué d'Aquitaine, France ; ² Non irrigué de Midi-Pyrénées

Dans d'autres régions de France, le sorgho a sa place dans des systèmes irrigués mais il a besoin de moitié moins d'eau que le maïs pour atteindre son potentiel sachant que les deux espèces, maïs et sorgho, présentent la même efficacité vis-à-vis de l'eau (quantité de matière sèche produite / quantité d'eau utilisée). La sélection du maïs tend à réduire l'écart entre les deux céréales (Amigues *et al* 2006). Toutefois, en condition limitante en eau, le sorgho permet actuellement de meilleures performances que le maïs. En effet, les quantités d'eau nécessaires pour arriver au maximum biologique de production de l'espèce sont plus faibles pour le sorgho que pour le maïs (Farré et Faci 2006).

3. Les valeurs nutritionnelles du sorgho et du maïs

Le sorgho n'a pas été utilisé dans l'alimentation des volailles pendant de nombreuses années parce que, dans les variétés anciennes (NK 123 ou Sultan), les graines contenaient des tanins condensés, principalement des flavonoïdes (Bate-Smith 1969, Watterson et Butler 1983), qui réduisent la digestibilité du mélange alimentaire ainsi que la croissance des oiseaux (Elkin *et al* 1996, Gualtieri et Rapaccini 1990, Nyachoti *et al* 1997).

Le nom tanin dérive de la tradition de "tannage" des peaux d'animaux avec des infusions d'écorce de chêne ou de châtaignier pour fabriquer du cuir. Historiquement, le terme tanin a été utilisé pour décrire un groupe hétérogène de composés polyphénoliques ayant la capacité de précipiter les protéines. Les polyphénols sont un groupe omniprésent et complexe de métabolites végétaux dont les poids moléculaires et les degrés de polymérisation sont extrêmement variables. Le sorgho peut contenir plus de 100 g / kg de polyphénols, tandis que les concentrations dans l'orge, le maïs et le blé sont négligeables (Bravo 1998). Les tanins condensés se distinguent des autres composés polyphénoliques par leur capacité à lier les protéines (Spencer *et al* 1988), et il a été affirmé que le tanin a le potentiel de précipiter 12 fois son poids en protéines (Jansman 1993). Cette capacité se reflète dans les méthodes d'analyse dans lequel les tanins sont quantifiés sur la base de la précipitation des protéines (Makkar 1989). Le sorgho peut contenir des concentrations en tanins condensés très variables (de moins de 0,06 g / kg à plus de 20 g / kg ; Butler *et al* 1984)), beaucoup plus que d'autres céréales (Gualtieri et Rapaccini 1990). Le tanin ou proanthocyanidines dans le grain de sorgho est représentatif des tanins condensés simples, comprenant un polymère linéaire (4-8) d'épicatéchine avec des unités terminales de catéchine (Hagerman *et al* 1997).

Il y a près de 60 ans, McClymont et Duncan (1952) ont conclu que le sorgho contenait un «facteur toxique» parce que l'incorporation de sorgho dans l'alimentation des volailles avait pour influence un taux de croissance sensiblement moindre et une tendance à augmenter la mortalité. Chang et Fuller (1964) ont ensuite identifié ce facteur toxique comme étant le tanin. Rostagno *et al.* (1973) ont démontré que les tanins du sorgho ont la capacité de diminuer la digestibilité des acides aminés chez les poulets. Le coefficient de digestibilité moyen de 14 acides aminés était de 0,730 pour le sorgho ayant une faible concentration en tanins contre 0,222 dans le sorgho à forte concentration. De même, Mitaru *et al.* (1985) ont montré un impact négatif des concentrations en tanins sur la digestibilité iléale vraie (DIV) des acides aminées du sorgho chez le poulet de chair. Les coefficients moyens de DIV de 15

acides aminés de sorgho avec différentes concentrations en tanins étaient de 0,509 (28,3 g / kg tanin), 0,660 (19,1 g / kg de tanin) et 0,908 (0,8 g / kg tanin). Nyachoti *et al.* (1997) ont examiné l'impact de faibles (0,47 g / kg) ou de fortes (10,79 g / kg) concentrations en tanins à partir de 18 études sur l'alimentation de poulets de chair. Le passage d'une faible à une forte teneur en tanins pénalise le gain de poids d'environ 19,6%, la consommation de 10,1% et l'efficacité alimentaire de 14,1%. Toutefois, il convient de noter que les gains de poids des poulets ne sont pas étroitement corrélés avec les concentrations en tanins du sorgho dans cette série de comparaisons. Nyachoti *et al.* (1996) ont conclu que les tanins de certaines variétés de sorgho peuvent avoir peu d'effet sur leur valeur alimentaire pour la volaille et que les effets attribués à des tanins dans d'autres études peuvent refléter la présence d'autres facteurs anti-nutritifs. 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. La nature de l'amidon peut avoir un impact sur celle-ci. De même, dans ces variétés suffisamment pauvres en tanins, la structure de la kafirine pourrait se révéler comme un facteur de variabilité important de la digestion iléale des acides aminés. (Elkin *et al* 1996, Jondreville 2000, Jondreville *et al* 2001).

Le kafir qui est l'autre nom donné au sorgho, dont découle d'ailleurs le terme kafirine, a été proposé par Johns et Brewster (1916) pour désigner cette protéine de stockage spécifique du sorgho. Deux études ont montré que les protéines du sorgho se composent de 54% de kafirine, 31% de glutéline, 8 et 7% d'albumine et de globuline (Virupaksha et Sastry 1968, Ali *et al* 2009). Ainsi la kafirine constitue une part importante, voire la majorité, des protéines du sorgho (Virupaksha et Sastry 1968, Taylor *et al* 1984, Cagampang et Kirleis 1984, Sastry *et al* 1986, Watterson *et al* 1993, Salinas *et al* 2006). La kafirine se trouve dans la structure des protéines qui sont circulaires, avec un diamètre de 0,4 à 2,0 μm , situées dans l'endosperme du sorgho (Taylor *et al* 1984). Cette protéine de stockage spécifique du sorgho est divisée en trois composants : α -kafirine, β -kafirine et γ -kafirine qui se distinguent par leur solubilité, leur structure et leur poids moléculaire. La kafirine est relativement mal digérée et contient peu de lysine (lys). Par conséquent, plus la proportion de kafirine augmente dans le sorgho, plus la digestibilité des acides aminés et de la lysine diminue.

Cependant, il a été démontré par Taylor *et al.* (2007) que le tanin du sorgho se lie préférentiellement à la γ -kafirine. Par conséquent, des concentrations croissantes de tanin diminuent la digestibilité des protéines « kafirines » dans le sorgho.

Plusieurs programmes de sélection génétique ont été consacrés à développer des variétés sans tanin (0,06% vs > 1,5% dans les variétés anciennes ; Conan *et al* 1992) Ainsi, il est probable que la majorité des cultures contemporaines de sorgho contiennent peu ou pas de tanins condensés. Rooney (2005) a déclaré catégoriquement que 99% des cultures de sorgho aux États-Unis ne contiennent pas de tanin. En France, Métayer *et al.* (1993) font état d'une teneur en tanin moyenne de 0,7 g / kg dans 68 échantillons de sorgho en provenance des récoltes 1989-1990, mais un seul échantillon contenait une teneur en tanin au-delà de 1,0 g / kg. En outre, les chercheurs ont noté que le contenu du sorgho en tanin était beaucoup plus faible que celui trouvé dans les cultures de sorgho dix ans plus tôt, qui dépassait alors 10 g/kg. Grâce à ce travail de sélection, le sorgho est actuellement couramment utilisé dans l'alimentation des volailles (Gualtieri et Rapaccini 1990, Selle *et al* 2010). Le maïs quant à lui ne contient pas de tanins (Douglas *et al* 1990).

Tableau 7. *Caractéristiques nutritionnelles élémentaires, exprimées par rapport au produit brut sauf indication contraire, du maïs et du sorgho d'après Sauvante et al (2004).*

	Maïs	Sorgho
Matière sèche (%)	86,4	86,5
Protéines brutes (%)	8,1	9,4
Cellulose brute (%)	2,2	2,4
Matière grasse brutes (%)	3,7	2,9
Cendres brutes (%)	1,2	1,4
Parois végétales (%)	9,1	8,5
Amidon (%)	64,1	64,1
Sucres totaux (%)	1,6	1,1
Energie brute (kcal / kg)	3860	3900

La valeur nutritionnelle du sorgho est voisine de celle du maïs (Larbier et Leclercq 1992). Il est riche en énergie métabolisable à cause de sa forte teneur en amidon (64%) et de la présence non négligeable de matières grasses (3%). Il est un peu moins pauvre en protéines (9,4% vs. 8,1%) (Tableau 7). Enfin, comme pour le maïs, la disponibilité du phosphore est faible.

Toutefois malgré des teneurs en amidon proches, le ratio des deux principales molécules le constituant, l'amylopectine et l'amylose (Figure 7), diffèrent entre les deux céréales (Jenkins et Donald 1995, D'Alfonso et McCracken 2002). Or, il a été montré que chez les oiseaux, la digestibilité des amylopectines est plus élevée que celle de l'amylose (Skiba *et al* 2005, Zhou *et al* 2010).

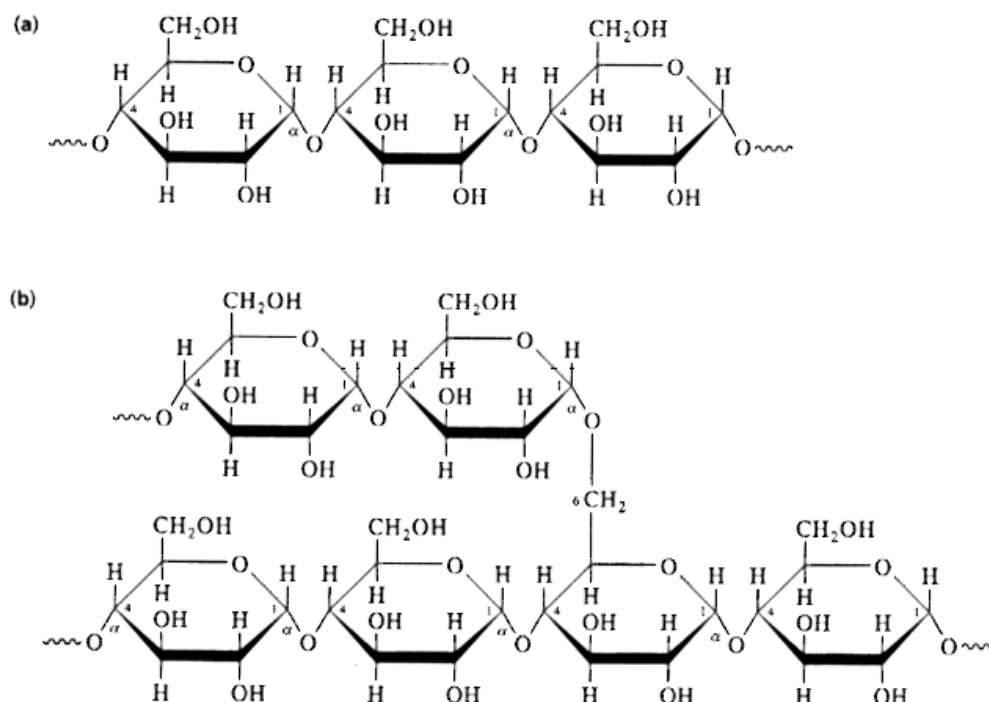


Figure 7. Structure de l'amylose (a) et de l'amylopectine (b) d'après Horton *et al* (2000)

De plus, contrairement au maïs (16 mg / kg), le sorgho ne contient que très peu de xanthophylles (< 2 mg/kg d'après Douglas *et al* 1990). Ces molécules de couleur jaune/rouge dérivées des carotènes, expliquent une partie de la pigmentation du jaune d'œufs des poules et de la pigmentation de la viande des poulets de chair nourris au maïs (Gualtieri et Rapaccini 1990).

4. Utilisation du maïs et du sorgho dans l'alimentation des volailles

Le maïs est la céréale la plus cultivée au monde avec 600 millions d'hectares. On le retrouve sur les cinq continents mais sa culture est réalisée selon des modes très variés. Culture vivrière à partir de variétés traditionnelles en Afrique subsaharienne, le maïs est devenu surtout une culture intensive et mécanisée à base de variétés très productives dans les pays tempérés industrialisés. L'essentiel de la production mondiale repose sur un faible nombre de pays. Parmi eux, les Etats-Unis et la Chine se détachent largement et représentent 60% des quantités de maïs produites à travers le monde (AGPM 2012). En réalisant 40% de la production mondiale, les Etats-Unis pèsent à eux seuls fortement sur le marché. Derrière ces 2 acteurs majeurs on retrouve 5 zones de production importantes dont l'Union européenne (60 millions de tonnes), produisant chacune entre 10 et 60 millions de tonnes et réalisant ensemble un peu plus de 20% de la production mondiale. L'alimentation animale est de loin le premier débouché du maïs dans le monde, surtout dans les pays industrialisés : la plante entière est consommée par le bétail comme fourrage frais ou sec ou sous forme d'ensilage. Les deux tiers environ de la production mondiale de maïs sont utilisés pour l'alimentation du bétail. Le maïs est également utilisé pour l'alimentation humaine. Marginale dans les pays industrialisés, sa consommation est particulièrement importante dans certains pays du Tiers Monde, notamment l'Afrique subsaharienne et l'Amérique latine, où il est consommé sous forme de grains entières ou utilisé en farine pour préparer des bouillies ou de galettes cuites. Les utilisations agro-industrielles du maïs, en particulier les produits de l'amidonnerie, constituent le 3^{ème} débouché principal du maïs. Parmi elles, la production d'éthanol de maïs utilisé comme agro-carburant constitue un débouché récent mais en forte croissance dans les pays industrialisés.

Le sorgho est la quatrième céréale la plus cultivée dans le monde, derrière le riz, le maïs et le blé, avec environ 40 millions d'hectares. Il est cultivé sur tous les continents. Tout comme le maïs, c'est une culture vivrière et manuelle en Afrique subsaharienne, mais surtout une culture intensive et mécanisée à base de variétés très productives dans les pays tempérés industrialisés.

Les principaux producteurs sont : les Etats-Unis, le Nigeria, l'Inde, le Mexique et le Soudan. Dans l'union européenne les deux principaux pays producteurs sont la France (40 000 à 70 000 ha) et l'Italie (30 000 à 40 000 ha). Un peu plus de 40% de la production mondiale est destinée à l'alimentation humaine, principalement en Afrique (Nigeria, Soudan, Ethiopie...) et en Asie (Inde, Chine). Environ 40 à 45% de la production mondiale est utilisé

en alimentation animale (Mexique, Etats-Unis, Union Européenne...), les 15% restant servent à la production de bioéthanol. En effet, en France par exemple, les deux principaux débouchés pour cette céréale sont la fabrication d'aliments du bétail pour 30 à 50% de la collecte et l'exportation intra Union Européenne (50 à 70%), principalement vers l'Espagne pour l'alimentation du bétail mais également, à un moindre niveau vers l'Italie et le Benelux pour le marché de l'oisellerie (Arvalis-Institut du végétal, 2010).

Le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) qui présente les mêmes caractéristiques nutritionnelles que le maïs mais nécessite pour sa production, une quantité d'eau bien inférieure, semble être un candidat intéressant pour se substituer au maïs dans l'alimentation des oies.

Chapitre IV. La durabilité des systèmes de production agricoles

Le concept de développement durable émerge en 1987, dans le rapport de la commission mondiale sur l'environnement et le développement. Il est alors défini comme un mode de «*développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de satisfaire les leurs*» (Brundtland 1989). Ce concept est consacré lors de la conférence des Nations Unies de Rio en 1992, au cours de laquelle les états signataires s'engagent à mettre au point des stratégies nationales de développement durable et à élaborer des indicateurs de durabilité (Agenda 21). Ce concept a l'avantage d'être fédérateur et d'être source d'une « illusion motrice » à l'origine de nombreux travaux (Lascoumes 2005). Depuis, l'Union Européenne, et en son sein la France, s'attache à décliner ces principes dans toutes ses politiques sectorielles : agriculture, transports, énergie...

Pendant les 30 années qui ont suivi la seconde guerre mondiale, le développement, fort de ses réussites industrielles, n'a eu pour bornes que la faisabilité technique et la rentabilité économique. A l'opposé, le concept de durabilité met l'homme au cœur des préoccupations du développement mais il souligne aussi que la croissance est tributaire des limites écologiques de la planète. Dans la problématique du développement durable, l'agriculture occupe une place importante (i) parce que le développement durable a pour objectif premier de satisfaire les besoins humains dans lesquels celui de se nourrir apparaît comme fondamental (Maslow 1943), (ii) parce qu'il est aujourd'hui démontré que de nombreuses pratiques agricoles actuelles ont des conséquences néfastes sur notre environnement : dégradation des sols, pollutions des eaux, appauvrissement de la biodiversité, changement climatique (Steinfeld *et al* 2006). Le développement de pratiques agricoles et de systèmes d'élevages plus durables sont donc aujourd'hui des priorités. C'est pourquoi, en production avicole comme ailleurs, nombreux sont ceux qui s'en réclament. Néanmoins, plus rares sont ceux qui définissent précisément ce qu'ils entendent par ce terme et à quels indicateurs de durabilité ils répondent. Il apparaît donc nécessaire de mieux définir le concept d'agriculture durable, ainsi que les indicateurs et les méthodes qui permettent d'évaluer la durabilité des exploitations agricoles.

1. Définitions et concepts de l'agriculture durable

Plusieurs définitions de l'agriculture durable ont été proposées (Bonny 1994). « *Une agriculture écologiquement saine, économiquement viable et socialement juste et humaine* » est aujourd'hui communément acceptée pour qualifier l'agriculture durable (Figure 8).

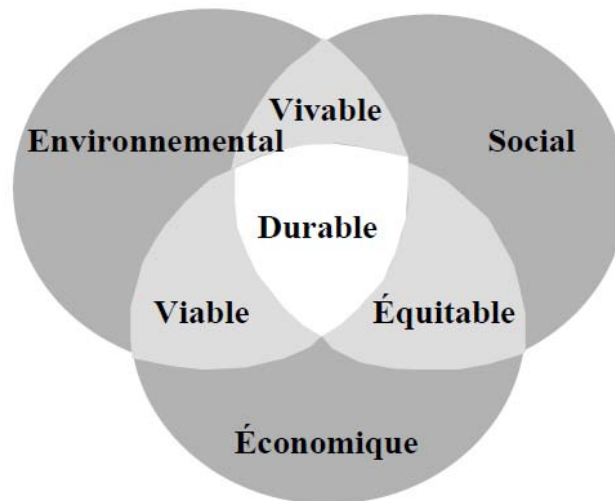


Figure 8. Les trois piliers de la durabilité

Cette définition présente l'avantage d'intégrer les 3 dimensions, économique, sociale et environnementale, qui forment les 3 piliers du développement durable. Ainsi, l'agriculture durable sera donc une agriculture qui peut durer parce qu'elle ménage son environnement et sauvegarde à long terme ses capacités de production. Il s'agit de préserver l'intégrité des moyens de production (sol, eau, air, etc...) tout en conservant la rentabilité de l'agriculture et en répondant aux besoins humains. A ceci s'ajoutent d'autres principes comme par exemple la gouvernance, la solidarité intergénérationnelle, la transmission des capitaux, des savoirs locaux (Antoine *et al* 2001, AFNOR 2003, Mancebo 2006).

Le développement durable et plus particulièrement l'agriculture durable renvoient à des enjeux politiques planétaires (Hervieu 2002) qui associent à la solidarité dans le temps (entre les générations), la solidarité dans l'espace (relations nord-sud) et la solidarité entre les différentes couches de la société (Mousel 1995). En France, la loi d'orientation agricole (LOA) votée en juillet 1999 a redéfini les missions de l'agriculture pour la réorienter vers des objectifs de durabilité : production de qualité, aménagement du territoire, entretien de l'espace, protection des ressources naturelles, et contribution à l'emploi rural (J.O.R.F. 1999).

A l'échelle de l'exploitation, Landais (1998) a défini une exploitation durable comme «une exploitation viable, vivable, transmissible et reproductible». La viabilité est prise ici dans sa dimension économique et concerne l'efficacité du système de production et la sécurisation des sources de revenus du système de production agricole face aux aléas du marché et aux incertitudes qui pèsent sur les aides directes. Une exploitation est vivable si elle assure à l'exploitant et à sa famille une vie professionnelle et personnelle décente (dimension sociale). La transmissibilité concerne la capacité de l'exploitation agricole à perdurer d'une génération à l'autre. Enfin, la reproductibilité s'adresse aux impacts des pratiques agricoles sur leur milieu et à la préservation des ressources naturelles (dimension environnementale).

Ce concept de durabilité agricole interagit avec les diverses pressions qui agissent sur les systèmes agricoles, dans différentes parties du monde, qui doivent prendre en compte la hausse des revenus et l'urbanisation, une concurrence féroce pour l'utilisation de la terre et de l'eau, l'augmentation de la population et par conséquent la demande croissante pour les produits d'origine animale (Herrero *et al* 2010).

2. Évaluation de la durabilité

Le concept de développement durable est intimement lié à la notion d'évaluation, qui implique la mise en œuvre d'approches globales et multicritères afin de prendre en compte les différentes composantes de la durabilité : économique, sociale, environnementale (Aubin *et al* 2005). Les méthodes d'évaluation de la durabilité se distinguent par leur niveau d'approche ou leur type d'évaluation (comprenant une ou plusieurs dimensions de la durabilité). Leur objectif est d'établir des diagnostics, d'identifier des points critiques et d'éclairer sur des choix stratégiques en vue d'une amélioration. La première étape de l'évaluation consiste à définir les limites (les frontières) du système étudié. Plusieurs niveaux d'approche existent, par exemple on peut faire l'évaluation de la ferme dans son ensemble (SOLAGRO 2002, Vilain 2003), de l'industrie comme une entité propre (Pottiez *et al* 2011), de l'atelier (Fortun-Lamothe *et al* 2012) ou du produit (Guinée 2002). Certaines méthodes évaluent les trois piliers de la durabilité, d'autres un (par exemple l'analyse de cycles de vie), ou deux des trois piliers. La seconde étape est la réalisation de l'inventaire des données nécessaires à l'évaluation qui se fait en fonction des objectifs et des indicateurs retenus.

L'indicateur est le plus petit dénominateur commun dans toutes les méthodes. Il s'agit de variables mesurables qui « fournissent des informations (quantitatives, qualitatives ou

subjectives) au sujet d'un système complexe en vue de faciliter sa compréhension aux utilisateurs de sorte qu'ils puissent prendre des décisions appropriées qui mènent à la réalisation des objectifs » (Gras *et al* 1989). Il est basé sur une référence relative ou absolue (valeur initiale, seuil, norme, etc...) qui lui donne un sens et le différencie de la valeur brute d'une variable. Il peut résulter d'une mesure, d'une observation, d'une donnée statistique, d'un calcul, d'une sortie de modèle dans le cas d'indicateurs simples ou d'une agrégation de variables pour des indicateurs composites (Mitchell *et al* 1995, Girardin *et al* 1999). Pour être accepté, un indicateur doit posséder certaines qualités : la pertinence, la sensibilité, la fiabilité et la simplicité (Gras *et al* 1989). Suivant les méthodes, les indicateurs peuvent être exprimés en unités différentes (par exemple, euros, pourcentage, et jours) et peuvent se référer ou non à une unité fonctionnelle qui représente la fonction du système étudié.

3. Démarche et méthodes pour l'évaluation de la durabilité des systèmes de production agricoles

En 2006, il existait déjà plus de 300 méthodes et outils d'évaluation de la durabilité dont 50 pour les systèmes d'élevage. Chaque discipline, espèce, domaine, approche, équipe propose un outil (Bockstaller *et al* 2010).

En agriculture, parmi ce nombre important de méthodes, une douzaine d'outils (Fertimieux, DIAGE, DIALECT, Planète, DIALOGUE, Indigo, Dexi-SH*...) sont aujourd'hui proposés pour évaluer uniquement les impacts environnementaux des activités agricoles (SOLAGRO, 2002, Van der Werf et Petit 2002, Gerber *et al* 2009). Mais l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) qui consiste en la création d'un groupe d'indicateurs, qui renseigne sur l'ensemble des ressources consommées et des substances polluantes émises pendant la production, l'utilisation et la mise en déchet d'un produit est aujourd'hui une méthode normalisée qui est largement utilisée, afin d'établir des diagnostics environnementaux sur des produits ou des services (Basset-Mens 2005).

En revanche, beaucoup moins de méthodes permettent d'évaluer les trois composantes de la durabilité des exploitations agricoles et encore moins des filières de production animales. On peut citer dans ce domaine, la méthode IDEA (Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles), le diagnostic du RAD (Réseau Agriculture Durable), IDAQUA

(Indicateurs de Durabilité pour l'Aquaculture), et la Méthode DIAMOND (DIagnostic de Durabilité des ateliers d'élevage des Animaux MONogastriques, déclinable par espèces).

La méthode IDEA a été développée dans un but pédagogique à l'instigation de la direction générale de l'Enseignement et de la Recherche du Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales (Vilain 2003). Le diagnostic RAD est globalement une simplification de la méthode IDEA qui a été beaucoup utilisée dans les groupes de réflexions sur le terrain (CIVAM 1992). Ces deux méthodes ont été prioritairement développées pour les élevages de ruminants et pour des structures de polycultures-élevage. IDAQUA est une méthode d'auto-diagnostic de la durabilité des exploitations piscicoles (salmoniculture, pisciculture continentale, pisciculture marine) basée sur un ensemble d'indicateurs socio-économiques, environnementaux et sanitaires. Elle permet l'évaluation de la durabilité à l'échelle d'une exploitation et de cibler les points critiques pour envisager des évolutions. Tout comme l'outil RAD, elle est issue du même principe que la méthode IDEA (Aubin *et al* 2007). La méthode DIAMOND permet d'évaluer la durabilité des ateliers d'élevage. Elle a été conçue pour être générique à l'ensemble des animaux monogastriques (volailles, porcs, lapins...) et adaptable pour permettre une utilisation en conditions de production par enquête directe auprès des éleveurs (Fortun-Lamothe *et al* 2012). Basée sur la même grille d'objectif de durabilité de la méthode DIAMOND, la méthode S+durable ?[®] permet d'évaluer la durabilité des ateliers d'élevage innovants en condition de recherche. Cet outil a pour objectif d'évaluer si une ou plusieurs innovations qui sont mises en œuvre dans un atelier d'élevage, permettent d'améliorer la durabilité du système.

Devant cette multiplicité de méthodes, et d'indicateurs de l'atelier, il n'est pas souvent évident de savoir quelle méthode est la plus pertinente. Riley (2001) a souligné que c'est une source de confusion qui est augmentée par le fait que de nombreuses méthodes ne sont pas évaluées pour leur pertinence scientifique ni leur faisabilité. L'utilisateur potentiel, que ce soit un chercheur travaillant sur une innovation, un conseiller agricole ou un intervenant impliqué dans un débat sur la durabilité d'un système aura des questions sur le choix de la méthode la plus adaptée à ses besoins.

Les réponses à de telles questions exigent une évaluation et une étude comparative qui fournit des informations, non seulement sur les points forts et sur les inconvénients de chaque méthode, son champ d'utilisation et sa validité, mais également sur la comparaison des

conclusions de chacune des méthodes. Certains auteurs (Meynard *et al* 2002, Bockstaller *et al* 2008) ont déjà souligné l'exigence d'une analyse comparative et la validation des différents indicateurs disponibles. Pour répondre à cette préoccupation des utilisateurs potentiels, des travaux de recherche ont comparé différents niveaux d'approches : à l'échelle de l'exploitation (van der Werf et Petit 2002, Halberg *et al* 2005) ou régionale (Payraudeau et van der Werf 2005). Cependant, aucune comparaison des résultats ou des conclusions issus des différentes méthodes n'est donnée (Bockstaller *et al* 2009).

De manière générale, une « bonne » méthode doit être : simple, pédagogique, attractive, explicite, évolutive face à de nouveaux enjeux sociaux (crise vocationnelle agricole, manque de reconnaissance de la société), économiques (problèmes d'accès au foncier, revalorisation des coûts de production) et/ou environnementaux (Bockstaller *et al* 2009).

3.1. Démarches participatives

La création d'un indicateur nécessite un consensus entre les concepteurs et les utilisateurs (Girardin *et al* 1999). La meilleure manière d'arriver à ce consensus est d'impliquer les utilisateurs dans tout le processus, de la création à l'évaluation des indicateurs. De plus en plus, la construction des indicateurs se fait lors d'ateliers de travail réunissant des agriculteurs, des chercheurs, des représentants de l'industrie et d'autres acteurs du milieu (Dalal *et al* 1999) de manière à pouvoir prendre en considération le plus de points de vue possibles (Rey-Valette *et al* 2008). La discussion entre scientifiques et professionnels est très importante : la même situation sera vue différemment par des individus œuvrant dans différentes sphères d'intervention (Arshad et Martin 2002). Il devient alors possible d'identifier dès le départ les limites à l'adoption ou à l'utilisation de certains indicateurs et de faire les modifications nécessaires pour améliorer ces indicateurs (Dalal *et al* 1999). Par conséquent, cela augmente les chances que les résultats de la démarche soient bien acceptés et que les parties se les approprient et les utilisent (Dalal *et al* 1999, Rey-Valette *et al* 2008). La démarche participative permet une co-construction par la présence de plusieurs intervenants du milieu, et elle est également adaptative, c'est-à-dire basée sur une succession d'ajustements (Rey-Valette *et al* 2008). La valeur scientifique de l'indicateur dépend de la rigueur de la procédure et de la décision consensuelle à propos de la méthode d'élaboration de l'indicateur (Girardin *et al* 1999).

3.2. Démarches normatives : l'analyse du cycle de vie

« L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) évalue l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système en relation à une fonction particulière et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie. Le cycle de vie d'un produit correspond à son parcours « du berceau à la tombe », c'est-à-dire de l'acquisition des matières premières, à sa production, son utilisation et sa fin de vie (mise en déchet, recyclage) » (Jolliet et al 2010).

Selon les normes ISO 14 040 (2006a) et ISO 14 044 (2006b), l'ACV est divisée en quatre grandes étapes :

- 1) La définition de l'objectif et du champ de l'étude
- 2) L'analyse de l'inventaire du cycle de vie
- 3) L'évaluation de l'impact du cycle de vie
- 4) L'interprétation du cycle de vie

3.2.1. Définition de l'objectif et du champ de l'étude

Cette étape est cruciale car elle fixe les limites de l'étude (Hauschild 2005). Ainsi sont définis les objectifs de l'étude, le système qui sera étudié, la fonction étudiée, l'unité fonctionnelle et les impacts qui seront pris en compte. Selon le commanditaire de l'étude, les objectifs de l'étude peuvent être très diversifiés. De cet objectif découle la définition du champ de l'étude. Celui-ci définit l'ensemble des processus économiques pris en compte, c'est-à-dire les limites du système à la fois par rapport à son environnement et par rapport aux autres systèmes de produits. A l'issue de cette étape, on réalise un arbre de processus pour le produit étudié. Il représente les éléments du système sous la forme de processus unitaires, assurant chacun une activité unique ou un groupe d'opérations, et décrit les flux de matière entre les éléments du système.

L'objectif de l'étude conditionne aussi le choix de la fonction étudiée et de l'unité fonctionnelle (UF) qui la caractérise. L'unité fonctionnelle représente la fonction du système étudié et c'est à cette unité que les impacts environnementaux seront rapportés (van der Werf et al 2011).

3.2.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie

Le but de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) est de quantifier les émissions de polluants et les utilisations de ressources, pour chaque étape du cycle de vie du produit. Une fois quantifiées, ces données d'inventaire (émissions et ressources) sont agrégées tout au long du cycle de vie et ramenées à l'unité fonctionnelle. On peut noter que lors de cette agrégation, chaque donnée qui présente des caractéristiques spatiales (lieu d'émission) et temporelles (moment d'émission) sont perdues (van der Werf *et al* 2011).

3.2.3. Evaluation de l'impact environnemental du cycle de vie

Le but de l'évaluation de l'impact est de comprendre et d'évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels associés aux émissions de polluants et des utilisations de ressources répertoriés lors de l'inventaire. Des questions environnementales appelées catégories d'impact sont d'abord sélectionnées et un indicateur est défini ou choisi pour chaque catégorie d'impact ainsi qu'un modèle de caractérisation. Ce modèle permettra d'établir une relation quantitative entre les données d'inventaire et l'indicateur, au travers de facteurs de caractérisation (Tableau 8).

La caractérisation, prévoit le calcul des valeurs d'indicateurs. Pour une catégorie d'impact donnée, une méthode de caractérisation est ainsi mise au point ou choisie au travers d'un indicateur de catégorie, d'un modèle de caractérisation et de facteurs de caractérisation issus du modèle. La définition de l'indicateur de catégorie, la mise au point des modèles de caractérisation et le calcul des facteurs de caractérisation ont fait l'objet de travaux scientifiques depuis plusieurs décennies et sont encore en cours d'élaboration ou d'amélioration pour certaines catégories d'impact comme la dégradation de la biodiversité ou la qualité du sol (van der Werf *et al* 2011).

Tableau 8. Facteurs de caractérisation pour quatre catégories d'impacts et quelques émissions vers l'air, le sol et l'eau selon Guinée et al (2002) (mis à jour IPCC 2007).

Substance	Changement climatique, kg équivalent CO ₂	Eutrophisation, kg équivalent PO ₄	Acidification, kg équivalent SO ₂	Toxicité terrestre, kg équivalent DCB
Emissions air				
CH ₄	25			
CO ₂	1			
N ₂ O	298			
NH ₃		0,35	1,6	
NO ₂		0,13	0,5	
NO _x		0,13	0,5	
SO ₂			1,2	
Emissions sol				
Cd				170
Cu				14
Zn				25
Emissions eau				
NO ₃		0,1		

Par la structure même de l'ACV, mais aussi par nécessité d'un modèle simple pour prendre en compte l'ensemble des problèmes environnementaux, les modèles de caractérisation employés dans la phase de caractérisation de l'ACV sont généralement dépourvus de différenciation spatiale et temporelle et ne tiennent pas compte des processus non linéaires. C'est pourquoi, pour des catégories d'impact régionaux, telles que l'eutrophisation ou l'acidification, ces simplifications ont été jugées excessives de façon récurrente.

3.2.4. Interprétation du cycle de vie

Le but de l'interprétation du cycle de vie est de dégager des conclusions et des recommandations aux décideurs, en cohérence avec l'objectif et le champ de l'étude. C'est la phase où l'on évalue la valeur et la robustesse de tous les résultats, choix et hypothèses. Les objectifs initiaux de l'étude sont repris pour évaluer les résultats et proposer des conclusions voire des recommandations adaptées (van der Werf *et al* 2011).

Face aux enjeux d'une agriculture durable, il semble intéressant d'analyser les effets des modifications d'un système grâce à différentes méthodes d'analyse de la durabilité. Tout d'abord, nous nous intéresserons aux impacts environnementaux à l'échelle de la production d'un kilo de foie gras avec la méthode des ACV, puis nous nous intéresserons à la durabilité, sur ses trois composantes, de l'atelier de production grâce à une méthode participative.

ETUDES EXPERIMENTALES

MATERIEL ET METHODES COMMUNS

PARTIE A : Zootechnie et qualité des produits

Au cours de cette étude, 5 essais successifs ont été réalisés (Tableau 9) :

Essai 1 - Influence de la forme de présentation du sorgho sur le développement du tractus digestif et les caractéristiques de la carcasse des oies en phase de croissance.

Essai 2 - Influence de la substitution du maïs par du sorgho et de la forme de présentation des aliments sur le développement et les performances des oies avant et après gavage.

Essai 3 - Influence de la forme de présentation du sorgho sur le comportement alimentaire des animaux au moment des transitions alimentaires.

Essai 4 - Etude des modalités pratiques d'incorporation du sorgho dans la pâtée de gavage.

Essai 5 - Influence de la substitution du maïs par du sorgho pendant les phases d'élevage et de gavage sur les performances zootechniques des animaux et sur la qualité des produits.

Ces expérimentations ont fait appel à un certain nombre de techniques communes que nous détaillons dans ce chapitre.

Tableau 9. Partie A Zootechnie et qualité des produits : récapitulatif des essais et des choix expérimentaux au cours des 5 essais réalisés

Travaux	Essais	Animaux				Facteurs ou paramètres étudiés	Nom des lots ¹								Mesures et techniques	
							Elevage					Gavage				
		Elevage		Gavage			M	M	S	S	S	M	M	S		S
		♂	♀	♂	♀		G	C	G	F	E	M	S	M		S
Influence du mode de présentation des céréales et de la substitution du maïs par du sorgho dans l'alimentation des oies pendant la phase d'élevage	1	180	180	-	-	Présentation du sorgho (farine, mélange, granulé)			x	x	x					- Caractéristiques physiques des aliments - Poids vif - Ingestion - Dissection anatomique
	2	240	240	132	132	Céréale (maïs et sorgho) Présentation (mélange et granulé)	x	x	x		x	x				- Caractéristiques physiques des aliments - Poids vif - Ingestion - Dissection anatomique -Volume de jabot - Performances pendant et après gavage
	3	252	-	-	-	Présentation du sorgho (mélange, granulé)			x		x					- Poids vif - Ingestion - Comportement alimentaire (scan sampling)
Etude la substitution du maïs par du sorgho en élevage et/ou en gavage	4	-	-	264	-	Niveau d'incorporation de sorgho dans la pâtée de gavage							x	x	x	- Poids vif - Ingestion - Qualité des foies (classement commercial, poids, couleur)
	5	260	-	260	-	Céréale (maïs et sorgho) Phase de distribution (élevage et/ou gavage)	x		x			x			x	- Poids vif - Ingestion - Qualité des foies et magrets (classement commercial, poids, couleur, composition biochimique, évaluation hédonique)

¹**MG**, granulé complet contenant 50% de maïs ; **MC**, mélange contenant 50% de maïs concassé et 50% de granulé complémentaire ; **SG**, granulé complet contenant 50% de sorgho ; **SF**, farine contenant 50% de sorgho ; **SE**, mélange contenant 50% de graines entières de sorgho et 50% de granulé complémentaire ; **MM**, pâtée de gavage contenant 405 g de maïs entier et 560g de farine de maïs / kg ; **MS**, pâtée de gavage contenant 405 g de maïs entier et 560 g de farine de sorgho / kg ; **SM**, pâtée de gavage contenant 405 g de sorgho entier et 560 g de farine de maïs/kg ; **SS**, pâtée de gavage contenant 405 g de sorgho entier et 560 g de farine de sorgho / kg.

1. Analyse des aliments expérimentaux

1.1. Prélèvement et préparation des échantillons

Un échantillon d'environ 1kg de chaque aliment ou matières premières a été prélevé, au milieu du silo ou du sac puis ensaché et mis sous vide. L'échantillon a ensuite été conservé à 2°C.

1.2. Détermination de la composition chimique des aliments

Sur l'ensemble des aliments expérimentaux :

- La teneur en matière sèche a été déterminée selon la méthode par dessiccation (AFNOR NF V18-109 1982).
- La teneur en matière minérale a été déterminée par incinération (AFNOR NF V18-101 1977).
- Les matières grasses brutes ont été extraites par un solvant (éther diéthylique, éther de pétrole, hexane) selon la méthode AFNOR NF V18-117 (1997a).
- La détermination de la cellulose brute a été réalisée selon la méthode de « Weende » basée sur une hydrolyse acide suivie d'une hydrolyse basique (AFNOR NF V03-40 1993a). La teneur en amidon a été mesurée selon la méthode polarimétrique « Ewers » décrite dans la 3^{ème} directive CEE 72/199 modifiée le 27/11/1980.
- Le dosage des protéines totales a été réalisé selon la méthode de Dumas (AFNOR NF V 18-120 1997b) à l'aide d'un appareil Leco auto-analyser (model FP-428, Leco Corp., St Joseph, MI, USA). Le taux de matières azotées totales (MAT) ou protéines brutes est obtenu en multipliant la teneur en azote total par le coefficient 6,25.
- Les acides aminés ont été dosés par chromatographie en phase liquide après hydrolyse et oxydation performique pour les acides aminés soufrés (AFNOR NF V18-113 1993b).
- La détermination de l'énergie métabolisable à bilan azotée nul (EMAn ; kcal/kg d'aliment) a été calculée suivant la formule suivante de Fisher et Mac Nab (1987) :

$$\text{EMAn} = 37,11 \times \text{Protéines Brutes} + 82,08 \times \text{Matières Grasses} + 39,93 \times \text{Amidon} \\ + 31,12 \times \text{Sucres Totaux}$$

- La composition en acides gras du maïs et du sorgho (essai 5) a été déterminée par chromatographie en phase gazeuse (Agilent 6890N équipé d'un injecteur automatique modèle 7683, le Réseau GC System, Palo Alto, CA et avec une colonne capillaire en silice fondue 100 m × 0,25 mm ID de 0,20 µm d'épaisseur de film PSil88, Varian, Middelburg, Pays-Bas) après transméthylation (Morrison et Smith 1964) selon Zened *et al.* (2011).

1.3. Paramètres physiques des aliments

1.3.1. Longueur et diamètre

La longueur et le diamètre des aliments ont été mesurés grâce à un pied à coulisse digital, sur 200 échantillons / aliment expérimental.

1.3.2. Taille des particules

La taille des particules des aliments expérimentaux a été déterminée suivant deux méthodes :

- Le tamisage humide (Lebas et Lamboley 1999) pour les aliments sous forme granulée.

Après une phase de délitement de 30 g d'aliment dans 600 ml d'eau aidée par un traitement aux ultrasons de 2 fois 10 minutes, le mélange eau plus aliment a été tamisé sur un tamiseur vibrant (Retsch R3) dans les trois dimensions à 2 800 oscillations par minute, muni de 4 tamis normalisés à mailles carrées (1mm, 0,5 mm, 0,315mm, 0,10mm). Pendant les 8 premières minutes du tamisage, un flux d'eau arrivant sur le premier tamis a entraîné les particules d'un tamis à l'autre. L'eau de tamisage, les fractions solubles et les particules passant à travers le tamis le plus fin n'ont pas été récupérées et ont été évacuées. Les deux dernières minutes de tamisage ont été effectuées sans aspersion d'eau, de manière à évacuer totalement l'eau des différents tamis. Les particules arrêtées par chaque tamis ont été

récupérées par entraînement avec de l'eau au dessus d'un filtre taré. Les filtres ont ensuite été séchés 24 h à 103°C, puis pesés. Les quantités de particules retenues sur chaque tamis ont été exprimées en pourcentage de la matière sèche de la prise d'essai. La proportion de l'ensemble des particules les plus fines et solubles, a été calculée par différence entre la matière sèche de la prise d'essai et la somme des particules retenues sur les différents tamis.

- Le tamisage à sec dans le cas de farines, de graines entières ou concassées.

Après un tamisage de 5 minutes de 30 g d'aliment, à l'aide d'un tamiseur vibrant (Retsch R3) dans les trois dimensions à 2 800 oscillations par minute, il s'agissait de récupérer par gravimétrie, sur plusieurs tamis normalisés à mailles carrées (1mm, 0.05 mm, 0.315mm, 0.10mm), les différentes particules des aliments expérimentaux.

Le pourcentage de particules retenues sur un tamis a été exprimé par rapport à la quantité totale mise sur le 1^{er} tamis, avant le tamisage.

1.3.3. Comportement d'hydratation

1.3.3.1. Capacité de gonflement des aliments

La capacité de gonflement des aliments est déterminée d'après la méthode décrite par Hernandez *et al.* (1997). Une fraction de 2 g d'aliment a été pesée dans une éprouvette graduée de 25 mL, puis 25 mL d'eau déminéralisée ont été ajoutés. Le volume initial a alors été mesuré. La capacité de gonflement correspondait à l'augmentation du volume des aliments provoquée par leur hydratation après 8h à température ambiante (20°C).

1.3.3.2. Capacité de rétention hydrique

La capacité de rétention hydrique des aliments a été déterminée d'après la méthode décrite par Giger-Reverdin (2000). Une fraction de 2 g d'aliment a été pesée dans un tube de centrifugation de 20 mL, et 10 mL d'eau déminéralisée ont été ajoutés. Le mélange a alors été agité manuellement pendant une dizaine de minutes afin d'hydrater l'échantillon de façon homogène. Il a ensuite été laissé au repos pendant 8h à température ambiante, puis centrifugé à 3000 trs / min (966 x g à 20°C) pendant 10 minutes. Le surnageant a été retiré

immédiatement après la centrifugation à l'aide d'une pipette et les sédiments ont été pesés. La capacité de rétention hydrique correspondait à la différence entre le poids initial et le poids après hydratation.

2. L'élevage, le gavage et l'abattage des oies

2.1. Animaux et programme d'alimentation

Les oies mises en élevage dans les différentes expérimentations ont été des oies de type Maxipalm[®] issues du couvoir « Les oisons du Périgord ». Ces animaux ont été élevés soit dès l'âge de 1 jour sur le site de la station d'Expérimentation Appliquée et de Démonstration sur l'Oie de Coulaures (Essai 2, 3, 4, et 5) soit à partir de 42 jours dans le cas de l'essai 1.

Quelle que soit l'origine des oies, les animaux ont été préparés au gavage suivant la technique du rationnement horaire (Tableau 10) préconisés par la Station d'Expérimentation Appliquée et de Démonstration sur l'Oie (SEADO) de Coulaures (Leprette *et al* 1997) et adaptée en fonction des conditions climatiques et de la consommation des animaux. Avant chaque pesée, les animaux ont été mis à jeun pendant 18h.

Tableau 10. Conduite alimentaire des oies destinées à la production de foie gras

Semaines	Période	Conduite alimentaire « rationnement horaire »
1	Démarrage	Ad libitum
2		Ad libitum
3		Ad libitum
4		Ad libitum
5		Ad libitum
6	Croissance-finition	Ad libitum
7		Ad libitum
8		12h/jour (la nuit)
9		3h/jour
10		2h/jour
11		2h/jour
12		2h/jour
13		2h/jour
14		3h/jour

Les oies ont été gavées à l'aide d'une gavageuse hydraulique (modèle DUSSAU MG 300, Dussau distribution SAS, Pecorade, Landes, France) en utilisant un mélange composé de 42% de céréales entières et de 58% de farine de céréale. Le gavage s'effectuait pendant 15 jours suivant le plan d'alimentation (Figure 9) décrit par Dubois *et al.* (2010).

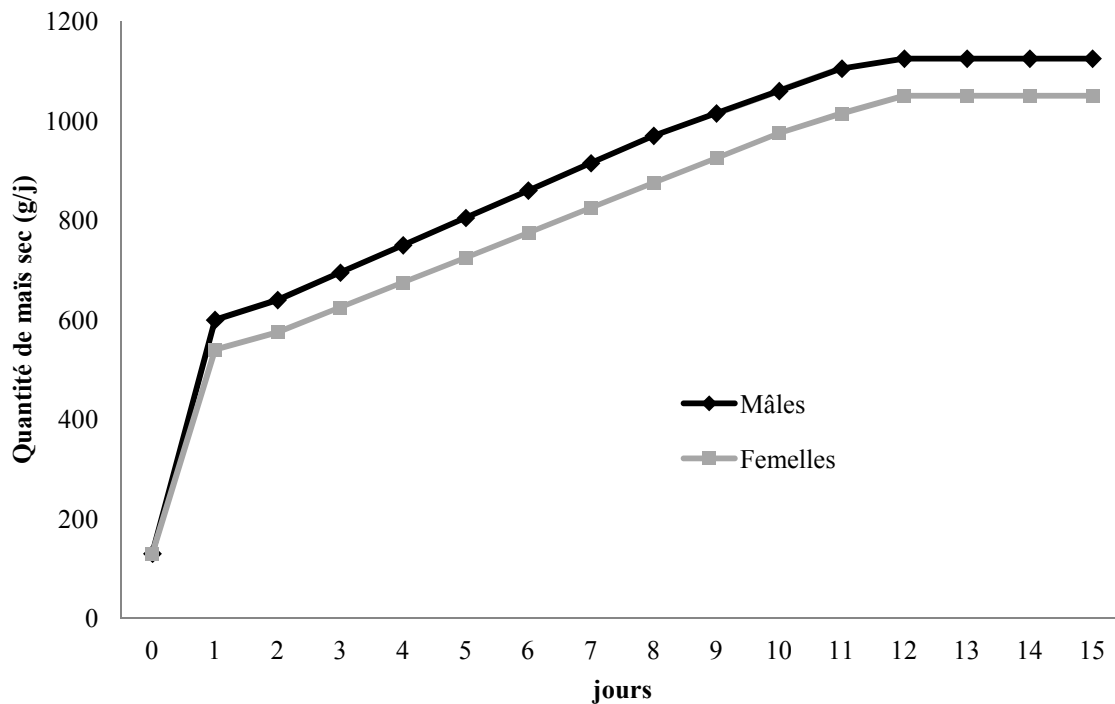


Figure 9. Apport quotidien théorique de maïs sec en grammes pendant la période de gavage (d'après Dubois *et al* 2010).

A la fin de chaque série de gavage les derniers repas ont été décalés pour respecter un délai de jeûne de 10h entre le dernier gavage et l'abattage des animaux.

2.2. Gestion et condition d'élevage

Excepté pour l'essai 4 où les animaux ont été élevés en parcs collectifs de 150 m² (0,25 m² / oie) avec un accès à un parcours enherbé de 1 ha (17 m² / oie), tous les animaux ont été élevés en parcs collectifs de 19m² (max 0,45 m² / oies) équipés de 2 abreuvoirs, de 3 mangeoires et d'un accès extérieur non enherbé de 91,5m² (max 2,3 m² / oie).

La température ambiante a été maintenue à 28 °C pendant la première semaine après l'éclosion et a ensuite été progressivement réduite pour atteindre 22 °C à 7 semaines d'âge, âge à partir duquel aucune chaleur n'a été fournie. Après cette période les animaux ont eu accès à un parcours extérieur entre 7h00 et 18h00. Cependant, dès la mise en place du rationnement horaire, les animaux ont été enfermés dans les bâtiments durant le temps d'accès à l'aliment (Tableau 10).

Dans tous les essais, pendant le gavage, les oies ont été logées en parc collectif (3 m²) sur caillebotis, à raison de 10 à 12 oies / parc. La salle de gavage était équipée d'un système de ventilation dynamique (extracteurs et brasseurs) couplé à un refroidissement par « cooling » afin de maintenir la température inférieure à 20°C et le taux d'humidité inférieur à 90%.

2.3. Abattage et éviscération des oies

Les oies destinées à la dissection anatomique ont été abattues sur place, à la SEADO, après avoir été pesées individuellement. Il s'agit d'oies non gavées. Sur la chaîne d'abattage (chaîne compacte ACMA), les oies ont été étourdies par un appareil d'électronarcose à bain d'eau et saignées par section des carotides et des jugulaires à la base de la tête. Après un égouttage d'environ 3 minutes, les oies ont été pesées afin de déterminer la quantité de sang écoulée par différence entre le poids vif et le poids des animaux saignés. Les animaux ont ensuite été échaudés dans de l'eau à 62°C puis plumés à l'aide d'une plumeuse manuelle horizontale. La plumaison des animaux a été achevée par finition manuelle. Le poids après saignée et plumaison des oies a été enregistré. Les oies ont été placées en chambre froide (4°C) pendant 24 h avant l'éviscération.

A la suite du gavage, les oies gavées ont été abattues à l'abattoir de volailles « Les ateliers De Lavergne (Prats-de-Carlux, Dordogne, France) » selon la même méthode que celle décrite précédemment. Dans ce cas, les oies ont été éviscérées à chaud (environ 20 minutes *post-mortem*). Tous les animaux ont été abattus selon la réglementation européenne (EU Council Directive 2009).

2.4. Dissection anatomique

La dissection anatomique a été réalisée selon la méthode de la WPSA (World's Poultry Science Association n.d.). Après 24 h passées en chambre froide, la carcasse de l'animal a été pesée, la tête et le cou ont été coupés au niveau de l'entrée de la cage thoracique et les pattes ont été coupées à l'articulation tibiotarse-tarsométatarse. Le dépôt graisseux intra-abdominal et tous les viscères ont été enlevés afin d'obtenir la carcasse éviscérée. La graisse abdominale pariétale, pesée à part, est la graisse de dépôt située contre la paroi interne de l'abdomen et autour du gésier. Les abats «consommables» (le cœur, le gésier nettoyé et le foie sans vésicule biliaire) ont été pesés séparément.

La carcasse éviscérée a ensuite été découpée en 4 parties principales :

- ensemble des membres postérieurs (cuisses et pilons) disséqués au ras de la ceinture pelvienne
- ensemble des ailes, séparées du tronc au niveau de la ceinture scapulaire
- ensemble des muscles pectoraux à la cage thoracique :
pectoralis superficialis, *pectoralis profundus*, *supracoracoid* et partie externe des *coracobrachialis ventralis*.
- reste de la carcasse, représentant la carcasse éviscérée moins les membres, les muscles pectoraux, le croupion et la peau.

Chaque ensemble autre que les muscles pectoraux a été disséqué en ses éléments principaux : peau (plus gras sous-cutané) et viande. Dans notre cas, la viande est composée des muscles et de la graisse inter- et intra-musculaire.

3. Mesure du comportement alimentaire : méthode du scan sampling

Les mesures du comportement alimentaire n'ont été réalisées que dans l'essai 3. Dans la pratique on distingue généralement deux types d'observations pour mesurer le comportement alimentaire des animaux :

- le *focal sampling* qui correspond à un chronométrage direct des activités d'un animal,
- et le *scan sampling* qui consiste à compter à intervalles régulier le nombre d'animaux effectuant une activité (Martin et Bateson 1986, Picard et Faure 1997).

Le *scan sampling* s'applique plus facilement à des conditions d'alimentation en groupe. La difficulté principale de ce type de mesure réside dans la définition rigoureuse de l'attitude

observée – «à la mangeoire» ou «en train de manger» –, ce qui peut varier d'un observateur à l'autre (Picard *et al* 1997).

Le comportement des animaux a été enregistré directement par scan sampling, adapté selon la méthode décrite par Jordan *et al* (2010) avec l'observateur posté debout à une distance d'environ 2 m, devant le parc. L'observateur était caché des animaux grâce à l'installation d'une bâche. De plus, ce dernier rentrait dans le bâtiment expérimental 10 min avant les mesures afin de ne pas perturber les oies.

Le *scan sampling* a été réalisé par un observateur tous les jours pendant la période où le régime expérimental a été distribué *ad libitum* et tous les deux jours pendant les périodes où les oies avaient un accès restreint à l'alimentation. Le comportement des oies a été enregistré à intervalle de 3 h lors de l'accès en plein air entre 7h00 et 18h00 et chaque heure pendant la période où les oies avaient un accès restreint à l'alimentation. Le nombre d'oies exécutant les comportements suivants a été enregistré : à la mangeoire, couché, à l'abreuvoir, debout (debout sans effectuer tout autre comportement) à l'intérieur du bâtiment et par différence, le nombre d'oies à l'extérieur du bâtiment, dans le cas où les animaux ont reçu l'aliment *ad libitum* et avaient accès à l'extérieur.

4. Mesure du volume du jabot

Les mesures du volume du jabot et de sa capacité d'extension ont été effectuées par introduction dans l'œsophage de l'animal d'un ballonnet. Ce ballonnet a été gonflé à pression constante (70 mm de mercure) et le volume d'air introduit a été mesuré par déplacement d'une colonne d'eau. Cette mesure a été réalisée sur des animaux à jeun et ayant subi au préalable une diète anhydre de 2 heures (Leprettre *et al* 2002).

5. Mesure de l'état d'emplument, de salissement et de l'état des pattes.

Les mesures de l'état d'emplument, du salissement et de l'état des pattes ont été adaptées de la grille de notation utilisée chez les canards mulards (Grille ITAVI).



Note 1



Note 2



Note 3

Grille de notation de l'état des pattes

Figure 10. *Grilles de notation de l'état des animaux*



Note 1



Note 2



Note 3

Grille de notation du salissement

Il s'agit d'une grille de notation allant de 1 (pas d'altération de la voute plantaire, ni présence de pododermatites) à 3 (présence de pododermatites, de lésion sanguinolentes) pour l'appréciation de l'état des pattes (Figure 9) ; de 1 (plumage propre) à 3 (plumage sali) pour l'appréciation de l'état de salissement des animaux et de 1 (plumage sans défaut) à 4 (absence de plume, et lésion du bréchet) pour l'appréciation de l'état d'emplument de l'animal. Ces notations ont été réalisées sur toutes les oies, à la fin de la période d'élevage (essais 2 et 5).

6. Analyse des foies gras et des magrets

Au cours des essais 2, 4 et 5, après l'éviscération de la carcasse des animaux gavés, le foie ainsi que les magrets (peau et *pectoralis major*) droit et gauche ont été prélevés, pesés, transformés et ont fait l'objet de différentes mesures.

6.1. Classement commercial des foies

Avant la phase de transformation, un classement commercial des foies gras crus refroidis a été réalisé par un spécialiste de l'industrie (Coopérative Sarlat Périgord, Sarlat-la-Caneda, Dordogne, France) formé à classer les foies en fonction de leur utilisation commerciale potentielle. La grille commerciale utilisée se décomposait en 5 classes : Extra, Première, Tout venant (Gros, Défaut, Sec), Volailles et Déclassées mais pour des raisons de simplification, nous avons reclassés les foies sur une échelle à 3 niveaux:

- Classe 1 : meilleure classe commerciale qui contient les foies sans défaut, à la texture appropriée, normalement utilisés pour fabriquer du foie gras entier en conserve correspondant sur la grille commerciale aux foies classés Extra et Première.
- Classe 2 : foies sans défaut, mais trop lourds pour faire des foies gras entiers en conserve correspondant sur la grille commerciale aux foies classés Tout venant (Gros).
- Classe 3 : nombreux défauts d'aspect ou de texture conduisant à une valeur commerciale inférieure correspondant sur la grille commerciale aux foies classés Tout venant (Sec, Défaut), Volailles et Déclassées.

6.2. Déveinage et stérilisation des foies

Les vaisseaux sanguins principaux ont été soigneusement retirés en salle climatisée à 10°C et une tranche de 180 ± 5 g a été excisée perpendiculairement à l'axe long du foie et à

travers les grand et petit lobes. Cet échantillon a été placé dans un récipient en verre de 200 mL. Du sel (12 g / kg) et du poivre (3 g / kg) ont été ajoutés, et chaque verrine a été operculée et placée dans un autoclave à eau ('Brouillon Process', Sainte Bazeille, France).

Le programme de cuisson a été réalisé de sorte à obtenir une valeur pasteurisatrice de 170. Il consiste en une montée en température en 15 minutes pour passer de la température initiale de l'autoclave de 70°C jusqu'à la valeur de 85°C maintenue pendant 47 minutes sous une pression de 0,8 bar. Après 30 min de refroidissement grâce à un courant d'eau froide, les verrines ont été retirées de l'autoclave et conservées à +4°C, pendant au moins deux mois jusqu'à l'ouverture pour calcul du rendement technologique (voir 6.4).

6.3. Salage et séchage des magrets

Après avoir été pesé, le magret gauche a été salé pendant 12 h, rincé puis séché pendant 3 semaines.

6.4. Rendement technologique des foies gras et des magrets

La mesure de rendement technologique a été réalisée dans une pièce climatisée à 10°C. Dans le cas des foies gras, les verrines ont été ouvertes et la graisse exsudée en périphérie du produit cuit a été délicatement retirée.

Le rendement technologique a alors été déterminé selon l'expression suivante :

$$\text{Rendement technologique} = (\text{Poids de foie cuit pesé sans la graisse exsudée périphérique} / \text{Poids de foie avant la cuisson}) * 100$$

Les magrets ont été pesés après les 3 semaines de séchage. Le rendement technologique a alors été déterminé selon l'expression suivante :

$$\text{Rendement technologique} = (\text{Poids de magret après séchage} / \text{Poids de magret avant séchage cuisson}) * 100$$

6.5. Mesure de la couleur des foies et des magrets

Les mesures de couleur ont été réalisées à l'aide d'un chromamètre Minolta CR 300 (Minolta, Osaka, Japan), en utilisant le système $L^*a^*b^*$ (Norme CIE, 1976) avec un illuminant D65 calibré sur la plaque blanche CR-A43. Dans ce système, la valeur L^* est la variable clarté ou luminance et les valeurs a^* et b^* sont les coordonnées de chromaticité ($a^* < 0$ couleur verte, $a^* > 0$ couleur rouge, $b^* < 0$ couleur bleue, $b^* > 0$ couleur jaune).

Sur les foies crus, les mesures de couleur ont été effectuées avant parage sur la face ventrale du grand lobe au niveau de la ligne du tiers inférieur (partie distale du grand lobe). Sur les foies cuits dégraissés, la couleur a été mesurée dans la masse du foie après tranchage.

Sur les magrets crus, la mesure de la couleur a été réalisée, avant parage, sur le *pectoralis major*.

6.6. Analyses chimiques des foies et des magrets

6.6.1. Prélèvement pour analyse biochimique

L'échantillonnage de foie gras et du magret a été réalisé comme décrit par Fernandez *et al.* (2011). Un échantillon de 50 ± 10 g de foie a été prélevé sur la partie centrale du lobe large et un échantillon de 8 ± 3 g du *pectoralis major* a été prélevé également sur la partie centrale de ce dernier.

Ces échantillons ont été immédiatement congelés dans de l'azote liquide et conservés à -20°C jusqu'à l'analyse chimique.

Les échantillons ont ensuite été broyés sous azote liquide avec un broyeur à bille Dangoumeau (Dangoumeau Prolabo, Nogent-sur-Marne, France) puis conservés à -20°C jusqu'à la réalisation des analyses biochimiques.

6.6.2. Détermination de la matière sèche et des matières minérales

La détermination de la matière sèche (MS) a été réalisée par séchage à l'étuve à 103°C pendant 24 heures après adjonction de sable, pour le foie seulement, afin d'augmenter les surfaces d'échange (JOCE 1971a). La coupelle est ensuite placée dans un dessicateur à température ambiante afin de refroidir l'échantillon avant la pesée.

Le taux de matière sèche a alors été déterminé selon la formule suivante :

$$MS = ((\text{Poids sec} - \text{Tare de la coupelle}) / \text{Prise d'essai}) * 100 \text{ (exprimée en pourcentage du poids de foie ou de } pectoralis \text{ major)}$$

La détermination des matières minérales ou cendres brutes a été réalisée par incinération des échantillons dans un four à moufle à 550°C pendant 6 heures (JOCE 1971b).

Le taux de matière minérale a alors été déterminé selon la formule suivante :

$$MM = ((\text{Poids sec} - \text{Tare de la coupelle}) / \text{Prise d'essai}) * 100 \text{ (exprimée en pourcentage du poids de foie ou de } pectoralis \text{ major)}$$

6.6.3. Dosage du taux de Matières Azotées Totales (MAT)

Le taux de MAT a été déterminé par la méthode de Dumas (AFNOR NF V 18-120 1997b) à l'aide d'un appareil Leco auto-analyser (model FP-428, Leco Corp., St Joseph, MI, USA). La technique impliquait une combustion totale à 850°C en présence d'oxygène de la matrice du foie gras contenu dans une feuille d'étain. Les gaz et sous-produits de la combustion ont été condensés à 6°C et homogénéisés. Une partie aliquote a été prélevée et entraînée par un courant d'hélium à travers différents supports assurant une réduction du NO en N₂ et la captation du CO₂ et d'H₂O. L'azote a alors été détecté et quantifié à l'aide d'un détecteur calorimétrique. L'EDTA (acide éthylène diamine tétracétique) a été utilisé pour la calibration.

La teneur en MAT a été estimée par le calcul suivant : MAT= N x 6,25. Elle a été exprimée en pourcentage du poids de foie ou de *pectoralis major*.

6.6.4. Dosage des lipides

Les lipides totaux ont été extraits à froid dans un mélange chloroforme / méthanol (2 :1, V/V) selon la méthode décrite par Folch *et al.* (1957), à raison de 1 g de foie gras ou de *pectoralis major* broyé dans 50 ml de volume d'extraction.

Les échantillons broyés ont été homogénéisés dans le mélange de solvant à l'aide d'un homogénéiseur de type « polytron ». Le mélange obtenu a été maintenu au frais (4°C) une nuit entière afin que l'extraction soit complète puis a été filtré sur un papier filtre, de type Durieux exempt de matières grasses. La séparation de phases a été assurée par l'ajout d'un volume de solution saline (Chlorure de sodium) pour former une solution biphasique. La phase chloroformique inférieure, contenant des lipides extraits, a été soutirée et filtrée sur papier filtre Whatman 1PS, puis une petite quantité de sulfate de sodium anhydre a été ajoutée pour capter les quelques molécules d'eau pouvant subsister dans cette phase. La quantification des lipides totaux a été réalisée par gravimétrie grâce à l'évaporation de la phase chloroformique d'une fraction aliquote.

Le taux a été déterminé selon la formule suivante :

$$\text{Lipides totaux} = ((2 / 3 * V_{\text{cm}}) * P) / (P_e * v)) * 100, \text{ exprimés en pourcentage du poids de foie ou de } pectoralis major$$

Avec : V_{cm} = volume de chloroforme-méthanol employé pour l'extraction

P = Masse de lipides contenus dans le tube (poids du tube-tare)

P_e = Prise d'essai en grammes

v = volume d'évaporation

6.6.5. Composition en acides gras

La séparation des acides gras totaux de la fraction lipidique a été réalisée par chromatographie en phase gazeuse. La composition en acides gras a été déterminée après transméthylation (Morrison et Smith 1964).

Les esters méthyliques d'acides gras ont été analysés en utilisant un chromatographe en phase gazeuse. Le chromatographe en phase gazeuse utilisé était de type Hewlett Packard 5890B muni d'un détecteur à ionisation de flamme, couplé à un intégrateur Hewlett Packard 3396. Ce chromatographe était équipé d'une colonne capillaire HP-INNOWAX d'une longueur de 30 m et de 0,25 μm de diamètre intérieur. La séparation était effectuée avec une

température constante du four à 200°C en utilisant l'azote comme gaz vecteur (16 psi en tête de colonne). Les températures de l'injecteur et du détecteur étaient de 250°C. Les esters méthyliques des acides gras étaient détectés et quantifiés par comparaison des temps de rétention et de surface des pics de chaque composé détecté avec ceux d'un mélange étalon. Pour chacun des échantillons, le taux des acides gras a été exprimé en pourcentage de l'ensemble des acides gras détectés. Les acides gras représentant moins de 0,1% sont considérés comme étant non identifiés.

6.7. Analyse hédonique

Nous avons réalisé un test dit « test consommateur » qui a pour objectif de connaître l'appréciation des produits de consommateurs non entraînés. A l'opposé, une analyse sensorielle est réalisée avec un jury formé et entraîné.

Dans notre cas, nous avons fait évaluer du foie gras entier en verrine et du magret séché, non fumé, d'oie. Pour cette étude, nous avons comparé quatre types de produits issus de l'essai 5. Pour chaque produit, le test s'est déroulé en laboratoire (Institut du goût du Périgord à Périgueux) selon une procédure en monadique séquentiel : chaque participant a testé un produit, l'a noté, puis a testé le produit suivant, sans chercher à réaliser de comparaison consciente directe entre les deux produits. Les tests ont été réalisés sur 18 personnes au cours de 3 séances d'une heure. Chaque personne a testé une fois chacune des modalités proposées : 36 produits (foies gras ou magrets) ont été testés soit 9 par modalité. Dans chacun d'entre-eux 6 tranches ont été réalisées.

Quel que soit le produit, le questionnaire a porté sur cinq points : l'appréciation de l'aspect global sur une échelle d'intensité ; l'appréciation de la couleur ; l'appréciation de l'odeur typique du foie gras ; l'appréciation du goût notés de 1 à 9 (1 = je n'aime pas du tout ; 9 = j'aime beaucoup). L'intention de reconsommation était notée de façon binaire : oui (1) / non (2).

7. Analyses statistiques des données

L'analyse des données a été réalisée à l'aide de deux logiciels d'analyse statistiques : MINITAB 2000 et PASW Statistics 18 (version 18.0.2, SPSS Inc., Chicago, IL).

7.1. Analyses de variance et tests de comparaison des moyennes

L'analyse de variance à plusieurs critères de classification permet d'identifier les critères qui expliquent, séparément ou conjointement, une fraction significative de la variabilité des données quantitatives (Winer *et al* 1991). Dans notre étude, nous avons réalisé différentes analyses de variance sur les données quantitatives (indice de consommation, poids vifs, gain moyen quotidien, consommation, poids de foie gras, de magrets, ensemble des données issues des dissections anatomiques et des analyses biochimiques) suivant les plans expérimentaux réalisés.

Lorsque les différences étaient significatives, les moyennes ont été comparées en utilisant le test de Duncan (essai 2, 3, 4 et 5) ou de Bonferroni (essai 1) dans le cas d'analyse à plus de deux critères. Sinon la comparaison des moyennes a été réalisée par la méthode de la plus petite différence significative (ppds) à l'aide d'un test t de Student.

7.2. Tests de comparaison de fréquence d'apparition

Les données de natures qualitatives (mortalité, fréquence des comportements des animaux) ont été analysées par un test du Khi deux.

7.3. Présentation des résultats statistiques

Les résultats statistiques sont présentés selon les notations suivantes : NS : non significatif pour $P > 0,05$; * : $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; $P < 0,001$.

PARTIE B : Evaluation de la durabilité des systèmes

A partir des résultats obtenus dans les 5 essais concernant l'effet du type de « céréale » et de la « présentation des aliments », ainsi que l'établissement d'une filière « type » à partir de la collecte de données issues de la profession, nous avons réalisé une évaluation de la durabilité à 2 niveaux d'approche (Tableau 11) :

Approche produit - évaluation environnementale

Approche atelier - évaluation de la durabilité dans les trois piliers

Ces méthodes ont fait appel à un certain nombre de paramètres communs que nous détaillons dans ce chapitre.

Tableau 11. *Partie B : Analyse de la durabilité des systèmes*

Travaux	Parties	Facteurs ou paramètres étudiés	Données	Mesures et techniques
Impacts environnementaux à l'échelle du produit	6	Céréale (sorgho/maïs) dans l'aliment Présentation (granulé ou mélange) de l'aliment	Expérimentales + « Terrain »	Méthode de l'analyse des cycles de vie
Impacts environnementaux, économiques et sociaux à l'échelle de l'atelier	7	Céréale (sorgho/maïs) dans l'aliment Présentation (granulé ou mélange) de l'aliment	Expérimentales	Méthode S+Durable ?

1. Evaluation des impacts environnementaux de la production de foie gras

Au début des années 90, est apparue la nécessité de mettre en œuvre des approches multicritères prenant en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie des produits, de leur fabrication à leur élimination finale en passant par leur phase d'utilisation. Ces analyses sont appelées les écobilans.

A leurs débuts, ces approches ont pu être qualifiées d'expérimentales voire partiales (écobilans menés à des fins exclusives de marketing ou de lobby). Par la suite, le développement de la normalisation internationale (famille des normes ISO 14040) a fixé des bases méthodologiques et déontologiques et retenu le terme « Analyse de cycle de vie » (ACV) en lieu et place d'« écobilan » (nom d'une société commerciale). Depuis 1997, les pratiques se sont donc progressivement harmonisées et les résultats sont ainsi devenus plus robustes et plus fiables.

1.1. Objectifs et champs de l'étude

L'ACV permet de quantifier les impacts d'un « produit » (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service voire d'un procédé) depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie en passant par les phases de distribution et d'utilisation, soit « du berceau à la tombe ». Dans notre cas, nous avons préalablement défini une « filière type » d'obtention du foie gras d'oie à partir de données issues des élevages de production (Chambre d'agriculture de la Dordogne). Puis, des ACV ont été réalisées sur différents scénarios de substitution partielle ou totale de maïs par le sorgho en introduisant des données expérimentales des essais 2 et 5. Ces analyses concernent la production de 1 kg de foie gras, de la production des œufs jusqu'à l'éviscération des volailles à l'abattoir, y compris la production des aliments et le transport des intrants. Le diagramme de flux des étapes de production du foie gras est représenté sur la Figure 11.

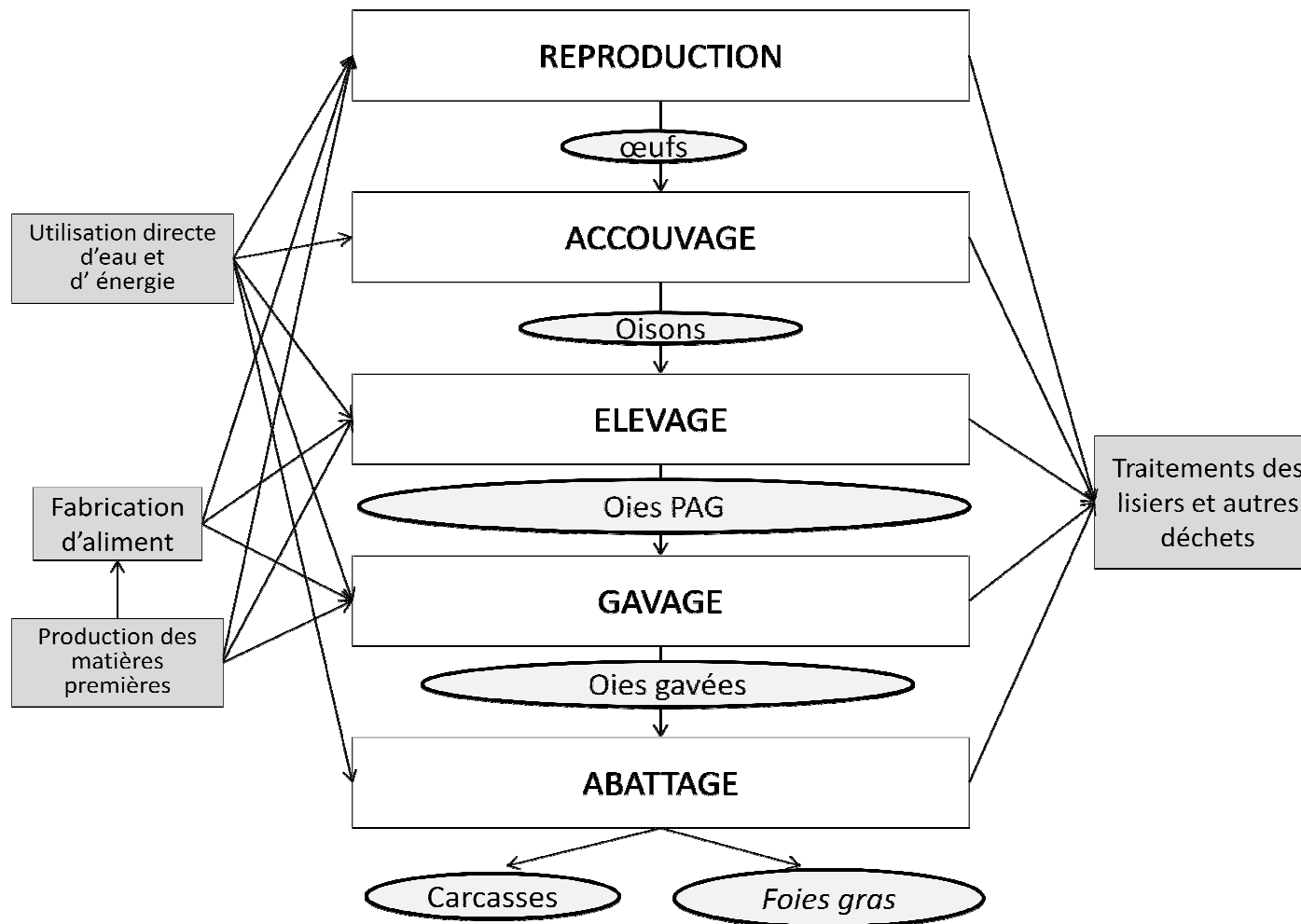


Figure 11. Diagramme de flux des étapes de production du foie gras

1.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie

L'inventaire des aliments destinés aux oies est composé de la production, du transport des ingrédients et du processus industriel de fabrication nécessaire à la réalisation des aliments. Ce processus inclut la livraison des ingrédients à l'usine de fabrication des aliments qui a été supposée se situer en Dordogne dans le sud-ouest de la France. Les impacts environnementaux sont exprimés pour 1kg d'aliment livré à l'éleveur. Tel que décrit dans Mosnier *et al* (2011), les données secondaires en ce qui concerne l'utilisation des ressources et des émissions associées à la production et à la livraison de plusieurs intrants pour la production agricole (engrais, pesticides, carburant pour le tracteur et machines agricoles) provenaient de la base de données ecoinvent, version 2.0 (Nemecek et Kägi 2007). La production de semences pour les semis a été prise en compte en supposant que les quantités d'intrants nécessaires à la production de semences étaient similaires à celles requises pour la culture correspondante. Nous avons considéré que les produits végétaux et ingrédients alimentaires produits en France ont été transportés par la route jusqu'en Dordogne, alors que les produits importés en France ont été transportés par bateau (par exemple le soja) jusqu'au port le plus proche (Bordeaux) puis par route jusqu'en Dordogne.

Pour toutes les cultures, les intrants utilisés et les rendements étaient basés sur les statistiques nationales du gouvernement français (Agreste 2010) sauf pour le maïs et le sorgho pour lesquels les intrants utilisés et les rendements étaient basés sur les moyennes nationales françaises (moyennes de 2006 à 2009) provenant des principales régions de production de la culture considérée. Nous avons distingué le maïs d'Aquitaine (sud-ouest de la France), qui a été irrigué et principalement fertilisé avec des engrais minéraux et le sorgho de Midi-Pyrénées (sud-ouest de la France) qui n'a pas été irrigué et qui a été fertilisé principalement avec des engrais minéraux.

Pour les processus de transformation des produits végétaux en ingrédients alimentaires, les données étaient basées sur Nemecek et Kägi (2007) pour le séchage du maïs et sur Jungbluth *et al.* (2007) pour la production de farine de soja, la farine de colza et l'huile. Les données ont également été recueillies pour le sel (Althaus *et al* 2007), le phosphate monocalcique (LCA Food database 2007) et le carbonate de calcium (Nemecek et Kägi 2007). Le premix a été supposé être principalement basé sur le carbonate de calcium tel que proposé par Mosnier *et al* (2011).

De nombreux ingrédients sont des co-produits (par exemple le tourteau de soja) résultant de processus produisant plus d'un produit. Pour ces ingrédients, l'utilisation des ressources et des émissions a été attribuée en fonction de la valeur économique des co-produits qui a été calculée en utilisant les taux d'extraction (le pourcentage de produits transformés obtenus à partir du produit « parent ») et les valeurs économiques. Les taux d'extraction ont été pris à partir des données de la Food and Agriculture Organization (FAO 2002) et les valeurs économiques retenues étaient les valeurs moyennes de 2004 à 2007 de l'ISTA (2009), tel que décrit par Mosnier *et al* (2011).

1.3. Evaluation de l'impact du cycle de vie

Les catégories d'impact suivantes ont été examinées : le changement climatique (qui correspond à des émissions de gaz à effet de serre, g de CO₂-équ.), l'eutrophisation (g PO₄-équ.), l'acidification (g SO₂-équ.), l'écotoxicité terrestre (g 1,4-DCB-équ.), la demande d'énergie cumulée (MJ), l'utilisation de l'eau (L) et de l'occupation des terres (m² par an). Le calcul de chaque catégorie d'impact a été obtenu en multipliant les ressources agrégées utilisées et les émissions agrégées de chaque substance avec un facteur de caractérisation (voir chapitre IV 1.4.1.3) pour chaque catégorie d'impact à laquelle elle peut potentiellement contribuer.

Le changement climatique, l'acidification, l'eutrophisation, l'écotoxicité terrestre, l'utilisation de l'eau et de l'occupation des terres ont été calculées à l'aide «de la base» CML2 et du logiciel de calcul SimaPro version 7.2 (PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands). Pour le changement climatique, nous avons actualisé les valeurs des facteurs de caractérisation (Forster *et al* 2007) pour le méthane biogénique (nouvelle valeur de 25 kg de CO₂-équ.) et pour l'oxyde nitreux (nouvelle valeur 298 kg de CO₂-équ.). Une description de la CML 2001 et des méthodes de DEC peuvent être trouvés dans Frischknecht *et al.* (2007). L'unité fonctionnelle a été fixée à 1kg de foie gras.

Les émissions dans l'air ont été estimées pour le NH₃, le N₂O et le NO_x (Mosnier *et al* 2011). Les facteurs d'émission pour la volatilisation du NH₃ après l'application des engrais minéraux ont été basés sur Nemecek et Kägi (2007). Les facteurs d'émission pour le N₂O ont été basés sur Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC 2006), et les émissions de NO_x ont été estimées selon la méthode proposée par Nemecek et Kägi (2007). Les pertes de NO₃ dans les eaux souterraines ont été basées sur Basset-Mens *et al.* (2007), compte tenu de la nature de la culture précédente et de la durée de la période sans

présence d'une culture. Les émissions de phosphates dans l'eau ont été estimées selon la méthode proposée par Nemecek et Kăgi (2007) compte tenu du lessivage dans les eaux souterraines et du ruissellement à la surface de l'eau pour le phosphate soluble, ainsi que l'érosion de particules de sol contenant du phosphore. Les émissions de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn dans le sol ont été calculées selon une méthode du bilan massique qui prend en compte les « entrées » des engrais synthétiques et organiques et leur « sortie » par l'intermédiaire des produits récoltés. La teneur en métaux lourds des engrais a été basée sur Nemecek et Kăgi (2007).

Le système d'élevage que nous avons défini (basé sur les pratiques traditionnelles) est situé dans une zone rurale de la Dordogne (sud-ouest de la France). La superficie agricole moyenne de l'atelier est de 1 ha, et les bâtiments d'élevage ont une surface de 250 m². Ils sont équipés avec un système de contrôle de la luminosité pour maximiser la ponte des oies. La composition de l'aliment distribué en période de reproduction est celle décrite par Sauveur *et al* (1988). Le troupeau d'oies reproductrices comprend 800 animaux qui sont élevés pendant quatre ans. Le nombre d'œufs produits est d'environ 29 700 par année.

Le couvoir est localisé à 80 km de la ferme. Le bâtiment couvre une surface de 600 m². Environ 170 550 œufs sont incubés par an, pour finalement arriver à 113 500 oisons viables.

Les deux ateliers d'élevage et de gavage sont situés dans la même ferme. Chaque cycle d'élevage dure environ 105 jours (3 cycles de production de 1 000 oiseaux par an). Les oies des deux sexes sont utilisées. Le bâtiment d'élevage couvre une surface de 250 m² et chaque troupeau a accès à 2 ha de prairie.

Chaque cycle de gavage dure environ 15 jours (12 cycles de production par an) et concerne 400 oies, seulement un quart des animaux est produit sur la ferme, les animaux restants provenant des fermes environnantes (80 km de la ferme). Le bâtiment où les oiseaux sont gavés couvre une surface de 200 m² et a été divisé en 40 parcs (3 x 1 m pour 10 oies).

L'abattoir est localisé à 80 km de la ferme. Le bâtiment couvre une surface de 320 m². Environ 80 000 oies gavées sont abattues annuellement en fonction de la réglementation européenne (CE) n ° 1099/2009;

Les émissions de fumier d'oie ont été calculées selon les données de CORPEN (2006) et Gac *et al* (2006).

Les performances d'élevage et de gavage sont extraites des essais 2 et 5.

2. Evaluation de la durabilité de l'atelier de production

La durabilité des ateliers d'élevage dont les pratiques varient sur le type de céréale (maïs / sorgho) et la forme de présentation (granulé ou mélange), a été évaluée à l'aide de la méthode S+durable ?[®] (Fortun-Lamothe 2011)

2.1. Définition des objectifs et des champs de l'étude

S+durable ?[®] permet de comparer un atelier d'élevage « de référence » avec un atelier d'élevage « innovant » dans les trois piliers de la durabilité : Environnement, social et Economie.

Les objectifs de durabilité ont été définis dans le cadre d'une démarche participative (Fortun-Lamothe *et al* 2012) suivant la méthode de Rey-Valette *et al* (2008).

Une grille d'objectifs et de critères spécifiques à ces objectifs (appelée GOLD, Tableau 12) a été construite. Les objectifs et les critères ont été co-définis par un comité d'une trentaine de personnes dont des experts, des représentants de la filière de production (producteurs, éleveurs, industrie alimentaire, abatteurs...) et des représentants des consommateurs-citoyens.

Tableau 12. Grille d'objectifs et critères de durabilités utilisés pour évaluer la durabilité des ateliers d'élevage

Piliers	Objectifs généraux	Critères	Indicateurs
Economie	Est économiquement rentable	Est économiquement viable	Indicateur 1 à 5
		Permet une efficacité de la main d'œuvre	Indicateur 1 à 5
		Met en œuvre un processus productif efficace	Indicateur 1 à 5
		Maîtrise sa valeur ajoutée	Indicateur 1 à 5
		Est économiquement rentable	Indicateur 1 à 5
	Est flexible et adaptable	Est peu spécialisé économiquement	Indicateur 1 à 5
		Est peu sensible aux aides	Indicateur 1 à 5
		Est autonome financièrement	Indicateur 1 à 5
		Est transmissible	Indicateur 1 à 5
		Est polyvalent	Indicateur 1 à 5
Environnement	Utilise de façon économe les ressources et produit des ressources renouvelables	Produit des ressources renouvelables	Indicateur 1 à 5
		Utilise de façon économe les énergies fossiles	Indicateur 1 à 5
		Utilise l'eau de façon économe	Indicateur 1 à 5
		Utilise de façon économe la biomasse	Indicateur 1 à 5
		Présente un lien écologique fort avec son environnement immédiat	Indicateur 1 à 5
	Protège les écosystèmes : ressources biologiques et environnement physique	Emet peu d'effluents et les gère de façon respectueuse de l'environnement	Indicateur 1 à 5
		Maintient de la biodiversité	Indicateur 1 à 5
		Met en œuvre des mesures d'hygiène qui protègent la santé des animaux de l'atelier	Indicateur 1 à 5
		Met en œuvre de mesures de prophylaxie qui protègent la santé de tous les animaux	Indicateur 1 à 5
		Utilise les antibiotiques de façon économe et raisonnée	Indicateur 1 à 5
Social	Préserve la qualité de vie et les conditions de travail du producteur	Permet de vivre de son travail	Indicateur 1 à 5
		Permet du repos et une bonne organisation du travail	Indicateur 1 à 5
		Limite la pénibilité du travail	Indicateur 1 à 5
		Permet une bonne implication dans le milieu social	Indicateur 1 à 5
		Permet une bonne insertion dans la vie locale	Indicateur 1 à 5
	Répond aux demandes du citoyen - consommateur	Fabrique des produits de qualité	Indicateur 1 à 5
		Met en œuvre des pratiques d'élevage respectueuses du bien être animal	Indicateur 1 à 5
		Permet un milieu de vie respectueux du bien être animal	Indicateur 1 à 5
		Maintient l'emploi et permet des circuits de commercialisation en filière courte	Indicateur 1 à 5
		Rend des services non-agricoles	Indicateur 1 à 5

2.2. Indicateurs de durabilité

Un ou plusieurs indicateurs sont choisis pour chacun des critères de durabilité. Les indicateurs retenus pour évaluer les systèmes sont choisis par les utilisateurs de la méthode.

2.3. Analyse des données

L'analyse est réalisée en comparant, pour chacun des indicateurs les performances de l'atelier innovant par rapport à celles de l'atelier de référence. L'écart entre les deux systèmes est exprimé pour chaque indicateur en unités d'écart-type. Les scores obtenus sont compris entre -1 (correspond à un écart de -2 écarts-types) et +1 (différence de +2 écarts-types), ils sont centrés sur 0. Les écarts en deçà et au-delà de 2 écarts-types sont tronqués (et ramenés à -2 et +2). Les différences tronquées font l'objet d'un signalement. L'indicateur est associé à un sens de variation (amélioration ou détérioration) qui est renseigné par l'utilisateur. L'agrégation des scores obtenus pour chaque indicateur se fait par objectifs et par piliers de durabilité. Dans notre cas, nous avons étudié, d'une part l'effet des céréales sur les modalités testés dans l'essai 5 et d'autre part l'effet de la présentation des aliments en élevage en utilisant les données issues de l'essai 2.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

PARTIE A : Zootechnie et qualité des produits

I. Chapitre 1. Etude de la forme de présentation et de la substitution du maïs par du sorgho pendant la phase d'élevage (Essais 1, 2 et 3)

1. Essai 1 - Influence de la forme de présentation du sorgho sur le développement du tractus digestif et les caractéristiques de la carcasse des oies en phase de croissance.

1.1. Objectifs :

L'essai réalisé a eu pour objet de tester l'influence de la forme de présentation du sorgho pendant la période de croissance-finition sur les performances des oies.

1.2. Déroulement de l'essai

Entre 42 et 98 jours d'âge, 360 oies (type Maxipalm[®]) ont été nourries avec un régime alimentaire contenant 500 g de sorgho / kg (EMAn 12,6 MJ / kg, 151 g / kg de protéine). Les oiseaux ont été divisés en trois groupes différant dans la forme de l'aliment distribué : Granulés complets (groupe témoin, n = 120); sorgho concassé (groupe CG, n = 120), ou un mélange contenant des granulés riches en protéines et des graines entières de sorgho (groupe M, n = 120). La consommation d'aliments par parc (40 oiseaux / parc) a été mesurée chaque semaine entre 42 et 98 jours d'âge, et le poids vif individuel a été mesuré toutes les 2 semaines. À 84 et 98 jours d'âge, 12 oiseaux ont été abattus dans chaque groupe pour mesurer le développement du gésier et les caractéristiques de la carcasse.

1.3. Principaux résultats

Quel que soit le sexe des oies, le poids vif à 98 jours était plus faible pour le groupe CG que pour le groupe témoin (5555 vs. 5888 g, $P < 0,05$ pour les mâles et 5039 vs. 5215 g, $P < 0,05$ pour les femelles). La consommation alimentaire sur toute la période expérimentale était de 5,5% plus élevée dans le groupe M ($P < 0,05$) que dans les groupes témoin et CG mais l'indice de consommation (6,91, $P < 0,05$) était similaire dans les trois groupes. Le développement du gésier (en % du poids) était plus élevé chez les oiseaux du groupe CG que celui des groupes témoin et M à 84 jours d'âge (respectivement 13,98% et 13,51%, $P < 0,05$), mais était similaire dans tous les trois groupes à 98 jours d'âge (4,01%, $P > 0,05$). Le développement du foie a été plus faible chez les oiseaux du groupe CG que ceux des deux autres groupes à 84 et 98 jours d'âge (respectivement -20%, $P < 0,001$ et -10%, $P < 0,05$). Les caractéristiques de la carcasse étaient semblables dans les trois groupes à la fois à 84 et à 98 jours d'âge.

Les résultats suggèrent qu'un régime simplifié présenté sous la forme d'un mélange de graines entières de sorgho et de granulé riche en protéines ne réduit pas les performances de croissance des oies et est donc une perspective intéressante. En revanche, l'utilisation d'un aliment sous forme de farine est à proscrire car il réduit les performances des animaux.

1.4. Publication n°1

Influence of feeding sorghum on the growth, gizzard development and carcass traits of growing geese

J. Arroyo^{1,2,3}, A. Auvergne¹, J. P. Dubois³, F. Lavigne³, M. Bijja³ and L. Fortun-Lamothe²

¹Université de Toulouse, INPT ENSAT, UMR 1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France;

²INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France;

³ASSELDOR, Station d'expérimentation appliquée et de démonstration sur l'oie, La Tour de Glane, 24420 Coulaures, France

Published on ANIMAL, 6, 1583-1589

(Received 13 September 2011; Accepted 14 January 2012)

Abstract

The aim of this trial was to study the influence of feed form on the performance, gizzard development and carcass traits of growing geese. Between 42 and 98 days of age, 360 geese (type Maxipalm[®]) were fed a diet containing 500 g sorghum/kg (nitrogen-corrected apparent metabolizable energy 12.6 MJ/kg, 151 g/kg CP). Birds were divided into three groups differing in feed form: complete pellets (Control group, n=120); a coarse-ground meal (CG group, n=120); or a mixture containing protein-rich pellets and sorghum whole grains (M group, n=120). Feed intake per pen (40 birds/pen) was measured weekly between 42 and 98 days of age, and individual live weight (LW) was measured every 2 weeks. At 84 and 98 days of age, 12 birds were slaughtered in each group to measure the gizzard development and body traits. Irrespective of the goose sex, LW at 98 days was lower for the CG group than for the Control group (5555 v. 5888 g, $P<0.05$ for males and 5039 v. 5215 g, $P<0.05$ for females). The feed intake over the entire period was 5.5% higher in the M group ($P<0.05$) than in the Control and CG groups but the feed conversion ratio (6.91, $P<0.05$) was similar in the three groups. The gizzard development (as % of LW) was higher in birds of the CG group than those of the Control and M groups at 84 days of age (+13.98% and +13.51%, respectively; $P<0.05$) but was similar in all three groups at 98 days of age (4.01%, $P>0.05$). The relative liver development was lower in the birds of the CG group than those of the other two groups at 84 and 98 days of age (-20%, $P<0.001$ and -10%, $P<0.05$, respectively). The other body traits were similar in the three groups at both 84 and 98 days of age. The present results suggest that a simplified diet presented in the form of a mixture of sorghum whole grains and protein-rich pellets did not reduce the performance of growing geese.

Keywords: goose, sorghum, diet presentation, performance

Implications

Feeding has high economic and environmental costs in poultry production. The present work shows that a diet offered in a simplified form, as a mixture of sorghum whole grains and protein-rich pellets, did not reduce the performance of growing geese compared with a complete pelleted diet. Therefore, such a feeding strategy offers interesting prospects for a more sustainable rearing method. Indeed, it could reduce the manufacturing processes and thus the economic and environmental impacts of goose feeding while improving the social acceptability of breeding systems by feeding the birds with a diet considered as more natural.

Introduction

To be more sustainable, livestock productions must improve their economic, social and environmental performance. Modifications in feeding strategies, both in the choice of raw materials and/or feed presentation appear to be relevant to this goal. Indeed, the feed represents the greatest part of the economic and environmental costs of poultry rearing (Boggia *et al.*, 2010). The use of local whole grains has been of interest to reduce the feed costs caused by transport, handling and processing (Dozier *et al.*, 2006). Additionally, it addresses consumer demand for more ‘natural’ feeding systems (Gabriel *et al.*, 2008). Several studies have demonstrated the possibility and value of using non-pelleted feeds (crushed, mashed or whole grains) in poultry feeding (Jahan *et al.*, 2006; Gabriel *et al.*, 2008; Mirghelenj and Golian, 2009). For example, the use of whole wheat has been shown to improve performance (Gabriel *et al.*, 2008) partly due to an increase in the gizzard development (Forbes and Covasa, 1995). Most of the work has been carried out on broilers, and most of the time, the grains used were wheat or maize. Data on other poultry such as geese (Auvergne *et al.*, 2006 and 2008; Lu *et al.*, 2011) and other grains such as sorghum are scarce.

Sorghum (*Sorghum bicolor*) had not been used in poultry feeding for many years because its grain contains tannins, which reduce its digestibility and thus the performance of birds (Elkin *et al.*, 1996; Nyachoti *et al.*, 1997). However, today, several sorghum varieties are

tannin-free and could be used in bird feeding (Gualtieri and Rapaccini, 1990; Selle *et al.*, 2010). This cereal has nutritional characteristics similar to those of maize (Sauvant *et al.*, 2004) but is more drought-resistant (Farré and Faci, 2006). This could reduce the environmental impacts of bird feeding by reducing the need for irrigating the crop.

Whole grains can be used in three ways: (i) ‘choice feeding’, in which the whole cereal and the protein-rich complement (pelleted or as whole grains) are given in two separate feeders (Pousga *et al.*, 2005); (ii) ‘sequential’ feeding, in which the whole cereal and the protein-rich complement are given in the same feeder but at different times of day (Bouvarel *et al.*, 2008; Umar Faruk *et al.*, 2010); and (iii) as a ‘loose mixture’, in which the whole cereal and the protein-rich complement are mixed in the same feeder (Yo *et al.*, 1997). The loose mixture is a solution easier to implement (Forbes and Covasa, 1995). It assumes that individual birds will eat the correct quantities of each component (whole grains and protein-rich pellets) to obtain a balanced diet that meets their nutritional requirements.

This trial aimed to study the effects of three methods of diet presentation (pellets, coarse-ground meal or a mixture of sorghum whole grains and protein-rich pellets) on the performance of growing geese.

Material and methods

Birds and feeding program

This trial was carried out at the Goose Breeding Station (Coulaures, Dordogne, France). At 1 day of age, 360 goslings (males and females, type Maxipalm[®]) were randomly allocated to nine pens of 40 birds and were fed a pelleted diet (nitrogen-corrected apparent metabolizable energy, AMEn 11.70 MJ/kg, 180 g/kg CP; manufactured by DFP Nutraliance, Saint-Ybard, Corrèze, France). At 42 days of age, birds were divided into three groups (three pens of 40 birds each), differing only in the form of feed given until 98 days of age. The diet contained 500 g tannin-free sorghum/kg (Argence[®] variety) and met the nutrient requirements of growing geese (National Research Council (NRC), 1994). The diet composition is shown in Table 1.

Table 1 *Ingredients and chemical composition of the experimental feed*

	Feed
<i>Ingredients (g/kg)</i>	
Sorghum	500
Wheat	209
Rapeseed meal	30
Sunflower meal	65
Soybean meal	93
Wheat middling	68
Salt	2
Calcium carbonate	10
Dicalcium phosphate	13
Sodium bicarbonate	1
Methionine	2
Lysine	2
Vitamins and minerals ¹	5
<i>Nutrients levels (% raw material except AMEn)</i>	
Dry matter	89.5
CP	15.1
Fat	2.3
Ash	4.6
Cellulose	4.1
Starch	52.6
Sugar	5.2
Methionine + cystine	0.6
Lysine	0.7
Threonine	0.5
AMEn (MJ/kg) ²	12.6

AMEn = nitrogen-corrected apparent metabolizable energy

¹ Vitamins, A: 9990 UI/kg; D3: 1998 UI/kg; E: 10.0 UI/kg; B1: 2.0 mg/kg; K3: 1.0 mg/kg; B2: 2.5 mg/kg; B5 : 5.1 mg/kg; B6: 1.0 mg/kg; PP: 24.9 mg/kg; B9: 0.3 mg/kg; choline: 300 mg/kg. Oligo elements, Cu: 9.3 mg/kg; FE: 29.0 mg/kg; I: 0.99 mg/kg; Co: 0.16 mg/kg; Mn: 70 mg/kg; Zn: 47 mg/kg; Se: 0.20 mg/kg; clay (sepiolite): 2 g/kg.

² AMEn,; Calculated from Fisher and Mc Nab (1987).

In the Control group (n=120), the birds received the diet in the form of a complete pelleted feed. In the CG group (n=120), feed was given as a complete coarse-ground meal. In the M Group (n=120), birds received a mixture containing 500 g/kg of sorghum whole grains (AMEn 14.80 MJ/kg, 85 g/kg CP) and 500 g/kg of protein-rich pellets (AMEn 10.40MJ/kg, 216 g/kg CP).

In France, geese are mainly reared for fatty liver production. Therefore, the feeding programme of growing geese was intended to prepare the birds for force-feeding (Guéméné and Guy, 2004). For this purpose, birds were fed a restricted diet from 56 to 98 days of age, to progressively adapt them to take in large amounts of food in a short period. The feeding programme we used has been previously described by Leprettre *et al.* (1997). Birds were fed *ad libitum* from 42 to 56 days of age and then had controlled access to food: 12 h a day from 56 to 63 days of age, 3 h a day from 63 to 70 days of age and 2 h a day from 77 to 98 days of age.

Housing and management conditions

Birds were housed in pens of 19m² containing 40 birds (20 males and 20 females). The pens were equipped with two drinkers, three feeders and outdoor access (91.5m²/pen). Geese had outdoor access between 0700 and 1800 h from 49 to 98 days of age. The room temperature was maintained at 28°C during the first week after hatching and was subsequently gradually reduced to 22°C at 49 days of age, after which no heat was provided.

Measurements and analytical methods

Birds were weighed individually at 42, 56, 70, 84 and 98 days of age after 18 h of fasting. Feed intake per pen was measured weekly. In the M group, the contents of the feed refusal, that is, the amounts of uneaten sorghum whole grains and protein-rich pellets, were also measured. Mortality was recorded daily. In geese, sexual maturity occurs at 12 and 14 weeks in females and males, respectively. Therefore, 12 birds per group (six of each sex) were slaughtered at 84 and 98 days of age to study gizzard development and carcass traits

according to the WPSA method (World's Poultry Science Association, n.d.). The full weights of gut (small intestine, duodenum, jejunum, ileum and caecum), gizzard, liver, carcass (eviscerated carcass with skin) and abdominal fat were measured as well as breast and thigh weights (without skin and subcutaneous fat). The geese were slaughtered at the Goose Breeding Station according to the European council regulations (EC, 2009).

The chemical composition of the experimental feed was analysed by Lara Europe Analyses (Toulouse, Haute-Garonne, France) and is reported in Table 1. Particle size (Table 2) was measured using successive sieves with decreasing mesh on dry material for the coarse-ground meal or wet material for the complete or the protein-rich pellets (Lebas and Lamboley, 1999).

Statistical analysis

Data were analysed using the GLM procedure of MINITAB (2000). Feed intake and feed conversion ratio were analysed including the experimental group in the model. Live weight (LW), average daily gain and carcass composition were analysed including group, sex and their interaction in the model. When the interaction group x sex was significant, the data were analysed within each sex. Means between treatments were compared using the Bonferroni test. Mortality was analysed using the χ^2 test. Differences were treated as significant when $P \leq 0.05$.

Results

Physical characteristics of the experimental diets

The diameter of pellets was similar in the diet offered to the birds of the Control and M groups (4.23 ± 0.14 and 4.23 ± 0.10 cm; $P > 0.05$) but they were longer in the complete pellets than in the protein-rich ones (10.03 ± 2.24 and 9.00 ± 2.24 cm, respectively; $P < 0.001$). The diameter of sorghum whole grains was 3.25 ± 0.84 cm. The proportion of large particles (>2 mm) was higher in the feed given to the birds of the M group than of the Control and the CG groups (80.6%, 30.7% and 32.1%, respectively; Table 2) due to the inclusion of 500 g/kg sorghum whole grains. Conversely, for the same reason, the proportion of small particles (<0.5 mm) was less in the feed given to the M group (10.6%). Because of the coarser

crushing, the proportion of small particles was lower in the feed offered to the CG birds (35.1%) than in that offered to the Control group (47.7%).

Table 2 Particle size (%) in the diet given to the bird in the three groups

	Group		
	Control	CG	M
>2 mm	30.7	32.1	80.6
1 mm	21.6	32.8	8.8
0.5 mm	36.9	14.4	5.2
<0.315 mm	10.8	20.7	5.4

C=Control; CG= coarse-ground meal; M= Mixture (in this group, the diet offered contained 500 g/kg protein-rich pellets and 500 g/kg sorghum whole grains).

Sorghum whole grains and feed intake

In the M group, over the entire period, intake of protein-rich pellets and sorghum whole grain in the M group was similar (9465 and 9428 g/goose, $P > 0.05$).

From 42 to 49 days of age, the feed intake was 9% higher in the Control group than that in the two other groups ($P < 0.01$; Table 3). From 70 to 77 days, this phenomenon was reversed: feed intake was higher in the M than that in the Control and CG groups (+12% and +6%, respectively; $P < 0.05$). During the last 3 weeks (77 to 98 days), the feed intake was similar in the three groups ($P > 0.05$). Over the entire period, the total feed intake was about 1000g higher when feed was given as a mixture of whole grains and protein-rich pellets than as complete pellets or as a coarse-ground meal ($P < 0.05$).

Table 3 Feed intake during the experimental period

Period (days)	Feeding access	Group			s.e.m.	Significance
		C	CG	M		Group
42-49 days (g/d)	<i>Ad libitum</i>	400 ^a	364 ^b	370 ^b	6.025	**
49-56 days (g/d)	<i>Ad libitum</i>	371	350	376	6.173	NS
56-63 days (g/d)	12h a day	296 ^b	300 ^b	360 ^a	11.808	*
63-70 days (g/d)	3h a day	291	294	326	7.421	NS
70-77 days (g/d)	2h a day	212 ^b	226 ^b	241 ^a	4.918	*
77- 84 days (g/d)	2h a day	305	308	333	5.724	NS
84-91 days (g/d)	2h a day	198	189	220	6.775	NS
91-98 days (g/d)	2h a day	204	217	192	6.059	NS
42-98 days (g)	-	17962 ^b	17843 ^b	18893 ^a	201.736	*

C= control; GG= coarse-ground meal; M= mixture containing protein-rich pellets and sorghum whole grains; s.e.m, standard error of the mean.

**, P<0.01; *, P<0.05; NS, P>0.05.

^{a,b} Within a row, means with no common superscript differed significantly (P<0.05).

Bird growth and mortality

Mortality rates during the trial were similar in the three groups (4.5%, P = 0.44). At 56 days of age, the LW of geese was lower in the CG and M groups than that in the Control group (-6.30% and -4.96%, respectively; P <0.05). From 70 days, geese were lighter in the CG group than in the other groups (P <0.01; Table 4).

Between 42 and 56 days, geese gained more weight in the Control than in the CG and M groups (+11%, P <0.001). From 70 days, growth was slow due to feed restriction. Between 70 and 84 days, birds gained weight only in the M group (+13 g/day), whereas they stabilized or lost weight in the Control and CG groups (0 and -4 g/day, P <0.05; Table 4) as a result of the change in feed intake described previously. Between 84 and 98 days, geese fed the coarse-ground meal gained significantly more weight than those fed the mixture of sorghum whole grains and protein-rich pellets (8 and 4 g/day, P <0.05; Table 4). However, this did not compensate for the growth retardation due to low feed intake at the beginning of the trial and birds of the CG group were the lightest at the end of the trial (P <0.01). However, in the M group, a higher feed intake from 63 days of age enabled the birds to fully compensate for their initial delay and they had a weight similar to that in the Control group at the end of the trial (Table 4). Throughout the experimental period, geese gained more weight in the Control and

M than in the CG groups (+3 g/day, $P < 0.05$; Table 4) but there were no significant differences in the feed conversion ratio between groups (Table 5).

Sex had a significant effect on LW at the end of the experiment because the males were 7% heavier than the females (Table 4).

The interaction between group and sex was significant for the average daily gain between 56 and 70 days and LW from 70 to 98 days of age. Irrespective of the sex, birds of the CG group were always lighter than the Control group (Table 4). In the M group, the performance differed between males and females. For males, the average daily gain between 56 and 70 days was similar between the three groups (55 g/day; $P > 0.05$). For females, birds of the M group gained more weight than those in the Control and CG groups (+19% and +15%, respectively; $P < 0.01$). Such a difference between sexes from 56 to 70 days explains the higher LWs of females in the M group than in the CG group. In contrast, LWs of the males of the M group were not significantly different from those of the CG group (Table 4).

Table 4 Changes in live weight and average daily gain during the experimental period

	Group			SEM	Significance		
	Control	CG	M		Group	Sex	Group*Sex
<i>Live weight (g)</i>							
42 days	3089	3008	3046	15.7	NS	***	NS
<i>Males</i>	3240±299	3146±274	3160±285		NS		
<i>Females</i>	2935±244	2859±218	2923±290		NS		
56 days	4797 ^a	4495 ^b	4559 ^b	29.6	***	***	NS
<i>Males</i>	5045 ^a ±565	4680 ^b ±479	4699 ^b ±654		**		
<i>Females</i>	4518 ^a ±396	4293 ^b ±375	4401 ^{ab} ±550		*		
70 days	5461 ^a	5188 ^b	5428 ^a	33.1	**	***	*
<i>Males</i>	5759 ^a ±544	5410 ^b ±5329	5405 ^b ±793		**		
<i>Females</i>	5148 ^a ±413	4947 ^b ±403	5163 ^a ±687		NS		
84 days	5447 ^a	5145 ^b	5606 ^a	36.3	***	***	*
<i>Males</i>	5761 ^a ±543	5409 ^b ±570	5554 ^{ab} ±872		*		
<i>Females</i>	5126 ^a ±442	4864 ^b ±442	5368 ^c ±764		***		
98 days	5552 ^a	5302 ^b	5672 ^a	38.8	**	***	*
<i>Males</i>	5888 ^a ±587	5555 ^b ±574	5630 ^{ab} ±891		*		
<i>Females</i>	5215 ^a ±444	5039 ^b ±482	5405 ^a ±712		**		
<i>Average daily gain (g/d)</i>							
42-56 days	106 ^a	93 ^b	94 ^b	1.2	***	**	NS
<i>Males</i>	112 ^a ±25	96 ^b ±18	96 ^b ±21		**		
<i>Females</i>	99 ^a ±16	90 ^b ±15	92 ^b ±22		*		
56-70 days	51 ^b	53 ^{ab}	56 ^a	0.9	*	NS	*
<i>Males</i>	54±16	56±11	55±23		NS		
<i>Females</i>	48 ^b ±12	50 ^b ±15	59 ^a ±17		**		
70-84 days	0 ^b	-4 ^b	13 ^a	0.9	***	NS	NS
<i>Males</i>	0 ^b ±16	-1 ^b ±15	12 ^a ±15		***		
<i>Females</i>	-1 ^b ±12	-6 ^b ±11	15 ^a ±21		***		
84-98 days	5 ^{ab}	8 ^a	4 ^b	0.6	**	NS	NS
<i>Males</i>	6±15	8±9	5±7		NS		
<i>Females</i>	5 ^{ab} ±7	8 ^a ±7	2 ^b ±15		**		
42-98 days	44 ^a	41 ^b	44 ^a	0.6	*	***	NS
<i>Males</i>	47±8	43±8	44±14		NS		
<i>Females</i>	41 ^b ±6	39 ^b ±7	44 ^a ±10		**		

LW= live weight; ADG = average daily gain; C = control; CG = coarse ground meal; M= mixture containing protein-rich pellets and sorghum whole grains; s.e.m, standard error of the mean.

***, P<0.001; **, P<0.01; *, P<0.05; NS, P>0.05.

^{a,b} Within a row, means with no common superscript differed significantly (P<0.05).

Table 5 Feed conversion ratio during the experimental period

Period (days)	Group			SEM	Significance
	Control	CG	M		Group
42-56	3.66	3.84	3.95	0.055	NS
42-70	4.37	4.52	4.80	0.076	NS
42-84	5.62	6.04	5.80	0.085	NS
42-98	6.70	7.04	7.00	0.097	NS

C = control; CG = coarse ground meal; M= mixture containing protein-rich pellets and sorghum whole grains; s.e.m, standard error of the mean.

NS, $P > 0.05$.

Body traits

At 84 days of age, the gizzard was heavier in the CG birds than in the Control and M groups (+14% and +13.5%, $P < 0.05$), whereas the liver weighed less in the CG birds than in the other groups at 84 ($P < 0.001$) and 98 days of age ($P < 0.01$; Table 6). However, the interaction between group and sex was significant for the liver weight at 84 and 98 days of age. At 84 days, the liver was lighter in the CG females than in the Control and M females (-19% and -29%, respectively, $P < 0.05$; Figure 1), whereas the liver weight was similar between groups in males (1.78% of BW; $P > 0.05$). At 98 days of age, the interaction between group and sex was significant for liver and abdominal fat weight, but analysis of data within sex showed no significant difference between groups (Figure 1).

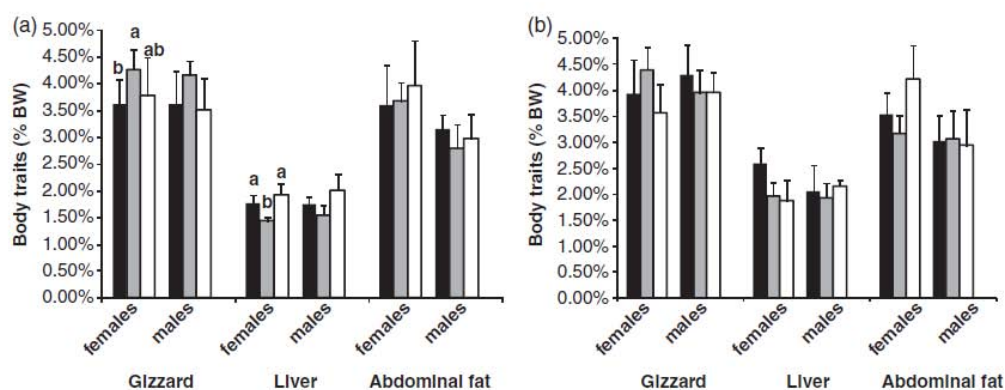


Figure 1 Gizzard, liver and abdominal fat development (% BW) at 84 (a) and 98 (b) days of age in birds of the C (control; black), CG (coarse-ground meal; grey) and M (mixture containing protein-rich pellets and sorghum whole grains; white) groups for males and females. ^{a,b} Means with no common superscript differed at $P < 0.05$ (within group and sex).

Table 6 Geese carcass composition at 84 and 98 days of age (6 birds per sex, group and stage)

	Group			Sex		SEM	Significance		
	Control	CG	M	Male	Female		Group	Sex	Group*Sex
<i>84 days of age</i>									
BW (g)	5418	5115	5549	5613	5109	96.5	NS	**	NS
Carcass (g)	3013	2858	3133	3154	2849	57.0	NS	**	NS
Carcass (% BW)	55.56	55.86	56.45	56.21	55.70	0.208	NS	NS	NS
Gut (% of BW)	5.64	5.53	5.46	5.22	5.87	0.088	NS	***	NS
Gizzard (% of BW)	3.63 ^b	4.22 ^a	3.65 ^b	3.78	3.89	0.094	*	NS	NS
Liver (% of BW)	1.77 ^a	1.49 ^b	1.98 ^a	1.78	1.72	0.045	***	NS	*
Abdominal fat (% of BW)	3.38	3.24	3.48	2.98	3.75	0.001	NS	**	NS
Breast (% carcass) ¹	7.11	7.00	6.78	6.87	7.04	0.096	NS	NS	NS
Thigh (% carcass) ¹	10.51	10.54	10.52	10.84	10.21	0.104	NS	**	NS
<i>98 days of age</i>									
BW (g)	5531	5274	5603	5756	5183	89.2	NS	**	NS
Carcass (g)	3085	2986	3199	3200	2979	50.5	NS	***	NS
Carcass (% of BW)	55.84	56.67	57.10	55.60	57.48	0.331	NS	**	NS
Gut (% of BW)	5.86	5.83	5.80	5.49	6.17	0.118	NS	**	NS
Gizzard (% of BW)	4.11	4.17	3.76	4.07	3.96	0.092	NS	NS	NS
Liver (% of BW)	2.32 ^a	1.94 ^b	2.02 ^{ab}	2.05	2.14	0.065	*	NS	*
Abdominal fat (% of BW)	3.27	3.12	3.58	3.00	3.64	0.112	NS	*	*
Breast (% carcass) ¹	7.67	7.33	7.41	7.50	7.44	0.093	NS	NS	NS
Thigh (% carcass) ¹	11.04	10.57	10.94	11.22	10.48	0.196	NS	NS	NS

C = control; CG = coarse ground meal; M= mixture containing protein-rich pellets and sorghum whole grains; s.e.m, standard error of the mean.

¹ Muscles and bones without skin and subcutaneous fat. ***, $P < 0.001$; **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$; NS, $P > 0.05$.

^{a,b} Within a row, means with no common superscript differed significantly at $P < 0.05$.

The other body traits were similar in the three groups at both slaughter stages.

Sex had a significant effect on several body traits. Males had a higher carcass weight, but a lower gut and abdominal fat weight than females at 84 and 98 days of age (Table 6).

Discussion

In this work, sorghum was used to study the influence of feed form on the growth, gizzard development and carcass traits of growing geese. The results showed that (i) a change in the feed form alters the feed intake and hence the growth and body composition of the birds, (ii) separation of the sources of energy and proteins enables the birds to adapt their ingestion to the change in their nutritional needs and (iii) the feed form influences the body traits slightly.

We also observed a sexual dimorphism as previously described in geese by Guy *et al.* (1998). In fact, sexual dimorphism in geese leads to a higher growth rate and an earlier age at sexual maturity in females. These phenomena may explain the sex effects and the interactions sex x group we observed.

Hughes (1984) suggested that when poultry are given a choice, feed intake results from a compromise between the nutritional needs of the bird and the relative palatability of the food. In the present work, the geese were given a pelleted feed before the trial, from 1 to 42 days of age. During the first week of the trial (42 days), the birds given a non-pelleted feed had a lower feed intake. Indeed, Mirghelenj and Golian (2009) observed a lower intake with a mash diet than a pelleted diet in broilers. Similar results have been reported in geese (Leprettre *et al.*, 2000; Auvergne *et al.*, 2006 and 2008) and the authors concluded that geese preferred large particles (>2 mm). However, we observed a slight sorting phenomenon for the birds receiving whole grains at the beginning of the trial. This behaviour has been previously observed in turkeys during periods of feed transition (Lecuelle *et al.*, 2010). This can be explained by the time needed for birds to adapt to a new feed differing in colour, texture, size and flavour from the feed given before the experimental period. However, at the end of the trial, the intake of sorghum whole grains increased in geese receiving the mixture. Indeed, the protein needs decreased with age in birds and it has been shown that birds can naturally equilibrate their diet (Emmans, 1991; Covasa and Forbes, 1994; Forbes and Shariatmadari, 1994). It was found that in a choice-feeding trial offering protein-rich pellets and whole

cereals, broilers progressively increased their intake of whole grains with increasing age to meet their decreasing protein needs (Leeson and Caston, 1993).

In the present study, we observed a close relation between the changes in LW and feed intake, both phenomena affecting the body composition. The lower feed intake at the beginning of the trial for birds given the coarse-ground meal or the mixture of protein-rich pellets and sorghum whole grains led to a lower LW. The higher intake of sorghum whole grains compared with protein-rich pellets in the M group at the end of the trial did not affect the muscle development (breast and thigh). Several studies have shown that whole grains increase gizzard development (Gabriel *et al.*, 2008; Lu *et al.*, 2011). This effect is mainly attributed to the greater size of food particles ingested (Carré, 2000). In contrast, in the present study, a higher gizzard development was observed at 84 days of age in the geese fed the coarse-ground meal, while this food had the lowest particle size. We observed no effect of whole grain intake on gizzard development at either 84 or 98 days of age. Therefore, the effects of particle size on gizzard development seem to depend on grain type as reported by Amerah and Ravindran (2008) on broilers.

As a whole, feed efficiency was not modified and no adverse effect was observed in birds fed with whole grains. Salmonella contamination has been reported as an important problem in non-pelleted food (Jones, 2011). Chemical products (formic and propionic acids) could reduce this problem but we did not use them in the present study and we observed no problems. The present results suggest that a high proportion of sorghum whole grains can be mixed loosely with protein-rich pellets without affecting the productive efficiency, as observed with wheat in broilers (Rose *et al.*, 1995) or laying hens (Blair *et al.*, 1973).

Conclusions

The present results showed a significant influence of the feed form on goose growth. Feed intake of birds decreased after a feed change during the time necessary to adapt to a new colour, size and hardness of food. The use of a coarse-ground meal leads to reduced performance at 14 weeks of age and should be avoided. However, at the end of the growing period, birds showed similar performance when they received a mixture of sorghum whole grains and protein-rich pellets instead of a completed pelleted feed. Thus, such a simplified diet offers interesting prospects for a more sustainable feeding strategy in goose rearing.

Using locally grown grains, such a practice could decrease the economic and environmental costs of goose feeding, reducing the transport and crushing processes and improving the social acceptability by feeding the birds with a diet considered as more natural.

Acknowledgements

The authors thank C. Pautot, H. Manse, C. Bannelier, D. Merilloux, D. Plassard, E. Cazenave and B. Dubois for their technical help.

References

- Amerah AM and Ravindran V 2008. Influence of method of whole-wheat feeding on the performance, digestive tract development and carcass traits of broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology* 147, 326–339.
- Auvergne A, Lavigne F and Dubois JP 2008. Utilisation du maïs en alimentation fermière pour les oies en période de croissance-finition. Conference at the 8^{ème} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Arcachon, France, 4pp.
- Auvergne A, Leprettre S, Lavigne F, Babilé R and Dubois JP 2006. Utilisation de protéagineux mélangés tropicaux dans des mélanges fermiers par les oies grises du sud-ouest en phase de finition. Conference at the 7^{ème} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Arcachon, France, 4pp.
- Blair R, Dewar WA and Dowling JN 1973. Egg production responses of hens given a complete mash or ungrounded grain together with concentrate pellets. *British Poultry Science* 14, 373–377.
- Boggia A, Paolotti L and Castellini C 2010. Environmental impact evaluation of conventional, organic and organic-plus poultry production systems using life cycle assessment. *World's Poultry Science Journal* 66, 95–114.
- Bouvarel I, Vallée C, Lescoat P, Ferreira G, Chagneau AM, Constantin P and Leterrier C 2008. Effects of various energy and protein levels on feed preferences in meat-type chickens used to sequential feeding. *Animal* 2, 1674–1681.

- Carré B 2000. Effects of feed particle size on the digestive processes in domestic birds. *INRA Productions Animales* 13, 131–136.
- Covasa M and Forbes JM 1994. The effect of social interaction on selection of feeds by broiler chickens. *British Poultry Science* 35, 817.
- Dozier WA, Behnke K, Kidd MT and Branton SL 2006. Effects of the addition of roller mill ground corn to pelleted feed on pelleting parameters, broiler performance, and intestinal strength. *Journal of Applied Poultry Research* 15, 236–244.
- EC 2009. European Union Council Directive 1009/2009/EC 2009, on the protection of animals at the time of slaughter or killing. *Official Journal of European Community* L 303, 1–30.
- Elkin RG, Freed MB, Hamaker BR, Zhang Y and Parsons CM 1996. Condensed tannins are only partially responsible for variations in nutrient digestibilities of sorghum grain cultivars. *Journal of Agricultural and Feed Chemistry* 44, 848–853.
- Emmans GC 1991. Diet selection by animals: theory and experimental design. *Proceedings of Nutrition Society* 50, 59–64.
- Farré I and Faci JM 2006. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 83, 135–144.
- Fisher C and Mc Nab JM 1987. Techniques for determining the metabolizable energy (ME) content of poultry feeds. In *Recent advances in animal nutrition* (ed. W Haresign and DJA Cole), pp. 3–18. Butterworths, London.
- Forbes JM and Covasa M 1995. Application of diet selection by poultry with particular reference to whole cereals. *World's Poultry Science Journal* 51, 149–165.
- Forbes JM and Shariatmadari F 1994. Diet selection for protein by poultry. *World's Poultry Science Journal* 50, 7–24.
- Gabriel I, Mallet S, Leconte M, Travel A and Lalles JP 2008. Effects of whole wheat feeding on the development of the digestive tract of broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology* 142, 144–162.
- Gualtieri M and Rapaccini S 1990. Sorghum grain in poultry feeding. *World's Poultry Science Journal* 46, 246–254.
- Guéméné D and Guy G 2004. The past, present and future of force-feeding and “foie gras” production. *World's Poultry Science Journal* 60, 210–222.

- Guy G, Baéza E, Salichon MR, Juin H and Rousselot-Pailley D 1998. Influence of goose breeding conditions on the meat and fatty liver production. *Annales de Zootechnie* 47, 215–224.
- Hughes BO 1984. The principles underlying choice feeding behavior in fowls with special reference to production experiments. *World's Poultry Science Journal* 40, 141–150.
- Jahan MS, Asaduzzaman M and Sarkar AK 2006. Performance of broiler fed on mash, pellet and crumble. *International Journal of Poultry Science* 5, 265–270.
- Jones FT 2011. A review of practical Salmonella control measures in animal feed. *Journal of Applied Poultry Research* 20, 102–113.
- Lebas F and Lamboley B 1999. Liquid phase sifting determination of the size of particles contained in pelleted rabbits feeds. *World Rabbit Science* 7, 229–235.
- Lecuelle S, Bouvarel I, Chagneau AM, Lescoat P, Laviron F and Leterrier C 2010. Feeding behaviour in turkeys with a change-over from crumbs to pellets. *Applied Animal Behavior Science* 125, 132–142.
- Leeson S and Caston LJ 1993. Production and carcass yield of broilers using free-choice cereal feeding. *Journal of Applied Poultry Research* 2, 253–258.
- Leprettre S, Dubois JP, Lavigne F and Babilé R 2000. Système d'élevage des oies et performances de croissance. Conference at the 4^{ème} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Arcachon, France, 4pp.
- Leprettre S, Babilé R, Auvergne A, Dubois JP, Manse H and Verdier M 1997. Feed restriction in Landese geese breeding: influences on growth and carcass composition during the growing period and after force-feeding. Conference at the 11th European Waterfowls Symposium, World Poultry Science Association, Nantes, France, 5pp.
- Lu J, Kong XL, Wang ZY, Yang HM, Zhang KN and Zou JM 2011. Influence of whole corn feeding on the performance, digestive tract development, and nutrient retention of geese. *Poultry Science* 90, 587–594.
- MINITAB 2000. Minitab Reference Manual (Release 13.0) for Windows. Minitab Inc., USA.
- Mirghelenj SA and Golian A 2009. Effects of feed form on development of digestive tract, performance and carcass traits of broiler chickens. *Journal of Animal and Veterinary advances* 8, 1911–1916.
- National Research Council (NRC) 1994. Nutrient requirement of poultry. National Academy Press, Washington, DC.
- Nyachoti CM, Atkinson JL and Leeson S 1997. Sorghum tannins: a review. *World's Poultry Science Journal* 53, 5–21.

- Pousga S, Boly H and Ogle B 2005. Choice feeding of poultry: a review. *Livestock Research for Rural Development* 17, 4.
- Rose SP, Fielden M, Foote WR and Gardin P 1995. Sequential feeding of whole grain wheat to growing broiler chickens. *British Poultry Science* 36, 97–111.
- Sauvant D, Perez JM and Tran G 2004. Tables of composition and nutritive value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish, 304pp. INRA Editions, Paris and Wageningen Academic Publishers, the Netherlands.
- Selle PH, Cadogan DJ, Li X and Bryden WL 2010. Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Animal Feed Science and Technology* 156, 57–74.
- Umar Faruk M, Bouvarel I, Meme M, Rideau N, Roffidal L, Tukur HM, Bastianelli D, Nys Y and Lescoat P 2010. Sequential feeding using whole wheat and a separate protein–mineral concentrate improved feed efficiency in laying hens. *Poultry Science* 89, 785–796.
- World's Poultry Science Association (WPSA) n.d. Working Group V: Method of dissection of broiler carcasses and description of parts. Terms used for parts of poultry in different languages (ed. J. Fris Jensen). World's Poultry Science Association, European Federation, Denmark.
- Yo T, Siegel PB, Guerin H and Picard M 1997. Self-selection of dietary protein and energy by broilers grown under a tropical climate: effect of feed particle size on the feed choice. *Poultry Science* 76, 1467–1474.

2. Essai 2 - Influence de la substitution du maïs par du sorgho et de la forme de présentation des aliments sur le développement et les performances des oies avant et après gavage.

2.1. Objectifs

Le but de cet essai était d'étudier les effets des céréales (maïs ou sorgho) et de la présentation de l'alimentation (alimentation en granulés ou d'un mélange avec des céréales) au cours de la période de croissance-finition sur les performances des oies pendant les phases d'élevage et de gavage.

2.2. Déroulement de l'essai

480 oies âgées d'un jour ont été divisées en 4 groupes différents par le régime alimentaire reçu entre 52 et 102 jours d'âge : un aliment granulé contenant 500 g de sorgho / kg (groupe CS ; EMAn 11,29 MJ / kg, 16,70% de protéines) ; un mélange contenant 500 g de granulés riches en protéines et 500 g de graines entières de sorgho / kg (groupe MS ; EMAn 11,61 MJ / kg, 14,30% de protéines), un aliment granulé contenant 500 g de maïs / kg (groupe CC ; EMAn 11,33 MJ / kg, 16,40% de protéine), et un mélange contenant 500 g de granulés riches en protéines et 500 g de maïs concassé / kg (groupe MC ; EMAn 11,48 MJ / kg, 14,50% de protéines). De 102 à 117 jours, 33 animaux / sexe / groupe ont été gavés avec du maïs. Entre 52 et 102 jours d'âge, le poids corporel individuel et la prise alimentaire collective (40 animaux / parc) ont été mesurés toutes les semaines. Les caractéristiques de la carcasse ont été mesurées à 69, 96 et 117 jours et le volume du jabot a été mesuré à l'âge de 102 jours.

2.3. Principaux résultats

La céréale n'a eu aucun effet significatif sur la consommation alimentaire totale (15 028 g, $P > 0,05$) ou le poids vif (5 811 g, $P > 0,05$) mais le développement du muscle pectoral à 102 jours est moins important chez les animaux nourris avec du sorgho que ceux nourris avec du maïs (-4,9% ; $P < 0,05$). La consommation d'aliments (+8,4% entre 69-102 jours ; $P < 0,001$), le poids corporel (+3,9% ; $P < 0,001$) et le développement des intestins (+9,3% ; $P < 0,001$) étaient plus élevés lorsque le régime alimentaire a été offert en mélange par rapport à une alimentation complète en granulés. Les animaux nourris avec des aliments complets granulés ont un jabot plus important (+10,1%, $P < 0,05$) que les autres. La nature de la céréale et la forme de présentation de l'aliment n'ont eu aucun effet sur les caractéristiques de la carcasse à la fin du gavage.

Les résultats suggèrent que l'utilisation de graines entières de sorgho est possible pour nourrir les oies.

2.4. Publication n°2

Effects of presentation and type of cereals (corn or sorghum) on performance of geese

J. Arroyo^{*,†,‡,§}, A. Auvergne^{*,†,‡}, J.P. Dubois[§], F. Lavigne[§], M. Bijja[§], C. Bannelier^{*,†,‡},
L.Fortun-Lamothe^{*,†,‡}

^{*} Université de Toulouse, INPT ENSAT, UMR 1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion,
Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France

[†] INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326
Castanet-Tolosan, France

[‡] Université de Toulouse, INPT ENVT, UMR 1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion,
Ecosystème et Métabolisme, 31076 Toulouse, France

[§] ASSELDOR, Station d'expérimentation appliquée et de démonstration sur l'oie, La Tour de
Glane, 24420 Coulaures, France

Published on POULTRY SCIENCE, 91, 2063-2071

(Received 03 November 2011; Accepted 04 April 2012)

Abstract

The aim of this trial was to study the effects of cereal (corn or sorghum) and of the presentation of the diet (pelleted diet or a mixture with cereal) on the performance of geese. 480 one-day-old geese were divided into 4 groups differing in the diet they received between 52 and 102 d of age : a pelleted diet containing 500 g of sorghum / kg (CS group; AMEn 11.29 MJ/kg , CP 16.70%); a mixture containing 500 g of protein-rich pellets and 500 g of sorghum whole seeds / kg (MS group; AMEn 11.61 MJ/kg, CP 14.30%); a pelleted diet containing 500 g of corn / kg (group CC; AMEn 11.33 MJ/kg, CP 16.40 %); and a mixture containing 500 g of protein-rich pellets and 500 g of corn mash / kg (group MC; AMEn 11.48 MJ/kg, CP 14.50 %). From 102 to 117 d, 33 birds / sex / group were force-fed with corn. Between 52 and 102 d of age, individual BW and collective feed intake (40 birds/pen) were measured weekly. Body traits were measured at 69, 96 and 117 d and the volume of the crop was measured at 102 d of age. The cereal had no significant effect on total feed intake (15,028 g, NS) or BW (5,811 g, NS) but the breast development at 102 d was less in birds fed sorghum compared with corn (-4.9%; $P < 0.05$). Feed intake (+8.4% between 69 and 102 d; $P < 0.001$), BW (+3.9%; $P < 0.001$) and gut development (+9.3 %; $P < 0.001$) were higher when the diet was offered as a mixture compared with a complete pelleted diet. The birds fed the complete pelleted diets had a larger crop (+10.1%; $P < 0.05$) than others. The cereal and the presentation of the diet had no effect on the body traits at the end of the force feeding. The results suggest that the use of sorghum whole seeds is feasible for feeding geese.

Keywords: goose, sorghum, corn, diet presentation, force feeding

Introduction

Innovations are needed to improve sustainability of livestock production systems, that is, to reduce their environmental impacts while maintaining or increasing their economic viability. Changing feeding practices, both the choice of raw materials or the form of the diet, seems to be one of the promising ways. Indeed, the feed represents the greatest part of the economic and environmental costs of poultry rearing (Boggia et al., 2010).

Firstly, raw materials should be chosen according to their environmental impacts and availability. Increasing the number of usable raw materials improves the flexibility of systems, avoiding reliance on materials whose price fluctuates greatly. Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] seems suitable in this respect (Sedghi et al., 2011).

Secondly, the use of local and simplified diet, such as a crushed, mashed diet or whole grains, can reduce transport and processing costs (Dozier et al., 2006). The value of nonpelleted foods has previously been demonstrated in poultry production (Bennett et al., 2002; Jahan et al., 2006; Gabriel et al., 2008; Mirghelenj and Golian, 2009). It generally increases feed intake and maintains poultry performance (Yo et al., 1997, 1998; Gabriel et al., 2008; Umar Faruk et al., 2010). It can modify the development of the digestive tract, especially the gizzard (Forbes and Covasa, 1995; Carré, 2000; Amerah et al., 2007; Mirghelenj and Golian, 2009; Lu et al., 2011), and improve gut motility, activity and health (Ferket, 2000; Engberg et al., 2002, 2004; Bjerrum et al., 2005). These beneficial effects were attributed to the greater particle size in the simplified diet (Carré, 2000, Engberg et al., 2002).

The aim of this work was to study the effects of the diet presentation (pelleted or simplified) and of the cereal (corn or sorghum) on the performance of geese. Indeed, most of the work on whole grains has been carried out on corn or wheat on broilers. Data on other poultry such as geese (Auvergne et al., 2006, 2008; Lu et al., 2011) are scarce. Nonetheless, the goose is an interesting animal model because its crop is not a truly differentiated organ (Sturkie, 1986) but its size influences food intake (Savory, 1985). Otherwise, fatty liver production requires high feed ingestion level for which animals should be prepared (Leprettre et al., 1997; Guy et al., 1998), for example, by increasing storage capacity of the food in the proximal part of the digestive tract. The presentation of the diet could play an important role in such a preparation due to relations between particle size, feed hydration and gut motility.

Materials and methods

Animals and feeding program

This trial was carried out at the Goose Breeding Station (Coulaures, Dordogne, France). 480 one-day-old geese (type Maxipalm) were divided into 4 groups (3 pens of 20 males and 20 females per group). All birds were fed ad libitum with a complete pelleted diet (AMEn 11.70 MJ/kg, CP 15.00 %; manufactured by DFP Nutraliance, Saint-Ybard, Corrèze, France) from 1 d to 51 d. The groups differed in the diet offered to birds between 52 and 102 d of age: a complete pelleted diet containing 500 g of sorghum/kg (CS group; AMEn 11.29 MJ/kg, CP 16.70%); a mixture containing 500 g of protein-rich pellets and 500 g of sorghum whole seeds/kg (MS group; AMEn 11.61 MJ/kg, CP 14.30%); a complete pelleted diet containing 500 g of corn/kg (group CC; AMEn 11.33 MJ/kg, CP 16.40 %); or a mixture containing 500 g of protein-rich pellets and 500 g of corn mash/kg (group MC; AMEn 11.48 MJ/kg, CP 14.50 %). The feeding program of growing geese was intended to prepare the birds for force feeding (Guéméné and Guy, 2004). For this purpose, birds were fed a restricted diet from 55 to 98 days of age, to progressively adapt them to take in large amounts of food in a short period. The feeding program we used was adapted from Leprettre et al., (1997). Birds were fed ad libitum from 1 to 54 d of age and then had controlled access to food: 4 h/d (2 h in the morning and 2 h in the afternoon) from 55 to 68 d, 2 h/d from 69 to 95 d and 3 h/d from 96 to 102 d of age.

The diets used during the rearing period met NRC requirements (NRC, 1994). Sorghum used for this experiment (Argence variety) was tannin-free. From 102 to 117 d, 33 birds / sex / group were force fed with a mixture of 340 g of corn flour, 240 g of whole corn, 400 g of water and vitamins (E: 32.00 UI/kg; B₁: 4.00 mg/kg; K₃: 2.86 mg/kg) and minerals (FeSO₄: 55.40 mg; CuSO₄: 15.00 mg, ZnSO₄: 40.00 mg; MnSO₄: 74.00 mg; Ca: 2.13g, Na: 1.44g; P: 0.23g /kg).

The birds used for force feeding were chosen according to their live weight at 102 d to be representative of the live weight variability within groups.

Table 1. *Ingredients and chemical composition of the experimental diets*

	Group ¹					
	Complete pelleted diets		Mixture diets			
	CC	CS	MC		MS	
			PRC	CM	PRS	SWS
<i>Ingredients (g/kg)</i>						
Corn	500.0	-	-	1000.0	-	-
Sorghum	-	500.0	-	-	-	1000.0
Wheat	162.5	193.2	323.6	-	388.7	-
Rapeseed meal	30.0	30.0	60.0	-	60.0	-
Soybean meal	145.0	117.5	292.5	-	232.5	-
Wheat middling	120.0	120.0	240.0	-	240.0	-
Calcium carbonate	18.0	15.0	35.5	-	30.0	-
Salt	2.0	2.0	4.5	-	4.0	-
Dicalcium phosphate	13.0	13.0	25.5	-	26.0	-
Sodium bicarbonate	1.0	1.0	2.0	-	2.0	-
Methionine	1.7	1.9	3.4	-	3.9	-
Lysine	1.3	1.4	2.5	-	2.9	-
Threonine	0.5	-	0.5	-	-	-
Additive	2.0	2.0	4.0	-	4.0	-
Vitamin and mineral premix ²	3.0	3.0	6.0	-	6.0	-
<i>Nutrients levels (% raw material except AMEn)</i>						
DM	87.5	87.6	87.8	85.7	86.9	86.2
CP	16.4	16.7	22.7	6.3	20.9	7.7
Ash	5.1	6.0	9.4	1.1	9.3	1.2
Fat	2.7	2.5	2.2	3.1	2.0	2.8
Cellulose	3.6	3.9	4.8	1.8	5.0	2.4
Starch (% DM)	43.4	43.7	25.7	67.5	29.6	67.7
Sugar(% DM)	4.5	4.2	6.3	1.8	5.6	1.0
Methionine + Cystine	0.69	0.74	0.97	0.29	0.94	0.33
Lysine	0.87	0.90	1.38	0.20	1.23	0.21
Threonine	0.58	0.59	0.82	0.24	0.71	0.28
AMEn (MJ/kg) ³	11.3	11.3	9.4	13.6	9.6	13.6
NDF ⁴	14.6	14.2	18.8	10.4	18.9	9.4
ADF ⁴	4.9	5.4	7.2	2.6	7.0	3.8
ADL ⁴	1.2	1.5	1.8	0.5	1.9	1.1
Plants cell walls ⁴	14.5	14.0	20.0	9.1	19.5	8.5

¹CC: complete pelleted diet containing 50% of corn; CS: complete pelleted diet containing 50% of sorghum; MC: mixture diet containing 50% of corn mash (CM) and 50% of a protein-rich pellets (PRC); MS: mixture diet containing 50% of sorghum whole seeds (SWS) and 50% of a protein-rich pellets (PRS). ² Vitamins, A: 9,990 UI/kg; D₃: 1,998 UI/kg; E: 10.0 UI/kg; B₁: 2.0 mg/kg; K₃: 1.0 mg/kg; B₂: 2.5 mg/kg; B₅: 5.1 mg/kg; B₆: 1.0 mg/kg; PP: 24.9 mg/kg; B₉: 0.3 mg/kg; Cholin: 300 mg/kg. Oligo elements, Cu: 9.3 mg/kg; Fe: 29.0 mg/kg; I: 0.99 mg/kg; Co: 0.16 mg/kg; Mn: 70 mg/kg; Zn: 47 mg/kg; Se: 0.20 mg/kg. 4000mg/kg; clay (sepiolite): 2 g/kg; ³ AMEn, was calculated from Fisher and Mc Nab., (1987); ⁴ Calculated from Sauvant et al., (2004). NDF= neutral detergent fiber; ADF= acid detergent fiber; and ADL= acid detergent lignin.

Housing and management conditions

The birds were housed in pens of 19m² containing 40 birds (20 males and 20 females). The pens were equipped with 2 drinkers, 3 feeders and outdoor access (91.5m²/pen). Geese had outdoor access between 0700 and 1800 from 41 to 102 d of age. The room temperature was maintained at 28°C from the first week after hatching and was subsequently gradually reduced to 22°C at 40 d of age, after which no heat was provided.

Measurements and analytical methods

Birds were weighed individually at 1, 52, 69, 84, 96 and 102 d after 18h of fasting, and at 117 d after 8 h of fasting. Feed intake per pen was measured at 54, 62, 68, 76, 83, 91, 95 and 102 d. In the MS and MC groups, the content of the feed refusal (that is, the relative amounts of uneaten sorghum whole seeds vs. protein-rich pellets or corn mash vs. protein-rich pellets) were also measured. During force feeding, the quantity of corn distributed was measured for each meal. Mortality was recorded daily. Birds were slaughtered at 69 d and 96 d of age (6 geese per sex and group) to study gizzard development and carcass traits according to the WPSA method. The weights of gut (small intestine, duodenum, jejunum, ileum and caecum), gizzard, liver, carcass (eviscerated carcass with skin) and abdominal fat were measured as well as breast and thigh weights (without skin and subcutaneous fat). Also, birds (33 geese per sex and group) were slaughtered after force feeding, at 117 d, to measure the weight of breast with skin, gizzard and fatty liver. Birds were killed according to the European council regulations (EU Council Directive 2009).

Geese have no truly differentiated crop; however, the feeding method used involves partly expanding the esophagus to form a pocket, which we will call the crop. At 102 d, the volume of the crop (13 geese per sex and group selected on their live weight at 102d) was measured after 18 h of fasting. A balloon was introduced into the esophagus and inflated to a constant pressure (70 mmHg). The volume of air introduced was measured by displacement of a water column.

The chemical composition of the experimental diets was analyzed by INZO (Château-Thierry, France) and shown in Table 1. The physical characteristics of the experimental diets are shown in Table 2. Length and diameter of the pellets were measured on 200 samples.

Particle size was measured using successive sieves of decreasing mesh on dry material for corn mash and sorghum whole seeds or wet material for the complete pelleted diets and protein-rich pellets (Lebas and Lamboley, 1999). The hydration capacity was measured by the method of Giger-Reverdin (2000). First, 2 g of feedstuff were mixed with 10mL of distilled water. After 8 h at room temperature, the mixture was centrifuged (966 x g for 10 min at 20°C) before weighing the pellet to determine the water-holding capacity (WHC). Second, 25 ml of distilled water were added to 2g of feedstuff. After 8 h at room temperature, the increased volume of the feedstuff due to hydration was measured to determine the swelling capacity (SC).

Statistical Analysis

Data were analyzed using the GLM procedure of PASW Statistics 18 (version 18.0.2, SPSS Inc., Chicago, IL). All data were analyzed including the effects of cereal (2 levels: corn or sorghum), presentation (2 levels: complete pelleted diet or mixture diet), sex (2 levels: male and female) and their interaction in the model, except for feed intake and the feed conversion ratio (FCR) measured during the rearing period where the sex was not included in the model because males and females were mixed in each pen. The effect of the sex was significant for many of the variables measured, but interactions between sex, cereal and presentation effects were never significant. Therefore, we have not reported the means of the variables for each sex in the present paper because the sexual dimorphism was previously described by Guy et al. (1998). The physical characteristics (length, diameter, WHC, and SC) of the experimental food were also analyzed using GLM procedures using the diet effect in the model (6 levels: CS, CC, protein-rich pellets to complement sorghum, protein-rich pellets to complement corn, sorghum whole seeds and corn mash). When significant, differences between groups were compared using the Duncan test.

Mortality, during rearing and force-feeding periods, was analyzed using the chi-squared test. Differences were treated as significant when $P \leq 0.05$.

Results

Physical characteristics of experimental diets

The diameter of the pellets was similar for all the experimental diets (4.2 ± 0.1 mm; NS) but they were shorter in the protein-rich pellets complementing the sorghum whole seeds than in the protein-rich pellets complementing the corn mash (9.0 ± 2.2 mm vs. 10.2 ± 2.2 mm, $P < 0.05$). The proportion of large particles (> 2.0 mm) was higher in the mixture diets (75% and 80% in MS and MC, respectively) than in the complete pelleted diets (26% and 31%, in CC and CS respectively; Table 2) mainly due to the diameter of the whole sorghum seeds (3.3 ± 0.8 mm) and the proportion of very large particles (> 4.0 mm) in corn mash (19%). Conversely, for the same reason, the proportion of small particles (< 0.5 mm) was less in the complete pelleted diets (52% and 48% in CC and CS, respectively) than in the mixture diets (3% and 5%, in MC and MS, respectively).

Measurements of hydration capacity, WHC and SC, showed differences between the experimental foods ($P < 0.001$). The 4 pelleted diets showed greater hydration capacity than the two unpelleted foods (-67% for WHC and -79% for SC; $P < 0.001$; Table 2). Sorghum whole seeds had a lower hydration capacity than corn mash (-40% for WHC and -30% for SC; $P < 0.05$).

Table 2. Physical characteristics of the experimental diets

	Group ¹							SEM	<i>P</i> -value
	Complete pelleted diets	Mixture diets							
		MC		MS					
		CC	CS	PRC	CM	PRS	SWS		
Length (mm)	9.4 ^a	10.0 ^b	10.2 ^b	-	9.0 ^a	-	0.08	<0.001	
Diameter (mm)	4.2 ^b	4.2 ^b	4.2 ^b	-	4.2 ^b	3.2 ^a	0.01	<0.001	
<i>Percentage of particle (%)</i>									
4.000 mm mesh	-	-	-	19.5	-	0.2			
2.000mm	25.8	30.7	61.0	70.0	61.30	97.9			
1.000mm	22.5	21.6	18.8	9.4	17.60	1.4			
0.500mm	41.6	36.9	14.1	0.4	10.35	0.1			
0.315mm	10.1	10.8	6.2	0.1	10.76	0.01			
<0.315mm	-	-	-	0.5	-	0.02			
<i>Feedstuff hydration¹</i>									
WHC ² (g of H ₂ O/ g of feedstuffs)	2.33 ^c	2.24 ^c	3.04 ^e	1.01 ^b	2.62 ^d	0.70 ^a	0.165	< 0.001	
SC ³ (mL/g)	2.60 ^b	2.50 ^b	2.24 ^b	0.65 ^a	3.04 ^c	0.45 ^a	0.190	< 0.001	

^{a-e} Within a row means with no common superscript differed at $P < 0.05$.

¹CC complete pelleted diet containing 50% of corn; CS: complete pelleted diet containing 50% of sorghum; MC mixture diet containing 50% of corn mash (CM) and 50% of protein-rich pellets (PRC); MS: mixture diet containing 50% of sorghum whole seeds (SWS) and 50% of protein-rich pellets (PRS).

²WHC= water-holding capacity

³SC= swelling capacity

Feed intake during the rearing period

There was no significant interaction between the cereal and the presentation effect, and no effect of the cereal on feed intake, except between 69 and 76 d when feed intake was 9% lower in birds fed corn rather than sorghum ($P < 0.05$). Conversely, the presentation of the diet had a significant effect from 69 d to 102 d (Table 3).

In general, during the first 2 wk of the trial (52-68 d) the feed intake was not affected by cereal or presentation of the diet (325 ± 3.6 g/d; NS). On the other hand, during the last part of the trial (69-102d), intake was higher in birds fed the mixture compared with the complete pellets (251 ± 12 vs. 272 ± 8 g/d; $P < 0.001$). Over the whole period, the feed intake tended to be lower in the CC group than in the others (14,227g vs. 15,296g, $P = 0.10$).

Table 3. Feed intake during the rearing period¹

Period	Feeding access	Group ²				SEM	Significance ³		
		CC	CS	MC	MS		C	P	CxP
52-54 d (g/d)	<i>Ad libitum</i>	280	294	287	295	6.4	0.453	0.759	0.847
55-62 d (g/d)	2h+2h	298	317	325	327	5.1	0.276	0.072	0.374
63-68 d (g/d)	2h+2h	357	364	356	340	4.2	0.578	0.146	0.200
69-76 d (g/d)	2h	203	235	240	250	6.3	0.041	0.016	0.236
77-83 d (g/d)	2h	277	297	307	310	5.3	0.212	0.032	0.313
84-91 d (g/d)	2h	240	250	271	263	5.0	0.846	0.029	0.310
92-95 d (g/d)	2h	287	310	313	316	4.7	0.105	0.055	0.194
96-102 d (g/d)	3h	236	229	247	244	2.9	0.310	0.016	0.590
52-102 d(g)		14227	15021	15442	15424	175.8	0.117	0.006	0.103

¹ The individual feed intake was calculated from the intake per pen (n= 3pens/groups) and the number of birds in the pen during the observation period (40 birds per pen at the beginning of the experimental period).

²CC complete pelleted diet containing 50% of corn; CS: complete pelleted diet containing 50% of sorghum; MC mixture diet containing 50% of corn mash and 50% of protein-rich pellets; MS: mixture diet containing 50% of sorghum whole seeds and 50% of protein-rich pellets.

³C: cereal; P: presentation of the diet

During the first 3 days of the trial, the birds fed the mixture diet preferred the protein-rich pellets to the cereal (59% of protein rich pellets vs. 41% of corn mash, and 61% of protein-rich pellets vs. 39% of sorghum whole seeds). After this period, the consumption of the 2 compounds of the mixture diets was balanced (between 52 and 48% depending on the periods). Over the whole period of rearing (52-102 d), more of the protein-rich pellets were consumed than the cereal (53% vs. 47%) in both MC and MS groups.

Mortality and animal growth during the rearing period

The mortality during the rearing period (52-102 d) was significantly higher in the CS group than in the others (11.6% vs. 1.0%; $P < 0.001$). This effect was due to a colibacillosis in one of the 3 pens which resulted in the death of 6 birds between 63 and 68 d rather than a cereal or a presentation of diet effect.

The BW was similar in the 4 groups at 1 d (106 ± 0.4 g), 52 d (4549 ± 19 g) and 69 d (5466 ± 25 g; NS; Table 4). Between 84 and 102 d, BW was 3.8% lower in birds fed the complete pelleted diets than with the mixture diet ($P < 0.001$). Interaction between cereal and presentation was significant at 96 d when the lowest BW was observed in the CC group.

Table 4. Live weight and average daily gain during the rearing period

	Groups ¹				SEM	Significance ²			
	CC	CS	MC	MS		C	P	S	CxP
<i>BW (g)</i>									
1 d	107	106	106	106	0.4	0.357	0.785	0.736	0.913
52 d	4512	4562	4558	4562	19.5	0.434	0.507	< 0.001	0.441
69 d	5421	5448	5529	5466	24.9	0.818	0.372	< 0.001	0.243
84 d	5557	5664	5829	5777	29.3	0.563	< 0.001	< 0.001	0.087
96 d	5646 ^a	5819 ^b	6004 ^c	5976 ^c	31.0	0.178	< 0.001	< 0.001	0.048
102 d	5673	5728	5913	5931	34.1	0.550	< 0.001	< 0.001	0.766
<i>ADG (g/d)</i>									
52-69 d	53.6	52.6	57.1	53.2	0.8	0.130	0.218	0.019	0.385
69-84 d	8.6	13.7	20.7	21.2	0.6	0.021	< 0.001	0.843	0.059
84-96 d	7.4	12.7	14.5	16.6	0.6	0.003	< 0.001	0.738	0.188
96-102 d	4.9 ^d	-12.7 ^a	-7.0 ^b	-1.9 ^c	0.9	< 0.001	0.769	0.325	< 0.001
52-102 d	23.3	22.8	27.8	27.6	0.5	0.703	<0.001	0.164	0.855

^{a-d} Within a row, means with no common superscript differed at $P < 0.05$.

¹CC: complete pelleted diet containing 50% of corn; CS: complete pelleted diet containing 50% of sorghum; MC mixture diet containing 50% of corn mash and 50% of protein-rich pellets; MS: mixture diet containing 50% of sorghum whole seeds and 50% of protein-rich pellets.

²C: cereal; P: presentation of the diet; S: Sex

The cereal, presentation of the diet, or their interaction, had significant effects on ADG of the birds from 69 d. Birds fed sorghum or the mixture diets gained more (at the beginning of the trial) or lost less (at the end of the trial) than birds fed corn or the complete pelleted diets ($P < 0.05$ to 0.001 depending on the period; Table 4). Over the whole rearing period, ADG was 17% lower in birds fed the complete pelleted diets than the mixture diets ($P < 0.001$).

Table 5. Feed conversion ratio¹ (FCR) during the rearing period

Period (d)	Group ²				SEM	Significance ³		
	CC	CS	MC	MS		C	P	CxP
52-69	5.9	6.3	5.8	6.2	0.09	0.046	0.517	0.966
52-84	8.6	8.7	7.6	8.0	0.19	0.464	0.036	0.781
52-96	11.2	10.8	9.5	9.7	0.26	0.866	0.006	0.486
52-102	12.3	13.1	11.6	11.2	0.30	0.726	0.031	0.221

¹FCR per bird was determined using measured live weight (individual measure) and estimated feed intake (measure per pen).

²CC complete pelleted diet containing 50% of corn; CS: complete pelleted diet containing 50% of sorghum; MC mixture diet containing 50% of corn mash and 50% of protein-rich pellets; MS: mixture diet containing 50% of sorghum whole seeds and 50% of protein-rich pellets.

³C: cereal; P: presentation of the diet

Between 52 and 69 d of age, the FCR was 6% higher in birds fed sorghum rather than corn ($P < 0.05$) without effect of presentation (Table 5). However, after 69 d, the cereal did not influence the FCR while the mixture diets lowered the FCR compared to complete pelleted diets (11.41 vs. 12.67; $P < 0.05$, Table 5).

Table 6. Geese carcass composition at 69 and 96 days of age

Item	Group ¹					Significance ²			
	CC	CS	MC	MS	SEM	C	P	S	CxP
<i>69 d of age</i>									
BW (g)	5368	5394	5531	5523	63.0	0.748	0.364	< 0.001	0.570
Carcass (g)	3116	3134	3191	3112	41.7	0.600	0.791	< 0.001	0.439
Carcass (% of BW)	58.0	57.3	57.6	56.3	0.26	0.029	0.135	0.038	0.458
Gut (% of BW)	5.4	5.5	5.2	5.5	0.07	0.201	0.322	0.262	0.410
Gizzard (% of BW)	3.8	3.7	3.8	4.0	0.05	0.690	0.123	0.568	0.275
Liver (% of BW)	1.7	1.6	1.7	1.65	0.02	0.294	0.378	0.170	0.566
Abdominal fat (% of BW)	3.0	2.7	3.2	3.0	0.08	0.025	0.502	0.791	0.651
Breast (% of carcass) ³	7.3	7.2	7.2	7.1	0.06	0.454	0.391	0.667	0.872
Thigh with bones (% of carcass) ³	10.5	11.0	10.5	10.7	0.10	0.063	0.530	0.003	0.474
<i>96 d of age</i>									
BW (g)	5641	5824	5976	5953	74.978	0.567	0.102	0.002	0.462
Carcass (g)	3209	3317	3352	3373	46.054	0.553	0.317	< 0.001	0.439
Carcass (% of BW)	56.9	57.0	56.0	56.7	0.22	0.446	0.144	0.038	0.458
Gut (% of BW)	5.94	5.53	6.28	6.26	0.08	0.125	< 0.001	0.099	0.165
Gizzard (% of BW)	3.87	3.90	3.74	3.61	0.06	0.672	0.069	0.357	0.495
Liver (% of BW)	2.04	1.94	2.06	2.21	0.04	0.723	0.072	0.554	0.123
Abdominal fat (% of BW)	3.86	3.30	3.65	4.00	0.09	0.401	0.306	0.791	0.651
Breast (% of carcass) ³	8.1	7.8	7.7	7.2	0.10	0.035	0.020	0.667	0.872
Thigh with bones (% of carcass) ³	10.2	10.8	10.5	10.2	0.07	0.179	0.643	0.003	0.474

¹CC complete pelleted diet containing 50% of corn; CS: complete pelleted diet containing 50% of sorghum; MC mixture diet containing 50% of corn mash and 50% of protein-rich pellets; MS: mixture diet containing 50% of sorghum whole seeds and 50% of protein-rich pellets.

²C: cereal; P: presentation of the diet; S: Sex

³Without skin and subcutaneous fat.

Body traits at the end of the rearing period

At 69 d of age, the relative weights of carcass (-1.8%) and abdominal fat (-8%) were lower in birds fed sorghum instead of corn ($P < 0.05$; Table 6). At 96 d of age, the relative weight of the breast was higher in birds fed corn and complete pelleted diets ($P < 0.05$ for cereal and presentation effect), while the relative weight of gut was lower in birds fed the complete pelleted diets (-8.5%; $P < 0.001$). The weight of liver tended to be higher and the weight of gizzard tended to be lower in birds fed the mixture diet ($P < 0.1$). The other body traits were similar in the 4 groups at both slaughter stages.

Crop volume

The cereal had no influence on the crop volume before the force-feeding period, but the crop was 10% smaller in birds fed the mixture of protein-rich pellets and cereal than in those given the complete pelleted diet ($P < 0.05$; Table 7). It was also smaller in males than in females (42.2 mL.g⁻¹ vs. 48.1 mL.g⁻¹; $P < 0.001$).

Animal performance during and after force-feeding

Mortality during the force-feeding period was similar in the 4 groups (26/264 = 9.8%; NS) and tended to be higher in males than in females (12.9% vs. 6.8%; $P = 0.098$). Cereal, presentation and their interaction did not influence mortality in females; however, mortality was increased in males fed the mixture diets compared to complete pelleted diets (13/66 vs. 4/66; $P < 0.05$). Cereal and presentation had no effect on feed intake, weight gain, FCR during the force-feeding period, or on body traits at the end of force-feeding (Table 7). The amount of food given during force-feeding was greater in males than in females (13,832g vs. 12,734g; $P < 0.001$; data not shown) because males were heavier than females, but weight gain during force feeding was similar in both sexes.

Table 7. Performance of geese before, during and after force-feeding

Item	Group ¹					Significance ²			
	CC	CS	MC	MS	SEM	C	P	S	CxP
<i>At 102d</i>									
BW (g)	5673	5734	5913	5931	34.1	0.419	0.004	< 0.001	0.937
Volume of crop / BW (mL/g)	47.0	48.5	42.2	43.5	1.03	0.504	0.016	0.003	0.986
<i>102-117d</i>									
Feed intake (g)	13324	13238	13223	13264	44.8	0.260	0.577	< 0.001	0.263
Average Gain (g)	2276	2382	2310	2221	17.0	0.944	0.144	0.265	0.606
FCR	5.9	5.6	5.8	6.0	0.05	0.696	0.161	0.035	0.582
<i>At 117d</i>									
BW (g)	7968	8122	8256	8219	41.5	0.501	0.062	< 0.001	0.758
Fatty liver (g)	858	880	889	816	11.7	0.090	0.589	0.382	0.338
Breast (g) ³	384	389	403	395	4.6	0.981	0.217	0.204	0.516
Gizzard (g)	151	151	160	155	2.4	0.598	0.080	0.002	0.946

¹CC complete pelleted diet containing 50% of corn; CS: complete pelleted diet containing 50% of sorghum; MC mixture diet containing 50% of corn mash and 50% of protein-rich pellets; MS: mixture diet containing 50% of sorghum whole seeds and 50% of protein-rich pellets.

²C: cereal; P: presentation of the diet; S: Sex.

³Muscles with skin and subcutaneous fat.

Discussion

The aim of this work was to study the effects of the cereal (corn or sorghum) and of the diet presentation (pelleted or simplified feed) on the performance of geese, to propose a more sustainable goose feeding system. The results showed that 1) tannin-free sorghum could be used in goose feeding during the rearing period because it did not decrease the performance at the end of the rearing period or after force feeding, compared with corn; 2) a simplified diet, in the form of a mixture of cereal and protein-rich pellets, seems promising for geese feeding because it increased their BW and reduced the FCR during rearing compared to a complete pelleted diet. But it also reduced the volume of the crop, which could reduce the success of the force feeding.

Sorghum has not been used in poultry feeding for many years because in old varieties (NK 123 or Sultan), the seeds contained condensed tannins, mainly flavonoids (Bate-Smith, 1969, Watterson and Butler, 1983), which reduce the diet's digestibility and the growth of the birds (Elkin et al., 1996; Nyachoti et al., 1997). Genetic selection programs were devoted to develop tannin-free varieties (0.06 % vs. >1.5% in old varieties; Conan et al., 1992) and now sorghum is commonly used in poultry feeding (Gualtieri and Rapaccini, 1990; Selle et al., 2010). The present results show that sorghum could be used in goose feeding, in complete pellets or as whole seeds, as previously demonstrated (Arroyo et al., 2012). Indeed, in the present study, the cereal used in the diet had very little effect on animal performance. Sorghum and corn have very similar chemical and nutritional composition. Sorghum has a slightly higher energy content (+100 kcal AMEn/kg; +3%) but a lower content of carotenoids and vitamin A (0.1 vs. $0.83 \cdot 10^3$ UI/kg) than corn (Sauvant et al., 2004), but this would not affect the dietary balance for birds. Another difference between the 2 grains could concern the type of starch, amylopectin or amylose, which differ greatly between cereals, but also among varieties and due to seasonal effects within cereals (Jenkins and Donald, 1995). In birds, digestibility is higher for amylopectin than for amylose (Skiba et al., 2005; Zhou et al., 2010) and generally, the amylopectin level is higher in corn than in sorghum. Hence, a difference in the nature of the starch could explain the lower weights of carcass and abdominal fat observed at 69 d in birds fed sorghum instead of corn, despite similar feed intake and nutritional composition of experimental diets. Indeed, the digestive tract needs time to adapt to a change in nutrient supply (Bedford, 1996), in this case at 52 d. Similar body traits at 96 d with both cereals support this latter hypothesis and suggest that 6 weeks after the diet switch the animals were adapted and had compensated for the differences. At that age, the breast development was less in animals fed sorghum rather than corn. This difference could be due to kafirins, proteins of sorghum, which disrupt the protein digestion (Selle et al., 2010).

In addition to its value for bird feeding, sorghum also has several advantages in regard to the environment. It is more drought-resistant than corn (Farré and Faci, 2006) and can be more easily grown without irrigation. Sorghum seeds do not need to be dried before storage, which reduces energy use. Finally, the use of local whole sorghum seeds could reduce the feed costs due to transport, handling and processing (Dozier et al., 2006). Therefore, sorghum offers an interesting alternative to corn to progress towards more sustainable goose feeding system.

Contrary to cereal effects which were weak, the presentation of the diet greatly affected the geese's performance, that is, feed intake, growth and body traits. The results showed that during the first 2 wk of the trial, the diet presentation did not affect the feed intake. However, the birds were given a complete pelleted diet before the trial, from 1 to 52 d of age. Therefore, here, the geese adapted quickly to a new feed presentation. On the other hand, Arroyo et al. (2012) showed that a change in the feed presentation could alter the feed intake for one week after the switch, when the diet was offered in the form of flour or a loose mixture. Such a difference could be explained by the age of birds at the moment of the diet change, which was later in the present study (52 d vs. 42 d). At the end of the trial, the intake was higher when the diet was offered in the form of a mixture compared to a complete pelleted diet, in agreement with Arroyo et al. (2012). This result confirmed that separating the sources of energy (in the form of cereal grains) and proteins (in form of protein-rich pellets) did not prevent the birds from having a balanced diet (Hughes, 1984).

The results showed that the presentation of the diet affected the body traits, mainly digestive tract but also carcass composition. Whole grains increased the animal gut development, as previously described (Lu et al., 2011), but tended to reduce the gizzard development, contrary to previous results (Gabriel et al., 2008; Lu et al., 2011). The crop volume was smaller in birds fed the mixture of protein-rich pellets and cereal than with the complete pelleted diet. These results could be explained by the lower hydration capacity of whole grains compared with pellets. First, previous results suggested a relation between feedstuff hydration capacity and structure of the gut (Shelton et al., 2005; Scott, 2007). Second, a lower SC of simplified feed probably expanded the crop less than the pellets.

Hydration capacity of a feedstuff is correlated with cell wall content (Robertson and Eastwood, 1991; Buffo et al., 1998), especially NDF and ADF levels (Giger-Reverdin, 2000), and the form of starch (Pinnavaia and Pizzirani, 1998). The fiber and the starch contents of the experimental diets were similar whichever way they were presented. However crushing and pelleting reduces the particle size, increasing the contact surface of feed particles with water, and could increase the hydration capacity of the diet. Additionally, pelleting partially gelatinizes starch which should increase its WHC (Pinnavaia and Pizzirani, 1998). On the other hand, Selle et al. (2009) showed in chickens a positive relationship between WHC and feed intake whereas in the present study, the diet with the highest hydration capacity was eaten the least.

The rearing of geese for fatty liver production should prepare the animals for a high feed intake over a short period. To do this, the feeding program used, with access to the feeder restricted and then increased, aims to enlarge the volume of the crop (Guéméné and Guy, 2004). Present results showed that the use of cereal in a simplified form could prevent this goal from being fully achieved. Consequently, the lower crop volume in males than in females could explain their higher mortality during the force-feeding period.

A simplified diet, such as a mixture of cereal and protein-rich pellets, offers interesting prospects for a more sustainable livestock production system. Indeed, it could reduce the manufacturing processes and thus the economic and environmental impacts of goose feeding. However, their method of use should be improved to allow better preparation of birds for force-feeding. Raw materials with a high hydration capacity should be useful to achieve this goal.

In conclusion, the present results show an important influence of feed presentation on goose performance. A simplified diet, such as a mixture of sorghum whole seeds and protein-rich pellets, offers interesting prospects for a more sustainable rearing method. Indeed, it could reduce the economic and environmental impacts of goose feeding. However, the diet should have a high hydration capacity to allow sufficient development of the crop and prepare the animals for force-feeding.

Acknowledgements

The authors thank the staff of the Goose Breeding Station (Dordogne, France) for the excellent supervision of the study of geese, especially D. Merilloux, D. Plassard, E. Cazenave, and J.Chouly. The authors also thank the staff of the UMR 1289 TANDEM, especially C. Pautot, H. Manse, K.Casseneuve, V. Ponchaut, and A. Nguyen for their technical assistance of the analysis of sample.

References

- Amerah, A.M., V. Ravindran, R.G. Lentle, and D.G. Thomas. 2007. Influence of feed particle size and feed form on the performance, energy utilization, digestive tract development, and digesta parameters of broiler starters. *Poult. Sci.* 86:2615-2623.
- Arroyo, J., A. Auvergne, J.P. Dubois, M. Bijja, F. Lavigne, and L. Fortun-Lamothe. 2012. Influence of feeding sorghum on the growth, gizzard development and carcass traits of growing geese. *Animal*. 6:1583-1589
- Auvergne, A., F. Lavigne, and J.P. Dubois. 2008. Utilisation du maïs en alimentation fermière pour les oies en période de croissance-finition. Pages 173-176 in *Proc. 8^{ème} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras*, Arcachon, France.
- Auvergne, A., S. Leprettre, F. Lavigne, R. Babilé, and J.P. Dubois. 2006. Utilisation de protéagineux métropolitains dans des mélanges fermiers par les oies grises du sud-ouest en phase de finition. Pages 197-200 in *Proc. 7^{ème} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras*, Arcachon, France.
- Bate-Smith, E.C. 1969. Luteoforol (3',4,4',5,7-pentahydroxyflavan) in *Sorghum vulgare* L. *Phytochemistry* 8:1803-1810.
- Bedford M.B. 1996. Interaction between ingested feed and the digestive system in poultry. *J. Appl. Poultry Res.* 5:86-95
- Bennett, C.D., H.L. Classen, and C. Riddell. 2002. Feeding broiler chickens wheat and barley diets containing whole, ground and pelleted grain. *Poult. Sci.* 81:995-1003.
- Bjerrum, L., K. Pedersen, and R.M. Engberg. 2005. The influence of whole wheat feeding on salmonella infection and gut flora composition in broilers. *Avian Dis.* 49:9-15.
- Boggia, A., L. Paolotti, and C. Castellini. 2010. Environmental impact evaluation of conventional, organic and organic-plus poultry production systems using life cycle assessment. *World's Poultr. Sci. J.* 66:95-114.
- Buffo, R.A., C.L. Weller, and A.M. Parkhurst. 1998. Relationships among grain sorghum quality factors. *Cereal Chem.* 75:100-104.
- Carré, B. 2000. Effects of feed particle size on the digestive processes in domestic birds. *INRA Prod. Anim.* 13:131-136.
- Conan, L., J.P., M. Métayer, M., Lessire, and J.L. Widiez. 1992. Metabolizable energy content of cereal grains in poultry. Recent yearly surveys in France. *INRA Prod. Anim.* 5:329-338

- Dozier, W.A., K. Behnke, M.T. Kidd, and S.L. Branton. 2006. Effects of the addition of roller mill ground corn to pelleted feed on pelleting parameters, broiler Performance, and intestinal strength. *J. Appl. Poultry Res.* 15:236–244.
- Elkin, R.G., M.B. Freed, , B.R. Hamaker, , Y. Zhang, and C.M. Parsons. 1996. Condensed tannins are only partially responsible for variations in nutrient digestibilities of sorghum grain cultivars. *J. Agric. Food Chem.*, 44:848-853.
- Engberg, R.M., M.S. Hedemann, and B.B. Jensen. 2002. The influence of grinding and pelleting of feed on the microbial composition and activity in the digestive tract of broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 44:569-579.
- Engberg, R.M., M.S. Hedemann, S. Steinfeldt, , and B.B. Jensen. 2004. Influence of whole wheat and xylanase on broiler performance and microbial composition and activity in the digestive tract. *Poult. Sci.* 83:925-938.
- EU Council Directive 2009. 1009/2009/EC,2009 On the protection of animals at the time of slaughter or killing, *Off.J. Eur. Comm L* 303:1–30.
- Farré, I., and J.M. Faci. 2006. Comparative response of maize (*Zea mays L.*) and sorghum (*Sorghum bicolor L. Moench*) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agric. Water Manage.* 83:135-144.
- Ferket, P. 2000. Feeding whole grains to poultry improves gut health. *Feedstuffs.* 72:12-14
- Fisher, C., and J.M. Mc Nab. 1987. Techniques for determining the metabolizable energy (ME) content of poultry feeds. Pages 3-18 in *Recent advances in animal nutrition*. W. Haresign, and D.J.A. Cole, ed. Butterworths, London, UK.
- Forbes, J.M., and M. Covasa. 1995. Application of diet selection by poultry with particular reference to whole cereals. *World's Poultr. Sci. J.* 51:149-165
- Gabriel, I., S. Mallet, M. Leconte, A. Travel, and J.P. Lalles. 2008. Effects of whole wheat feeding on the development of the digestive tract of broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 142:144-162.
- Giger-Reverdin, S. 2000. Charaterisation of feedstuffs for ruminants using some physical parameters. *Anim. Feed Sci. Technol.* 86:53-69.
- Gualtieri, M., and S. Rapaccini. 1990. Sorghum grain in poultry feeding. *World's Poultr. Sci. J.* 46:246-254.
- Guéméné, D., and G. Guy. 2004. The past, present and future of force-feeding and “foie gras” production. *World's Poultr. Sci. J.* 60:210-222.

- Guy, G., E. Baéza, M.R. Salichon, H. Juin, and D. Rousselot-Pailley. 1998. Influence of goose breeding conditions on the meat and fatty liver production. *Ann. Zootech.* 47:215-224.
- Hughes B.O. 1984. The principles underlying choice feeding behavior in fowls with special reference to production experiments. *World's Poultr. Sci.* 40:141-150.
- Jahan, M.S., M. Asaduzzaman, and A.K. Sarkar. 2006. Performance of broiler fed on mash, pellet and crumble. *Int. J. Poult. Sci.* 5:265-270.
- Jenkins, P.J., Donald, A.M., 1995. The influence of amylose on starch granule structure. *Int. J. Biol. Macromol.* 17:315–321.
- Lebas, F., and B. Lamboley 1999. Liquid phase sifting determination of the size of particles contained in pelleted rabbits feeds. *World Rabbit Science.* 7:229-235.
- Leprettre, S., R. Babilé, A. Auvergne, J.P. Dubois, H. Manse, and M. Verdier. 1997. Food restriction in Landese geese breeding: influences on growth and carcass composition during the growing period and after force-feeding. Pages 569–574 in *Proc. 11th European Waterfowls Symposium*, World Poultry Science Association, Nantes, France,
- Lu, J., X.L. Kong, Z.Y. Wang, H.M. Yang, K.N. Zhang, and J.M. Zou. 2011. Influence of whole corn feeding on the performance, digestive tract development, and nutrient retention of geese. *Poult. Sci.* 90:587-594.
- Mirghelenj, S.A., and A. Golian. 2009. Effects of feed form on development of digestive tract, performance and carcass traits of broiler chickens. *J. Anim. Vet. Adv.* 8:1911-1916.
- National Research Council. 1994. Nutrient requirement of poultry, 9th rev. ed. *Natl. Acad. Press*, Washington, DC.
- Nyachoti, C.M., J.L. Atkinson, and S. Leeson. 1997. Sorghum tannins: A review. *World's Poultr. Sci. J.* 53:5-21.
- Pinnavaia, G.G., and S. Pizzanrani. 1998. Evaluation of the degree of gelatinization by water holding capacity. *Starch.* 50:64-67
- Robertson, J.A., and M.A. Eastwood. 1981. An investigation of the experimental conditions which could affect water-holding capacity of dietary fibre. *J. Sci. Food Agric.* 32:819-825.
- Sauvant, D., J.M. Perez, and G. Tran. 2004. Tables of composition and nutritive value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish. *INRA Editions*, ed. Wageningen Academic Publishers, the Netherlands.
- Savory, C.J. 1985. An investigation into the role of the crop in control of feeding in Japanese quail and domestics fowls. *Physiol. Behav.* 35:917-928.

- Scott, T. 2007. The use of water in diets as an additive to improve performance of poultry? Pages 447-454 in Proc. 16th European Symposium on Poultry Nutrition. World Poultry Science Association, Strasbourg, France.
- Sedghi, M., M. R. Ebadi, A. Golian, and H. Ahmadi. 2011. Estimation and modeling true metabolizable energy of sorghum grain for poultry. *Poult. Sci.* 90:1138-1143
- Selle, P.H., D.J. Cadogan, X. Li, and W.L. Bryden. 2010. Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 156:57-74.
- Selle, P.H., K. Germaine, and T. Middlebrook. 2009. Water holding capacity of wheat may be indicative of voluntary feed intake in broiler chicks. *Aust. Poult. Sci. Symp.* 125-128.
- Shelton, J.L., D.W. Dean, L.L. Southern, and T.D. Bidner. 2005. Effect of protein and energy sources and bulk density of diets on growth performance of chicks. *Poult. Sci.* 84:1547-1554.
- Skiba, F., B. Barrier-Guillot, J.P. Métayer, and M. Champion. 2005. Effect of the maize and starch types on the nutritional value of maize for broiler chickens. Pages 287-291 in Proc. Sixièmes Journées de la Recherche Avicole, St Malo, France.
- Sturkie, P.D. 1986. *Avian Physiology*. Fourth edition. Springer-Verlag, New York, NY.
- Umar Faruk, M., I. Bouvarel, M. Meme, N. Rideau, L. Roffidal, H.M. Tukur, D. Bastianelli, Y. Nys, and P. Lescoat. 2010. Sequential feeding using whole wheat and a separate protein-mineral concentrate improved feed efficiency in laying hens. *Poult. Sci.* 89:785-796.
- Watterson, J.J., and Butler, L.G. 1983. Occurrence of an unusual leucoanthocyanidin and absence of proanthocyanidins in sorghum leaves. *J. Agric. Food Chem.* 31:41-45
- Yo, T., P.B. Siegel, J.M. Faure, H. Guerin, and M. Picard. 1998. Self-selection of dietary protein and energy by broilers grown under a tropical climate: adaptation when exposed to choice feeding at different ages. *Poult. Sci.* 77:502-509.
- Yo, T., P.B. Siegel, H. Guerin, and M. Picard. 1997. Self-selection of dietary protein and energy by broilers grown under a tropical climate: effect of feed particle size on the feed choice. *Poult. Sci.* 76: 1467-1474.
- Zhou, Z., H.F. Wan, Y. Li, W. Chen, Z.L. Qi, P. Peng, and J. Peng. 2010. The influence of the amylopectin/amylose ratio in samples of corn on the true metabolizable energy value for ducks. *Anim. Feed Sci. Technol.* 157:99-103.

3. Essai 3 - Influence de la forme de présentation du sorgho sur le comportement alimentaire des animaux au moment des transitions alimentaires.

3.1. Objectifs

Le but de cet essai était d'étudier les effets de l'alimentation mélangée pendant la période de croissance-finition sur le comportement alimentaire, la consommation et la croissance des oies.

3.2. Déroulement de l'essai

252 oies, âgées d'un jour, ont été divisées en deux groupes différant par la forme de présentation de l'aliment qu'elles ont reçu entre 42 et 98 jours d'âge: un granulé complet contenant 500 g de sorgho / kg (groupe C ; EMAn 11,55 MJ/kg, 16% de protéine) ou un mélange contenant 500 g de granulés riches en protéines (EMAn 9,49 MJ/kg, 23% de protéine) et 500 g de graines entières de sorgho/kg (groupe M ; EMAn 13,61 MJ / kg, 9% de protéine). La consommation alimentaire a été mesurée quotidiennement entre 42 et 98 jours et tous les trois jours entre le 43ème et le 98ème jour. Le poids vif individuel a été mesuré hebdomadairement entre 42 et 98 jours. Le comportement des oies a été enregistré par la méthode du scan sampling durant toute la période expérimentale (divisée en 5 périodes selon le temps d'accès à la mangeoire : Période 1 de 42 à 55 jours (accès *ad libitum*) ; Période 2 de 56 à 62 jours (2h+2h d'accès); Période 3 de 63 à 70 jours (2h d'accès); Période 4 de 71 à 94 jours (1h d'accès) ; Période 5 de 95 à 97 jours (3h d'accès)).

3.3. Principaux résultats

Durant toute la durée de l'expérience, la consommation alimentaire ainsi que l'indice de consommation étaient similaires dans les deux groupes (respectivement 14 224 g et 8,34, $P > 0,05$). Entre 42 et 91 jours d'âge, le poids vifs des oiseaux était similaire dans les deux groupes, mais à 98 jours d'âge, les animaux étaient 3,6% moins lourds dans le groupe C que dans le groupe M ($P < 0,01$). Le comportement des oies a été influencé par les rythmes d'accès à la mangeoire. Ainsi le pourcentage d'animaux en train de se nourrir augmente lorsque le temps d'accès à la mangeoire se réduit ($P < 0,001$). En revanche, le comportement des animaux n'a pas été influencé par la forme de présentation des aliments ($P > 0,05$).

Les résultats confirment qu'un aliment présenté sous forme de mélange de graines entières de sorgho et de granulé riche en protéines est une stratégie alimentaire intéressante pour nourrir des oies en croissance et qu'il n'affecte pas de manière importante le comportement alimentaire des animaux.

3.4. Publication n°3

The influence of loose-mix feeding on behavior, feed intake and body weight of growing geese

J. Arroyo^{*,†,‡,§}, A. Auvergne^{*,†,‡}, J.P. Dubois[§], F. Lavigne[§], M. Bijja[§], C. Bannelier^{*,†,‡},
L.Fortun-Lamothe^{*,†,‡}

^{*} *Université de Toulouse, INPT ENSAT, UMR 1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France*

[†] *INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France*

[‡] *Université de Toulouse, INPT ENVT, UMR 1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème et Métabolisme, 31076 Toulouse, France*

[§] *ASSELDOR, Station d'expérimentation appliquée et de démonstration sur l'oie, La Tour de Glane, 24420 Coulaures, France*

Submitted on POULTRY SCIENCE

(Received 08 October 2012)

Abstract

The aim of this trial was to study the influence of loose-mix feeding on behavior, feed intake and body weight of growing geese. In total, 252 one-day-old geese (*Anser anser*) were divided into 2 groups differing in the form of diet they received between 42 and 98 d of age: a complete pelleted diet containing 500g of sorghum/ kg (C group; AMEn 11.55 MJ/kg, CP 16 %) and a mixture containing 500 g of protein-rich pellets (AMEn 9.49 MJ/kg, CP 23%) and 500 g of sorghum whole seeds/kg (AMEn 13.61 MJ/kg, CP 9%; M group). Feed intake was measured daily from 42 to 48 d and every three d from 49 to 98 d. Individual BW was measured weekly from 42 to 98 d. Goose behavior was monitored by the scan sampling method throughout the experiment, which was divided into 5 periods according to the timing of access to feed : Period 1 from 42 to 55 d (ad libitum feeding access); Period 2 from 56 to 62 d (2h+2h feeding access); Period 3 from 63 to 70 d (2h feeding access); Period 4 from 71 to 94 d (1h feeding access); Period 5 from 95 to 97 d (3h feeding access). Over the whole period, the feed intake and the feed conversion ratio were similar in both groups (14224g and 8.34; respectively $P > 0.05$). BW was similar in both groups from 42 to 91 d of age, but at 98 d of age, BW was 3.6 % lower in C than in M group ($P < 0.01$). Goose behavior was influenced by period, since the percentage of birds feeding increased when the daily access time to the feed decreased ($P < 0.001$), but not by group ($P > 0.05$). The present results suggest that a diet presented in the form of a mixture of sorghum whole seeds and protein-rich pellets is an interesting feeding strategy for growing geese.

Keywords: goose, loose-mix feeding, sorghum, diet presentation, behavior

Introduction

In commercial poultry production, birds are generally fed complete pelleted diets, formulated to meet their nutrient requirements throughout their life. The feed represents the majority of the economic and environmental costs of poultry rearing (Boggia et al., 2010), so feeding the birds with local raw material in a simplified form, such as whole grains, can reduce transport and processing costs (Henuk and Dingle, 2002; Dozier et al., 2006). The value of whole seed has previously been demonstrated in poultry production (Noirot et al., 1998). It generally slightly increases feed intake while maintaining performance (Yo et al., 1997; Yo et al., 1998; Gabriel et al., 2008; Umar Faruk et al., 2010). Data on geese fed whole seeds lead to similar results (Lu et al., 2011; Arroyo et al., 2012a, 2012b).

In France, geese are mainly reared for *fois gras* (fatty liver) production and the feeding program of birds is intended to prepare them for overfeeding (Guéméné and Guy, 2004) i.e. to consume a large amount of food in a short time. To do this, several changes in the timing of access to the feeder are made during the rearing period. Therefore, it seemed interesting to study the effects of modifying the form of diet presentation on feed intake and behavior during this period, especially when the timing of access to the feeding is altered.

The present experiment was therefore designed to test whether loose-mixture feeding with sorghum whole seeds influences goose behavior, feed intake and body weight during the growing period. Waterfowl behavior has previously been studied using the focal-animal sampling method, in which individual behavior is followed over time, or the scan sampling method, in which the frequency of different behavior patterns within a group is recorded at set time intervals (Altmann, 1974; Petrie and Petrie, 1998). Due to the gregarious behavior of geese (Hughes, 1971, Keeling and Hurnik, 1996) and the large size of the experimental groups (21 birds per pen) which makes individual recording quite difficult, we chose the scan sampling method.

Materials and methods

Birds and experimental groups

This trial was carried out at the Goose Breeding Station (Coulaures, Dordogne, France). 252 1-d-old geese (*Anser anser*) were divided into 2 groups (6 pens of 21 males per group). All birds were fed ad libitum with a complete pelleted diet (AMEn 11.70 MJ/kg, CP 18% manufactured by Sanders Centre Auvergne, Aigueperse, France) from 1 d to 41 d. The groups differed in the form of diet presentation offered to birds between 42 and 98 d of age: a complete pelleted diet containing 500 g of sorghum/kg (Control group; AMEn 11.55 MJ/kg, CP 16%); or a mixed diet (M group) containing 500 g of protein-rich pellets (AMEn 9.49 MJ/kg, CP 23%) and 500 g of sorghum whole seeds/kg (AMEn 13.61 MJ/kg, CP 9%). The composition of the experimental diets is shown in Table 1. The feeding program of growing geese was intended to prepare the birds for force-feeding (Guéméné and Guy, 2004). For this purpose, birds had a restricted access to the diet from 56 to 98 d of age according to the method of Leprettre et al. (1997): 4 h/d (2 h in the morning and 2 h in the afternoon) from 56 to 62 d, 2 h/d from 63 to 70 d, 1h/d from 71 to 94 d and 3 h/d from 95 to 98 d of age. The diets used during the rearing period met NRC requirements (NRC, 1994). Sorghum used for this experiment was tannin-free.

Housing and management conditions

The birds were housed in pens of 19m² containing 21 males. The pens were equipped with one drinker, two feeders and outdoor access (91.5m²/pen). Geese had outdoor access between 0700 h and 1800 h from 42 to 98 d of age. But from 56 to 98 d, outdoor access was denied during the time when birds received experimental diets.

The room temperature was maintained at 28°C from the first wk after hatching and was subsequently gradually reduced to 22°C at 40 d of age, after which no heat was provided.

Measurements and analytical methods

The physical characteristics of the experimental diets are shown in Table 2. Particle size was measured using successive sieves of decreasing mesh on dry material for sorghum whole seeds or wet material for the complete pelleted diet and protein-rich pellets (Lebas and Lamboley, 1999).

Table 1. *Ingredients and chemical composition of the experimental diets*

	Groups ^I		
		M	
<i>Item</i>	C	SWS	PRP
<i>Ingredients (g/kg)</i>			
Sorghum	500	1000	-
Wheat	200	-	400
Rapeseed meal	105	-	208
Sunflower meal	87	-	175
Soybean meal	45	-	89
Dicalcium phosphate	20	-	40
Calcium carbonate	18	-	37
Extruded soybean	13	-	27
Vitamin ²	5	-	10
Methionine	3	-	5
Lysine	2	-	5
Salt	2	-	4
<i>Nutrients levels (% raw material except AMEn)</i>			
CP	16.0	8.8	23.2
Fat	2.6	2.6	2.6
Cellulose	5.2	2.1	8.3
Ash	6.4	1.2	11.5
Phosphorus	0.4	0.1	0.8
Calcium	1.4	0.0	2.8
Lysine	0.9	0.2	1.5
Methionine	0.5	0.2	0.9
Methionine+Cystine	0.8	0.3	1.3
Threonine	0.6	0.3	0.8
AMEn (MJ/ kg)	11.70	13.61	11.55

¹ C: control diet (complete pelleted diet); M: mixed diet containing 500g/kg of sorghum whole seeds (SWS) and 500g/kg of protein-rich pellets (PRP).

² Vitamins, A: 10,000 UI/kg; D3: 3,000 UI/kg; E: 30.0 UI/kg; B1: 2.0 mg/kg; K3: 1.5 mg/kg; Cholin: 500 mg/kg.

Birds were individually weighed weekly from 42 to 98 d after 18h of fasting. Mortality was recorded daily. Feed intake per pen was measured daily from 42 to 48 d, and every three d from 49 d to the end of the growing period (98 d).

Behavior was monitored inside the poultry building from 42 to 98 d using the scan sampling method adapted from Jordan et al. (2010). The observer stood in front of the pen at a distance of approximately 2m, behind a tarpaulin sheet installed at the beginning of the experiment. The observer entered the building about 10 minutes before the beginning of behavior recording to avoid disturbing the geese during measurement.

Scan sampling was conducted by one observer every d from 42 to 55 (ad libitum access to the diet) and every two d from 56 to 98 (controlled access to food). Behavior was recorded at 3 h intervals during the outdoor access and every hour during the period of controlled access to food. For each measurement, the number of geese lying, feeding, drinking, and simply standing still was recorded. The number of geese outside the building (from 42 to 55 d only) was calculated by difference.

Statistical Analysis

All data were analyzed using PASW Statistics 18 (version 18.0.2, SPSS Inc., Chicago, IL). Data for bird performance (body weight, feed conversion ratio (FCR) and feed intake) and physical characteristics of the diets (length and diameter) were analyzed using the GLM procedure including the effect of group in the model (2 levels: C or M). Mortality and data from scan sampling were analyzed using the Chi-square test. The numbers of geese lying or standing inside or outside of the building were pooled together, so that only three behavior patterns were analyzed: feeding, drinking and other. Values of different observations per d were pooled within periods: period 1 from 42 to 55 d (ad libitum feeding access); period 2 from 56 to 62 d (2h+2h feeding access); period 3 from 63 to 70 d (2h feeding access); period 4 from 71 to 94 d (1h feeding access); period 5 from 95 to 97 d (3h feeding access). Effect of group on geese behavior was tested within each of the 5 periods and also for all the 4 periods during which access to food was restricted. The data for feed intake were also pooled by period and analyzed including the effects of period (5 levels: Period 1, Period 2, Period 3, Period 4 and Period 5), group (2 levels: C or M) and their interaction in the model. The group effect and interaction between period and group were not significant and are therefore not reported here. Differences were treated as significant when $P \leq 0.05$.

Results

Physical characteristics of the experimental diets

The length and the diameter of the pellets offered to the birds (complete pellets or protein-rich pellets) were similar in the 2 groups (8 ± 0.2 mm and 3.2 ± 0.1 mm; $P > 0.05$, respectively; Table 2). The proportion of large particles (> 1.0 mm) was higher in the mixed diet (72%) than in the control diet (33%; Table 2) mainly due to the whole sorghum seeds (3.1 ± 0.6 mm) in the mixed diet. Consequently, the proportion of small particles (< 0.5 mm) was less in the mixed diet (23%) than in the complete pelleted diet (51%; Table 2).

Table 2. *Physical characteristics of the experimental diets*

	Groups ¹			SEM	Significance <i>P</i> -value
	C	M			
		SWS	PRP		
Length (mm)	8.2	-	7.8	0.2	0.211
Diameter (mm)	3.1	3.1	3.3	0.0	0.235
<i>Percentage of particles</i>					
4.000 mm mesh	-	-	-		
2.000 mm mesh	-	95	-		
1.000 mm mesh	33	5	44		
0.500 mm mesh	16	-	11		
0.315 mm mesh	7	-	5		
0.1 mm mesh	8	-	5		
< 0.1 mm mesh	36	-	35		

¹ C: control diet (complete pelleted diet); M: mixture diet containing 500g/kg of sorghum whole seeds (SWS) and 500g/kg of protein-rich pellets (PRP).

Feed intake

From 42 to 55 d of age, when birds had ad libitum access to feed, intake was similar in both groups (390g/d, $P > 0.05$; Table 3). However during the d following a change in the duration of access to the feeder, intake was always higher in the M than in the C group (+12% from 56 to 57d, and +13% from 63 to 66 d; $P < 0.05$; and +23% from 95 to 97 d; $P < 0.01$). This was also observed from 77 to 80 d (+12%; $P < 0.05$).

Table 3. Individual feed intake during the experimental period (g/d except for the total period)¹

Period	Feeding access	Groups ²		SEM	Significance
		C	M		P-value
42 d	Ad libitum	339	330	3	0.407
43 d	Ad libitum	482	465	6	0.457
44 d	Ad libitum	485	479	11	0.460
45 d	Ad libitum	444	439	6	0.121
46 to 48 d	Ad libitum	286	285	4	0.489
49 to 50 d	Ad libitum	454	442	7	0.604
51 to 52 d	Ad libitum	403	408	6	0.975
53 to 55 d	Ad libitum	245	247	4	0.760
56 to 57 d	2h+2h	224	250	6	0.025
58 to 59 d	2h+2h	270	278	5	0.480
60 to 62 d	2h+2h	272	284	6	0.443
63 to 66 d	2h	176	198	5	0.031
67 to 70 d	2h	210	226	5	0.321
71 to 73 d	1h	203	197	13	0.100
74 to 76 d	1h	233	206	13	0.292
77 to 80 d	1h	219	245	5	0.045
81 to 84 d	1h	251	261	3	0.182
85 to 88 d	1h	195	214	5	0.113
89 to 90 d	1h	238	238	0	0.999
91 to 94 d	1h	215	214	0	0.292
95 to 97 d	3h	235	288	11	0.002
Total : 42 to 97 d (g)		13968	14480	160	0.112

¹ The individual feed intake was calculated from the intake per pen (n = 6 pens/group) and the numbers of birds in the pen during the observation period (21 birds per pen at the beginning of the experimental period).

² C: control (complete pelleted diet); M: mixed diet (in this group, the diet offered contained 500 g/kg of protein-rich pellets and 500 g/kg of sorghum whole seeds).

Over the whole period, the feed intake was similar in both groups (NS). Feed intake was greatly influenced by the access time to the feed: 390 g/d between 42 d and 55 d of age, when the birds had ad libitum access to the diet, against only 223 g/d between 71 d and 94 d of age when the birds had 1 h /d access to the diet ($P < 0.001$; data not shown). During the last 3 d of the rearing period the feed intake increased (261 g/d) with the increased access time to the feed, from 1 to 3 h/d.

Bird growth and mortality

Mortality rate was similar in the two groups throughout the trial (1.60%, $P > 0.05$). Body weight was similar in the two groups from 42 d to 91 d of age (Table 4), but by 98 d it was 3.7 % lower in the C than in the M group ($P < 0.01$).

Between 42 and 49 d of age, ADG was 7 % higher in the C than in the M group ($P < 0.01$). Conversely, between 63 to 70, 77 to 84 and 91 to 98 d of age, it was higher in the M than in the C group (+233%; +25% and +62.5% respectively; $P < 0.05$). Averaged over the whole experimental period, it was 9% higher in the M than in C group ($P < 0.05$; Table 4).

Table 4. Live weight and ADG during the experimental period

Item	Groups ¹		SEM	Significance
	C	M		P-value
<i>BW (g)</i>				
42 d	3925	3967	13	0.069
49 d	4707	4697	24	0.712
56 d	5226	5196	28	0.985
63 d	5476	5478	30	0.735
70 d	5448	5501	32	0.316
77 d	5393	5427	33	0.306
84 d	5565	5651	36	0.125
91 d	5524	5649	38	0.074
98 d	5553	5759	38	0.006
<i>ADG (g/d)</i>				
42-48 d	112	104	1	0.006
49-55 d	74	71	2	0.325
56-62 d	35	40	1	0.119
63-69 d	-4	3	1	0.001
70-76 d	-8	-11	1	0.774
77-83 d	21	28	1	0.003
84-90 d	-7	-4	2	0.325
91-98 d	6	16	2	0.013
42-98 d	29	32	1	0.017

¹ C: control (complete pelleted diet); M: mixed diet (in this group, the diet offered contained 500 g/kg of protein-rich pellets and 500 g/kg of sorghum whole seeds).

Between 42 to 49 and 42 to 56 d of age, the FCR, was higher in the M than in the C group (+5% and +6% respectively, $P < 0.05$). However after 56 d the group did not influence the FCR. Averaged over the experimental period, there was no significant difference in the FCR between groups (8.34; $P > 0.05$, Table 5).

Table 5. Feed conversion ratio¹ (FCR) during the experimental period

Period	Groups ²		SEM	Significance
	C	M		P-value
42 to 49 d	4.07	4.28	0.05	0.034
42 to 56 d	3.98	4.22	0.06	0.031
42 to 63 d	4.21	4.36	0.04	0.158
42 to 70 d	5.17	5.26	0.06	0.427
42 to 77 d	6.38	6.50	0.11	0.853
42 to 84 d	6.76	6.84	0.08	0.774
42 to 91 d	7.69	7.66	0.09	0.941
42 to 98 d	8.53	8.15	0.13	0.168

¹ FCR per bird was determined using individual live weight and feed intake per pen. ² C: control (complete pelleted diet); M: mixed diet (in this group, the diet offered contained 500 g/kg of protein-rich pellets and 500 g/kg of sorghum whole seeds).

Goose behavior

The form of diet presentation had no effect on the geese's feeding behavior, regardless of the period ($P > 0.05$; Table 6). On average, during the ad libitum feeding access, only 1% and 3% of the birds were feeding and drinking respectively during the observation, while 96% behaved in other ways (lying or standing inside the building or being outside the building). During the controlled access to food, 24% of the birds were feeding during the observations while 17% were drinking and 59% behaved otherwise (lying or standing inside the building). However the frequency of different forms of behavior widely differed between periods in both groups ($P < 0.001$). Indeed, the percentage of birds feeding increased when the daily access time to the feed decreased: from 14% when birds had 2h+2h access to the feed (Period 2) to 40% when the birds had only 1 h of daily access to the feed (Period 4).

Table 6. Frequency of birds feeding, drinking and behaving in other ways (%) by period (scan sampling) and group during the experimental period

	Groups ^A		Group effect
Item	C	M	P-value
Period ^B			
Ad libitum feeding access			
Period 1			
Feeding	1	1	0.950
Drinking	2	3	
Other behavior ^C	97	96	
Controlled access to food			
Period 2			
Feeding	14	15	0.997
Drinking	19	16	
Other behavior ^D	69	69	
Period 3			
Feeding	20	20	0.874
Drinking	16	14	
Other behavior ^D	64	66	
Period 4			
Feeding	41	40	0.939
Drinking	21	20	
Other behavior ^D	38	40	
Period 5			
Feeding	24	26	0.879
Drinking	18	15	
Other behavior ^D	58	59	
Total : period 2 to 5			
Feeding	24	24	0.961
Drinking	18	16	
Other behavior ^D	58	60	
Period effect (P-value)	< 0.001	< 0.001	

^A C: control (complete pelleted diet); M: mixed diet (in this group, the diet offered contained 500 g/kg of protein-rich pellets and 500 g/kg of sorghum whole seeds).

^B Period 1: 42 to 55 d (ad libitum feeding access); Period 2: 56 to 62 d (2h+2h feeding access); Period 3: 63 to 70 d (2h feeding access); Period 4: 71 to 94 d (1h feeding access) ; Period 5: 95 to 97 d (3h feeding access).

^C Percentage of geese lying and standing inside the building or being outside the building

^D Percentage of geese lying and standing inside the building

Discussion

In this work, sorghum was used to study the influence of form of diet presentation on food behavior and performance of growing geese. The results showed that i) the form of diet presentation influences feed intake throughout the rearing period and body weight at the end of the rearing period; and ii) feeding behavior changes throughout the rearing period, mainly due to changes in the access time to the feeder, but was not influenced by the form of diet presentation.

In this trial the geese switched from a starter diet to the experimental diet, in the form of pellets or a loose mixture, at 42 d of age. We observed no effect of the form of diet presentation on feed intake at the beginning of the experiment. This result agrees with those of Arroyo et al. (2012a). On the other hand, Arroyo et al. (2012b) previously observed a lower feed intake in geese switched from a pelleted feed to a loose-mixture diet. This difference could be explained by the maturity of the birds at the moment of the dietary change. Indeed, heavy birds, as in the present study and that of Arroyo et al. (2012a; 3950 g and 4550g, respectively), may be less sensitive than light ones (3180 g; Arroyo et al., 2012b) to a change in the dietary presentation.

We found that the feeding program, mainly the access time to the feed, affected the geese's behavior. Indeed, the rearing of geese for fatty liver production should prepare the birds for a high feed intake over a short period during the overfeeding period. A restricted access time to the feed aims to enlarge the volume of the birds' crops (Guéméné and Guy, 2004). Our results show that the feeding program modified behavior during each stage of the rearing period. A restricted access to the diet greatly decreased the feed intake and stabilized the weight gain but, as expected, it enables geese to eat 220 g of feed in 1 hour. As a consequence, scan-sampling showed a big increase in the feeding pattern frequency when the access time to the feeder decreased. The goose is a gregarious bird whose food intake is influenced by group behavior. Thus, social facilitation (Clayton, 1978) and allelomimetic feeding behavior (Hughes, 1971, Keeling and Hurnik, 1996), i.e. increasing the frequency or intensity of response or initiation of specific responses due to the presence of other animals engaged in a behavior, may lead to a consumer or conversely to group neophobia towards food (Nielsen, 2004). Feeding behavior depends on the different interacting perceptions and also on the experience of the bird.

The form of diet presentation influenced the feed intake when access time to the feed changed. Intake of feed was higher when presented as a loose mixture compared to complete pelleted diet each time the access time to the feed was reduced. Similar results were previously observed by Arroyo et al. (2012a). Such a result suggested a higher palatability of loose mixture compared to complete pellets as previously shown by Arroyo et al. (2012b). The determination of food intake is not well known in geese (Marcilloux and Auffray, 1981). However, Bouvarel et al. (2010) reported two types of food intake regulation in poultry: long-term, intake is centrally controlled by feedback loops with peripheral tissues to ensure energy balance, protein homeostasis and homeothermy; short-term, it is regulated by the need to limit the size of the food ingested, and ensure regular energy and nutrient intake. Therefore, ingestion involves short-term sensory signals (< min) from the gastrointestinal tract. Of these, visual and tactile abilities are particularly used by the birds to enjoy their food. These results suggest that in the short term, when access time to the feed is reduced, geese preferred the loose-mixture feed as indicated by their higher feed intake. However in the medium term they adjusted their intake to their nutritional needs and soon feed intake was no longer influenced by the form of diet presentation.

In conclusion, this study showed an influence of the form of diet presentation on goose feed intake, especially during the changes of timing of access to the feed, which lead to higher body weights at the end of the rearing period. Therefore, a loose-mix feeding system, such as a mixture of sorghum whole seeds and protein-rich pellets, offers interesting prospects for a more sustainable rearing method. Indeed, it could reduce the economic and environmental costs of goose feeding associated with grinding and transporting the cereal.

Acknowledgements

The authors thank the staff of the Goose Breeding Station (Dordogne, France) for their excellent supervision of this study.

References

- Altmann, J. 1974. Observational study of behaviour: sampling methods. *Behaviour*. 49: 227-267.
- Arroyo, J., A. Auvergne, J.P. Dubois, F. Lavigne, M. Bijja, C. Bannelier, and L. Fortun-Lamothe. 2012a. Effects of presentation and type of cereals (corn or sorghum) on performance of geese. *Poult. Sci.* 91:2063-2071.
- Arroyo, J., A. Auvergne, J.P. Dubois, F. Lavigne, M. Bijja, and L. Fortun-Lamothe. 2012b. Influence of feeding sorghum on the growth, gizzard development and carcass traits of growing geese. *Animal* 6: 1583-1589.
- Boggia, A., L. Paolotti, and C. Castellini. 2010. Environmental impact evaluation of conventional, organic and organic-plus poultry production systems using life cycle assessment. *World's Poultr. Sci. J.* 66:95-114.
- Bouvarel, I., S. Tesseraud, and C. Leterrier. 2010. Feed intake in chickens : do not forget short-term regulation. *INRA Prod. Anim.* 23:391-404.
- Clayton, D. A. 1978. Social facilitated behaviour. *Q. Rev. Biol.* 53:373-390.
- Dozier, W.A., K. Behnke, M.T. Kidd, and S.L. Branton. 2006. Effects of the addition of roller mill ground corn to pelleted feed on pelleting parameters, broiler Performance, and intestinal strength. *J. Appl. Poultry Res.* 15:236–244.
- Gabriel, I., S. Mallet, M. Leconte, A Travel, and J.P. Lalles. 2008. Effects of whole wheat feeding on the development of the digestive tract of broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 142:144-162.
- Guéméné, D., and G. Guy. 2004. The past, present and future of force-feeding and “foie gras” production. *World's Poultr. Sci. J.* 60:210-222.
- Henuk, Y.L., and J.G. Dingle. 2002. Practical and economic advantage of choice feeding systems for laying poultry. *World's Poult. Sci. J.* 58:199–208.
- Hughes, B.O. 1971. Allelomimetic feeding in the domestic fowl. *Br. Poult. Sci.* 12:359-366.
- Jordan, D., M. Umar Faruk, P. Lescoat, M.N. Ali, I. Štuhec, W. Bessei, and C. Leterrier. 2010. The influence of sequential feeding on behaviour, feed intake and feather condition in laying hens. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 127:115-124.
- Keeling, L.J., and J.F. Hurnik. 1996. Social facilitation acts more to the appetitive than the consummatory phase of feeding behavior in domestic fowl. *Anim. Behav.* 52:11-15.
- Lebas, F., and B. Lamboley. 1999. Liquid phase sifting determination of the size of particles contained in pelleted rabbits feeds. *World Rabbit Sci.* 7:229-235.

- Leprettre, S., R. Babilé, A. Auvergne, J.P. Dubois, H. Manse, and M. Verdier. 1997. Feed restriction in Landese geese breeding: influences on growth and carcass composition during the growing period and after force-feeding. Pages 569–574 in Proc. 11th European Waterfowls Symposium. World Poultry Science Association, Nantes, France.
- Lu, J., X.L. Kong, Z.Y. Wang, H.M. Yang, K.N. Zhang, and J.M. Zou. 2011. Influence of whole corn feeding on the performance, digestive tract development, and nutrient retention of geese. *Poult. Sci.* 90:587-594.
- Marcilloux, J.C., and P. Auffray. 1981. Feeding pattern of the Landes goose. *Reprod. Nutr. Develop.* 737-748.
- Mirghelenj, S.A., and A. Golian. 2009. Effects of feed form on development of digestive tract, performance and carcass traits of broiler chickens. *J. Anim. Vet. Adv.* 8:1911-1916.
- Nielsen, B.L. 2004. Behavioural aspects of feeding constraints: do broilers follow their gut feeling ? *Appl. Anim. Behav. Sci.* 86:251-260.
- National Research Council. 1994. Nutrient requirement of poultry. 9th rev. ed. Natl Acad. Press, Washington, DC.
- Noirot, V., I. Bouvarel, B. Barrier-Guillot, J. Castaing, J.L. Zwick, and M. Picard. 1998. Whole cereal grains in broiler nutrition : the come back ? *INRA Prod. Anim.* 11:349-357.
- Petrie, S.A., and V. Petrie. 1998. Activity budget of breeding white-faced whistling-ducks during winter and spring in northern Kwazulu-Natal, South Africa. *J. Wildl. Manag.* 62:1119-1126.
- Umar Faruk, M., I. Bouvarel, M. Meme, N. Rideau, L. Roffidal, H.M. Tukur, D. Bastianelli, Y. Nys, and P. Lescoat. 2010. Sequential feeding using whole wheat and a separate protein-mineral concentrate improved feed efficiency in laying hens. *Poult. Sci.* 89: 785–796.
- Yo, T., P.B. Siegel, J.M. Faure, H. Guerin, and M. Picard. 1998. Self-selection of dietary protein and energy by broilers grown under a tropical climate: adaptation when exposed to choice feeding at different ages. *Poult. Sci.* 77: 502-509.
- Yo, T., P.B. Siegel, H. Guerin, and M. Picard. 1997. Self-selection of dietary protein and energy by broilers grown under a tropical climate: effect of feed particle size on the feed choice. *Poult. Sci.* 76: 1467-1474.

II. Chapitre 2. Etude la substitution du maïs par du sorgho pendant le gavage (Essais 4 et 5)

1. Essai 4 - Etude des modalités pratiques d'incorporation du sorgho dans la pâtée de gavage.

1.1. Objectifs

L'essai réalisé avait pour but d'étudier l'influence du niveau et de la forme de présentation du sorgho dans la pâtée de gavage sur les performances des oies.

1.2. Déroulement de l'essai

264 jars (type Maxipalm[®]) ont été divisés en 3 groupes (n = 88 chacun) différant par le taux (la moitié ou la totalité) et la forme (farine ou graines entières) de sorgho inclus dans la pâtée de gavage (99 et 115 jours d'âge) : 405 g de graines entières de maïs jaune / kg et 560 g de farine de sorgho / kg (groupe F) ; 405 g de graines entières de sorgho / kg et 560 g de farine de maïs jaune / kg (groupe W) ; ou 405 g de graines entières de sorgho / kg et 560 g de farine de sorgho / kg (groupe FW). Tous les oiseaux ont été pesés avant la période de gavage. La quantité de céréales distribuée et la mortalité ont été mesurées de 99 à 115 jours. Après la période de gavage, les oiseaux ont été abattus après 10 heures de jeûne pour mesurer le poids, la couleur et le classement commercial des foies gras.

1.3. Principaux résultats

Malgré une quantité d'aliment distribué pendant la période de gavage similaires à celle des autres groupes (13 220 g ; $P > 0,05$), les oiseaux du groupe FW ont eu un indice de consommation plus faible et un foie gras plus lourd que les oiseaux du groupe F (respectivement -4% et +8%, $P < 0,05$). Une telle différence a pénalisé la classification commerciale des foies gras (42% vs. 24% dans la classe « tout venant » respectivement dans le groupe FW et F, $P < 0,001$). De plus, l'intensité de la couleur jaune était plus forte dans le foie gras des oiseaux gavés avec des graines de maïs jaune que dans ceux issus d'animaux gavés avec du sorgho (+4% et +22% respectivement dans le groupe F par rapport aux groupes W et FW, $P < 0,005$).

Ces résultats suggèrent que le gavage des oies avec une pâtée contenant uniquement du sorgho est faisable. Cette pratique augmente les performances pondérales des foies gras mais diminue leur valeur commerciale et l'intensité de leur couleur jaune.

1.4. Publication n°4

Influence of amount and form of sorghum in the diet on the performance of overfed geese

J. Arroyo^{1,2,3,4}, A. Auvergne^{1,2,3}, J. P. Dubois⁴, F. Lavigne⁴, M. Bijja⁴ and L. Fortun-Lamothe^{2,1,3}

¹ *Université de Toulouse INPT ENSAT, UMR 1289 TANDEM, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France*

² *INRA, UMR1289 TANDEM, F-31326 Castanet-Tolosan, France*

³ *Université de Toulouse INPT ENVT, UMR1289 TANDEM, F-31076 Toulouse, France*

⁴ *ASSELDOR, Station d'expérimentation appliquée et de démonstration sur l'oie, La Tour de Glane, 24420 Coulaures, France*

Submitted on ANIMAL

(Received 24 September 2012)

Abstract

The aim of this trial was to study the influence of the amount and form of sorghum on the performance of overfed geese. 264 ganders (type Maxipalm[®]) were divided into 3 groups of 88 birds, differing in the level and form (flour or whole grain) of sorghum included in the diet given during the overfeeding period (99 to 115 days of age): 405 g of whole yellow maize grain/kg and 560 g of sorghum flour /kg (F group; nitrogen-corrected apparent metabolizable energy, AMEn 18.58 MJ/kg, CP 73.0 g/kg); 405 g of whole sorghum grain/kg and 560 g of yellow maize flour /kg (W group; AMEn 18.57 MJ/kg, CP 72.0 g/kg); or 405 g of whole sorghum grain/kg and 560 g of sorghum flour /kg (FW group; AMEn 18.60 MJ/kg, CP 78.0 g/kg). All birds were weighed at the beginning and end of the overfeeding period. The amount of cereal given and bird mortality were measured from 99 to 115 days. After the overfeeding period, the birds were slaughtered after 10 hours of fasting to record the weight and colour of the fatty livers and the commercial grading of the fatty livers on a 3-point scale. In spite of a similar total amount of food given (13,220 g; $P > 0.05$), the birds of the FW group had a lower feed conversion ratio and heavier fatty livers than birds of the F group (-4% and +8%, respectively; $P < 0.05$). This difference reduced the commercial grading of the fatty livers (42% and 24% in Class 2 in FW and F group, respectively; $P < 0.001$). The intensity of yellow colour was higher in fatty liver from birds overfed with whole yellow maize grain than with whole sorghum grain (+4% and +22% in F compared to W and FW groups, respectively; $P < 0.005$). The results suggest that overfed the geese with a diet containing only sorghum is an interesting feeding strategy because it increased the performance of birds, but it needs to be further studied to limit the detrimental effects on the commercial grading of the fatty liver.

Keywords: goose, sorghum, fatty liver, overfeeding

Implications

Feeding has high economic and environmental costs in poultry production. The present work showed that overfed geese with sorghum is feasible. Moreover, a diet composed largely of sorghum during overfeeding increased the weight of “foie gras” and reduced the feed conversion ratio of the geese. Such a feeding strategy offers interesting prospects for a more sustainable “foie gras” production system. Indeed, it could reduce the environmental impact of goose feeding while improving the flexibility of breeding systems, making it possible to use a cereal other than maize for overfeeding. However, such a strategy should be further studied to reduce the detrimental effect on “foie gras” commercial grading.

Introduction

The feeding of waterfowl for “foie gras” production is largely based on the use of maize as an energy source. This cereal is used during the rearing period but mainly during the overfeeding period when maize represents more than 95 % of the raw material included in the diet (Guéméné and Guy, 2004). But the feed represents the largest part of the economic and environmental costs of poultry production (Boggia *et al.*, 2010, Leinonen *et al.*, 2012a and 2012b) and the use of a single energy source reduces the flexibility of systems, imposing the use of a material whose price fluctuates greatly. Hence it seemed interesting to explore the possibility of replacing the maize in the goose diet. Arroyo *et al.* (2012a and 2012b) showed that sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) could be used in goose diets during the growing-finishing period. Sorghum could also be valuable to induce the steatosis of the liver but the use of this cereal during the overfeeding period remains to be studied. It was previously showed that geese must be overfed with a high-energy diet to induce steatosis (Hermier *et al.*, 1999). Previous studies showed that high-protein (soybean; Nir *et al.*, 1972), starchless carbohydrate (fig; Babilé *et al.*, 1998) or fatty ingredients (nut meal; Bouillet-Oudot *et al.*, 2002) are less efficient in inducing steatosis than starchy ingredients. Sorghum, like maize, is rich in starch (64%, Sauviant *et al.*, 2004).

During the overfeeding period, for practical reasons, the diet is generally given as a mixture of 40.5% whole grain and 56% flour (Dubois *et al.*, 2010). Therefore, the aim of this trial was to study the effect of the form of presentation (whole grain or flour) and of the amount (40.5, 56 or 100%, depending on the form) of sorghum in the overfeeding diet on the performance of geese.

Materials and methods

Birds and management conditions

This trial was carried out at the Goose Breeding Station (Coulaures, Dordogne, France). 264 ganders (type Maxipalm[®]) were reared from 1 day to 98 days as described by Arroyo *et al.* (2012a). At 99 days of age, the birds were divided into 3 groups of 88 birds differing in the percentage and form of presentation of the sorghum in the diet offered to birds between 99 and 115 days of age: 405 g of yellow maize whole grain / kg and 560 g of sorghum flour / kg (F group); or 405 g of sorghum whole grain / kg and 560 g of yellow maize flour / kg (W group); or 405 g of sorghum whole grain / kg and 560 g of sorghum flour /kg (FW group). All the diets contained 35g of a vitamin/mineral premix / kg (Table 1).

The birds were allocated to the three groups in order of having mean live weight and weight variability at 99 days similar in each group. 754 g of water / kg was added to the diets before overfeeding. The planned overfeeding programme was previously described by Dubois *et al.* (2010).

The 264 geese were housed in 24 (3x1m) pens, each with 11 geese. Each pen was equipped with drinkers. The room was maintained at a maximum temperature of 20°C and a maximum relative humidity of 90%.

Measurements

The chemical composition of the experimental diets was analyzed by InVivo Labs (Château-Thierry, France) and is shown in Table 1. Briefly, the nitrogen-corrected apparent metabolizable energy (AMEn) was 18.58, 18.57 and 18.60 MJ/kg and the CP content was 73.0, 72.0 and 78.0 g/kg in the diets offered to the F, W and FW groups, respectively. Particle size of the diets was measured using successive sieves with decreasing mesh on the dry material.

Table 1 *Ingredients, chemical composition and physical characteristics of the three experimental diets*

Item	Group ¹		
	F	W	FW
<i>Ingredients (g/kg)</i>			
Sorghum			
Whole grain	-	405	405
Flour	560	-	560
Maize			
Whole grain	405	-	-
Flour	-	560	-
Vitamin and mineral premix ²	35	35	35
<i>Nutrient levels (% of gross matter except AMEn)</i>			
Dry matter	86.9	87.0	86.7
Ash	1.4	1.4	1.2
Organic matter	85.5	85.6	85.5
CP	7.3	7.2	7.8
Cellulose	3.2	3.2	3.4
Fat	3.6	3.6	3.4
Starch	58.1	58.5	57.3
Sugar	1.3	1.4	1.1
Methionine + Cystine ⁴	0.4	0.4	0.3
Lysine ⁴	0.2	0.2	0.2
Threonine ⁴	0.3	0.3	0.3
AMEn (MJ/Kg) ³	18.58	18.57	18.60
<i>Physical characteristics</i>			
> 4.0 mm	41.7	0.3	0.3
2.0 mm	0.5	41.1	40.7
1.0 mm	13.3	21.2	14.4
0.5 mm	26.0	20.9	26.1
0.3 mm	7.6	9.0	7.6
<0.3 mm	10.9	7.5	10.9

¹ F: 405 g of whole maize and 560 g of sorghum flour / kg; W: 405 g of whole sorghum and 560 g of maize flour / kg; FW: 405 g of whole sorghum and 560 g of sorghum flour / kg.

² Vitamin and mineral premix: vitamins, E: 32 UI/kg; B1: 4.00 mg/kg; K3: 2.86 mg/kg and minerals FeSO₄: 55.40 mg/kg; CuSO₄: 15.00 mg/kg; ZnSO₄: 40.00 mg/kg; MnSO₄: 74.00 mg/kg; Ca: 2.13g/kg; Na: 1.44g/kg; P: 0.23g /kg.

³AMEn, nitrogen-corrected apparent metabolizable energy; Calculated from Fisher and McNab (1987).

⁴ Calculated from Sauvant *et al.* (2004).

The proportions of particle sizes were different in the three diets (Table 1) since the proportion of large particles (> 4.0 mm) was higher in the diet offered to the F group than in the other two diets (41.7% vs. 0.3% and 0.3% in F, W and FW groups, respectively) while the proportion of medium-sized particles (between 2.0 and 4.0 mm) was lower in the diet offered to the birds in the F group than in the other groups (0.5% vs. 41.1% and 40.7%, in F, W and FW groups, respectively). The proportion of small particles (< 1.0 mm) was similar in the three groups (42.2%).

Birds were weighed individually at 99 days after 18 hours of fasting, and at 115 days after 10 hours of fasting. During the overfeeding period, the quantity of food given to the birds was measured individually at each meal. Mortality was recorded daily. At 115 days, the birds were slaughtered according to European council regulations (EC) n° 1099/2009.

After carcass evisceration, the liver was removed and weighed. Colour was measured on the cold fatty liver (after 6 h at 7°C) along the ventral face of the large lobe (CR 300 Minolta chromameter, Minolta, Osaka, Japan). The mean of 3 measurements at different sites (top, middle, and bottom of the large lobe) was computed for each liver. A commercial grading was carried out by a person from the industry (Cooperative Sarlat Périgord, Sarlat-la-canéja, Dordogne, France) trained to classify the raw fatty livers according to their potential commercial use. The livers were graded on a 3-point scale: Class 1 corresponded to the best commercial class for livers with no defects, appropriate texture, usually processed as entire-canned livers, Class 2 corresponded to livers with no external defects but too heavy (> 900 g) to be processed as entire-canned livers, and Class 3 livers had several defects in appearance or texture.

Statistical Analysis

Data were analyzed using the GLM procedure of the PASW Statistics18 package program for windows (version 18.0.2, SPSS Inc., Chicago, IL). Performance of geese was analyzed using the 3 experimental groups as the only factor in the model (3 levels: F, W and FW groups). When significant, means between treatments were compared using Duncan's test. The "foie gras" commercial grading and bird mortality during overfeeding periods were analyzed using a χ^2 test. Differences were treated as significant when $P \leq 0.05$.

Results and discussion

The objective of this work was to study the influence of the form of presentation and the proportion of sorghum in the diet on the performance of overfed geese. The results show that the diet containing only sorghum improved the performance of birds as regards feed conversion ratio and fatty liver weight, but reduced the commercial grading and also affected the fatty liver colour, mainly reducing the intensity of lightness and yellow colour.

Firstly, present results showed that overfed the geese with sorghum is feasible. Mortality during the overfeeding period was similar in the three groups ($16/264 = 6.1\%$; $P > 0.05$) and less important than reported in previous experiments using only maize (9.8% ; Arroyo *et al.*, 2012). The BW of birds was similar in the three groups at 99 days (5,584 g, $P > 0.05$; Table 2) and at 115 days of age (8,308 g; $P > 0.05$).

Table 2 Effect of the form of presentation and of the amount of sorghum in the overfeeding diet on the performance of geese during the experimental period (99 to 115 days)

	Groups ¹			SEM	P-value
	F	W	FW		Group
Numbers of birds	88	88	88		
BW at 99 days (g)	5606	5598	5549	27	ns
BW at 115 days (g)	8278	8334	8312	31	ns
Feed intake (g)	13259	13210	13192	16	ns
Average gain (g)	2672	2736	2764	16	ns
Feed conversion ratio	5.00 ^a	4.87 ^{ab}	4.81 ^b	0.03	*

¹ F: 405 g of whole maize and 560 g of sorghum flour / kg; W: 405 g of whole sorghum and 560 g of maize flour / kg; FW: 405 g of whole sorghum and 560 g of sorghum flour / kg.

* $P < 0.05$; ns, $P > 0.05$.

SEM: standard error of the mean.

^{a,b} Within a row, means with no common superscript differed significantly ($P < 0.05$).

In spite of a similar total amount of food distributed (13,220 g; $P > 0.05$; Table 2), the birds of FW group had a feed conversion ratio lower than birds of F group (-4% ; $P < 0.05$; Table 2). Secondly, we found that overfed the geese with sorghum enhanced the liver steatosis since the average weight of fatty liver observed here (1028 g) is higher than reported in previous experiments using only maize (906 g: Fernandez *et al.*, 2003; 858 g: Arroyo *et al.*, 2012a). The SS birds had a heavier fatty liver than the F ones ($+8\%$; $P < 0.05$; Table 3). This resulted in a lower grading of the liver in this group ($P < 0.001$; Table 3). The better performance of birds receiving 100% sorghum rather than a mixture of sorghum and maize

(especially the higher feed conversion ratio and fatty liver weight with the same total quantity of feed) can be explained by the characteristics of maize and sorghum.

Table 3 Effect of the form of presentation and of the amount of sorghum in the overfeeding diet on quality of fatty liver

	Groups ¹			SEM	P-value
	F	W	FW		Group
Number of fatty livers	82	82	84		
Weight of fatty liver (g)	982 ^b	1033 ^{ab}	1069 ^a	12	*
Commercial grading (%) ²					
Class 1	64	50	32		
Class 2	24	41	42		***
Class 3	12	9	26		

¹ F: 405 g of whole maize and 560 g of sorghum flour / kg; W: 405 g of whole sorghum and 560 g of maize flour / kg; FW: 405 g of whole sorghum and 560 g of sorghum flour / kg.

² Class 1: livers with no defects and < 900 g; Class 2: heavy livers (> 900 g) with no external defects; Class 3: livers with several defects in appearance or texture.

*** $P < 0.001$; * $P < 0.05$

SEM: standard error of the mean.

^{a,b} Within a row, means with no common superscript differed significantly ($P < 0.05$).

Firstly, the protein content was higher in sorghum than in maize (Sauvant *et al.*, 2004) and thus higher in the FW diet than in the other diets (+ 8%). Previous studies on geese have shown a higher fatty liver weight when the dietary protein content increased (Nir *et al.*, 1972 and 1973; Bouillet-Oudot *et al.*, 2002). Secondly, the different size of food particles between diets can also partly explain the better performance of FW birds. Indeed, the particle size influences the size of the gizzard (Carré, 2000), and the gizzard is an essential part of the gastrointestinal motility (Duke, 1982 and 1992) and digestive efficiency. However, previous results showed that the effects of particle size on the gut were smaller with sorghum than with whole maize (Lu *et al.*, 2011; Rodgers *et al.*, 2012).

The livers from the F birds were lighter in colour than those from the other two groups (+3%; $P < 0.05$; Table 4). Thus, the intensity of yellow colour was higher in fatty liver from birds fed with yellow maize whole grain than with sorghum whole grain (+4% and +22% in F group compared to W and FW groups, respectively; $P < 0.005$; Table 4). The intensity of the red colour of fatty liver was not affected by the diet. The difference in the colour of the fatty liver from birds of the three groups can be explained by the lower content of carotenoids and vitamin A (0.1 vs. 0.83 10^3 UI/kg) in sorghum than in maize (Sauvant *et al.*, 2004). Indeed,

Fernandez *et al.* (2003) reported higher intensity of lightness and yellow colour (68.5 and 28.4, for L* and b* respectively) in fatty liver from birds fed maize than in the present study.

Table 4 *Effect of the form of presentation and of the amount of sorghum in the overfeeding diet on fatty liver colour*

	Groups ¹			SEM	P-value
	F	W	FW		Group
Number of fatty livers	82	82	84		
<i>Fatty liver colour</i>					
L*	66.5 ^a	64.5 ^b	64.8 ^b	0.2	***
a*	15.7	15.1	15.7	0.1	ns
b*	24.2 ^a	23.4 ^b	19.7 ^c	0.1	***

¹ F: 405 g of whole maize and 560 g of sorghum flour / kg; W: 405 g of whole sorghum and 560 g of maize flour / kg; FW: 405 g of whole sorghum and 560 g of sorghum flour / kg.

*** $P < 0.001$; ns, $P > 0.05$.

SEM: standard error of the mean.

^{a,b,c} Within a row, means with no common superscript differed significantly ($P < 0.05$).

A similar phenomenon was observed in the loss of yellow pigmentation in broiler skin or a reduction in the yolk colour in the eggs (Gualtieri and Rapaccini, 1990) when birds were fed sorghum rather than maize.

Conclusions

Our results show a significant influence of the amount and form of sorghum in the overfeeding diet on the performance of geese. Geese overfed with a diet containing only sorghum performed better. This feeding strategy is promising but needs further study to avoid downgrading of the fatty liver. The economic and environmental impacts of a pure sorghum diet also need to be evaluated.

Acknowledgments

The authors thank the staff of the Goose Breeding Station (Dordogne, France) for the excellent supervision of this study on geese. The authors also thank the staff of the UMR 1289 TANDEM, especially C. Pautot for technical assistance with the analysis of samples.

References

- Arroyo J, Auvergne A, Dubois JP, Lavigne F, Bijja, M, Bannelier C and Fortun-Lamothe L 2012a. Effects of presentation and type of cereals (corn or sorghum) on performance of geese. *Poultry Science* 91, 2063-2071.
- Arroyo J, Auvergne A, Dubois JP, Lavigne F, Bijja M and Fortun-Lamothe L 2012b. Influence of feeding sorghum on the growth, gizzard development and carcass traits of growing geese. *Animal* 6, 1583-1589.
- Babilé R, Chambert S, Everlet P, Auvergne A, and Manse H 1998. Caractérisation des tissus adipeux après gavage des canards au maïs ou au mélange figue-maïs. In 3^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Bordeaux, France, pp. 133-135.
- Boggia A, Paolotti L and Castellini C 2010. Environmental impact evaluation of conventional, organic and organic-plus poultry production systems using life cycle assessment. *World's Poultry Science Journal* 66, 95-114.
- Bouillet-Oudot M, Leprettre S, Dubois JP and Babilé R 2002. Utilisation du tourteau de noix en gavage : incidence sur les produits d'oies grasses. In 5^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Pau, France, pp. 132-135.
- Carré B 2000. Effects of feed particle size on the digestive processes in domestic birds. *INRA Productions Animales* 13, 131-136.
- Duke GE 1992. Recent studies on regulation of gastric motility in turkeys. *Poultry Science* 71, 1-8.
- Duke GE 1982. Gastrointestinal motility and its regulation. *Poultry Science* 61, 1245-1256.
- Dubois JP, Auvergne A, Lavigne F, Fernandez X and Babilé R 2010. Le nouveau guide pratique du gavage. In 9^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Bordeaux, France, pp. 255-258.
- European Union Council Directive 1009/2009/EC 2009. On the protection of animals at the time of slaughter or killing, *Official Journal of European Community* L 303 (2009), pp. 1–30.
- Fernandez X, Leprettre S, Dubois JP, Auvergne A and Babilé R 2003. The influence of current parameters during the water-bath stunning of overfed geese (*Anser anser*) on blood loss and on fatty liver and meat downgrading. *Animal Research* 52, 383-397.
- Fisher C and Mc Nab JM 1987. Techniques for determining the metabolizable energy (ME) content of poultry feeds. In *Recent advances in animal nutrition* (ed. W Haresign and DJA Cole), pp. 3–18. Butterworths, London.

- Gualtieri M and Rapaccini S 1990. Sorghum grain in poultry feeding. *World's Poultry Science Journal* 46, 246-254.
- Guéméné D and Guy G 2004. The past, present and future of force-feeding and “foie gras” production. *World's Poultry Science Journal* 60, 210-222.
- Hermier D, Salichon MR, Guy G, Peresson R, Mourot J, and Lagarrigue S 1999. Hepatic steatosis in waterfowl: metabolic basis and genetic susceptibility. *INRA Productions Animales* 12, 265–271.
- Leinonen I, Williams AG, Wiseman J, Guy J and Kyriazakis I 2012a. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Broiler production systems. *Poultry Science* 91, 8–25
- Leinonen I, Williams AG, Wiseman J, Guy J and Kyriazakis I 2012b. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Egg production systems. *Poultry Science* 91, 26–40.
- Lu J, Kong XL, Wang ZY, Yang HM, Zhang KN and Zou JM 2011. Influence of whole corn feeding on the performance, digestive tract development, and nutrient retention of geese. *Poultry Science* 90, 587-594.
- Nir I, Perek M and Katz Z 1972. The influence of soybean meal supplemented to maize diet of forced-fed geese upon their liver, organ and blood plasma components. *Annales de Biologie Animale Biochimie Biophysique* 12, 77-89.
- Nir I, Nitsan Z and Vax A 1973. The influence of force feeding and of protein supplementation to the diet on the metabolisable energy diets, digestibility of nutrients, nitrogen retention and digestive enzymes output in geese. *Annales de Biologie Animale Biochimie Biophysique* 13, 465-479.
- Rodgers NJ, Choct M, Hetland H, Sundby F and Svihus B 2012. Extent and method of grinding of sorghum prior to inclusion in complete pelleted broiler chicken diets affects broiler gut development and performance. *Animal Feed Science and Technology* 171, 60-67.
- Sauvant D, Perez JM and Tran G 2004. Tables of composition and nutritive value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish, 304pp. INRA Editions, Paris and Wageningen Academic Publishers, the Netherlands.

2. Essai 5 - Influence de la substitution du maïs par du sorgho pendant les phases d'élevage et de gavage sur les performances zootechniques des animaux et sur la qualité des produits.

2.1. Objectifs

Le but de cet essai était d'étudier les effets de la substitution du maïs par du sorgho au cours de la croissance et / ou du gavage sur les performances et la qualité du magret et du foie gras chez les oies.

2.2. Déroulement de l'essai

260 jars (type Maxipalm[®]) ont été divisés en 4 groupes différant par la céréale incluse dans le régime alimentaire distribué au cours de la période de croissance-finition (période G, 2 niveaux : du maïs: C, ou du sorgho : S) et celui utilisé pendant le gavage (période O, 2 niveaux : le maïs ou le sorgho) en utilisant un plan factoriel 2 x 2. Les 4 groupes différaient par le régime alimentaire distribué aux oiseaux entre 44 et 104 jours d'âge (période G) : une alimentation sous forme de granulés contenant 500 g de sorgho / kg (groupes de SS et SC ; EMAn 11,72 MJ / kg, 16,4 % de protéine), une alimentation sous forme granulés contenant 500 g de maïs / kg (les groupes CS et CC; EMAn 11,72 MJ / kg, 16,5 % de protéine) et entre 105 et 120 jours d'âge (période O) : un aliment contenant 967 g de maïs / kg (les groupes SC et CC ; EMAn 18,55 MJ / kg, 6,70 % de protéine) ou 965 g de sorgho / kg (SS et CS ; EMAn 18,60 MJ / kg, 7,80 % de protéine). La quantité de céréale distribuée et la mortalité des oiseaux ont été mesurées quotidiennement entre 105 et 120 jours d'âge. A la fin de la période O, les oiseaux ont été abattus après 10 h de jeûne pour mesurer le poids, la couleur et la composition chimique du foie gras et du magret.

2.3. Principaux résultats

Le poids vif des oies avant la période O (5 597 g, $P > 0,05$) et la quantité de nourriture distribuée pendant le gavage (12 739 g, $P > 0,05$) ont été similaires dans les 4 groupes. La mortalité dans le groupe SC était plus élevée que dans les trois autres groupes (14,29% vs. 3,58%, $P < 0,05$). Après le gavage, les oiseaux nourris avec du sorgho (groupes CS + SS) avaient des foies plus lourds (respectivement 984 g vs. 885 g, $P < 0,001$) et moins jaune (18,03 vs. 23,97 pour b *, $P < 0,001$) que les oiseaux nourris avec du maïs (groupes CC + SC). La substitution totale du maïs par du sorgho au cours des deux périodes (groupe SS) a augmenté le poids du foie gras, mais réduit sa couleur jaune. En revanche, une substitution partielle, c'est-à-dire pendant la période d'élevage seule (groupe SC) a entraîné une augmentation de la mortalité pendant la période de gavage.

Ces résultats suggèrent qu'une substitution totale du maïs par du sorgho est intéressante car elle permet d'augmenter la performance pondérale des foies mais réduit l'intensité de leur couleur jaune. En revanche, un changement de la nature de la céréale utilisée entre les phases d'élevage et de gavage réduit les performances des animaux.

2.4. Publication n°5

Effects of substituting yellow corn by sorghum in goose diet on *magret* and *foie gras* quality

J. Arroyo^{†,‡,§,*}, A. Auvergne^{†,‡,§}, J.P. Dubois^{*}, F. Lavigne^{*}, M. Bijja^{*}, C. Bannelier^{‡,†,§}, H. Manse^{†,‡,§}, L.Fortun-Lamothe^{‡,†,§}

[†]*Université de Toulouse, INPT ENSAT, UMR 1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France*

[‡]*INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France*

[§]*Université de Toulouse, INPT ENVT, UMR 1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème et Métabolisme, 31076 Toulouse, France*

^{*}*ASSELDOR, Station d'expérimentation appliquée et de démonstration sur l'oie, La Tour de Glane, 24420 Coulaures, France*

Submitted on JOURNAL OF ANIMAL SCIENCE

(Received 31 May 2012)

Abstract

The aim of this trial was to study the effects of the substitution of yellow corn by sorghum during the growing and/or the overfeeding periods on the performance, *magret* and *foie gras* quality in geese. 260 ganders (type Maxipalm[®]) were divided into 4 groups differing in the cereal included in the diet given during the growing-finishing period (G period, 2 levels: yellow corn: C, or sorghum: S) and in the cereal used in the diet given during the overfeeding period (O period, 2 levels: yellow corn or sorghum), using a 2 x 2 factorial design. The groups differed in the diet offered to birds between 44 and 104 d of age (G period): a pelleted diet containing 500 g of sorghum/kg (SS and SC groups; AMEn 11.72 MJ/kg, CP 16.4 g/kg) or a pelleted diet containing 500 g of yellow corn/kg (CS and CC groups; AMEn 11.72 MJ/kg, CP 16.5 g/kg) and between 105 and 120 d of age (O period): 967 g of yellow corn/kg (SC and CC groups; AMEn 18.55 MJ/kg, CP 6.70 g/kg) or 965 g of sorghum/kg (SS and CS groups; AMEn 18.60 MJ/kg, CP 7.80 g/kg). Between 105 and 120 d, the amount of cereal offered and bird mortality were measured. At the end of the O period, the birds were slaughtered after 10 h of fasting to measure *foie gras* and breast muscle weight, color and chemical composition. The BW of birds before the O period (5597g, $P > 0.05$) and the amount of food offered during the O period (12739g, $P > 0.05$) were similar for the four groups. The mortality in the SC group was higher than in the other three groups (14.29% vs. 3.58%, $P < 0.05$). After overfeeding, birds fed with sorghum (CS + SS groups) had *foies gras* which were heavier (984g vs. 885g, respectively; $P < 0.001$) and less yellow (18.03 vs. 23.97 for b*, $P < 0.001$) than birds fed with corn (CC + SC groups). The total substitution of yellow corn by sorghum i.e. during both the periods of growing-finishing and overfeeding (SS group) increased the weight of the *foie gras* but altered its color to a paler yellow. In contrast, a partial substitution, i.e. during the rearing period only (SC group) resulted in an increased mortality during the overfeeding period.

Keywords: goose, sorghum, yellow corn, *foie gras*, *magret*, overfeeding

Abbreviations: AMEn: nitrogen-corrected apparent metabolizable energy; FCR: Feed conversion ratio

Introduction

Innovations are needed to improve the sustainability of livestock production systems, i.e. to reduce their environmental impacts while maintaining or increasing their economic viability. The feed represents the greatest part of the economic and environmental costs of poultry rearing (Boggia et al., 2010; Leinonen et al., 2012a,b). Therefore, changing the feeding practices, for example the choice of raw materials, seems one of the promising ways to target the sustainability goal.

Raw materials should be chosen according to their environmental impacts and availability. Widening their range improves the flexibility of systems, avoiding reliance on materials whose prices fluctuate greatly. Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) is a possible candidate: its nutritional characteristics are similar to those of corn (Sauvant et al., 2004) but it is more drought-resistant (Farré and Faci, 2006) and could offer a way of reducing the vulnerability of agriculture to the risk of water shortage (Amigues et al., 2006) and the need for irrigation.

It has not been used in poultry feeding for many years because the seeds of old varieties (NK 272 123 or Sultan) contained condensed tannins, mainly flavonoids (Watterson and Butler, 1963; Bate-Smith, 1969), which reduce the digestibility of the diet and the growth of the birds (Elkin et al., 1996; Nyachoti et al., 1997; Sedghi et al., 2011). Genetic selection programs have reduced the tannin content from 1.5% to 0.06% (Conan et al., 1992) and now sorghum is commonly used in poultry feeding (Gualtieri and Rapaccini, 1990; Nyannor et al., 2007; Selle et al., 2010).

Arroyo et al. (2012a,b) showed that corn could be replaced by sorghum during the growing-finishing period without affecting goose performance. But in *foie gras* production, corn is primarily used during the overfeeding period (Guéméné and Guy, 2004). A partial substitution of corn by proteic (soybean; Nir et al., 1972), starchless glucidic (fig; Babilé et al., 1998) or lipidic ingredients (nut meal; Bouillet-Oudot et al., 2002b) during overfeeding was previously studied. However no study has focused on the total substitution of the corn by another starchy raw material during rearing and overfeeding.

The aim of this work was to study the effects of substitution of yellow corn by sorghum during the growing-finishing and/or overfeeding period on performance and *foie gras* and *magret* qualities in geese.

Materials and methods

Birds and feeding program

This trial was carried out at the Goose Breeding Station (Coulaures, Dordogne, France). 260 ganders (type Maxipalm[®]) were divided into 4 groups differing in the cereal included in the diet given during the growing-finishing period (G period, 2 levels: yellow corn: C, or sorghum: S) and in the cereal used in the diet given during the overfeeding period (O period, 2 levels: yellow corn or sorghum), according to a 2 x 2 factorial design. All birds were fed *ad libitum* with the same complete pelleted diet (AMEn 11.70 MJ/kg, minimum of CP 18.00 g/kg; manufactured by Sanders Centre Auvergne, France) from 1 to 43 d. The groups differed in the diet offered to birds between 44 and 104 d of age (growing-finishing period, G): a pelleted diet containing 500 g of sorghum/kg (SS and SC groups; AMEn 11.72 MJ/kg, CP 16.4 g/kg; n=65 each) or a pelleted diet containing 500 g of yellow corn/kg (CS and CC groups; AMEn 11.72 MJ/kg, CP 16.5 g/kg; n=65 each) and between 105 and 120 d of age (overfeeding period, O): 967 g of yellow corn/kg (SC and CC groups; AMEn 18.55 MJ/kg, CP 6.70 g/kg) or 965 g of sorghum/kg (SS and CS groups; AMEn 18.60 MJ/kg, CP 7.80 g/kg). The overfeeding diets were in the form of a mixture of 42% of whole grain and 58% of ground grain. Water was added (667 or 754 g/kg to the corn and sorghum diet respectively) before overfeeding. The amount of water added was higher in the sorghum than in the corn diet to permit easy overfeeding of both groups in spite of a lower water holding capacity of the corn-based mixture. The composition of the experimental diets is shown in Table 1. The diets used during the rearing period met NRC requirements (NRC, 1994). On the other hand, the diets used during the overfeeding period were highly energetic to induce the steatosis of the liver (Hermier et al., 1999; Cazeils, 2000).

The feeding program of growing geese was intended to prepare the birds for overfeeding (Guéméné and Guy, 2004) and adapted from Arroyo et al. (2012a). For this purpose, feed was distributed *ad libitum* from 1 to 57 d of age and restricted from 58 to 104 d, to progressively adapt them to take in large amounts of food in a short period: 4 h/d (2 h in the morning and 2 h in the afternoon) from 58 to 70 d, 2 h/d from 71 to 100 d and 3 h/d from 101 to 104 d of age.

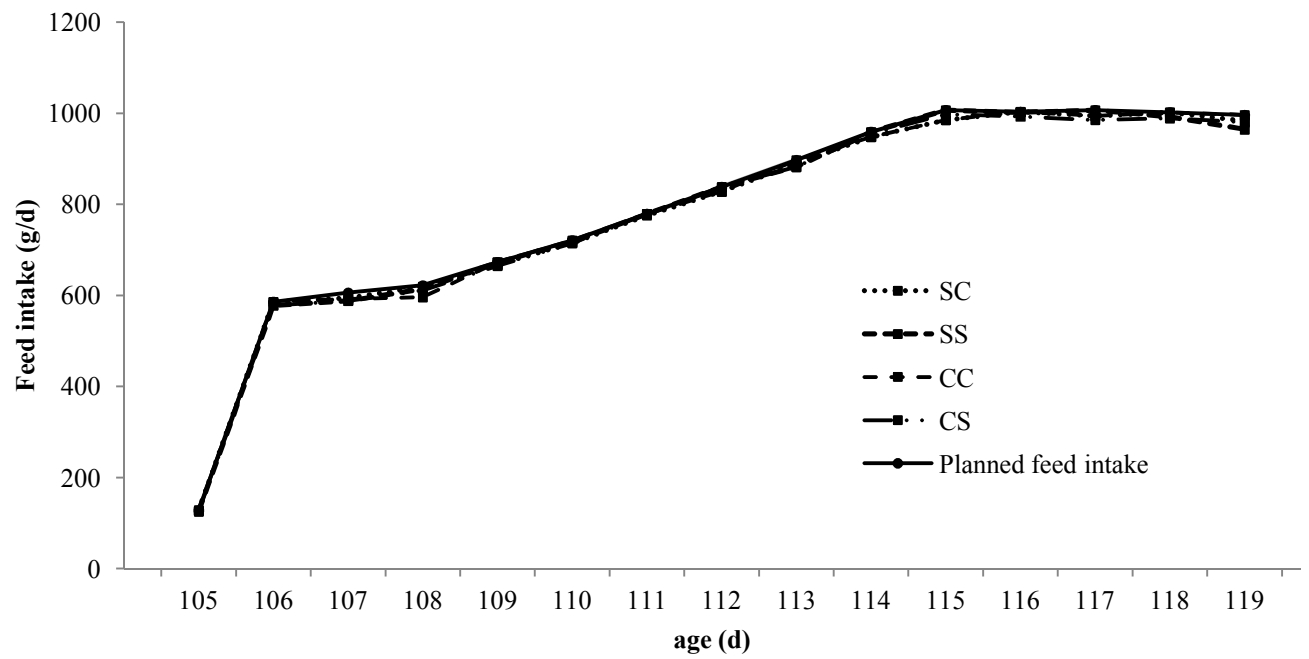


Figure 1. Planned (circles) and real (squares) feed intake in birds overfed with corn or sorghum

Table 1. *Ingredients of the experimental diets*

Ingredients (g/kg)	Growing-finishing diet		Overfeeding diet	
	Corn	Sorghum	Corn	Sorghum
Corn	500.0	-	966.7 ³	-
Sorghum	-	500.0	-	964.9 ⁴
Wheat	162.5	193.2	-	-
Soybean meal	145.0	117.5	-	-
Wheat middling	120.0	120.0	-	-
Rapeseed meal	30.0	30.0	-	-
CaCO ₃	18.0	15.0	-	-
Dicalcium phosphate	13.0	13.0	-	-
Vitamin and mineral premix	3.0 ¹	3.0 ¹	33.3 ²	35.1 ²
NaCl	2.0	2.0	-	-
Additive	2.0	2.0	-	-
Methione	1.7	1.9	-	-
Lysine	1.3	1.4	-	-
Calcium carbonate	1.0	1.0	-	-
Threonine	0.5	-	-	-

¹ Vitamin and mineral premix for growing-finishing diet: vitamins, A: 9,990 UI/kg; D3: 1,998 UI/kg; E: 10 UI/kg; B1: 2.0 mg/kg; K3: 1.0 mg/kg; B2: 2.5 mg/kg; B5: 5.1 mg/kg; B6: 1.0 mg/kg; PP: 24.9 mg/kg; B9: 0.3 mg/kg; Cholin: 300 mg/kg. Oligo elements, Cu: 9.3 mg/kg; Fe: 29.0 mg/kg; I: 0.99 mg/kg; Co: 0.16 mg/kg; Mn: 70 mg/kg; Zn: 47 mg/kg; Se: 0.20 mg/kg; Clay (sepiolite): 2 g/kg. ² Vitamin and mineral premix for overfeeding diet: vitamins, E: 32 UI/kg; B1: 4.00 mg/kg; K3: 2.86 mg/kg and minerals FeSO₄: 55.40 mg/kg; CuSO₄: 15.00 mg/kg; ZnSO₄: 40.00 mg/kg; MnSO₄: 74.00 mg/kg; Ca: 2.13g/kg, Na: 1.44g/kg; P: 0.23g /kg. ³420 g corn /kg as whole grains and 580 g corn /kg as ground meal; ⁴420 g sorghum /kg as whole seeds and 580 g sorghum /kg as ground meal.

Table 2. Chemical composition and particle size of the experimental diets

	Growing-finishing diet		Overfeeding diet	
	Corn	Sorghum	Corn	Sorghum
<i>Nutrients levels (% of gross matter)</i>				
DM	87.8	87.4	87.2	86.7
Ash	5.3	6.0	1.6	1.2
OM	82.5	81.4	85.6	85.5
CP	16.6	16.5	6.7	7.8
Cellulose	5.0	4.7	3.0	3.4
Fat	3.2	2.3	3.8	3.4
Starch	43.4 ²	43.7 ²	59.3	57.3
Sugar	3.7	3.6	1.6	1.1
Methionine + Cystine	0.5	0.6	0.2	0.2
Lysine	0.8	0.8	0.3	0.3
Threonine	0.6	0.6	0.5	0.2
Aspartic acid	1.5	1.3	0.4	0.4
Serine	0.8	0.7	1.5	2.0
Glutamic acid	3.3	3.1	0.3	0.3
Glycine	0.7	0.7	0.6	0.9
Alanine	0.8	0.9	0.4	0.5
Valine	0.8	0.8	0.3	0.4
Isoleucine	0.7	0.6	1.0	1.3
Leucine	1.4	1.3	0.3	0.4
Tyrosine	0.6	0.5	0.4	0.5
Phenylalanine	0.8	0.7	0.2	0.2
Histidine	0.4	0.4	0.4	0.2
Arginine	1.0	0.9	0.4	0.4
Proline	1.1	1.1	0.8	0.8
¹ AMEn (MJ/Kg)	11.72	11.72	18.55	18.60
<i>Particle size (%)</i>				
4.000 mm mesh	0.0	0.0	47.69	0.31
2.000 mm	0.0	0.0	0.85	46.47
1.000 mm	51.40	55.36	18.07	13.16
0.500 mm	8.16	9.64	18.72	23.44
0.315 mm	4.01	2.96	8.01	6.85
<0.315 mm	36.43	32.04	6.66	9.77

¹AMEn, nitrogen-corrected apparent metabolizable energy; Calculated from Fisher and McNab (1987). ² Calculated from Sauvant et al. (2004).

Housing and management conditions

From 1 to 104 d, the 260 birds of the experiment were housed in 2 pens of 150m² containing 600 birds (300 males and 300 females). In one pen the birds were fed the sorghum-based diet, while in the other they received the one containing corn from 44 to 104 d. At 105 d, 130 males were chosen in each pen so that their BW was representative of the BW variability within each pen. Half of them were overfed with sorghum; the other half were overfed with yellow corn.

During the growing period the pens were equipped with drinkers, feeders and outdoor access (1ha/group). The geese had outdoor access between 0700 and 1800 h from 41 to 104 d of age. The room temperature was maintained at 28°C from the first week after hatching and was subsequently gradually reduced to 22°C at 40 d of age, after which no heat was provided.

During the overfeeding period the 260 geese were divided in 26 pens (3x1m for 10 geese). Each pen was equipped with drinkers. The room was maintained at a temperature of <20°C and a relative humidity of <90%.

Measurements and analytical methods on the experimental diets

The chemical composition of the experimental diets was analyzed by InVivo Labs (Château-Thierry, France) and is shown in Table 2. The fatty acid composition of corn and sorghum, shown in Table 3, was determined by gas chromatography (Agilent 6890N, equipped with a model 7683 auto injector, Network GC System, Palo Alto, CA and with a fused silica capillary column 100 m × 0.25 mm ID, 0.20 µm film thickness; PSil88, Varian, Middelburg, the Netherlands) after transmethylation (Morrison and Smith, 1964) according to Zened et al. (2011). Particle size was measured using successive sieves of decreasing mesh on the wet material for the pelleted diets given during the growing-finishing period, or on the dry material for the diet given during the overfeeding period (Lebas and Lambole, 1999).

Table 3. *Fatty acid composition (%) of corn and sorghum used in the experimental diet*

	Corn	Sorghum
C-8:0	0.13	0.16
C-16:0	14.96	15.26
C-16:1	0.08	0.42
C-17:0	0.13	-
C-18:0	1.99	1.36
C-18:1 ω 9	24.98	32.08
C-18:1 ω 11	0.90	1.54
C-18:2	54.07	44.87
C-18:3	1.52	2.20
C-20:1	0.21	0.38
Unidentified fatty acids	1.03	1.73

Measurements and analytical methods on birds

Birds were weighed individually at 44, 71 and 105 d after 18h of fasting, and at 120 d after 10 h of fasting. The individual feed intake between 44 and 104 d was calculated from the intake per pen (n=1 pen/group) and the number of birds in the pen during the observation period.

The planned overfeeding program was previously described by Dubois et al. (2010) and is shown in Figure 1. The actual quantity of food given to the birds was measured individually for each meal. Mortality was recorded daily. At 120 d, the birds were killed according to the European council regulations (EC) n° 1099/2009.

Sampling and analysis of Muscle and Meat

Carcasses were eviscerated 20 min postmortem, after scalding and plucking. The sampling of muscle was carried out as described by Fernandez et al. (2011). The entire right and left *magret* (i.e. breast muscle and skin) were cut according to the commercial standards and weighed. Then the color was measured on the muscle using the trichromatic CIE Lab coordinates system (L*, a*, b*), using a CR 300 Minolta chromameter (Minolta, Osaka,

Japan). A 8 ± 3 g sample of the pectoralis major muscle of the right *magret* was taken from the part of muscle, dissected from all visible fat and connective tissue, and immediately frozen in liquid nitrogen and stored at -20°C until chemical analysis. After being weighed, the left *magret* was salted for 12 h, rinsed and then dried for 3 weeks. After this process, the yield of dried left *magret* was measured.

Sampling and analysis of foie gras

After carcass evisceration, the liver was removed and weighed. The sampling of *foie gras* was carried out as described by Fernandez et al. (2011). A 50 ± 10 g sample of liver was taken from the central part of the large lobe. This sample was immediately frozen in liquid nitrogen and stored at -20°C until chemical analysis. The livers were then stored for 5-6 h in a chilling room at 7°C .

Color was measured in the cold *foie gras* along the ventral face of the large lobe (CR 300 Minolta chromameter, Minolta, Osaka, Japan). The average of 3 measurements at different sites (top, middle, and bottom of the large lobe) was computed for each liver.

A commercial grading was carried out by a specialist from the industry (Cooperative Sarlat Périgord, Sarlat-la-canéja, Dordogne, France), trained to classify raw *foies gras* according to their potential commercial use. The livers were graded on a 3-point scale: from 1 (best commercial class, representing livers with no defects, appropriate texture, normally used for processing as entire canned livers) to 3 (class 2 = livers with no defects but too heavy to be processed as entire canned livers, and class 3 = numerous defects, either in terms of visual appearance or texture, leading to a decreased commercial value).

After color measurement and commercial grading, the livers were prepared for processing. The main blood vessels were carefully removed, and a slice of 180 ± 5 g was excised perpendicularly to the long axis of the liver and across the large and small lobes. This sample was placed in a glass container. Salt (12g/kg) and pepper (3g/kg) were added, and each container was closed and cooked for 1h in water at 85°C , under a pressure of 0.8 bar. After 30 min of chilling, the containers were removed from the autoclave and stored at $+4^{\circ}\text{C}$.

After 2 months of storage, the containers were opened and the cooked liver was carefully dissected from all visible fat. The amount of fat loss during cooking was expressed as a percentage of the initial liver weight. After this process, the liver was cut perpendicularly to the long axis of the liver position in the container and the color was measured along the

face of the cut (CR 300 Minolta chromameter, Minolta, Osaka, Japan) immediately after the cut and 1 h later in the same place.

Chemical composition of foie gras and breast muscle

Samples of *foie gras* (n=20 per group) and breast muscle (n=15 per group) were ground as frozen, homogenized, and used for the determination of the chemical composition according to Molette et al. (2001). Briefly, the DM was determined after desiccation of the sample for 24 h in a drying oven at 103 °C (JOCE, 1971a). Ash was determined after charring at 550 °C (JOCE; 1971b). The lipids were extracted with a cold mixture of chloroform and methanol (2/1 v/v) according to Folch et al. (1957). Nitrogen was determined according to the Dumas' combustion method using the Leco auto-analyser (model FP-428, Leco Corp., St Joseph, MI, USA) and converted to crude protein using 6.5 as conversion factor. Fatty acid composition was determined after transmethylation (Morrison and Smith, 1964). Fatty acid methyl esters were analyzed using a gas chromatograph fitted with a 0.25 µm thick film of reticulated polyethyleneglycol phase and 30 m × 0.25 mm i.d. capillary column (Innovax) with nitrogen as the carrier gas. The temperatures of the injector and the detector were 250 and 300 °C, respectively, and the column temperature was set from 200 to 250 °C with a 5 °C/min rise.

Statistical Analysis

Data were analyzed using the GLM procedure of using the PASW Statistics18 packed program for windows (PASW Statistics18, 2010). All the data, except the BW at 44, 71 and 105 d of age, were analyzed, including the effects of cereal given during the growing-finishing period (G, 2 levels: yellow corn or sorghum), cereal given during the overfeeding period (O, 2 levels: yellow corn or sorghum), and their interaction in the model (G x O). The BW at 44, 71 and 105 d of age was analyzed using the effect of cereal given during the growing-finishing period only because CC/CS and SC/SS birds were in the same pen and received the same diet from 44 to 104 d and were not overfed yet. Treatment means were compared using the Duncan test. The particle size distribution of the diets, the commercial grading and bird mortality during overfeeding periods were analyzed using the χ^2 test. Differences were treated as significant when $P \leq 0.05$.

Results

Physical characteristics of the experimental diets

The physical characteristics of the experimental diets are shown in Table 2. The particle size distribution was similar in the two diets given during the growing-finishing period ($P = 0.871$). On the other hand the proportion of large particles (> 4.000 mm) was higher in the corn-based overfeeding diet than in that based on sorghum (47.7% vs. 0.3%; $P < 0.001$) because corn grains are larger (> 4.000 mm) than sorghum seeds (between 2.000 and 4.000 mm). However, the proportion of medium-sized particles (between 2.000 and 4.000 mm) was lower in the corn- than in the sorghum-based overfeeding diet (0.8 vs. 48.5%; $P < 0.001$). But the proportion of small particles (< 1.000 mm) was similar in both (33.4% and 40.1%; $P > 0.05$; Table 2).

Bird performance before, during and after overfeeding

During the growing-finishing period (44 to 104 d), the mortality rate was 1.15% in the SS/SC group and 1.65% in CS/CC group (1 measurement per pen). During the same period, the feed intake was 21.1 kg/bird in SS/SC group and 20.4 kg/bird in the CS/CC (1 measurement per pen). At 44 and 71 d of age, the BW of birds was similar for the four groups (3,820 g and 5,425 g in SS/SC and CS/CC, respectively; $P > 0.05$; Table 4).

There was an interaction between the effects of the two periods for bird mortality. During the overfeeding period (105 to 120 d), mortality was higher in the SC group than in the CC, CS and SS groups (14.3% vs. 1.5%; 3.1% and 6.2%, respectively; $P < 0.05$). Before the overfeeding period, at 105 d, the BW of birds was similar for the four groups (5,597g, $P > 0.05$; Table 4). In spite of a similar total amount of food given (12,739 g; $P > 0.05$; Table 4) and energy intake (237 MJ; $P > 0.05$) between groups, the birds overfed with sorghum were heavier than birds overfed with yellow corn at the end of the overfeeding period (8,362 g vs. 8,238 g, $P < 0.05$; Table 4). FCR was lower and average gain were higher in the SS than in the other three groups (- 8.45 % and + 9.31 %, respectively; $P < 0.001$; Table 4).

Table 4. Performance of geese during the experimental period

	Groups ¹				SEM	P-value ²		
	CC	CS	SC	SS		G	O	G*O
<i>Growing-finishing period (44 to 104 d)</i>								
BW at 44 d (g)	3854	3837	3792	3798	15.92	0.109	-	-
BW at 71 d (g)	5429	5452	5425	5392	22.3	0.460	-	-
<i>Overfeeding period (105 to 120 d)</i>								
BW at 105 d (g)	5631	5664	5572	5522	26.02	0.054	-	-
BW at 120 d (g)	8252	8315	8224	8410	28.20	0.556	0.027	0.272
Feed intake (g)	12725	12699	12759	12773	14.56	0.065	0.840	0.506
Energy intake (MJ)	237	236	237	237	0.27	0.067	0.527	0.478
avg gain (g)	2622 ^b	2651 ^b	2652 ^b	2888 ^a	16.35	<0.001	<0.001	0.001
FCR (105-120 d)	4.90 ^a	4.82 ^a	4.83 ^a	4.44 ^b	0.03	<0.001	<0.001	0.002

¹ CC: corn during growing-finishing period and corn during overfeeding period; CS: corn during growing-finishing period and sorghum during overfeeding period; SC: sorghum during growing-finishing period and corn during overfeeding period; SS: sorghum during growing-finishing period and sorghum during overfeeding period; ²G: Growing-finishing period; O: Overfeeding period; SEM: standard error of the mean ^{a-b} Within a row, means with no common superscript differed significantly ($P < 0.05$).

Magret and foie gras quality before cooking

The interaction between the two periods was significant on the *magret* weight as well as on the intensity of lightness (L^*) and of yellow color (b^*) of the breast muscle ($P < 0.001$). Indeed, in spite of a similar weight of muscle between the four groups (248g, $P > 0.05$; Table 5), the weight of skin was higher in the CS and SC groups than in the CC and SS groups (231g vs. 208g, $P < 0.001$; Table 5). Lightness was higher in the muscle of the birds which were fed the same cereal between the two periods than in others (SS + CC vs. SC + CS: +2.64%; $P < 0.05$; Table 5). The intensity of yellow color was higher in muscle from birds of SC groups than from other birds (+29%; $P < 0.05$; Table 5). The intensity of red color in the breast muscle was higher in birds fed corn rather than sorghum both during growing-finishing (+5%; $P < 0.05$; Table 5) and during overfeeding periods (+7%, $P < 0.01$; Table 5).

The interaction between the two periods was significant on *foie gras* weight and commercial grading but not on its color. *Foie gras* was heavier in birds of SS group (1,026 g) than in birds of the three other groups (910 g, 943 g and 860 g respectively; $P < 0.01$; Table 5). This would reduce the commercial grading of the *foies gras* from birds of the SS group (44% vs. 54% in class 1 and 33% vs. 20% in class 2, in SS vs. the three other groups, respectively; $P < 0.01$).

Color of *foie gras* was not affected by the cereal given during the growing-finishing period (Table 5). However the intensity of yellow color was higher in *foie gras* from birds overfed with yellow corn rather than sorghum (+25%; $P < 0.001$; Table 5). Intensity of lightness and of red color of *foie gras* were not affected by the cereal given during the overfeeding period.

Magret and foie gras quality after cooking

The interaction between the two periods was significant on the yield of *magret* (Table 6). This latter was lower in the birds of SC group than of the SS group (67.08% vs. 68.87%, $P < 0.05$; Table 6). Conversely, the cereal given during the two periods had no effect on fat loss during cooking (7.83%; $P > 0.05$; Table 6). At opening the containers after 2 months of storage, the intensity of yellow color was higher in *foie gras* from birds overfed with yellow corn rather than sorghum (+26%; $P < 0.001$; Table 6), while the cereal given during the two periods had no effect on other color parameters. However, one hour after opening the containers, the interaction between the two periods was significant on intensity of lightness and of the yellow color of *foie gras* ($P < 0.05$). The intensity of yellow of the *foie gras* was the highest in birds from the SC group and the lowest in the birds from CS and SS groups ($P < 0.001$; Table 6). Additionally, intensity of lightness was higher in *foies gras* from birds of SC group than from the three other groups (+ 2%; $P < 0.05$).

Breast muscle and foie gras chemical composition

No interaction was observed between the two periods for breast muscle composition (Table 7), except for protein content, but the effects of each period were not significant. The breast muscle of the birds fed with sorghum during the growing-finishing period contains more lipids and ash than birds fed with yellow corn (+7% and +5% respectively, $P < 0.05$; Table 7).

Table 5. Effects of the period of substitution of corn by sorghum on the quality of products of overfed geese before cooking

	Groups ¹				SEM	P-value ²		
	CC	CS	SC	SS		G	O	G*O
<i>Magret</i>								
<i>Magret</i> wt (g)	458	473	487	457	4.80	0.491	0.460	0.024
Breast muscle wt (g)	249	240	256	249	2.63	0.108	0.160	0.826
Skin of <i>Magret</i> wt (g)	210 ^b	233 ^a	230 ^a	207 ^b	1.75	0.745	0.935	<0.001
<i>Pectoral muscle color</i>								
L*	36.80 ^a	34.91 ^b	35.21 ^b	37.47 ^a	0.28	0.501	0.925	<0.001
a*	17.42	16.30	18.33	17.16	0.19	0.013	0.002	0.966
b*	2.56 ^b	2.48 ^b	3.50 ^a	2.42 ^b	0.11	0.031	0.004	0.014
<i>Foie gras</i>								
<i>Foie gras</i> wt (g)	910 ^{bc}	943 ^b	860 ^c	1026 ^a	12.17	0.471	<0.001	0.005
<i>Foie gras color</i>								
L*	68.44	70.03	66.51	69.19	0.56	0.238	0.066	0.595
a*	12.40	12.18	12.58	12.73	0.16	0.288	0.952	0.605
b*	23.75	18.00	24.19	18.06	0.32	0.477	<0.001	0.565

¹ CC: corn during growing-finishing period and corn during overfeeding period; CS: corn during growing-finishing period and sorghum during overfeeding period; SC: sorghum during growing-finishing period and corn during overfeeding period; SS: sorghum during growing-finishing period and sorghum during overfeeding period; ²G: Growing-finishing period; O: Overfeeding period

SEM: standard error of the mean.

^{a-c} Within a row, means with no common superscript differed significantly (P<0.05).

Table 6. Effects of the period of substitution of corn by sorghum on the quality of products of overfed geese after cooking

	Groups ¹				SEM	P-value ²		
	CC	CS	SC	SS		G	O	G*O
<i>Magret</i>								
Yield after salting and drying (%)	68.37 ^{ab}	67.99 ^{ab}	67.08 ^b	68.87 ^a	0.20	0.814	0.038	0.019
<i>Foie gras</i>								
Fat loss during cooking (%)	9.37	7.62	7.70	6.61	0.25	0.377	0.221	0.764
<i>Trichromatic coordinate at glass container opening</i>								
L*	68.77	68.99	68.00	69.47	0.22	0.993	0.063	0.167
a*	5.77	6.42	6.41	6.24	0.15	0.510	0.657	0.297
b*	16.97	13.01	18.18	12.84	0.30	0.185	<0.001	0.081
<i>Trichromatic coordinate 1h after glass container opening</i>								
L*	68.40 ^a	68.63 ^a	67.22 ^b	69.51 ^a	0.21	0.778	0.007	0.008
a*	5.32	5.10	5.07	5.15	0.12	0.622	0.672	0.114
b*	17.87 ^b	13.71 ^c	18.97 ^a	13.82 ^c	0.26	0.048	<0.001	0.019

¹ CC: corn during growing-finishing period and corn during overfeeding period; CS: corn during growing-finishing period and sorghum during overfeeding period; SC: sorghum during growing-finishing period and corn during overfeeding period; SS: sorghum during growing-finishing period and sorghum during overfeeding period; ²G: Growing-finishing period; O: Overfeeding period

SEM: standard error of the mean.

^{a-c} Within a row, means with no common superscript differed significantly (P<0.05).

Table 7. Effects of the period of substitution of corn by sorghum on the chemical composition of breast muscle

	Groups ¹				SEM	P-value ²		
	CC	CS	SC	SS		G	O	G*O
DM (%)	28.09	28.57	29.14	28.47	0.162	0.153	0.624	0.156
Lipids (%)	5.47	5.62	6.03	5.81	0.089	0.040	0.853	0.512
Ash (%)	1.48	1.42	1.53	1.50	0.028	0.046	0.776	0.704
Proteins (%)	24.59	25.50	26.03	24.45	0.284	0.378	0.892	0.047
<i>Fatty acid composition (%)</i>								
C-14:0	0.50	0.48	0.48	0.48	0.004	0.555	0.692	0.212
C-16:0	21.59	21.19	21.36	21.48	0.095	0.591	0.731	0.119
C-16:1	4.39	4.12	4.13	4.25	0.048	0.465	0.775	0.133
C-18	9.70	9.97	9.57	9.78	0.074	0.115	0.097	0.918
C-18:1 ω 9	46.48	46.31	47.39	47.16	0.133	<0.001	0.369	0.787
C-18:2 ω 6	9.81	9.96	9.56	9.42	0.069	0.006	0.631	0.186
C-18:3 ω 3	0.57	0.54	0.60	0.62	0.009	<0.001	0.347	0.199
C-20:0	0.01	0.02	0.01	0.00	0.003	0.197	0.749	0.250
C-20:1	0.48	0.49	0.48	0.48	0.005	0.357	0.198	0.908
C-20:3 ω 6	0.73	0.74	0.72	0.74	0.009	0.102	0.500	0.406
C-20:4 ω 6	3.03	3.21	2.98	2.93	0.045	0.018	0.788	0.062
C-22:4 ω 6	0.59	0.62	0.58	0.57	0.009	0.033	0.666	0.156
Unidentified fatty acids	2.12	2.36	2.14	2.09	0.036	0.022	0.343	0.051

¹ CC: corn during growing-finishing period and corn during overfeeding period; CS: corn during growing-finishing period and sorghum during overfeeding period; SC: sorghum during growing-finishing period and corn during overfeeding period; SS: sorghum during growing-finishing period and sorghum during overfeeding period; ²G: Growing-finishing period; O: Overfeeding period

SEM: standard error of the mean.

Table 8. *Effects of the period of substitution of corn by sorghum on the chemical composition of foie gras*

	Groups ¹					P-value ²		
	CC	CS	SC	SS	SEM	G	O	G*O
DM (%)	62.53	62.07	62.72	60.73	0.292	0.315	0.034	0.181
Lipids (%)	52.42	50.82	51.39	49.35	0.369	0.081	0.012	0.755
Ash (%)	0.32	0.39	0.31	0.37	0.013	0.596	0.037	0.938
Proteins (%)	8.07	8.36	8.28	8.73	0.112	0.195	0.098	0.723
<i>Fatty acid composition (%)</i>								
C-14:0	0.56	0.60	0.56	0.55	0.006	0.057	0.129	0.054
C-16:0	22.88	22.92	21.99	22.40	0.145	0.016	0.423	0.519
C-16:1	3.34	3.22	3.20	3.00	0.042	0.030	0.058	0.655
C-18	13.67	14.83	13.62	14.66	0.145	0.684	<0.001	0.817
C-18:1 ω 9	57.40	56.31	58.49	57.20	0.177	0.002	<0.001	0.745
C-18:2 ω 6	0.66	0.70	0.68	0.72	0.009	0.221	0.040	0.824
C-20:0	0.18	0.19	0.17	0.19	0.003	0.939	0.055	0.239
C-20:1	0.42	0.44	0.44	0.46	0.005	0.160	0.025	0.882
C-20:4 ω 6	0.59	0.62	0.63	0.63	0.009	0.201	0.274	0.447
Unidentified fatty acids	0.30	0.16	0.22	0.17	0.016	0.217	0.004	0.108

¹ CC: corn during growing-finishing period and corn during overfeeding period; CS: corn during growing-finishing period and sorghum during overfeeding period; SC: sorghum during growing-finishing period and corn during overfeeding period; SS: sorghum during growing-finishing period and sorghum during overfeeding period; ²G: Growing-finishing period; O: Overfeeding period

SEM: standard error of the mean.

The cereal given during the growing-finishing period alone influenced the fatty acid composition of the breast muscle. The percentage of C-18:1 ω 9 and C-18:3 ω 3 fatty acids was higher in the muscle of birds fed sorghum than corn, while those of C-18:2 ω 6, C- 20:4 ω 6, C-22:4 ω 6 and unidentified fatty acid were lower. The percentage of other fatty acids was similar among groups (Table 7).

No significant interaction was found between the effects of the two periods for *foie gras* composition. The percentage of dry matter and lipid were higher (+2%; $P < 0.05$; Table 8) while that of ash was lower (- 16%; $P < 0.05$) in the *foies gras* of birds overfed with corn than with sorghum. The fatty acid composition of the *foie gras* was affected by both the cereal fed during the growing-finishing period (C-16:0, C-16:1 and C-18:1 ω 9; $P < 0.05$) and during the overfeeding period (most of them; $P < 0.05$; Table 8).

Discussion

The objective of this work was to study the effects of substitution of yellow corn by sorghum during growing-finishing and/or overfeeding periods on performance, *foie gras* and *magret* quality in goose. The results showed that i) changing the cereal in the diet between the growing-finishing and the overfeeding period reduced the performance of the geese, suggesting the need for the digestive tract to adapt to the diet before overfeeding; ii) the use of sorghum improved the performance of birds (*foie gras* weight, feed conversion ratio and weight gain) and affected the *magret* and *foie gras* color, mainly decreasing the intensity of yellow color and altering the fatty acid composition.

The poorer performance caused by a change of cereal between the growing-finishing and the overfeeding periods can be attributed to the need for the digestive tract to adapt to a new diet differing both in particle size and composition. Firstly, the particle size was larger in the diet given during the overfeeding period than in that offered during the growing-finishing period, more especially in the corn mixture than in the sorghum mixture. It has been shown that the size of food particles influences the digestive tract and especially the size of gizzard (Carré, 2000), bird health, gut motility and activity (Ferket, 2000; Engberg et al., 2002, 2004; Bjerrum et al., 2005; Amerah and Ravindran 2007). Secondly, the cereal ingested is also important. Indeed, Bedford (1996) showed that the feed significantly influences the gut environment, mainly substrate and viscosity, and thus the digestive ability. Particle size and

cereal could also interact to explain the reduced performance observed in the group submitted to a change of cereal between the two periods. For example Rodgers et al. (2012) showed that the effects of particle size on the gut were smaller with sorghum than with whole corn (Lu et al., 2011).

The better performance of birds that ate sorghum instead of corn, especially live and *foie gras* weight, despite a similar feed intake, can be explained by differences in the nutritional characteristics of the diet. Sorghum and corn have very similar chemical and nutritional composition but in our case the sorghum had higher protein content (+1 pt / kg; + 16%). This could explain the higher liver weight observed in the birds overfed with sorghum as previously shown (Nir et al., 1972, 1973; Bouillet-Oudot et al., 2002b). Additionally, the type of starch, mainly the amylopectin/amylose ratio, differs between cereals (Jenkins and Donald, 1995) and is generally higher in sorghum than in corn. But in birds, amylopectin digestibility is higher than amylose (Skiba et al., 2005; Zhou et al., 2010) which could explain the higher liver weight and feed conversion ratio in birds fed sorghum. The lower intensity of yellow color in the *magret* and the *foie gras* of bird fed sorghum can be explained by the lower carotenoids and vitamin A content (0.1 vs. $0.83 \cdot 10^3$ UI/kg) in the sorghum compared to corn (Sauvant et al., 2004). A similar phenomenon was previously observed in the skin of broiler and in egg yolk (Gualtieri and Rapaccini 1990).

The lipid content of the breast muscle was slightly higher in birds fed sorghum during the growing-finishing period but the cereal influences mostly its fatty acid composition as previously observed in broilers given sorghum (Cherian et al 2002) or in geese fed with nut meal (Bouillet-Oudot et al., 2002a,b). The higher levels of C18:1 and C18:3 and the lower level of C18:2 in the breast of birds fed sorghum could be linked with similar differences in fatty acid composition between the two cereals. On the other hand the cereal given during the overfeeding period did not influence the fatty acid composition of the breast muscle.

The two main fatty acids in corn and sorghum are linoleic acid (C18:2, 54 and 44% respectively) and oleic acid (C18:1, 25 and 32%). Oleic acid was the major fatty acid in the *foie gras* (57 % of the total fatty acid content) while linoleic acid represented less than 1% as previously observed (Leprettre et al., 1998; Cobos et al., 2000; Molette et al., 2001; Molee et al., 2005). Palmitic acid (C16:0) and stearic acid (C18:0) represented 21% and 14% of the total fatty acids while the other fatty acids seemed to be of minor importance as they represented less than 6% of the total.

Our results suggest that the composition of the diet offered during the growing-finishing period influenced mainly the *magret* quality while the *foie gras* characteristics mainly depended on the diet given during the overfeeding period, in agreement with Auvergne et al. (1995).

In conclusion, these results show a significant influence of the substitution of yellow corn by sorghum during growing-finishing and overfeeding periods on goose performance, *magret* and *foie gras* quality. The total substitution of yellow corn by sorghum, i.e. during both periods, increased the weight of the *foie gras* but reduced its yellow color intensity. In contrast, a partial substitution of corn by sorghum, during the growing-finishing period only, increased the mortality during the overfeeding period, suggesting the need for the birds to adapt to their diet before the overfeeding. The partial substitution of corn by sorghum, during the overfeeding period only, reduced the yellow color intensity and modified the fatty acid composition of the *foie gras* without affecting its weight.

The possibility of using sorghum in goose diet, especially during the overfeeding period, could widen the range of raw materials usable for *foie gras* production and consequently improve the flexibility of this farming system by making it less dependent on corn availability and market prices. The consequences of such a feeding practice on the environmental impact of goose feeding needs further study.

Acknowledgements

The authors thank the staff of the Goose Breeding Station (Dordogne, France) for the excellent supervision of this study on geese. The authors also thank the staff of the UMR 1289 TANDEM especially, C. Pautot and J. Barthel for technical assistance with the analysis of samples.

Literature cited

- Amerah, A. M., V. Ravindran, R. G. Lentle, and D. G. Thomas. 2007. Influence of feed particle size and feed form on the performance, energy utilization, digestive tract development, and digesta parameters of broiler starters. *Poult. Sci.* 86, 2615-2623.
- Amigues, J. P., P. Debaeke, B. Itier, G. Lemaire, B. Seguin, F. Tardieu, and A. Thomas. 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72pp.
- Arroyo, J., A. Auvergne, J. P. Dubois, M. Bijja, F. Lavigne, and L. Fortun-Lamothe. 2012a. Influence of feeding sorghum on the growth, gizzard development and carcass traits of growing geese. *Animal*. doi:10.1017/S1751731112000432. (in press)
- Arroyo, J., A. Auvergne, J. P. Dubois, M. Bijja, F. Lavigne, Bannelier C and L. Fortun-Lamothe. 2012b. Effects of presentation and type of cereals (corn or sorghum) on performance of geese. *Poult. Sci.* (in press)
- Auvergne, A., R. Babilé, M. Bouillet-Oudot, H. Manse and G. Latil. 1995. Influence of two feeding rates on muscular and liver composition in force-fed mule ducks. *Proc. XII European symposium on the quality of poultry meat*. Zaragoza, Spain. 181-188.
- Babilé, R., S. Chambert, P. Everlet, A. Auvergne, and H. Manse. 1998. Caractérisation des tissus adipeux après gavage des canards au maïs ou au mélange figue-maïs. *Proc. 3^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras*, Bordeaux, France. 133-135.
- Bate-Smith, E. C. 1969. Luteoforol (3',4,4',5,7-pentahydroxyflavan) in *Sorghum vulgare* L. *Phytochemistry* 8: 1803-1810.
- Bedford, M. B. 1996. Interaction between ingested feed and the digestive system in poultry. *J. Appl. Poultry Res.* 5 :86-95
- Bjerrum, L., K. Pedersen, and R. M. Engberg. 2005. The influence of whole wheat feeding on salmonella infection and gut flora composition in broilers. *Avian Dis.* 49, 9-15.
- Boggia, A., L. Paolotti, and C. Castellini. 2010. Environmental impact evaluation of conventional, organic and organic-plus poultry production systems using life cycle assessment. *World's Poultry Sci. J.* 66, 95-114.
- Bouillet-Oudot, M., S. Leprettre, J. P. Dubois., and R. Babilé. 2002a. Effets de l'incorporation de tourteau de noix dans l'aliment d'élevage sur la croissance des oies et les caractéristiques des produits après gavage. *Proc. 5^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras*, Pau, France. 128-131.

- Bouillet-Oudot, M., S. Leprettre, J. P. Dubois., and R. Babilé. 2002b. Utilisation du tourteau de noix en gavage : incidence sur les produits d'oies grasses. Proc. 5^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Pau, France. 132-135.
- Carré, B. 2000. Effects of feed particle size on the digestive processes in domestic birds. INRA Prod. Anim.13 (2), 131-136.
- Cazeils, J. L. 2000. Caractérisation de la composition lipidique des membranes plasmiques des hépatocytes de foies d'oies: relation avec le rendement technologique des foies gras. Ph.D. dissertation. Institut National Polytechnique, Toulouse, France.
- Cherian, G., R. K. Selvaraj, M. P. Goeger, and P. A. Stitt. 2002. Muscle fatty acid composition and thiobarbituric acid-reactive substances of broilers fed different cultivars of sorghum. Poultr. Sci. 81, 1415-1420.
- Cobos, A., A. Veiga, and O. Diaz. 2000. Chemical and fatty acid composition of meat and liver of wild ducks (*Anas platyrhynchos*). Food Chemistry 68, 77-79.
- Conan, L., J. P., M. Métayer, M., Lessire, and J. L. Widiez. 1992. Metabolizable energy content of cereal grains in poultry. Recent yearly surveys in France. INRA Prod. Anim. 5 (5), 329-338
- Dubois, J. P., A. Auvergne, F. Lavigne, X. Fernandez, and R. Babilé. 2010. Le nouveau guide pratique du gavage. Proc. 9^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Bordeaux, France. 255-258.
- Elkin, R. G., M. B. Freed, B. R. Hamaker, Y. Zhang, and C. M. Parsons. 1996. Condensed tannins are only partially responsible for variations in nutrient digestibilities of sorghum grain cultivars. J. Agric. Food Chem., 44, 3, 848-853.
- Engberg, R. M., M. S. Hedemann, and B. B. Jensen. 2002. The influence of grinding and pelleting of feed on the microbial composition and activity in the digestive tract of broiler chickens. Br. Poult. Sci. 44, 569-579.
- Engberg, R. M., M. S. Hedemann, S. Steinfeldt, and B. B. Jensen. 2004. Influence of whole wheat and xylanase on broiler performance and microbial composition and activity in the digestive tract. Poult. Sci. 83, 925-938.
- European Union Council Directive 1009/2009/EC, 2009. On the protection of animals at the time of slaughter or killing, Official Journal of European Community L 303 (2009), pp. 1–30.
- Farré, I., and J. M. Faci. 2006. Comparative response of maize (*Zea mays L.*) and sorghum (*Sorghum bicolor L. Moench*) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. Agric. Water Manage. 83, 135-144.

- Ferket, P. 2000. Feeding whole grains to poultry improves gut health. *Feedstuffs*. 72, 12-14
- Fernandez, X., M. Bouillet-Oudot, C. Molette, M. D. Bernadet, and H. Manse. 2011. Duration of transport and holding in lairage at constant postprandial delay to slaughter-Effects on fatty liver and breast muscle quality in mule ducks. *Poult. Sci.* 90, 2360-2369.
- Fisher, C., and J. M. Mc Nab. 1987. Techniques for determining the metabolizable energy (ME) content of poultry feeds. *Recent advances in animal nutrition*. Haresign, W. and Cole, D.J.A. editors, Butterworths, London. 3-18.
- Folch, J., M. Lees, and C. Sloane-Stanley. 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissue. *J. Biol Chem.* 226:497–509.
- Gualtieri, M., and S. Rapaccini. 1990. Sorghum grain in poultry feeding. *World's Poult. Sci. J.* 46, 246-254.
- Guéméné, D., and G. Guy. 2004. The past, present and future of force-feeding and “foie gras” production. *World's Poult. Sci. J.* 60, 210-222.
- Hermier, D., M. R. Salichon, G. Guy, R. Peresson, J. Mourot, and S. Lagarrigue. 1999. Hepatic steatosis in waterfowl: metabolic basis and genetic susceptibility. *INRA Prod. Anim.* 12:265–271.
- Jenkins, P. J., and Donald, A. M. 1995. The influence of amylose on starch granule structure. *Int. J. Biol. Macromol.* 17, 315–321.
- JOCE (Journal Officiel des Communautés Européennes). 1971a. Dosage de l'humidité. L279/8. *Eur-Op News*, Luxembourg, Luxembourg.
- JOCE (Journal Officiel des Communautés Européennes). 1971b. Dosage des cendres brutes. L155/20. *Eur-Op News*, Luxembourg, Luxembourg.
- Lebas, F., and B. Lamboley 1999. Liquid phase sifting determination of the size of particles contained in pelleted rabbits feeds. *World Rabbit Science.* 7, 229-235.
- Leinonen, I., A. G. Williams, J. Wiseman, J. Guy, and I. Kyriazakis. 2012a. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Broiler production systems. *Poult. Sci.* 91, 8–25
- Leinonen, I., A. G. Williams, J. Wiseman, J. Guy, and I. Kyriazakis. 2012b. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Egg production systems. *Poult. Sci.* 91, 26–40.
- Leprettre, S., A. Auvergne, H. Manse, R. Babilé, J. P. Dubois, and M. Candau. 1998. Effect of the starvation period before slaughter on biochemical composition and sterilization yields of goose fatty livers. *Sciences des Aliments.* 18, 415-422.

- Lu, J., X. L. Kong, Z. Y. Wang, H. M. Yang, K. N. Zhang, and J. M. Zou. 2011. Influence of whole corn feeding on the performance, digestive tract development, and nutrient retention of geese. *Poult. Sci.* 90, 587-594.
- Molee, W., M. Bouillet-Oudot, A. Auvergne, and R. Babilé. 2005. Changes in lipid composition of hepatocyte plasma membrane induced by overfeeding in duck. *Comp Biochem Physiol B.* 141, 437-444.
- Molette, C., P. Berzaghi., A. Dalle Zotte, H. Remignon, and R. Babilé. 2001. The use of near-infrared reflectance spectroscopy in the prediction of the chemical composition of goose fatty liver. *Poult. Sci.* 80, 1625-1629.
- Morrison, W. R., and L. M. Smith, 1964. Preparation of fatty acid methyl esters and dimethylacetals from lipids with boron fluoride-methanol. *J. Lipid Res.* 5:600–608.
- National Research Council. 1994. Nutrient requirement of poultry, 9th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Nir, I., M. Perek, and Z. Katz. 1972. The influence of soybean meal supplemented to maize diet of forced-fed geese upon their liver, organ and blood plasma components. *Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys.* 12, 77-89.
- Nir, I., Z. Nitsan, and A. Vax. 1973. The influence of force feeding and of protein supplementation to the diet on the metabolisable energy diets, digestibility of nutrients, nitrogen retention and digestive enzymes output in geese. *Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys* 13, 465-479.
- Nyachoti, C. M., J. L. Atkinson, and S. Leeson. 1997. Sorghum tannins: A review. *World's Poult. Sci. J.* 53, 1, 5-21.
- Nyannor, E. K. D., S. A. Adedokun, B. R. Hamaker, G. Ejeta and O. Adeola. 2007. Nutritional evaluation of high-digestible sorghum for pigs and broiler chicks. *J. Anim. Sci.* 85:196-203.
- PASW Statistics 18. 2010, Release 18.0.2 (2 April 2010) edn.
- Rodgers, N. J., M. Choct, H. Hetland, F. Sundby, and B. Svihus. 2012. Extent and method of grinding of sorghum prior to inclusion in complete pelleted broiler chicken diets affects broiler gut development and performance. *Anim. Feed Sci. Technol.* 171, 60-67.
- Sauvant, D., J. M. Perez, and G. Tran. 2004. Tables of composition and nutritive value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish. eds INRA Editions, Paris and Wageningen Academic Publishers, The Netherlands. 304pp.
- Sedghi, M., M. R. Ebadi, A. Golian, and H. Ahmadi. 2011. Estimation and modeling true metabolizable energy of sorghum grain for poultry. *Poult. Sci.* 90, 1138-1143

- Selle, P. H., D. J. Cadogan, X. Li, and W. L. Bryden. 2010. Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 156, 57-74.
- Skiba, F., B. Barrier-Guillot, J. P. Métayer, and M. Champion. 2005. Effect of the maize and starch types on the nutritional value of maize for broiler chickens. *Proc. Sixièmes Journées de la Recherche Avicole*, St Malo, France. 287-291.
- Verdouw, H., C. J. A. Van Echteld, and E. M. J. Dekkers, 1977. Ammonium determination based on indophenol formation with sodium salicylate. *Water Res.* 12:399–402.
- Watterson, J. J., and L. G. Butler. 1983. Occurrence of an unusual leucoanthocyanidin and absence of proanthocyanidins in sorghum leaves. *J. Agric. Food Chem.* 31: 41-45.
- Zened, A., A. Troegeler-Meynadier, M.C. Nicot, S. Combes, L. Cauquil, Y. Farizon, and F. Enjalbert. 2011. Starch and oil in the donor cow diet and starch in substrate differently affect the in vitro ruminal biohydrogenation of linoleic and linolenic acids. *J. Dairy Sci.* 94(11): 5634-5645.
- Zhou, Z., H. F. Wan, Y. Li, W. Chen, Z. L. Qi, P. Peng, and J. Peng. 2010. The influence of the amylopectin/amylose ratio in samples of corn on the true metabolizable energy value for ducks. *Anim. Feed Sci. Technol.* 157, 99–103.

2.5. Annexe

Evaluation hédonique des produits issus d'oies grasses nourries avec du maïs ou du sorgho pendant les phases de croissance-finition et / ou de gavage.

Suite à l'essai traitant des effets de la substitution du maïs par du sorgho dans l'alimentation des oies en phase de croissance et de gavage, nous avons réalisé un « test consommateur » sur les foies gras entiers en verrine et les magrets séchés, non fumés. Pour des raisons de cohérence, nous garderons la même nomenclature que celle utilisée dans la publication 5, c'est-à-dire :

CC : Produits issus d'animaux élevés avec du maïs et gavés avec du maïs

CS : Produits issus d'animaux élevés avec du maïs et gavés avec du sorgho

SC : Produits issus d'animaux élevés avec du sorgho et gavés avec du maïs

SS : Produits issus d'animaux élevés avec du sorgho et gavés avec du sorgho

Résultats

Aucune différence significative n'est observée sur le magret (Figure 13, Tableau 14). A contrario, les foies gras issus d'animaux gavés au maïs (CC et SC) ont plus la faveur des consommateurs que ceux issus d'animaux gavés avec du sorgho (CS ou SS). Les différences significatives sont observées sur tous les paramètres testés : aspect global ($P < 0,01$), couleur ($P < 0,05$), odeur ($P < 0,05$), goût ($P < 0,05$), texture ($P < 0,05$) et intensité de reconsommation ($P < 0,01$) (Figure 12, Tableau 13). Cependant, nous n'observons pas d'effet de la céréale utilisée pendant la phase croissance-finition sur les paramètres étudiés.

Ces résultats semblent en accord avec les processus biologiques d'élaboration du foie gras. En effet, c'est durant le gavage que le foie réalise la stéatose nécessaire pour arriver à un poids légalement nécessaire pour l'obtention du titre de foie gras. Il semble donc logique que les différences observés soient expliquées par l'alimentation reçue pendant le gavage (O).

Il semble que les consommateurs soient capables de discriminer aussi bien au niveau du goût, de la couleur, de la texture et de l'odeur des foies gras issus d'un gavage à base de sorgho. Toutefois, les résultats obtenus ne semblent pas montrer de facteurs prohibitifs à la potentielle consommation de ce produit par le grand public. A l'opposé, les consommateurs ne semblent pas capables de discriminer les magrets en fonction de la céréale reçue par les animaux pendant la phase de croissance-finition ou de gavage.

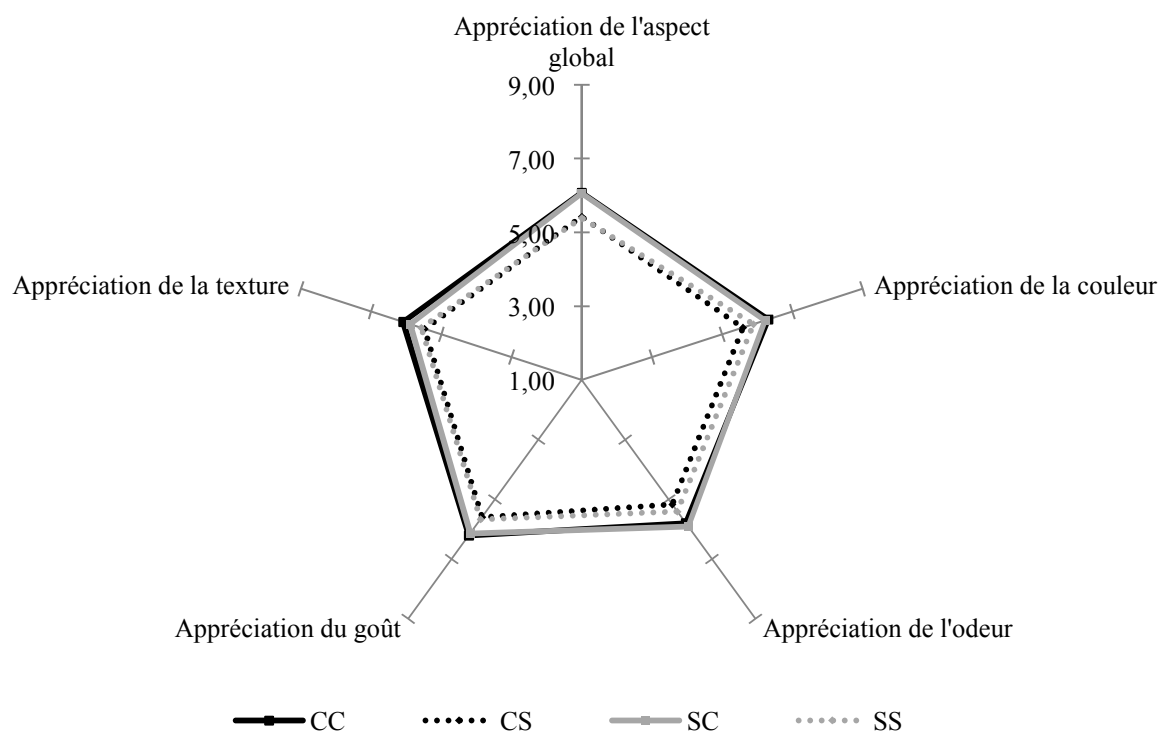


Figure 12. Effets de la substitution du maïs par du sorgho en élevage et / ou gavage dans l'alimentation des oies sur l'évaluation hédonique des foies gras entiers en verrine

Tableau 13. Effets de la substitution du maïs par du sorgho en élevage et / ou gavage dans l'alimentation des oies sur l'évaluation hédonique des foies gras entiers en verrine

	Groupes ¹				SEM	P-value ²		
	CC	CS	SC	SS		G	O	G*O
Appréciation de l'aspect global	6,07	5,43	6,06	5,39	0,108	0,839	0,003	0,051
Appréciation de la couleur	6,31	5,59	6,22	5,89	0,116	0,498	0,020	0,076
Appréciation de l'odeur	5,80	5,17	5,91	5,41	0,107	0,309	0,010	0,052
Appréciation du goût	6,20	5,59	6,15	5,67	0,125	0,794	0,016	0,115
Appréciation de la texture	6,09	5,48	5,89	5,57	0,121	0,957	0,041	0,180
Intension de reconsommation	1,31	1,48	1,30	1,48	0,033	0,889	0,008	0,072

¹ CC : Produits issus d'animaux élevés avec du maïs et gavés avec du maïs ; CS : Produits issus d'animaux élevés avec du maïs et gavés avec du sorgho ; SC : Produits issus d'animaux élevés avec du sorgho et gavés avec du maïs ; SS : Produits issus d'animaux élevés avec du sorgho et gavés avec du sorgho ; ²G : période de croissance-finition ; O : période de gavage

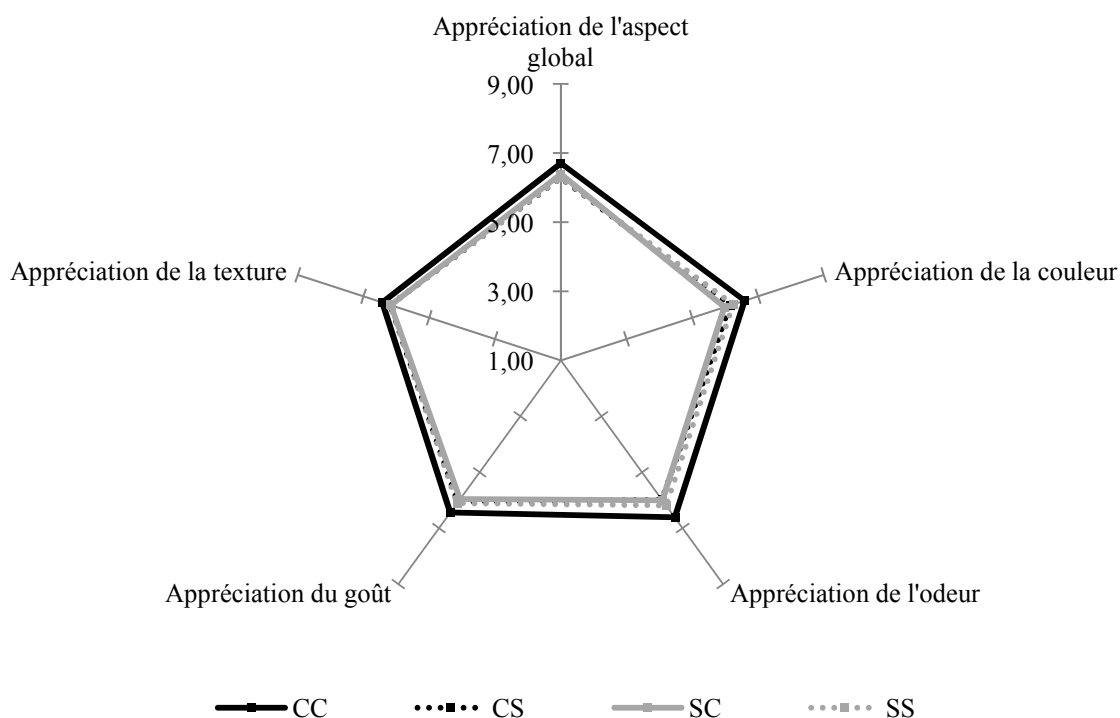


Figure 13. Effets de la substitution du maïs par du sorgho dans l'alimentation des oies en élevage et / ou gavage sur l'évaluation hédonique des magrets séchés non fumés

Tableau 14. Effets de la substitution du maïs par du sorgho dans l'alimentation des oies en élevage et / ou gavage sur l'évaluation hédonique des magrets séchés non fumés

	Groupes ¹					P-value ²		
	CC	CS	SC	SS	SEM	G	O	G*O
Appréciation de l'aspect global	6,70	6,28	6,39	6,28	0,099	0,477	0,255	0,447
Appréciation de la couleur	6,59	6,15	5,98	6,24	0,108	0,235	0,419	0,126
Appréciation de l'odeur	6,61	5,98	6,00	6,19	0,104	0,177	0,932	0,165
Appréciation du goût	6,44	6,07	5,96	6,11	0,118	0,185	0,714	0,420
Appréciation de la texture	6,43	6,19	6,17	6,19	0,108	0,664	0,672	0,851
Intension de reconsommation	1,28	1,39	1,48	1,41	0,033	0,095	0,781	0,186

¹ CC : Produits issus d'animaux élevés avec du maïs et gavés avec du maïs ; CS : Produits issus d'animaux élevés avec du maïs et gavés avec du sorgho ; SC : Produits issus d'animaux élevés avec du sorgho et gavés avec du maïs ; SS : Produits issus d'animaux élevés avec du sorgho et gavés avec du sorgho ; ²G : période de croissance-finition ; O : période de gavage

PARTIE B : Evaluation de la durabilité des systèmes de production

I. Approche produit - Impacts environnementaux à l'échelle du produit

1. Objectifs

Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer les conséquences d'un changement de la céréale (maïs ou sorgho) et de la forme de présentation de l'aliment (granulé complet ou mélange de graines entières et de granulé riche en protéines) distribués aux oies sur les impacts environnementaux de la production de foie gras.

2. Champs d'études

L'analyse du cycle de vie (ACV) a été réalisée sur différents scénarios de substitution partielle ou totale du maïs par du sorgho basée sur des données expérimentales et des pratiques de terrain représentatives des élevages d'oies français. L'évaluation concernait la production de foie gras depuis l'obtention des œufs jusqu'à l'éviscération des oiseaux à l'abattoir. Les catégories d'impacts ont été calculées en utilisant la méthode de référence CML2 : potentiel d'eutrophisation (kg PO₄-ék), changement climatique (kg CO₂-ék), potentiel d'acidification (kg SO₂-ék), écotoxicité terrestre (kg 1,4-DCB-ék), demande d'énergie cumulée (MJ), consommation d'eau (L), et occupation du sol (m² par an). L'unité fonctionnelle était le kilo de foie gras.

3. Principaux résultats

La substitution du maïs par du sorgho a réduit les impacts sur l'environnement de la fabrication des aliments donnés pendant la période de croissance-finition et de gavage pour toutes les catégories (-40% à -60%) sauf l'eutrophisation et l'occupation des sols (+10% à +33%). Les effets du type de céréale sur les impacts environnementaux de la production de foie gras dépendent du moment (élevage ou gavage) et du taux d'incorporation. Les impacts environnementaux de la production d'aliment et de foie gras sont plus faibles lorsque les oiseaux sont nourris exclusivement avec du sorgho à la fois pendant la période de croissance-finition et de gavage. L'utilisation d'un régime alimentaire présenté sous une forme simplifiée pendant la période de croissance-finition ne réduit que très légèrement les impacts environnementaux liés à la fabrication des aliments (0 à +6% selon la catégorie d'impact). De plus elle n'a aucune influence sur les impacts environnementaux de la production d'1kg de foie gras lorsque la céréale utilisée est le maïs, mais en revanche augmente ces impacts lorsque la céréale utilisée est le sorgho. Ce résultat est dû à une plus forte mortalité des oiseaux pendant la période gavage lorsqu'ils ont été nourris avec du sorgho sous forme de graines entières pendant la phase de croissance-finition.

Ces résultats suggèrent que la substitution totale du maïs par du sorgho peut réduire les impacts environnementaux de la production foie gras et ainsi offrir une alternative intéressante en réponse à la pénurie d'eau dans le sud de la France. Toutefois, son utilisation sous une forme simplifiée nécessite une amélioration des pratiques d'élevage afin de limiter la mortalité et ainsi réduire les impacts environnementaux.

4. Publication n°6

Environmental influence of maize substitution by sorghum and diet presentation on goose's
"foie gras" production.

J. Arroyo^{1,2,3,4}, L.Fortun-Lamothe^{2,1,3}, A. Auvergne^{1,2,3}, J.P. Dubois⁴, F. Lavigne⁴, M. Bijja⁴,
J.Aubin⁵

¹ *Université de Toulouse, INPT ENSAT, UMR 1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France*

² *INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France*

³ *Université de Toulouse, INPT ENVT, UMR 1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème et Métabolisme, 31076 Toulouse, France*

⁴ *ASSELDOR, Station d'expérimentation appliquée et de démonstration sur l'oie, La Tour de Glane, 24420 Coulaures, France*

⁵ *INRA, Agrocampus Rennes, UMR1069, Sol Agronomie Spatialisation, 65 rue de Saint Briec, CS 84215, F-35042 Rennes Cedex, France*

Submitted on JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION

(Received 25 September 2012)

Abstract

We studied the environmental consequences of cereal choice (maize or sorghum) and form of presentation (completed pelleted feed or mixture of whole grains and protein-rich pellets) of the diet given to geese reared for “*foie gras*” production. Attributional Life Cycle Assessment (LCA) was conducted on different scenarios of partial and total substitution of maize by sorghum, based on experimental data and in-field management practices at representative French goose farms. The assessment concerned “*foie gras*” production from egg production through to bird evisceration at the slaughterhouse. The impact categories were calculated using the CML2 baseline method: eutrophication (kg PO₄-eq.), climate change (kg CO₂-eq.), acidification potential (kg SO₂-eq.), terrestrial ecotoxicity (kg 1.4-DCB eq.), cumulative energy demand (MJ), water use (L), and land occupation (m² per year). Functional unit was 1kg of *foie gras*. Using sorghum instead of maize reduced the environmental impacts (-40% to -60%) of the feed given during both growing-finishing (GF period) and overfeeding (O period) for all categories except eutrophication and land occupation (+10% to +33%). Conversely, although the effects of cereal type on the impact of *foie gras* were dependent on feed level and stage of inclusion, birds fed exclusively with sorghum cereal during both the GF period and the O period had lower environmental impacts than birds fed with maize for all the potential impacts calculated. A diet presented in a simplified form during the GF period very slightly reduced the environmental impacts of the feed (0 to +6% depending on impact category) and had no effects on “*foie gras*” impacts when cereal used was maize but increased the “*foie gras*” impacts when cereal used was sorghum due to higher bird mortality during the O period. These results suggest total substitution of maize by sorghum can reduce the environmental impacts of “*foie gras*” production and thus offer an interesting alternative in response to water shortages in southern France, but its use in a simplified form hinges on prior improvement of rearing practices to limit subsequent mortality and increased environmental impacts.

Keywords: goose, sorghum, maize, “*foie gras*”, LCA

Abbreviations: LCA: Life Cycle Assessment, LCI: Life Cycle Inventory

Introduction

The food industry is now acutely aware that the environmentally-conscious consumer of the future will consider ecological and ethical criteria when selecting food products (Andersson et al., 1994). Moreover, consumers in developed countries are already demanding safe food of high quality that has been produced with minimal adverse environmental impacts (Boer, 2002). It is thus essential to evaluate environmental impact and resource use in food production and distribution systems for sustainable consumption. Feed is the main driver of environmental costs in poultry rearing (Boggia et al., 2010). Therefore, changing feeding practices, i.e. choice of raw materials or form of diet presentation, may improve the sustainability of livestock production systems. Raw materials should be chosen according to their environmental impacts and availability. The diet of geese used to produce “foie gras” is mainly based on using maize as energy source during the rearing and overfeeding periods (Guéméné and Guy, 2004). Here, we evaluated the environmental impact of using sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) as a substitute for maize in foie gras production. Sorghum has a similar nutritional characteristics to maize (Sauvant et al., 2004) but is more drought-resistant, making it an promising candidate to reduce the vulnerability of French agriculture to the risks of water shortage (Amigues et al., 2006) by reducing the need for crop irrigation (Farré and Faci, 2006). Moreover, increasing the panel of raw materials lends greater flexibility to the production systems, and limits reliance on product price fluctuations.

Diet presentation form may also influence environmental performances. A poultry diet offered in a simplified form, such as a mixture of whole grains and protein-rich pellets, could slim down the manufacturing processes and thus the environmental impacts of goose diet while improving the social acceptability of breeding systems by ensuring the birds are fed with a diet considered more ‘natural’ (Gabriel et al., 2003).

Arroyo et al. (2012a and 2012b) showed that sorghum could be used for goose feeding during both the GF and/or O periods of “foie gras” production. They also showed a significant influence of diet presentation on geese performance during the GF period, as using a simplified form of cereal instead of a completely pelleted diet increased mortality during the O period (Arroyo et al., 2012a).

This study was therefore designed to evaluate the potential environmental impacts of changes in goose feeding practices: i) substitution of maize by sorghum during the GF and/or O periods and ii) cereal in a simplified form during the GF period. For this purpose, we adopted the Life Cycle Assessment (LCA) approach to calculate the environmental impact of 1 kg of “foie gras”. LCA is a recognized method for assessing a product’s environmental impact, including the resources consumed and the environmental emissions involved during its entire lifespan (Guinée et al., 2002).

Materials and methods

This study is split into two strands: i) LCA of the diets used to feed the birds during both the GF period and the O period, and ii) the consequences of different feeding strategies (effects of presentation and/or type of cereals) on the environmental impacts of the “foie gras” end-product. Attributional LCA was conducted on different scenarios introducing a change in routine foie gras goose farm practices by partial and total substitution of maize by sorghum, based on experimental data from two studies (Arroyo et al., 2012a, 2012b).

System boundary

The LCA assessment concerns the production of 1 kg of “foie gras”, defined as functional unit, from egg production through to evisceration of the birds at the slaughterhouse, including diet production and the transportation of inputs. The “foie gras” production process map is given in Figure 1.

Life Cycle Inventory (LCI)

Diet LCI

The diet LCI covers the production and transport of feed ingredients and the milling of goose feed. Diet composition is given in Table 1. This process, which includes feed ingredient delivery to the feed factory, is assumed to be located in the Dordogne region of southwest France. Environmental impacts are expressed per 1 kg of feed ingredient delivered to the farm, working to the assumption that the geese are located 80 km from the feed factory.

Table 1 *Ingredients of the experimental diets*

	Growing-finishing diet ^{1,2}						Overfeeding diet ³	
	Complete pelleted diets		Mixture diets				Maize	Sorghum
	CM	CS	MM		MS			
			PRM	CF	PRS	SWS		
Ingredients (g/kg)								
Maize	500.0	-	-	1,000.0	-	-	966.7 ⁴	-
Sorghum	-	500.0	-	-	-	1,000.0	-	964.9 ⁵
Wheat	162.5	193.2	323.6	-	388.7	-	-	-
Rapeseed meal	30.0	30.0	60.0	-	60.0	-	-	-
Soybean meal	145.0	117.5	292.5	-	232.5	-	-	-
Wheat middlings	120.0	120.0	240.0	-	240.0	-	-	-
Calcium carbonate	18.0	15.0	35.5	-	30.0	-	-	-
Salt	2.0	2.0	4.5	-	4.0	-	-	-
Dicalcium phosphate	13.0	13.0	25.5	-	26.0	-	-	-
Sodium bicarbonate	1.0	1.0	2.0	-	2.0	-	-	-
Methionine	1.7	1.9	3.4	-	3.9	-	-	-
Lysine	1.3	1.4	2.5	-	2.9	-	-	-
Threonine	0.5	-	0.5	-	-	-	-	-
Additive	2.0	2.0	4.0	-	4.0	-	-	-
Vitamin and mineral premix	3.0 ⁶	3.0 ⁶	6.0 ⁶	-	6.0 ⁴	-	33.3 ⁷	35.1 ⁷

¹CM: complete pelleted diet containing 50% maize; CS: complete pelleted diet containing 50% sorghum; MM: mixed-ration diet containing 50% maize mash (“CF”) and 50% protein-rich pellets (“PRM”) MS: mixed-ration diet containing 50% sorghum whole seeds (“SWS”) and 50% protein-rich pellets (“PRS”). ² Arroyo et al., 2012a ³ Arroyo et al., 2012b ⁴420 g maize/kg as whole grains and 580 g maize/kg as ground meal; ⁵420 g sorghum/kg as whole seeds and 580 g sorghum/kg as ground meal; ⁶ Vitamins, A: 9,990 UI/kg; D3: 1,998 UI/kg; E: 10.0 UI/kg; B1: 2.0 mg/kg; K3: 1.0 mg/kg; B2: 2.5 mg/kg; B5: 5.1 mg/kg; B6: 1.0 mg/kg; PP: 24.9 mg/kg; B9: 0.3 mg/kg; Choline: 300 mg/kg. Dietary minerals, Cu: 9.3 mg/kg; Fe: 29.0 mg/kg; I: 0.99 mg/kg; Co: 0.16 mg/kg; Mn: 70 mg/kg; Zn: 47 mg/kg; Se: 0.20 mg/kg. 4000mg/kg; Clay (sepiolite): 2 g/kg;⁷ Vitamins, E: 32.00 UI/kg; B1: 4.00 mg/kg; K3: 2.86 mg/kg and minerals FeSO4: 55.40 mg; CuSO4: 15.00 mg; ZnSO4: 40.00 mg; MnSO4: 74.00 mg; Ca: 2.13g, Na: 1.44g; P: 0.23g /kg.

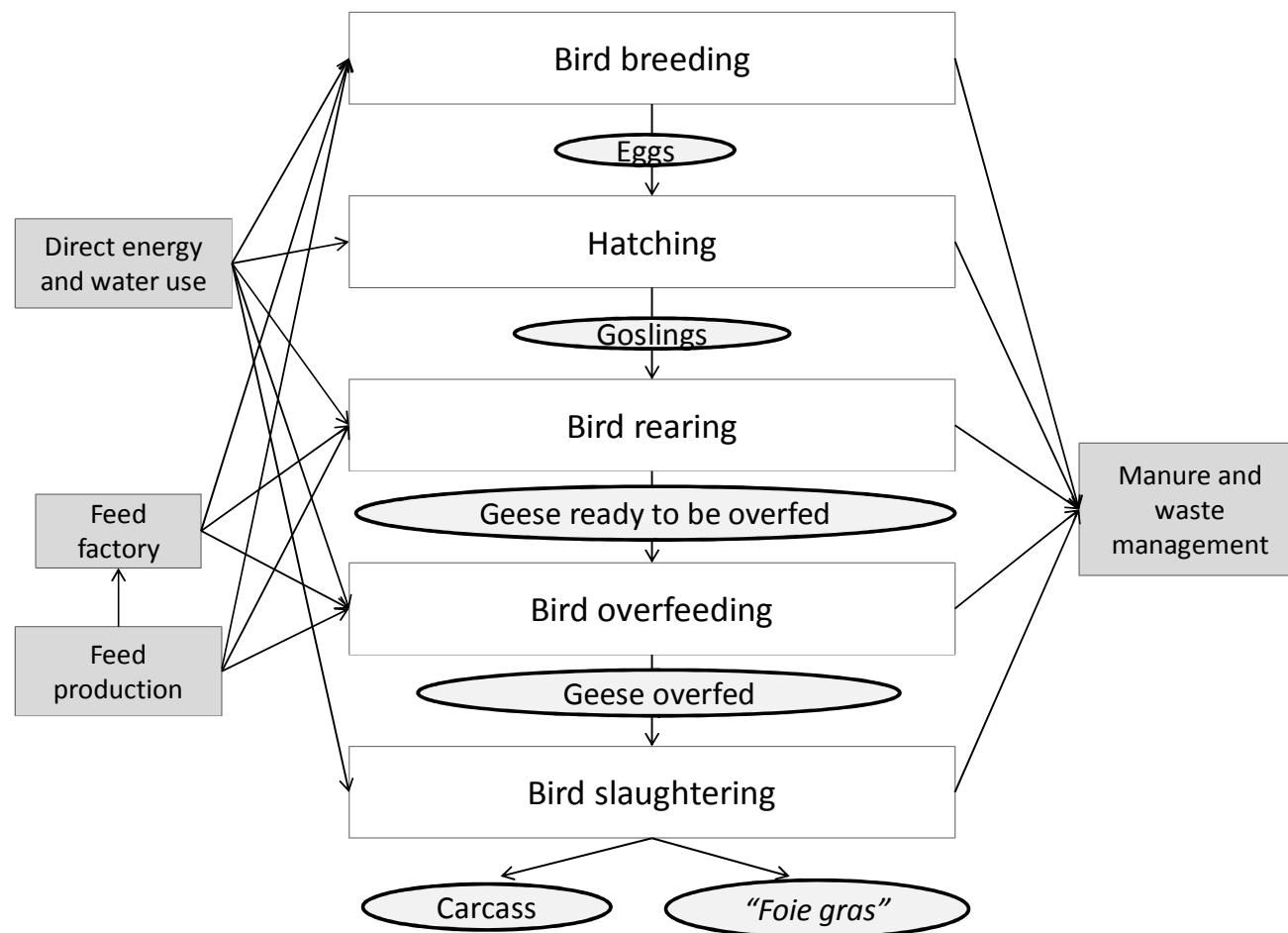


Figure 1 Flow diagram process-mapping goose "foie gras" production from the cradle to the slaughterhouse exit gate

As described in Mosnier et al. (2011), secondary data on resource use and emissions associated with the production and delivery of several crop production inputs (fertilizers, pesticides, tractor fuel and agricultural machinery) came from the ecoinvent database version 2.0 (Nemecek and Kägi, 2007). The production of seed for sowing was accounted for by assuming inputs required for seed production were similar to those required for the corresponding crop. We considered that crop products and feed ingredients produced in France were transported by road to the Dordogne, whereas products imported to France (i.e. soybean) were shipped from overseas to the port and then by road to the feed factory.

Crop production

For all crops, inputs used and yields were based on French government statistics (AGRESTE, 2010). Except for maize and sorghum, crop production data were French national averages based on data from the main production regions for the target crop; yield levels were 2006-to-2009 averages. For maize and sorghum production, we distinguished maize from the Aquitaine (southwest France), which was irrigated and mainly fertilized with mineral fertilizers, and sorghum from the Midi-Pyrénées (southwest France), which was not irrigated and mainly fertilized with mineral fertilizers. Main inputs used, dry matter crop yields and nitrate-N emitted for maize and sorghum productions are shown in Table 2.

Feed-ingredients production

For processes transforming crops into feed ingredients, data were based on Nemecek and Kägi (2007) for maize-drying and Jungbluth et al. (2007) for the production of soybean meal, rapeseed meal and oil. Data were also collected for salt (Althaus et al., 2007), monocalcium phosphate (LCA Food database, 2007) and calcium carbonate (Nemecek and Kägi, 2007). The premix was assumed to be mainly based on having the same impacts as calcium carbonate, as proposed in Mosnier et al. (2011).

Table 2 *Main inputs used, dry matter yield, and nitrate-N emitted (all in kg/ha except irrigation) for maize versus sorghum crops*

	Maize ¹	Sorghum ²
N Mineral	189.0	68.0
N	46.0	23.0
P ₂ O ₅ (triple superphosphate)	67.0	21.0
K ₂ O (potassium oxide)	85.0	8.0
CaO (calcium oxide)	167.0	333.0
Seed for sowing	20.0	13.0
Pesticide (active ingredient)	3.1	2.2
Diesel	82.0	76.0
Irrigation water (m ³ /ha)	760.0	0.0
Agricultural machinery	20.9	19.0
Grain dry matter yield	8,820.0	5,525.0
Nitrate-N emitted	70.0	32.0

¹ Irrigated, from Aquitaine, France ² Not irrigated, from Midi-Pyrénées, France

Many feed ingredients (e.g. soybean meal, rapeseed oil) are co-products. For these ingredients, resource use and emissions were allocated according to the economic value of the co-products, which was calculated using extraction rates (percentage of processed product obtained from the parent product) and economic values. Extraction rates were borrowed from FAO data (FAO, 2002) and values were ISTA (2009) 2004-to-2007 averages, as described in Mosnier et al. (2011).

Emissions calculation

As described in Mosnier et al. (2011), emissions to air were estimated for NH₃, N₂O and NO_x. Emission factors for NH₃ volatilization following application of mineral fertilizer were based on Nemecek and Kägi (2007). Emission factors for N₂O were based on IPCC figures (IPCC, 2006), and NO_x emissions were estimated according to Nemecek and Kägi (2007) as 21% of N₂O emissions. NO₃ losses to groundwater were based on Basset-Mens et al. (2007), considering type of previous crop and duration of the fallow period. Phosphate emissions to water were estimated according to Nemecek and Kägi (2007) considering leaching to groundwater and run-off to surface water for soluble phosphate as well as erosion of soil particles containing phosphorus. Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn emissions to soil were calculated

via to a mass-balance approach considering input by synthetic and organic fertilizers and output via harvested products. Fertilizer heavy-metal content was based on Nemecek and Kāgi (2007).

Scenarios

Routine farm management

The breeding system we defined (based on traditional practices; Magdeleine, 2003) for the production of goose eggs was located in a rural zone of the Dordogne assumed to be located 80 km from the farm (i.e. from the goose GF and O unit). The average breeding unit surface area was 1 ha, and the bird buildings covered a surface of 250 m². The infrastructure materials of the sheds consisted mainly of steel tubes, brick, polyvinylchloride, polyurethane, and concrete for the foundations. The shelters were fitted with luminosity-control systems to maximize egg-laying. The feeding and drinking systems were fully automated. The composition of the feed distributed during breeding is described in Sauveur et al. (1988). A flock of breeding geese comprised 800 reproductive geese that served for 4 years and produced 29,700 eggs per year. The manure extracted of the breeding unit represented 120 kg / birds / years.

The hatchery was localized at 80 km from the farm. The building covered a surface of 600 m². The construction materials of the sheds consisted mainly of steel tubes, brick, polyvinylchloride, polyurethane, and concrete for the foundations. About 170,550 eggs were incubated per year, ultimately producing 113,500 one-day-old goslings.

Both the GF and O units were located on the same farm. Each rearing cycle lasted about 105 days, allowing 3 production cycles of 1,000 birds per year. Grower geese of both sexes were used. The rearing building covered a surface area of 250 m², and each flock had access to 2 ha of grassland. Room temperature was maintained at 28°C during the first week after hatching and was subsequently gradually reduced to 22°C at 49 days of age, after which no heat was delivered and geese had access to outdoors.

Each O-period cycle lasted about 15 days, allowing 12 production cycles of 400 geese per year. Overfed birds came from the farm ($\frac{1}{4}$ of the animals) or from surrounding rearing units located at 80 km from the farm ($\frac{3}{4}$ of the animals). The building used for the overfeeding

covered a 200 m² surface area and was divided into 40 pens (3 x 1 m per pen, holding 10 geese) tooled up with drinkers. In-building climate was 20°C and 90% max. humidity. The bird performances during the GF and O periods used in this paper come from experimental data and are described below. The waste extracted represented 40 kg / bird of midden and 70 L / bird of manure respectively for the GF and O units. All emissions from geese manure were calculated according to CORPEN data (2006) and Gac et al. (2006).

The bird slaughtering unit was considered to be located 80 km from the farm. The building covered a 320 m² surface area. About 80,000 overfed geese were killed per year in accordance with European Council (EC) regulation No. 1099/2009, to yield carcasses and foie gras. For these two products, resource use and emissions were allocated according to their economic value.

Scenarios for the study of the effects of diet presentation on foie gras production

The rearing performances used to build the diet presentation scenarios were taken from Arroyo et al. (2012a). The aim of this trial was to study the effects of diet cereal (maize or sorghum) and diet presentation (a complete pelleted diet or a half-and-half mixture of 500g/kg simplified-form cereal and 500g/kg protein-rich pellets) on geese performance. Four groups of 120 birds were formed to receive different diets in the GF period: a complete pelleted diet containing 500 g maize/kg (CMM_a group); a mixture containing 500 g protein-rich pellets and 500 g maize mash/kg (MMM_a group); a complete pelleted diet containing 500 g sorghum/kg (CSM_a group); or a mixture containing 500 g protein-rich pellets and 500 g whole sorghum seeds/kg (MSM_a group). After this period, 33 birds/group were overfed with maize. The main results, which are reported in Table 3, showed that diet presentation format had no effect on body weight or foie gras weight at the end of the O period, but increased mortality during the O period.

Table 3 Goose performances according to feeding strategies

	Effect of diet presentation ¹				Effect of cereal type in the diet ²			
	Group CMM _a	Group CSM _a	Group MMM _a	Group MSM _a	Group CMM _b	Group CMS _b	Group CSM _b	Group CSS _b
Diet during GF period ³	CM	CS	MM	MS	CM	CM	CS	CS
Diet during O period	Maize	Maize	Maize	Maize	Maize	Sorghum	Maize	Sorghum
<i>Performance during S period</i>								
Period	1-53 d				1-43 d			
Feed intake (g/bird) ⁴	11,500				8,500			
<i>Performance during GF period</i>								
Period	54-101 d				44-104 d			
Mortality (%)	0.83	1.67	0.83	0.00	1.65	1.65	1.15	1.15
Feed intake (g/bird)	22,230	23,020	23,440	23,420	20,370	20,370	21,450	21,450
<i>Performance during O period</i>								
Period	102-117 d				105-120 d			
Mortality (%)	6.06	6.06	15.15	24.24	1.49	3.08	14.29	6.15
Feed intake (g /bird) ⁵	13,920	13,810	13,780	13,800	12,730	12,700	12,760	12,770
Body weight (g)	7,968	8,122	8,256	8,219	8,252	8,315	8,224	8,410
Fatty liver (g)	858	880	889	816	910	943	860	1,026

S period: Starter period; GF period: Growing-finishing period; O period: Overfeeding period

¹ Arroyo et al., 2012a ; ² Arroyo et al., 2012b ; ³ CM: complete pelleted diet containing 50% maize; CS: complete pelleted diet containing 50% sorghum; MM mixed-ration diet containing 50% maize mash and 50% protein-rich pellets; MS: mixed-ration diet containing 50% sorghum whole seeds and 50% protein-rich pellets. ⁴ The starter diet used was a complete pelleted diet, AMEn; (11.70 MJ/kg, CP 18.00%), manufactured by DFP Nutraliance (Saint-Ybard, Corrèze, France)

Scenarios for the study of the effects of cereals used in the diet on “foie gras” production.

The rearing performances used to build the cereal types scenarios were taken from Arroyo et al. (2012b). The aim of this trial was to study the effects of substituting maize by sorghum during the GF and/or O periods on geese performances. A total of 1,200 geese were distributed into 2 groups differing in the diet received during the GF period. Half of the birds received a complete pelleted feed containing 500 g of maize/kg, while the other half received a complete pelleted feed containing 500 g sorghum/kg. At the end of the GF period, 130 ganders/group were separated in two groups. In the first group, the birds were overfed with a mixture composed mainly of yellow maize (CMM_b and CSM_b groups) while in the second group, the birds were overfed with a mixture composed mainly of sorghum (CMS_b and CSS_b groups).

Leading into the O period, bird live weight was similar among the 4 groups. The amount of food distributed during the O period was similar among groups, but mortality was higher in the CSM_b group compared to the other 3 groups. At the end of the O period, birds overfed with sorghum yielded heavier foie gras than birds overfed with maize. The main results of this sub-study are reported in Table 3.

Life Cycle Impact Assessment

The following impact categories were considered: climate change (corresponding to greenhouse gas emissions, g CO₂-eq.), eutrophication (g PO₄-eq.), acidification (g SO₂-eq.), terrestrial ecotoxicity (g 1,4-DCB-eq.), cumulative energy demand (MJ), water use (L) and land occupation (m² per year). Each impact category was calculated by multiplying the aggregated resources used and aggregated emissions of each individual substance by a characterization factor for each potential target impact category.

Climate change, acidification, eutrophication, terrestrial ecotoxicity, water use and land occupation were calculated using the CML2 ‘baseline’ and ‘all categories’ 2001 characterization methods as implemented in Simapro LCA calculation software (version 7.2). Cumulative energy demand (CED) was calculated according to version 1.05 of Simapro. For climate change, we updated the values of the characterization factors (Forster et al., 2007) for biogenic methane (new value 25 kg CO₂-eq.) and nitrous oxide (new value 298 kg CO₂-eq.).

A description of the CML 2001 and CED methods can be found in Frischknecht et al. (2007). Functional unit was 1 kg of foie gras.

Results

Environmental impacts of goose diet production

For all the environmental impacts of the growing-finishing diet, the proportion of raw materials of vegetable origin (maize, sorghum, soybean meal, wheat + wheat middling, and rapeseed meal) contributed to approximately 90% of the impacts value. Table 4 summarizes the environmental profile of the feed formulation ingredients used. Among the vegetable raw materials, wheat middling and sorghum had the lowest values for impact on climate change (297 g and 327 g CO₂-eq./kg respectively), whereas rapeseed meal had the highest values (942 g CO₂-eq./kg, respectively). For eutrophication, acidification and terrestrial ecotoxicity, the highest impact values were observed for rapeseed meal (8.4 g PO₄-eq./kg, 8.9 g SO₂-eq./kg and 4.5 g 1,4-DCB-eq./kg, respectively). The highest value for impact on water use was recorded for maize (97.8L/kg). For impact on land occupation, rapeseed and soybean meal (3.04 m² year/kg and 1.68 m² year/kg, respectively) had the highest impact values. Environmental impacts of sorghum were approximately 40% lower than those of maize, except on eutrophication (+18%) and land occupation (+33%).

Amino acids had the highest environmental impact values (Table 4) but they were used in small quantities in the diet composition (< 4%; Table 1) and consequently had little influence on the environmental impacts of the diet (< 2 %).

The inclusion level of dietary maize or sorghum had a real effect on their environmental impacts. Except for eutrophication and land occupation, the environmental impacts of geese diets were lower when the cereal used was maize rather than sorghum, and the differences were larger for O-period diets than GF-period diets (-43% vs -19% for climate change, -47% vs -16% for acidification, -47% vs -23% for terrestrial ecotoxicity, -61% vs -25% for CED, -92% vs -74% for water use, respectively; Table 5). Diet presentation format, i.e. mainly the pelleting process here, has only a very slight effect on the impact values (< -5% in MM vs CM or MS vs CM, respectively; Table 5).

Table 4 Potential environmental impacts of the ingredients used in the geese diets (for 1 kg delivered at the feed mill)

	Climate change (g CO ₂ -eq./kg)	Eutrophication (g PO ₄ -eq./kg)	Acidification (g SO ₂ -eq./kg)	Terrestrial ecotoxicity (g 1.4-DCB-eq./kg)	Cumulative energy demand (MJ/kg)	Water use (L/kg)	Land occupation (m ² year/kg)
Maize	527.0	4.9	3.0	2.7	4.2	97.8	1.2
Sorghum	327.0	5.8	1.7	1.5	1.8	6.9	1.6
Wheat	494.0	3.9	4.1	1.4	2.8	21.0	1.4
Rapeseed meal	942.0	8.4	8.9	4.5	6.1	26.0	3.0
Soybean meal	531.0	5.6	3.5	3.2	6.7	25.8	1.7
Wheat middlings	297.0	2.3	2.4	1.3	2.4	12.6	0.8
Calcium carbonate	436.0	0.0	0.2	1.4	0.9	0.0	0.0
Salt	198.0	0.2	2.1	0.0	2.9	0.1	0.0
Dicalcium phosphate	1,497.0	19.0	39.2	11.0	21.6	7.10 ⁷	0.4
Sodium bicarbonate	1,095.0	3.3	4.3	7.3	20.0	52.5	0.0
Methionine	2,904.0	1.4	6.5	2.8	88.3	56.7	0.0
Lysine	4,211.0	8.2	13.1	21.5	117.7	123.9	2.3
Threonine	4,211.0	8.2	13.1	21.5	117.7	123.9	2.3
Additive	436.0	0.0	0.2	1.4	0.9	0.0	0.0
Vitamin and mineral premix	436.0	0.0	0.2	1.4	0.9	0.0	0.0

Table 5 Potential environmental impacts of the feed at the farm gate (for 1 kg of each feed)

	Climate change (g CO ₂ -eq./kg)	Eutrophication (g PO ₄ -eq./kg)	Acidification (g SO ₂ -eq./kg)	Terrestrial ecotoxicity (g 1.4-DCB-eq./kg)	Cumulative energy demand (MJ/kg)	Water use (L/kg)	Land occupation (m ² year/kg)
Growing-finishing diets ¹							
CM	536.0	4.6	3.8	2.6	5.6	61.3	1.2
CS	436.0	5.0	3.2	2.0	4.2	15.8	1.4
MM	532.0	4.6	3.7	2.5	5.3	61.1	1.2
MS	432.0	5.0	3.1	1.9	4.0	15.6	1.4
Overfeeding diets ²							
Maize	339.0	3.0	1.9	1.7	3.1	53.4	0.7
Sorghum	192.0	3.3	1.0	0.9	1.2	4.4	0.9

¹CC: complete pelleted diet containing 50% maize; CS: complete pelleted diet containing 50% sorghum; MC mixed-ration diet containing 50% maize mash and 50% protein-rich pellet; MS: mixed-ration diet containing 50% sorghum whole seeds and 50% protein-rich pellets.

² The overfeeding diets were in the form of a mixture composed of 42% whole grains and 58% ground grains. The diet was blended with water (667 or 754 g/kg in maize and sorghum diets, respectively) prior to overfeeding.

Effects of the form of diet presentation on environmental impacts of foie gras production

The effects of diet presentation format on the environmental impacts of 1 kg of foie gras produced were dependent on the cereal type included in the diet. Indeed, diet format had no effect on impact of foie gras when cereal used was maize (e.g. 44.9 kg CO₂-eq v. 46.6 kg CO₂-eq in the CMM_a and MMM_a groups, respectively; Table 6). Conversely, a diet presented in a simplified form during the GF period generally increased the impact of foie gras, e.g. + 13.7% for climate change impact, when the cereal used was sorghum, due to a higher bird mortality during the subsequent O period (, Table 6). But the use of sorghum reduced the impact on water use (-17%).

Effects of cereals used in the diet on environmental impacts of foie gras production

The effect of cereal type in the goose diet on the environmental impacts of foie gras production were dependent on its level of inclusion and the physiological state of the animals when it was offered. Indeed, a total substitution of maize by sorghum, i.e. through both the GF period and the O period, resulted in lower environmental impacts of “foie gras” (31.3 v. 38.1 kg CO₂-eq./kg in group CSS_b v. CMM_b, respectively; Table 6). On the opposite, a partial substitution of maize by sorghum during overfeeding period only had no effect on impact of “foie gras” (38.1 kg CO₂-eq./kg v. 35.7 kg CO₂-eq./kg in the groups CMM_b and CMS_b respectively, Table 6), excepted on water use (-29%). Finally, a partial substitution of maize by sorghum increased the impact of “foie gras” when practiced during the growing-finishing period (41.4 kg CO₂-eq./kg in the group CSM_b; Table 6).

Table 6 Potential environmental impacts of foie gras (1 kg at the slaughterhouse gate) using the economic allocation approach

Group	Diet during GF period ¹	Diet during O period	Climate change (kg CO ₂ -eq./kg)	Eutrophication (kg PO ₄ -eq./kg)	Acidification (kg SO ₂ -eq./kg)	Terrestrial ecotoxicity (kg 1.4-DCB-eq./kg)	Cumulative energy demand (MJ/kg)	Water use (L/kg)	Land occupation (m ² year/kg)
Effect of diet presentation ²									
CMM _a	CM	Maize	44.9	0.33	0.58	0.16	356.6	3,541.9	64.7
CSM _a	CS	Maize	42.0	0.34	0.55	0.14	323.4	2,506.4	68.1
MMM _a	MM	Maize	46.6	0.35	0.60	0.16	367.2	3,661.8	68.0
MSM _a	MS	Maize	51.1	0.41	0.68	0.17	388.0	2,927.9	83.9
Effect of cereal in the diet ³									
CMM _b	CM	Maize	38.1	0.28	0.51	0.13	295.4	2,936.6	52.4
CMS _b	CM	Sorghum	37.5	0.28	0.49	0.12	268.1	2,076.8	55.3
CSM _b	CS	Maize	41.4	0.33	0.57	0.14	309.2	2,296.7	65.3
CSS _b	CS	Sorghum	31.3	0.27	0.44	0.10	223.8	1,056.5	55.9

¹CC: complete pelleted diet containing 50% maize; CS: complete pelleted diet containing 50% sorghum; MC mixed-ration diet containing 50% maize mash and 50% protein-rich pellet; MS: mixed-ration diet containing 50% sorghum whole seeds and 50% protein-rich pellets.

² Arroyo et al., 2012a

³ Arroyo et al., 2012b

Discussion

The objectives of this paper were to evaluate with LCA method, the consequences i) of a substitution of maize by sorghum during growing-finishing and/or overfeeding periods and ii) of the diet presentation on the environmental impacts of feed and “foie gras” production. The results showed that i) a total substitution of maize decreases the environmental impacts of feed and of “foie gras” production and ii) a simplified diet during the growing-finishing period, in form of a mixture of whole grains and protein-rich pellets reduced only slightly the environmental impacts of the feed compared to a complete pelleted diet and its effects on “foie gras” is null (maize) or detrimental (sorghum), depending on the cereal used.

The environmental impacts of the production of feed for pig (van der Werf et al., 2005; Mosnier et al., 2011), salmon; (Pelletier and Tyedmers, 2007) or poultry (Mosnier et al., 2011) as well as the consequences of integrating environmental constraints in the feed formulation were previously studied (Nguyen et al., 2011). Results showed that both the choice of raw materials and the form of diet presentation modified the environmental impacts of feed production. Studies have demonstrated the technical feasibility (Gabriel et al., 2003) and environmental interest (van der Werf et al., 2005) of using non-pelleted feeds (crushed, mashed, or whole grains) in poultry in order to cut out the pelleting process, since industrial processes involved in feed ingredients production are known to contribute to their environmental impacts (van der Werf et al., 2005). Here, we found that giving a simplified diet during the GF period, in form of a mixture of whole grains and protein-rich pellets, only slightly reduced the environmental impacts of a feed for geese compared to a complete pelleted diet. Therefore, its consequences in terms of environmental impact of foie gras production were null with unchanged zootechnical performances, as observed with maize, or negative with lower zootechnical performances (higher mortality), as observed with sorghum. The use of sorghum in a simplified form may prevent the right development of the proximal part of the goose’s digestive tract, meaning the animals are less able to cope with the very high dietary intake during the O period (Arroyo et al., 2012a). A lower hydration capacity of whole grains compared to pellets could explain this result and the higher mortality that we observed with this feeding schedule.

Previous results showed that using sorghum in goose diet is technically feasible and opens up promising animal performance perspectives (Arroyo et al. 2012a and 2012b). Here, we

found evidence that a total substitution of maize by sorghum was also beneficial in terms of potential environmental impacts. This difference is observed for impact on water use, since sorghum culture has a lower water demand than maize crops (Farré and Faci, 2006), but also for many other impacts such as climate change, acidification or cumulative energy demand.

However, a partial substitution, i.e. during the GF period or the O period only, led to contradictory results: it had no effect on the environmental impacts of foie gras when the substitution was used in the O period but detrimental effects when the substitution was used in the GF period. Nevertheless, the sorghum substitution reduced the environmental impacts of the feed for both GF period and O period. This inconsistency is explained by the higher mortality observed during the O period in birds receiving sorghum during the GF period.

This inconsistency also highlights the limitations and risks generated by associating LCA methods with experimental results. Firstly, the use of experimental data has the advantage of representing an actual farm system complete with its specific individual features. However, data coming from only one or two values per scenario lead to shortcomings in this approach. This issue has previously been studied in grassland pastoral systems for cattle (Subak, 1999; Peters et al., 2010). The range of different regions, breed types, and levels of management and technical efficiency make it difficult to draw definitive conclusions (Crosson et al., 2011). To reduce these risks, experimental results should only be integrated into LCA when the data are obtained from 'steady state' systems and several measurements. In our case, the number of animals per group was satisfactory (>120 birds), and thus their performances can be considered meaningful. However, simple technical adjustments in feed practices during one or two subsequent experiments would probably have attenuated the detrimental effects on bird mortality and thus the environmental impacts of foie gras.

Secondly, combining data from many sources raises the issue of how to assess uncertainty and data approximation and the allied consequences on LCA results (Ross et al., 2002). For example, Prudêncio da Silva et al. (2010) underlined the wide range of different datasets for Brazilian soybeans. The particularities of technical and regional practices already have a great influence on the results of LCA assessments, and the issue will be further compounded by added dataset differences to ultimately bring strong variability in reported results.

Conclusions

The results reported here showed that the total substitution of maize by sorghum in the diet of growing and overfed geese reduced the potential environmental impacts of the feed and of the foie gras production process as a whole. Therefore, sorghum offers an interesting alternative to maize, especially under conditions of limited water availability, by reducing the environmental impacts and increasing the pane of available resource food and thus the flexibility and robustness of the foie gras production system. In contrast, diet presented in a simplified form slightly increased the environmental impacts of the feed and can even increased the environmental impact of the foie gras production processes if combined with detrimental effects on bird mortality. Note that the use of sorghum in a simplified form requires appropriate feeding practices before it can be recommended.

Acknowledgments

The authors thank the staff of the geese breeding station (Dordogne, France) for excellent supervision of the studies on geese, the staff of the Chambre d'Agriculture de la Dordogne for collecting data on goose “foie gras” production, and the staff of UMR 1069 SAS for their technical assistance on the LCA analysis.

References

- AGRESTE, [La statistique, l'évaluation et la prospective agricole] 2010. Enquête pratiques culturales. Retrieved May 20, 2012 from <http://agreste.agriculture.gouv.fr/>.
- Althaus, H.J., Chudacoff, M., Hischier, R., Jungbluth, N., Osses, M., Primas, A., 2007. Life cycle inventories of chemicals. Final ecoinvent data report v2.0, vol. 8. Swiss Centre for the Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- Amigues, J.P., Debaeke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., Thomas, A., 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72pp.
- Andersson, K., Ohlsson, T., Olsson, P., 1998. Screening life cycle assessment (LCA) of tomato ketchup: a case study. *J. Clean. Prod.* 6, 277–288.
- Arroyo, J., Auvergne, A., Dubois, J.P., Lavigne, F., Bijja, M., Bannelier, C., Fortun-Lamothe, L., 2012a. Effects of presentation and type of cereals (maize or sorghum) on performance of geese. *Poult. Sci.* 91, 2063-2071.
- Arroyo, J., Auvergne, A., Dubois, J.P., Lavigne, F., Bijja, M., Fortun-Lamothe, L., 2012b. Effects of substituting yellow maize by sorghum in goose diet on magret and foie gras quality. *J. Anim. Sci.* (submitted)
- Basset-Mens, C., van der Werf, H.M.G., Robin, P., Morvan, T., Hassouna, M., Paillat, J., Vertès, F., 2007. Methods and data for the environmental inventory of contrasting pig production systems. *J. Clean. Prod.* 15, 1395–1405.
- Boer, D.I.J.M., 2002. Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. *Livest. Prod. Sci.* 80, 69–77.
- Boggia, A., Paolotti, L., Castellini, C., 2010. Environmental impact evaluation of conventional, organic and organic-plus poultry production systems using life cycle assessment. *World's Poult. Sci. J.* 66, 95-114.
- CORPEN, 2006. Estimation des rejets d'azote, de phosphore, de potassium, de calcium, de cuivre et de zinc par les élevages avicoles. Comité d'orientation pour les pratiques agricoles respectueuses de l'environnement, 55p.
- Crosson, P., Shalloo, L., O'Brien, D., Lanigan, G.J., Foley, P.A., Boland, T.M., Kenny, D.A., 2011. A review of whole farm systems models of greenhouse gas emissions from beef and dairy cattle production systems. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166–167, 29-45.
- European Union Council Directive 1009/2009/EC, 2009. On the protection of animals at the time of slaughter or killing, Official Journal of the EC, L 303 (2009), pp. 1-30.

- FAO, 2002. Technical conversion factors (TCF) for agricultural commodities. Retrieved May 18, 2010, from <http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/methodology/tcf.pdf>
- Farré, I., Faci, J.M., 2006. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agric. Water Manage.* 83, 135-144.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., van Dorland, R., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In *Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. S Solomon, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor and HL Miller), pp. 129-234. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Hirschler, R., Hellweg, S., Humbert, S., Köllner, T., Loerincik, Y., Margni, M., Nemecek, T., 2007. Implementation of life cycle impacts assessment methods. *Ecoinvent report no. 3, v2.0*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- Gabriel, I., Mallet, S., Leconte, M., 2003. Differences in the digestive tract characteristics of broiler chickens fed on complete pelleted diet or on whole wheat added to pelleted protein concentrate. *Br. Poult. Sci.* 44, 283-290.
- Gac, A., Béline, F., Bioteau, T., 2006. [Flux de gaz à effet de serre (CH₄, N₂O) et d'ammoniac (NH₃) liés à la gestion des déjections animales – Synthèse bibliographique et élaboration d'une base de données, rapport final, Cemagref-Ademe, 97 p.
- Guéméné, D., Guy, G., 2004. The past, present and future of force-feeding and “foie gras” production. *World's Poult. Sci. J.* 60, 210-222.
- Guinée, J.B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J., 2002. Life cycle assessment: an operational guide to the ISO standards. Centre of Environmental Science, Leiden University, Leiden, The Netherlands.
- Information Science, Technology and Applications (ISTA) 2009. Oil world annual 2009, vol. 1 ISTA Mielke GmbH, Hamburg, Germany.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (ed. HS Eggleston, L Buendia, K Miwa, T Ngara and K Tanabe), IGES, Japan.
- Jungbluth, N., Chudacoff, M., Dauriat, A., Dinkel, F., Doka, G., Faist Emmenegger, M., Gnansounou, E., Kljun, N., Schleiss, K., Spielmann, M., Stettler, C., Sutter, J., 2007. Life

- cycle inventories of bioenergy. Ecoinvent report 17. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- LCA Food database, 2007. Retrieved May 18, 2010, from <http://www.lcafood.dk/>
- Magdeleine, P., 2003. Contexte, structure et perspectives d'évolution du secteur français du foie gras. 67pp. Retrieved February 11, 2008 from <http://www.itavi.asso.fr/economie/references/palmipedes.php/>
- Mosnier, E., van der Werf, H.M.G., Boissy, J., Dourmad, J.Y., 2011. Evaluation of the environmental implications of the incorporation of feed-use amino acids in the manufacturing of pig and broiler feeds using Life Cycle Assessment. *Animal*. 5, 1972–1983.
- Nemecek, T., Kägi, T., 2007. Life cycle inventories of Swiss and European agricultural production systems. Ecoinvent final report v2.0, no. 15, Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich and Dübendorf, Switzerland.
- Nguyen, T.T.H., Bouvarel, I., Ponchant, P., van der Werf, H.M.G., 2011. Using environmental constraints to formulate low-impact poultry feeds. *J. Clean. Prod.* 1-10.
- Pelletier, N., Tyedmers, P., 2007. Feeding farmed salmon: is organic better? *Aquaculture*. 272, 399-416.
- Peters, G.M., Rowley, H.V., Wiedemann, S., Tucker, R., Short, M.D., Schulz, M., 2010. Red meat production in Australia: life cycle assessment and comparison with overseas studies. *Environ. Sci. Technol.* 44, 1327-1332.
- Prudêncio da Silva, V., van der Werf, H.M.G., Spies, A., Soares, S.R. 2010. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. *J. Environ. Manage.* 91, 1831-1839.
- Ross, S., Evans, D., Webber, M., 2002. How LCA studies deal with uncertainty. *Int. J. LCA* 7, 47-52.
- Sauvant, D., Perez, J.M., Tran, G., 2004. Tables of composition and nutritive value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish. eds INRA Editions, Paris and Wageningen Academic Publishers, The Netherlands. 304pp.
- Sauveur, B., Rousselot-Pailley, D., Larrue, P., 1988. Energy feeding of geese breeders. *INRA Prod. Anim.* 1, 209-214.
- Subak, S., 1999. Global environmental costs of beef production. *Ecol. Econ.* 30, 79-91.
- van der Werf, H.M.G., Petit, J., Sanders, J., 2005. The environmental impacts of the production of concentrated feed: the case of pig feed in Bretagne. *Agr. Syst.* 83, 153-177.

5. Annexe I

Impact environnementaux de la production du foie gras d'oie : comparaison des modes d'allocation massique et économique

Lorsqu'une étape du cycle de vie du produit aboutit à plusieurs coproduits, il est nécessaire de réfléchir à la meilleure méthode d'affectation des impacts aux différents coproduits. Appelée « allocation », cette répartition influence fortement les résultats de l'analyse des cycles de vie (Cederberg et Mattson 2000). Différentes approches sont décrites :

- l'allocation massique : les charges et émissions en amont de l'étape de séparation des coproduits sont attribuées au prorata de leur poids respectif.
- l'allocation économique : ce prorata est effectué en multipliant les quantités produites (kg) par la valeur économique respective de chaque coproduit (euros / kg). Cette valeur est estimée représenter plus justement l'intérêt porté par l'utilisateur final à la fabrication du produit.
- l'allocation énergétique : ce prorata est effectué en multipliant les quantités produites (kg) par la teneur en énergie respective de chaque coproduit (MJ / kg). Cette valeur est estimée représenter plus justement l'utilisation des ressources énergétiques totales liées à la fabrication du produit.
- sans allocation : les charges et émissions en amont sont attribuées au prorata du nombre de coproduits.

L'étude de l'influence de la substitution du maïs par du sorgho et de la forme de présentation des aliments sur les impacts environnementaux de la production de foie gras d'oie à l'aide de l'analyse du cycle de vie, a été réalisée en utilisant la méthode d'allocation économique (publication 6). Il nous a semblé judicieux de réaliser également cette étude en utilisant une méthode d'allocation massique et de comparer les deux types de résultats. Le foie gras est en effet un très bon modèle pour réaliser cette comparaison car le foie gras (850 g en moyenne) ne représente que 20% du poids total de l'animal gavé mais 80% de sa valeur économique totale (80 € / kg de foie gras).

Pour comparer ces deux approches, nous avons repris les mêmes scénarios et données que précédemment (publication 6), les résultats obtenus pour les deux méthodes d'allocation sont présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15. Impacts environnementaux potentiels d'1 kg de foie gras (à la sortie de l'abattoir) en utilisant l'allocation massique (AM) et l'allocation économique (AE).

	Aliment pendant la période de croissance -finition ¹	Aliment pendant le gavage	Changement climatique (kg CO ₂ -éq./kg)		Eutrophisation (kg PO ₄ -éq./kg)		Acidification (kg SO ₂ -éq./kg)		Ecotoxicité terrestre (kg 1.4-DCB- éq./kg)		Demande d'énergie cumulée (MJ/kg)		Utilisation de l'eau (L/kg)		Occupation des terres (m ² /an/kg)	
			AM	AE	AM	AE	AM	AE	AM	AE	AM	AE	AM	AE	AM	AE
Influence de la présentation de l'aliment																
CMM _a	CM	Maïs	11,5	44,9	0,09	0,33	0,15	0,58	0,04	0,16	91,4	356,6	908,2	3 541,9	16,6	64,7
CSM _a	CS	Maïs	10,8	42,0	0,09	0,34	0,14	0,55	0,04	0,14	82,9	323,4	642,7	2 506,4	17,5	68,1
MMM _a	MM	Maïs	12,0	46,6	0,09	0,35	0,15	0,60	0,04	0,16	94,2	367,2	938,9	3 661,8	17,4	68,0
MSM _a	MS	Maïs	13,1	51,1	0,11	0,41	0,17	0,68	0,04	0,17	99,5	388,0	750,8	2 927,9	21,5	83,9
Influence de la céréale dans l'aliment																
CMM _b	CM	Maïs	9,8	38,1	0,07	0,28	0,13	0,51	0,03	0,13	75,7	295,4	753,0	2 936,6	13,4	52,4
CMS _b	CM	Sorgho	9,1	37,5	0,07	0,28	0,12	0,49	0,03	0,12	68,7	268,1	532,5	2 076,8	14,2	55,3
CSM _b	CS	Maïs	10,6	41,4	0,09	0,33	0,15	0,57	0,04	0,14	79,3	309,2	588,9	2 296,7	16,7	65,3
CSS _b	CS	Sorgho	8,0	31,3	0,07	0,27	0,11	0,44	0,03	0,10	57,4	223,8	270,9	1 056,5	14,3	55,9

¹CM : aliment complet contenant 50% de maïs ; CS : aliment complet contenant 50% de sorgho ; MM : mélange contenant 50% de maïs concassé et 50% de complément granulé riche en protéines ; MS : mélange contenant 50% de graines de sorgho et 50% de complément granulé riche en protéines.

Les impacts environnementaux liés à la production de 1kg de foie gras calculés par une méthode d'allocation massique ou économique (Tableau 15) se révèlent différents en valeur absolue. En moyenne, les impacts environnementaux sont supérieurs (entre +300 et +600%) lorsqu'ils sont évalués à l'aide d'une méthode utilisant l'allocation économique au lieu de l'allocation massique (Tableau 15). Cela est à relier directement avec le très fort poids économique du foie gras (80% du prix de l'animal) en comparaison de la carcasse (20% du prix). En revanche, les deux méthodes d'allocation n'ont pas changé la nature des conclusions concernant les effets de la substitution du maïs par du sorgho et de la forme de présentation des aliments. Ainsi, la substitution totale du maïs par du sorgho dans l'alimentation des oies gavées réduit l'impact environnemental potentiel de la production de foie gras. Les conséquences d'une modification de la forme de présentation de l'aliment dépendent de la céréale utilisée. Cette conclusion est expliquée par le fait que l'application différentielle du type d'allocation intervient tout à fait à la fin du cycle de vie du produit (dernière étape avant sortie de l'abattoir).

L'approche par allocation massique ou économique du calcul des impacts environnementaux des produits et coproduits peuvent entraîner des différences importantes entre les résultats et par conséquent dans leur interprétation (Crosson *et al* 2011). La sensibilité des résultats à ces différentes approches a été largement étudiée notamment dans le cas des systèmes de production de lait dans la filière bovine (Cederberg et Stadig 2003). Ainsi, Casey et Holden (2005) ont montré que les méthodes d'allocation économique et massique réduisaient de 3 et 15% respectivement les valeurs des impacts potentiels comparées à une méthode sans allocation. Dans notre cas, toute la filière d'élevage des oies en France n'est justifiée que pour la production de foie gras. Il semble donc logique, dans ce cas présent, d'attribuer les impacts environnementaux plus en fonction de la valeur économique des produits que de leur valeur massique. L'attitude la plus prudente consiste à calculer les impacts à l'aide des différentes méthodes d'allocations tant qu'une harmonisation internationale n'a pas été proposée.

6. Annexe II

Impact environnementaux de la production du foie gras d'oie : comparaison avec d'autres productions animales

Plusieurs auteurs ont essayé de synthétiser les impacts environnementaux de plusieurs productions animales et/ou denrées alimentaires (Roy *et al* 2009, de Vries et de Boer 2010, Roy *et al* 2012). Il en résulte que la comparaison inter-filière nécessite une harmonisation i/ de l'unité fonctionnelle, généralement la production d'une tonne de viande ii/ de l'allocation utilisée, généralement l'allocation économique et ii/ des frontières du système.

Cependant lorsque l'on compare la production de viande (bœuf, volailles, porc) à la production de foie gras on s'aperçoit que cette dernière génère beaucoup d'impacts (Tableau 16), cependant la production d'une tonne de carcasse d'oie génère des impacts environnementaux équivalents à la production de porc. Cette différence s'explique par le fort prix de foie gras pour un poids faible par rapport à la carcasse (Cf. 5. Annexe I).

A l'inverse de la production de viande de bœuf, de porc, de mouton, poulet, d'œuf et de lait destinée à nourrir la population, la production de foie gras d'oie est une production destinée au plaisir. Le foie gras d'oie est un produit de luxe qui se consomme de manière ponctuelle généralement lors de moment festif. Dans un contexte de diminution des impacts environnementaux à l'échelle de la planète, l'arrêt de la consommation de produit de luxe entrainerait une réduction de 6% des impacts (Jungbluth et Itten 2012). Cependant la production et la consommation de foie gras d'oie sont très locale et ponctuelle comparée aux autres produits. Le poids des impacts environnementaux à l'échelle mondiale de la production de foie gras d'oie (2 710 t en 2011 ; CIFOG 2012) par rapport aux autres denrées alimentaires (respectivement 56 888 000 t équivalent carcasse pour les bovins, 13 681 000 t équivalent carcasse pour les ovins et caprins, 93 354 000 t équivalent carcasse pour les porcs et 440 315 000 tonnes de lait en 2011, FranceAgrimer 2012) doit être minime.

Tableau 16. Impacts environnementaux à la sortie de l'atelier de différentes productions animales en utilisant la méthode de l'allocation économique d'après de Vries et de Boer (2010)

Etude	Système/Etude	Pays ^a	Unité fonctionnelle	Changement climatique kg CO ₂ -éq	Acidification kg	unité	Eutrophisation kg	unité	Occupation des terres m ²
Partie 6									
Foie gras d'oie	Production type	Fr	t de foie gras	38068	507	SO ₂ -éq	278	PO ₄ ³⁻ -éq	53370
Carcasse d'oie	Production type	Fr	t de poids vif	1331	18	SO ₂ -éq	10	PO ₄ ³⁻ -éq	1831
Porc									
Basset-Mens et Van der Werf (2005)	Bonnes pratiques agricoles	Fr	t poids vif	2300	44	SO ₂ -éq	21	PO ₄ ³⁻ -éq	5400
Basset-Mens et Van der Werf (2005)	Label rouge	Fr	t poids vif	3500	23	SO ₂ -éq	17	PO ₄ ³⁻ -éq	6300
Williams <i>et al</i> (2006)	Elevage à l'intérieur	UK	t poids mort	6420	507	SO ₂ -éq	119	PO ₄ ³⁻ -éq	7300
Blonk <i>et al</i> (1997)	Conventionnel	NL	t poids vif	3700	31	SO ₂ -éq	18	PO ₄ ³⁻ -éq	—
Poulet									
Williams <i>et al</i> (2006)	Conventionnel	UK	t poids mort	4570	173	SO ₂ -éq	49	PO ₄ ³⁻ -éq	6400
Williams <i>et al</i> (2006)	libre accès au parcours	UK	t poids mort	5480	230	SO ₂ -éq	63	PO ₄ ³⁻ -éq	7300
Leinonen <i>et al</i> (2012a)	Conventionnel	UK	t carcasse consommable	4410	47	SO ₂ -éq	20	PO ₄ ³⁻ -éq	5600
Bœuf									
Williams <i>et al</i> (2006)	100% allaitante	UK	t poids mort	25300	708	SO ₂ -éq	257	PO ₄ ³⁻ -éq	38500
Williams <i>et al</i> (2006)	Plaine	UK	t poids mort	15600	452	SO ₂ -éq	153	PO ₄ ³⁻ -éq	22800
Williams <i>et al.</i> (2006)	Colline et de montagne	UK	t poids mort	16400	510	SO ₂ -éq	169	PO ₄ ³⁻ -éq	24100
Œufs									
Mollenhorst <i>et al</i> (2006)	Cage en batterie	NL	t d'œuf	3900	32	SO ₂ -éq	250	NO ₃ ⁻ -éq	4500
Mollenhorst <i>et al</i> (2006)	Litière profonde	NL	t d'œuf	4300	57	SO ₂ -éq	310	NO ₃ ⁻ -éq	4800
Mollenhorst <i>et al</i> (2006)	Litière profonde avec parcours extérieur	NL	t d'œuf	4600	65	SO ₂ -éq	410	NO ₃ ⁻ -éq	5700
Leinonen <i>et al</i> (2012b)	Cage en batterie	UK	t d'œuf	2900	53	SO ₂ -éq	20	PO ₄ ³⁻ -éq	4000
Lait									
Basset-Mens <i>et al</i> (2009)	Moyennes des exploitations agricoles	NZ	t lait	930	8	SO ₂ -e	2,9	PO ₄ ³⁻ -e	1200
Haas <i>et al</i> (2001)	Intensif	G	t lait	1300	19	SO ₂ -e	7,5	PO ₄ ³⁻ -e	—
Haas <i>et al</i> (2001)	Extensif	G	t lait	1000	17	SO ₂ -e	4,5	PO ₄ ³⁻ -e	—

^a NL= the Netherlands; Fr= France; UK= United Kingdom; G= Germany; NZ= New Zealand

II. Approche atelier – Impacts environnementaux, économiques et sociaux à l'échelle de l'atelier de production

1. Objectifs

Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer les conséquences de la substitution du maïs par du sorgho pendant les périodes de croissance et / ou gavage des animaux ainsi que l'utilisation d'aliment sous forme non-granulée sur la durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie à l'aide d'une évaluation multicritère.

2. Méthode d'évaluation

Nous avons comparé i) une alimentation standard de type granulé à une alimentation présentée sous forme d'un mélange de graines entières et de granulés riches en protéines (aliment dit « fermier ») ; et ii) un aliment formulé avec du maïs durant la phase d'élevage et de gavage (MM) à un aliment où cette céréale a été substituée en partie (MS ou SM) ou en totalité (SS) par du sorgho. Des indicateurs permettant d'évaluer la réponse aux objectifs de durabilité assignés aux ateliers de production ont été mesurés. Les valeurs de ces indicateurs pour les ateliers innovants ont été comparées à celles obtenues pour les ateliers de références et transformées en scores puis agrégées par pilier de la durabilité.

3. Principaux résultats

Les résultats montrent que quelle que soit l'innovation testée, aucune n'améliore la durabilité des ateliers de production sur les trois piliers de la durabilité. Toutefois, l'utilisation d'aliments fermiers et l'utilisation d'un système d'alimentation utilisant du sorgho comme source unique de céréale (SS) améliorent la durabilité des ateliers de production pour deux des trois piliers de la durabilité : Economie et Environnement (+0,62 et +0,31) et Economie et Social (+0,32 et +0,20), respectivement.

Ces résultats suggèrent que la substitution totale du maïs par du sorgho ainsi que l'alimentation sous forme non-granulée peuvent être une perspective intéressante pour améliorer la durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie.

4. Publication n°7

Effets du type de céréales (maïs ou sorgho) et de la forme de présentation de l'aliment
(granulé ou mélange) sur la durabilité des ateliers d'élevage d'oies grasses

J. Arroyo^{1,2,3,4}, L.Fortun-Lamothe^{2,1,3}

¹ *Université de Toulouse, INPT ENSAT, UMR 1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion,
Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France*

² *INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326
Castanet-Tolosan, France*

³ *Université de Toulouse, INPT ENVT, UMR 1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion,
Ecosystème et Métabolisme, 31076 Toulouse, France*

⁴ *ASSELDOR, Station d'expérimentation appliquée et de démonstration sur l'oie, La Tour de
Glane, 24420 Coulaures, France*

En préparation

Introduction

Plusieurs rapports ont pointé du doigt les productions animales en tant que filières fortement génératrices de problèmes environnementaux, telles que les émissions de gaz à effet de serre, l'eutrophisation et la pollution de l'eau (FAO, 2006). De plus, de part leurs pratiques ou leur forte intensification, ces dernières sont souvent critiquées par les associations de défense des animaux. Ces pressions politiques et sociétales nécessitent la mise au point d'innovations permettant de rendre ces filières plus « durables » c'est-à-dire à la fois « *écologiquement saine, économiquement viable et socialement juste et humaine* » (Bonny, 1994).

Ainsi, plusieurs travaux ont montré que la plus grande partie des coûts environnementaux des filières de production animale est due à l'alimentation des animaux de production (Boggia *et al.*, 2010, Leinonen *et al.*, 2012a, 2012b). Dans le cas de la filière destinée à la production de foie gras, l'alimentation des palmipèdes repose pour une large part sur l'utilisation du maïs comme source d'énergie (Guéméné et Guy, 2004). Or cette plante présente l'inconvénient d'être consommatrice en eau durant sa production. De plus, dans l'alimentation des palmipèdes, en plus de la forte présence d'une seule céréale pendant la phase de gavage, leur distribution sous forme d'aliments complets granulés au cours de la phase d'élevage est le plus fréquemment observée en France. Mais, utiliser des aliments complets granulés implique des coûts financiers et environnementaux supplémentaires dus au transport et au broyage des différentes matières premières. Selon Dozier *et al.* (2006), le coût du broyage des céréales représente 25 à 30% du coût de fabrication des aliments.

Dans ce contexte, le sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], qui présente les mêmes caractéristiques nutritionnelles que le maïs (Sauvant *et al.*, 2004) mais nécessite pour sa production une quantité d'eau bien inférieure (Farré et Faci, 2006) semble être un candidat de substitution au maïs intéressant. Il pourrait donc être une alternative intéressante afin de réduire la vulnérabilité de l'agriculture française au risque de pénurie d'eau (Amigues *et al.*, 2006). De plus l'alimentation dite « fermière », c'est-à-dire présentée sous forme d'un mélange de grains entiers et d'un granulé complémentaire protéique pourrait réduire partiellement les procédés de fabrication et donc les impacts environnementaux de l'alimentation, tout en améliorant l'acceptabilité sociale des systèmes d'élevage en alimentant les oiseaux avec un régime considéré comme plus « naturel » (Gabriel *et al.*, 2003). Enfin, si

la céréale incorporée dans le mélange fermier est produite localement (c'est-à-dire sur la ferme ou dans un environnement proche), cela peut également réduire les impacts liés à son transport.

Arroyo *et al.* (2012a et 2012b) ont montré que le sorgho peut être utilisé pour l'alimentation des oies pendant les périodes de croissance-finition et/ou de gavage. Mais ils ont également montré une influence importante de la présentation des aliments, pendant la période de croissance-finition, sur les performances des oies. En effet, l'utilisation d'une alimentation « fermière » pendant la phase de croissance-finition des oies a pénalisé la préparation des oiseaux pendant le gavage et a par conséquent augmenté leur taux de mortalité au cours de cette période (Arroyo *et al.*, 2012a). De plus, un changement de céréales (maïs puis sorgho) entre les périodes de croissance-finition et de gavage augmenté la mortalité et réduit les performances des oiseaux pendant la période de gavage (Arroyo *et al.*, 2012b). Cette double innovation dans l'alimentation des oies (changement de céréale et de forme de présentation de l'aliment) présente donc des intérêts mais également des limites. Il semble nécessaire de pouvoir les mettre en balance à l'aide d'une évaluation multicritère prenant en compte les différentes composantes de la durabilité : économique, sociale et environnementale (Aubin *et al.*, 2005). Ces innovations concernent l'atelier d'élevage. Il nous a semblé judicieux d'utiliser une méthode d'évaluation centrée sur ce niveau.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les conséquences de la substitution du maïs par du sorgho pendant les périodes de croissance et/ou gavage et de l'utilisation d'aliment sous forme d'un mélange contenant des céréales entières sur la durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie.

Matériel et méthodes

Méthode d'évaluation de la durabilité

Nous avons retenu pour réaliser l'évaluation de la durabilité des ateliers de production, la méthode S+ durable ?[®] (Fortun-Lamothe, 2011). Cette méthode est une méthode d'évaluation multicritère qui permet d'évaluer la durabilité des ateliers de production dans les 3 piliers de la durabilité.

Définition des objectifs et des champs de l'étude

S+durable ?[®] permet de comparer un atelier de production « de référence » avec un atelier de production « innovant ». Cette comparaison se base sur une grille d'objectif de durabilité qui a été défini dans le cadre d'une démarche participative par consensus d'acteurs (Rey-Valette *et al.*, 2008) organisée au niveau national (Fortun-Lamothe *et al.*, 2012). Cette grille d'objectifs (Tableau 1) est composée de 2 objectifs pour chacun des 3 piliers de la durabilité, de 5 critères pour chacun des 6 objectifs et de 5 indicateurs maximum par critères.

Indicateurs de durabilité

Dans la méthode S+durable ?[®] les indicateurs de durabilité sont choisis par les utilisateurs eux-mêmes pour leur capacité à évaluer la réponse du système aux objectifs de durabilité (Becker, 1997). Nous avons choisi 18 indicateurs permettant d'évaluer la réponse des ateliers de production à quatre objectifs de durabilité : 6 pour le pilier Economie, 4 pour le pilier Environnement et 8 pour le pilier Social (Tableau 2) :

Pour le critère « Est économiquement viable » nous avons choisi l'indicateur « Prix des aliments utilisés / animal (€) » qui est calculé à partir du prix des aliments achetés lors de la réalisation de l'essai c'est-à-dire au printemps 2010. Pour le critère « Permet une efficacité de la main d'œuvre », nous avons utilisé l'indicateur « Efficacité de gavage (%) » qui est calculé pour l'ensemble du troupeau en considérant qu'une oie gavée représente 100% du temps de gavage / animal, une oie non gavée 75% / animal et une oie morte 0% / animal. Pour le critère « Met en œuvre un processus productif efficace », nous avons utilisé deux indicateurs : le ratio poids de foie / poids des animaux mis en gavage (g de foie / g poids vif) et le ratio poids de foie/quantité de pâtée de gavage (g foie/ g de matière sèche). Pour le critère « Maîtrise sa valeur ajoutée », nous avons utilisé un indicateur : le ratio quantité d'aliment non-granulé / quantité totale d'aliment consommée par l'animal (g / g). La quantité d'aliments non granulés est obtenue par différence entre la quantité totale d'aliment et la quantité d'aliments granulés. Pour le critère « Est économiquement rentable », nous avons choisi la valeur commerciale des foies (€ / kg de foie) qui est calculé sur une base de 100 en fonction de la grille commerciale et du poids de foie. La grille commerciale se décompose en 5 classes : Extra (valeur 100), Première (valeur 75), Tout venant (valeur 45), Volailles (valeur 10) et Déclassé (valeur 0).

Tableau 1 : Grille d'Objectifs pour évaluer La Durabilité des ateliers d'élevage (GOLD)

Piliers	Objectifs généraux	Critères	Numéro du critère
Economie	Est économiquement rentable	Est économiquement viable	1
		Permet une efficacité de la main d'œuvre	2
		Met en œuvre un processus productif efficace	3
		Maîtrise sa valeur ajoutée	4
		Est économiquement rentable	5
	Est flexible et adaptable	Est peu spécialisé économiquement	6
		Est peu sensible aux aides	7
		Est autonome financièrement	8
		Est transmissible	9
		Est polyvalent	10
Environnement	Utilise de façon économe les ressources et produit des ressources renouvelables	Produit des ressources renouvelables	11
		Utilise de façon économe les énergies fossiles	12
		Utilise l'eau de façon économe	13
		Utilise de façon économe la biomasse	14
		Présente un lien écologique fort avec son environnement immédiat	15
	Protège les écosystèmes : ressources biologiques et environnement physique	Emet peu d'effluents et les gère de façon respectueuse de l'environnement	16
		Maintient de la biodiversité	17
		Met en œuvre des mesures d'hygiène qui protègent la santé des animaux de l'atelier	18
		Met en œuvre de mesures de prophylaxie qui protègent la santé de tous les animaux	19
		Utilise les antibiotiques de façon économe et raisonnée	20
Social	Préserve la qualité de vie et les conditions de travail du producteur	Permet de vivre de son travail	21
		Permet du repos et une bonne organisation du travail	22
		Limite la pénibilité du travail	23
		Permet une bonne implication dans le milieu social	24
		Permet une bonne insertion dans la vie locale	25
	Répond aux demandes du citoyen -consommateur	Fabrique des produits de qualités	26
		Met en œuvre des pratiques d'élevage respectueuses du bien être animal	27
		Permet un milieu de vie respectueux du bien être animal	28
		Maintient l'emploi et permet des circuits de commercialisation en filière courte	29
		Rend des services non-agricoles	30

Tableaux 2 : Indicateurs choisis et mode d'obtention

Piliers	Objectifs généraux	N° du critère	Indicateurs retenus (Unité)	Sens de variation	Mode de calcul
Economie	Est économiquement rentable	1	Prix des aliments utilisés/animal (€)	-1	Comprend le prix des aliments achetés lors de la réalisation de l'essai c'est-à-dire au printemps 2010
		2	Efficacité de gavage (%)	+1	On considère qu'une oie gavée représente 100% du temps de gavage, une oie non gavée 75% et une oie morte 0%
		3	Poids de foie / Poids des animaux mis en gavage (g foie/ g poids vif)	+1	
		3	Poids de foie / quantité de pâtée de gavage (g foie/g matière sèche)	+1	
		4	Quantité d'aliment non-granulé/quantité totale consommée (g/g)	+1	Tous les aliments exceptés ceux utilisés sous-forme de granulé
		5	Valeur commerciale des foies (€/kg de foie)	+1	Calculé en base 100 en fonction de la grille commerciale ¹ x poids du foie (kg)
	Est flexible et adaptable	Ø			
Environnement	Utilise de façon économe les ressources et produit des ressources renouvelables	13	Quantité d'eau utilisée (L/oie/jour)	-1	
		14	Indice de consommation en élevage (g d'aliment/ g de poids vif)	-1	
		14	Indice de consommation en gavage (g d'aliment/ g de poids vif)	-1	
	Protège les écosystèmes : ressources biologiques et environnement physique	20	IFTA (indices de fréquence des traitements antibiotiques) ²	-1	
	Préserve la qualité de vie et les conditions de travail du producteur	Ø			
Social	Répond aux demandes du citoyen -consommateur	26	Classement commercial (% d'extra-première)	+1	
		26	Rendement après cuisson (g/g)	+1	(Poids du foie cuit pesé sans la graisse exsudée) périphérique/Poids de foie avant la cuisson)*100
		26	Intention de reconsumation du produit par le consommateur (%)	+1	
		27	Taux de mortalité en gavage (%)	-1	
		27	Etat d'emplumement à la mise en gavage (notes)	-1	
		27	Etat des pattes à la mise en gavage (notes)	-1	
		28	Etats des pattes à la fin du gavage (notes)	-1	
		28	Etat de salissure à la mise en gavage (notes)	-1	

¹ Grille commerciale : 100 Extra ; 75 Première ; 45 Tout Venant (gros, sec, défaut) ; 10 volailles et 0 déclassé. ² d'après Fortun-lamothe *et al.* (2011).

Pour le critère « Utilise de l'eau de façon économe », nous avons utilisé la consommation d'eau (L / oie / jour). Pour le critère « Utilise de façon économe la biomasse », nous avons utilisé les indices de consommation (en élevage et / ou en gavage lorsque le nombre de parcs par modalité était supérieur à deux). Pour le critère « Utilise les antibiotiques de façon économe et raisonnée » nous avons pris l'IFTA (Fortun-Lamothe *et al.*, 2011). Pour le critère « Fabrique des produits de qualité », trois indicateurs ont été retenus : le pourcentage de foie gras classé en Extra et Première ; le rendement de foie gras après cuisson (%) et l'intention de reconsommation du produit par le consommateur (%). Pour le critère « Met en œuvre des pratiques d'élevage respectueuses du bien-être animal », trois indicateurs ont également été retenus : le taux de mortalité en gavage (%), l'état d'emplumement et des pattes des animaux lors de la mise en gavage (grille de notation de 1 à 3). Pour le critère « Permet un milieu de vie respectueux du « bien être animal » », nous avons choisi deux indicateurs qui sont l'état de salissure des animaux à la mise en gavage et l'état des pattes à la fin de la période de gavage. Aucun indicateur présentant les qualités nécessaires (Gras *et al.*, 1989) n'a pu être retenu pour les objectifs « Respecte les demandes du producteur » et « Flexible et adaptable ».

Scénarios étudiés

1/ Influence de la forme de présentation (granulé ou non-granulé) des aliments distribués pendant la période de croissance-finition sur la durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie

Les données utilisées pour étudier la durabilité de cette innovation ont été extraites d'Arroyo *et al.* (2012a). Brièvement, cet essai avait pour but d'étudier les effets de la forme de présentation de l'aliment (mélange de céréales sous forme simplifiée et de granulés riches en protéines) sur les performances des oies (mâles et femelles). 480 oies (240 mâles et 240 femelles) âgées d'un jour ont été divisées en 4 groupes différant par le régime alimentaire reçu entre 52 et 102 jours d'âge : un granulé complet contenant 500 g de sorgho / kg (groupe 1) ; un mélange contenant 500 g de granulés riches en protéines et 500 g de graines entières de sorgho / kg (groupe 2), un granulé complet contenant 500 g de maïs / kg (groupe 3), et un mélange contenant 500 g de granulés riches en protéines et 500 g de maïs concassé / kg (groupe 4). De 102 à 117 jours, 33 animaux / sexe / groupe ont été gavés avec du maïs.

Tableau 3 : Résultats des ateliers de production de foie gras d'oie en fonction de la forme de présentation de l'aliment

Piliers	Objectifs généraux	Critères	Indicateurs (Unité)	Groupes	
				Témoin Granulé	Innovant Fermier
Economie	Est économiquement rentable	Est économiquement viable	Prix des aliments utilisés / animal (€)	6,47 ± 1,46	6,00
		Permet une efficacité de la main d'œuvre	Efficacité de gavage (%)	98,69 ± 8,60	93,20
		Met en œuvre un processus productif efficace	Poids de foie / Poids des animaux mis en gavage (g foie/ g PV ¹)	0,15 ± 0,03	0,14
			Poids de foie / Quantité de pâtée (g foie / g matière sèche)	0,07 ± 0,01	0,06
		Maîtrise sa valeur ajoutée	% quantité d'aliment non-granulé/ quantité totale consommée (g / g)	48,68 ± 4,43	72,01
		Est économiquement rentable	Valeur commerciale des foies (€ / kg de foie)	59,06 ± 24,01	56,92
Environnement	Utilise de façon économe les ressources et produit des ressources renouvelables	Utilise l'eau de façon économe	Quantité d'eau utilisée (élevage+gavage) (L / oie / j)	1,92 ± 0,21	1,93
		Utilise de façon économe la biomasse	IC ² élevage (g / g)	12,66 ± 0,91	11,41
			IC ² gavage (g / g)	6,04 ± 0,72	6,02
	Protège les écosystèmes : ressources biologiques et environnement physique	Utilise les antibiotiques de façon économe et raisonnée	IFTA	0,00 ± 0,00	0,00
Social	Répond aux demandes du citoyen -consommateur	Fabrique des produits de qualité	Classement commercial (% d'extra-première)	56,45 ± 5,00	56,60
			% Rendement cuisson	94,23 ± 0,46	92,96
		Met en œuvre des pratiques d'élevage respectueuses du bien être animal	Taux de mortalité (gavage)	6,67 ± 2,52	21,67
			Etat d'empluement à la MEG ³ (notes)	1,22 ± 0,42	1,21
		Permet un milieu de vie respectueux du bien être animal	Etat des pattes à la MEG ³ (notes)	2,44 ± 0,60	2,23

¹ PV : poids vif; ² IC : indice de consommation; ³ MEG : mise en gavage.

Les résultats ont montré que la présentation des aliments avait un effet significatif sur la consommation des animaux (+8,4% ; $P < 0,001$) pendant toute la période de croissance-finition, mais, aucun effet sur les caractéristiques de la carcasse à la fin du gavage. En revanche, nous n'avons pas observé d'effet significatif de la nature de la céréale (maïs ou sorgho) sur les performances des animaux. Par conséquent, dans cette étude, nous avons rassemblé les groupes 1 et 3 sous un seul groupe « Témoin Granulé » et les groupes 2 et 4 sous le groupe « Innovant Fermier ». De plus, pour faciliter la comparaison avec les résultats issus de l'essai portant sur la substitution du maïs par du sorgho en période de croissance-finition et de gavage sur la production de foie gras d'oie (voir ci-dessous), nous n'avons utilisé que les résultats obtenus sur les oies mâles. Les résultats obtenus dans chacun des groupes pour les indicateurs retenus sont présentés dans le Tableau 3.

2/ Influence de la substitution du maïs par du sorgho en période de croissance-finition et de gavage sur la durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie

Les données utilisées pour étudier la durabilité de cette innovation ont été extraites d'Arroyo *et al.* (2012b). Le but de cet essai était d'étudier les effets de la substitution de maïs par du sorgho au cours de la croissance et/ou du gavage sur les performances, la qualité du magret et du foie gras chez les oies. 260 jars ont été divisés en 4 groupes différant par la céréale incluse dans l'aliment distribué au cours de la période de croissance-finition (2 niveaux : du maïs : M, ou du sorgho : S) et celle utilisée pendant le gavage (2 niveaux : du maïs ou du sorgho), en utilisant un plan factoriel 2 x 2. Ainsi, les 4 groupes différaient par le régime alimentaire entre 44 et 104 jours d'âge : une alimentation sous forme de granulés contenant 500 g de sorgho / kg (groupes de SS et SM) ou contenant 500 g de maïs / kg (les groupes MS et MM) et entre 105 et 120 jours d'âge : 967 g de maïs / kg (les groupes SM et MM) ou 965 g de sorgho / kg (SS et MS).

Les résultats ont montré qu'avant la période de gavage, le poids vif des oiseaux n'était pas différent entre les quatre groupes. En revanche, malgré une quantité équivalente de nourriture distribuée au cours de la période de gavage, la mortalité dans le groupe SM était plus élevée par rapport aux trois autres groupes (14,29% vs. 3,58%, $P < 0,05$). Après la période de gavage, les oiseaux gavés avec du sorgho (MS et SS) avaient un poids de foie gras (984 g vs. 885 g respectivement, $P < 0,001$) plus élevé que les oiseaux gavés avec du maïs (SM ou MM).

Tableau 4 : Résultats des ateliers de production de foie gras d'oie en fonction de la nature de la céréale utilisée pendant la période de croissance-finition et/ou de gavage

Piliers	Objectifs généraux	Critères	Indicateurs (unité)	Groupes ¹			
				Témoin MM	Innovants		
					MS	SM	SS
Economie	Est économiquement rentable	Est économiquement viable	Prix des aliments utilisés / animal (€)	7,98 ± 0,53	7,87	7,59	7,60
		Permet une efficacité de la main d'œuvre	Efficacité de gavage (%)	99,90 ± 9,35	98,62	95,56	97,38
		Met en œuvre un processus productif efficace	Poids de foie/ Poids des animaux mis en gavage (g foie / g PV ²)	0,16 ± 0,04	0,16	0,16	0,18
			Poids de foie/ Quantité de pâtée (g foie/ g matière sèche)	11,06 ± 2,06	11,36	10,48	12,21
		Maîtrise sa valeur ajoutée	% quantité d'aliment non-granulé / quantité totale consommée (g / g)	37,57 ± 10,00	37,52	38,51	38,54
		Est économiquement rentable	Valeur commerciale des foies (€ / kg de foie)	67,38 ± 19,57	56,90	59,87	58,67
Environnement	économe en ressources	Utilise l'eau de façon économe	Quantité d'eau utilisée (gavage) (L / oie / j)	8,48 ± 0,11	9,58	8,51	9,64
		Utilise de façon économe la biomasse	IC ³ gavage (g / g)	4,90 ± 0,48	4,82	4,83	4,44
	Protège les écosystèmes : ressources biologiques et environnement physique	Utilise les antibiotiques de façon économe et raisonnée	IFTA	0,00 ± 0,00	0,00	0,00	0,00
Social	Répond aux demandes du citoyen -consommateur	Fabrique des produits de qualité	Classement commercial (% d'extra-première)	73,85 ± 4,43	41,27	55,56	44,26
			% Rendement cuisson	90,63 ± 0,92	92,38	92,30	94,39
			Intension de reconsommation (%)	68,52 ± 4,69	51,85	70,37	51,85
		Met en œuvre des pratiques d'élevage respectueuses du bien être animal	Taux de mortalité en élevage (%)	1,65 ± 0,13	1,65	1,15	1,15
			Taux de mortalité en gavage (%)	1,52 ± 0,12	14,29	3,08	6,15
			Etat d'empluement à la MEG ⁴ (notes)	2,09 ± 0,78	2,09	1,45	1,39
		Permet un milieu de vie respectueux du bien être animal	Etat des pattes MEG ⁴ (notes)	2,62 ± 0,65	2,72	2,50	2,17
			Etat des pattes à la fin du gavage (notes)	1,09 ± 0,29	1,66	1,29	1,71
			Etat de salissure à la MEG ⁴ (notes)	1,73 ± 0,73	1,66	1,63	1,45

¹ MM : maïs pendant la période de croissance-finition et maïs pendant le gavage ; MS : maïs pendant la période de croissance-finition et sorgho pendant le gavage ; SM : sorgho pendant la période de croissance-finition et maïs pendant le gavage ; SS : sorgho pendant la période de croissance-finition et sorgho pendant le gavage ; ² PV : poids vif ; ³ IC : indice de consommation ; ⁴ MEG : mise en gavage

Dans cette étude, le système « de référence » est le groupe MM et les trois autres groupes sont considérés comme 3 systèmes « innovants » différents. Les résultats obtenus dans chacun des groupes pour les indicateurs retenus sont présentés dans le Tableau 4.

Analyse des données

L'analyse est réalisée à l'aide de la feuille de calcul S+Durable ?[®] (Fortun-Lamothe, 2011). Elle consiste à comparer, pour chacun des indicateurs choisis, les performances de l'atelier « innovant » par rapport à celles de l'atelier de « référence ». L'atelier de référence est le témoin utilisé dans chacun des scénarios (témoin granulé ou témoin MM). L'indicateur est associé à un sens de variation (+1 : amélioration ou -1 : détérioration) qui est renseigné par l'utilisateur. L'écart entre les deux systèmes est exprimé en unités d'écart-type de la population par rapport à l'atelier de « référence ». Les scores obtenus sont compris entre -1 (différence de -2 écarts types entre la valeur de l'indicateur pour l'atelier témoin et celle de l'indicateur pour l'atelier innovant) et +1 (différence de +2 écarts types), ils sont centrés sur 0. Les écarts en deçà et au-delà de 2 écarts types sont tronqués (et ramenés à -2 et +2). Les différences tronquées font l'objet d'un signalement. L'agrégation se fait par critère, par objectif puis par pilier de durabilité. La pondération est la même pour tous les éléments à chaque niveau d'agrégation, c'est-à-dire que les trois piliers (et en leur sein chaque objectifs puis chaque critère) ont le même poids. Lorsque plusieurs indicateurs (n) sont choisis pour évaluer un même critère (par exemple pour le critère « Utilise de façon économe la biomasse », deux indicateurs ont été utilisés « IC en élevage » et « IC en gavage ») alors le poids de chaque indicateur est divisé par le nombre d'indicateur ($1 / n$).

Dans de nombreux cas, l'écart-type de l'indicateur est obtenu par calcul (somme, différence, produit ou rapport entre plusieurs variables). Dans le cas des variables indépendantes, nous avons appliqué les relations mathématiques relatives aux variances puis réalisé la racine carré de la variance de l'indicateur pour obtenir son écart type (Winer *et al.*, 1991). En revanche, dans le cas des variables dépendantes, nous avons généré la valeur de l'indicateur composite pour chaque unité statistique (animal, lot, cage, bande...) et calculé ensuite la variance et l'écart type. Dans le cas des indicateurs exprimés sous forme de pourcentage (mortalité, ...), nous avons généré un écart type en utilisant la loi de Bernouilli (valeur 1 pour une modalité, valeur 0 pour l'autre modalité). Dans le cas des indicateurs issus de variables discrètes

(exemple : note d'emplumement), nous avons considéré le numéro de la classe de notation comme une variable quantitative.

Résultats

1. Durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie utilisant des aliments fermiers pendant la période de croissance-finition

Les résultats montrent que l'utilisation d'aliments fermiers pendant la période de croissance-finition améliore la durabilité de l'atelier de production de foie gras d'oie pour deux piliers : score de +0,62 et +0,31 respectivement dans le pilier Economie et Environnement pour l'atelier innovant comparé à l'atelier de référence. Néanmoins, cette innovation détériore la durabilité dans le pilier Social (score de -0,82 ; Tableau 5).

L'amélioration de la durabilité économique est expliquée en totalité par l'amélioration des performances pour l'objectif général « Est économiquement rentable » (score de +0,62) puisque aucun indicateur n'a été mesuré pour l'objectif général « Est flexible et adaptable ». Cette remarque vaut également pour le pilier social puisque l'objectif « Préserve la qualité de vie et les conditions de travail du producteur » n'a pas été évalué. Dans le cas du pilier Environnement, la valeur du seul indicateur retenu (IFTA ; Tableau 2) pour l'objectif « Protège les écosystèmes » est nulle quelle que soit l'innovation testée (aucun antibiotique utilisé pendant les deux périodes et pour les deux types d'ateliers ; par conséquent la valeur obtenue pour l'objectif « Utilise de façon économe les ressources et les produits des ressources renouvelables » est identique à celle du pilier Environnement (Tableau 5).

L'analyse par critère de durabilité montre que la valeur positive du score obtenu pour le pilier Economie (+0,62) est expliquée par la performance de l'atelier pour les critères « Maîtrise sa valeur ajoutée » (+1, score tronqué) et « Est économiquement viable » (+0,16) ; les scores obtenus pour les trois autres critères étant négatifs, -0,32 ; -0,18 et -0,04 pour les critères « Permet une efficacité de la main d'œuvre », « Met en œuvre un processus productif efficace » et « Est économiquement rentable » respectivement.

Le score positif de l'atelier innovant dans le pilier Environnement est totalement dû à l'amélioration des performances pour le critère de durabilité « Utilise de façon économe la biomasse » (+0,35 ; Tableau 6) puisque le seul autre critère mesuré dans cet objectif obtient un score négatif (« Utilise l'eau de façon économe », -0,04 ; Tableau 6).

Tableau 5 : Performances de durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie innovants par objectif et par pilier de durabilité

	Groupes ¹							
	Granulé vs. Fermier		MM vs. MS		MM vs. SM		MM vs. SS	
	Note	Troncature (n)	Note	Troncature (n)	Note	Troncature (n)	Note	Troncature (n)
Piliers de durabilité								
<i>Economie</i>	0,62	1	-0,17	0	-0,10	0	0,32	0
<i>Environnement</i>	0,31	0	-0,92	1	-0,03	0	-0,52	1
<i>Social</i>	-0,82	2	-0,40	3	0,29	3	0,20	6
Objectifs généraux de durabilité								
<i>Est économiquement rentable</i>	0,62	1	-0,17	0	-0,10	0	0,32	0
<i>Est flexible et adaptable</i>	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
<i>Utilise de façon économe les ressources et produit des ressources renouvelables</i>	0,31	0	-0,92	1	-0,03	0	-0,52	1
<i>Protège les écosystèmes : ressources biologiques et environnement physique</i>	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
<i>Préserve la qualité de vie et les conditions de travail du producteur</i>	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
<i>Répond aux demandes du citoyen-consommateur</i>	-0,82	2	-0,40	3	0,29	3	0,20	6

¹ MM : maïs pendant la période de croissance-finition et maïs pendant le gavage ; MS : maïs pendant la période de croissance-finition et sorgho pendant le gavage ; SM : sorgho pendant la période de croissance-finition et maïs pendant le gavage ; SS : sorgho pendant la période de croissance-finition et sorgho pendant le gavage ; n.e.: non évalué.

Tableau 6: Performance de durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie innovants par critère de durabilité

Piliers	Objectifs généraux	Critères	Groupes ¹			
			Granulé vs. Fermier	MM vs. MS	MM vs. SM	MM vs. SS
Economie	Est économiquement rentable	Est économiquement viable	0,16	0,10	0,36	0,36
		Permet une efficacité de la main d'œuvre	-0,32	-0,07	-0,23	-0,13
		Met en œuvre un processus productif efficace	-0,18	0,06	-0,08	0,26
		Maîtrise sa valeur ajoutée	1,00	0,00	0,05	0,05
		Est économiquement rentable	-0,04	-0,27	-0,19	-0,22
	Est flexible et adaptable	Est peu spécialisé économiquement	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Est peu sensible aux aides	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Est autonome financièrement	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Est transmissible	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Est polyvalent	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
Environnement	Utilise de façon économe les ressources et produit des ressources renouvelables	Produit des ressources renouvelables	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Utilisation de façon économe les énergies fossiles	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Utilise l'eau de façon économe	-0,04	-1,00	-0,10	-1,00
		Utilise de façon économe la biomasse	0,35	0,08	0,07	0,48
		Présente un lien écologique fort avec son environnement immédiat	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
	Protège les écosystèmes : ressources biologiques et environnement physique	Emet peu d'effluents et les gère de façon respectueuse de l'environnement	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Maintient de la biodiversité	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Met en œuvre des mesures d'hygiène qui protège la santé des animaux de l'atelier	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Met en œuvre de mesures de prophylaxie qui protègent la santé de tous les animaux	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Utilise les antibiotiques de façon économe et raisonnée	0,00	0,00	0,00	0,00
Social	Préserve la qualité de vie et les conditions de travail du producteur	Permet de vivre de son travail	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Permet du repos et une bonne organisation du travail	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Limite la pénibilité du travail	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Permet une bonne implication dans le milieu social	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Permet une bonne insertion dans la vie locale	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
	Répond aux demandes du citoyen - consommateur	Fabrique des produits de qualités	-0,50	-0,35	0,03	-0,33
		Met en œuvre des pratiques d'élevage respectueuses du bien être animal	-0,50	-0,33	0,14	0,15
		Permet un milieu de vie respectueux du bien être animal	0,18	0,28	0,12	0,39
		Maintient l'emploi et permet des circuits de commercialisation en filière courte	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
		Rend des services non-agricoles	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.

¹ MM : maïs pendant la période de croissance-finition et maïs pendant le gavage ; MS : maïs pendant la période de croissance-finition et sorgho pendant le gavage ; SM : sorgho pendant la période de croissance-finition et maïs pendant le gavage ; SS : sorgho pendant la période de croissance-finition et sorgho pendant le gavage ; n.e.: non évalué.

La détérioration des performances de durabilité de l'atelier innovant dans le pilier Social (-0,82 ; Tableau 5) résulte de la détérioration des scores pour deux critères de durabilité sur trois. En effet, les scores des ateliers innovants obtenus pour les critères de durabilité « Fabrique des produits de qualité » et « Met en œuvre des pratiques agricoles respectueuses du bien-être animal » sont égaux (-0,50 ; 2 scores tronqués) tandis que le score du critère « permet un milieu de vie respectueux du bien-être animal » est positif (0,18 ; Tableau 6).

2. Durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie utilisant du sorgho pendant les périodes de croissance-finition et/ de gavage.

Les résultats montrent que, quelle que soit l'innovation testée, aucune n'améliore les performances de durabilité sur les trois piliers à la fois. La substitution totale du maïs par du sorgho comme source unique de céréale (SS), c'est-à-dire à la fois en période de croissance-finition et de gavage, améliore les performances de durabilité de l'atelier innovant pour deux des trois piliers de la durabilité : Social et Economie (+0,20 avec 6 scores d'indicateurs tronqués et +0,32 respectivement ; Tableau 5). En revanche, l'utilisation du maïs pendant la phase de croissance-finition associée à l'utilisation du sorgho pendant la phase de gavage dégrade les scores de durabilité dans les trois piliers (-0,17 ; -0,40 avec 3 scores d'indicateurs tronqués et -0,92 pour les piliers Economie, Social et Environnement respectivement). Toutefois, l'utilisation du sorgho pendant la phase de croissance-finition uniquement (SM) améliore les performances dans le pilier Social (+0,29 avec 3 scores d'indicateurs tronqués) mais détériore les performances dans les deux autres piliers (-0,1 et -0,03 dans le pilier Economie et Environnement, respectivement).

De manière globale, l'utilisation du sorgho dans l'alimentation des oies améliore les performances de durabilité de l'atelier innovant pour les critères de durabilité « Est économiquement viable » (+0,10 ; +0,36 et +0,36 respectivement pour les innovations MS, SM et SS), « Maîtrise sa valeur ajoutée » (0,00 ; +0,05 et +0,05 respectivement pour les innovations MS, SM et SS), « Utilise de façon économe la biomasse » (+0,08 ; +0,07 et +0,48 respectivement pour les innovations MS, SM et SS) et « Permet un milieu de vie respectueux du bien être animal » (+0,28 ; +0,12 et +0,39 respectivement pour les innovations MS, SM et SS). Mais, elle détériore les scores obtenus pour les critères « Permet une efficacité de la main d'œuvre » (-0,07 ; -0,23 et -0,13 respectivement pour les innovations MS, SM et SS), « Est économiquement rentable » (-0,27, -0,19 et -0,22 respectivement pour les innovations MS,

SM et SS) et « Utilise de façon économe la biomasse » (-1,00 (score tronqué), -0,10 et -1,00 (score tronqué) respectivement pour les innovations MS, SM et SS).

Les scores obtenus par l'atelier innovant pour le critère de durabilité « Met en œuvre des processus productifs efficaces » sont contradictoires suivant la période d'utilisation du sorgho (respectivement 0,06 ; 0,26 et -0,08 pour les groupes MS, SS et SM, respectivement). Les résultats sont opposés pour les scores obtenus pour le critère « Fabrique des produits de qualité » (-0,35 ; 0,03 et -0,33 respectivement MS, SM et SS). Seul l'utilisation de maïs uniquement pendant la phase de croissance-finition (MS) détériore le score obtenu pour le critère « Met en œuvre des pratiques d'élevage respectueuses du bien être animal » (-0,33 ; Tableau 6).

Discussion

Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer les conséquences de la substitution du maïs par du sorgho pendant les périodes de croissance-finition et/ou gavage ainsi que l'utilisation d'aliment sous forme partiellement non-granulée sur la durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie à l'aide d'une évaluation multicritère. Les résultats montrent que, quelle que soit l'innovation testée, aucune n'améliore la durabilité sur les trois piliers à la fois. L'utilisation d'aliments fermiers pendant la phase de croissance-finition et l'utilisation d'un système d'alimentation contenant du sorgho comme seule source de céréale en croissance-finition et en gavage améliore les performances de durabilité des ateliers pour deux piliers de la durabilité. L'utilisation du maïs en élevage associée à l'utilisation du sorgho en gavage dégrade les scores dans les trois piliers de la durabilité.

L'intérêt de la substitution du maïs par du sorgho pour l'alimentation des oies reposait sur l'hypothèse d'une réduction des impacts environnementaux causés par la production de foie gras en raison d'un itinéraire cultural moins gourmand en eau et en intrants de cette céréale (Amigues *et al.*, 2006). Nos résultats montrent au contraire que l'utilisation du sorgho entraîne une réduction de la durabilité environnementale des ateliers de production, quelle que soit la phase pendant laquelle est pratiquée cette substitution (croissance-finition et/ou gavage). Ce résultat est expliqué par une plus forte utilisation d'eau pour le gavage des oies avec du sorgho, qu'un meilleur indice de consommation n'a pas permis de compenser. Ceci est en opposition avec les résultats obtenus par la méthode des analyses de cycle de vie (ACV) sur le produit foie gras, qui montrent une réduction des impacts environnementaux liés à la production de 1kg de foie gras (-5 à -15% en fonction des impacts calculés ; Arroyo *et al.*,

2012c). En revanche, les résultats montrent que cette innovation permet une amélioration globale des performances de durabilité économique et sociale dans le cas d'une substitution totale du maïs par du sorgho. Ce résultat global cache toutefois une disparité de résultats puisque cette innovation améliore la performance de durabilité de certains critères (viabilité, efficacité du processus, indépendance) mais dégrade la performance d'autres critères (efficacité de la main d'œuvre, rentabilité).

L'intérêt de l'utilisation d'un aliment composé d'un mélange de céréales sous forme simplifiée et de granulés riches en protéines reposait sur l'hypothèse d'une réduction des impacts environnementaux, liée à la simplification du processus de fabrication de l'aliment, et une meilleure acceptabilité sociale liée à l'utilisation d'un aliment jugé plus « naturel » (Gabriel *et al.*, 2003). Nos résultats confirment notre hypothèse de départ concernant les impacts environnementaux grâce notamment à une amélioration de la performance concernant l'utilisation économe de la biomasse. Mais l'économie d'énergie liée à la simplification du processus de fabrication est réalisée en dehors de l'atelier et n'est pas mise en évidence ici. A l'inverse, les résultats obtenus par la méthode de l'analyse des cycles de vie avaient montré que cette innovation était dépendante de la céréale utilisée. Dans le cas de l'utilisation de maïs concassé, les impacts environnementaux de la production d'1 kg de foie gras n'augmentait pas tandis qu'il augmentait en utilisant des graines entières de sorgho (Arroyo *et al.*, 2012c). Nous observons également une réduction de la performance de durabilité sociale expliquée par une réduction du rendement à la cuisson et une augmentation de la mortalité des animaux pendant le gavage. En effet, l'utilisation d'un aliment sous forme simplifiée peut empêcher le bon développement de la partie proximale du tube digestif de l'oie, notamment le jabot, et de ce fait, rendre les animaux moins en mesure de s'adapter à l'apport alimentaire très élevé pendant la période de gavage (Arroyo *et al.*, 2012a).

Conclusions

Les résultats montrent que quelle que soit l'innovation testée aucune n'améliore la durabilité sur les trois piliers. Toutefois, l'utilisation d'aliments fermiers et l'utilisation d'un système d'alimentation utilisant du sorgho comme source unique de céréale améliorent la durabilité des ateliers de production sur deux piliers : Economie et Environnement ou Economie et Social, respectivement. Ces résultats suggèrent que la substitution totale du maïs par du sorgho ainsi que l'alimentation sous forme non-granulé peuvent être une alternative probable afin d'améliorer la durabilité des ateliers de production de foie gras d'oie.

Références

- Amigues JP, Debaeke P, Itier B, Lemaire G, Seguin B, Tardieu F, Thomas A. 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72pp.
- Arroyo J, Auvergne A, Dubois JP, Lavigne F, Bijja M, Bannelier C, Fortun-Lamothe L. 2012a. Effects of presentation and type of cereals (maize or sorghum) on performance of geese. *Poultry Science* 91, 2063-2071.
- Arroyo J, Auvergne A, Dubois JP, Lavigne F, Bijja M, Fortun-Lamothe L. 2012b. Effects of substituting yellow maize by sorghum in goose diet on magret and foie gras quality. *Journal of Animal Science* (soumis)
- Arroyo J, Fortun-Lamothe L, Auvergne A, Dubois JP, Lavigne F, Bijja M, Aubin J. 2012c. Environmental influence of maize substitution by sorghum and diet presentation on goose's "foie gras" production. *Animal* (en préparation)
- Aubin J, Van der Werf HMG, Petit J. 2005. Contribution de l'analyse du cycle de vie à l'évaluation du développement durable de l'aquaculture, Académie d'agriculture, octobre, academie-agriculture.fr
- Becker B. 1997. Sustainability assessment: a review of values, concepts, and methodological approaches. *Issues in Agriculture* 10 - Washington, DC, Consultative Group on International Agricultural Research / World Bank (10).
- Bockstaller C, Guichard L, Makowski D, Aveline A, Girardin P, Plantureux S. 2008. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 139-149.
- Boggia A, Paolotti L, Castellini C. 2010. Environmental impact evaluation of conventional, organic and organic-plus poultry production systems using life cycle assessment. *World's Poultry Science Journal* 66, 95-114.
- Bonny S. 1994. Les possibilités d'un modèle de développement durable en agriculture. Le cas de la France. *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, 23, 5-15.
- Dozier WA, Behnke K, Kidd MT, Branton SL. 2006. Effects of the addition of roller mill ground corn to pelleted feed on pelleting parameters, broiler performance, and intestinal strength. *Journal of Applied Poultry Research* 15, 236–244.
- Farré I, Faci JM. 2006. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 83, 135-144.

- Food and Agriculture Organization (FAO) 2006. Livestock's long shadow: environmental issues and options. <http://www.fao.org/docrep/010/a0701e/a0701e00.HTM>
- Fortun-Lamothe L. 2011. S+ durable ? outil d'évaluation de la durabilité des ateliers d'élevage. IDDN.FR.001.420007.000.R.P.2011.000.30100
- Fortun-Lamothe L, Courtadon H, Croisier A, Gidenne T, Combes S, Le Bouuin S, Chauvin C. 2011. L'index de fréquence des traitements par les antibiotiques (IFTA) : un indicateur de durabilité des ateliers d'élevage. In Proc.14^{èmes} Journées de la Recherche Cunicole, 22-23 novembre 2011, Le Mans, France
- Fortun-Lamothe L, Litt J, Coutelet G, Gidenne T. 2012. A participatory approach to define objectives, criteria and indicators for evaluating the sustainability of rabbit rearing units. In Proc 10th World Rabbit Congress. Sharm el-Sheikh, Egypt. 5pp.
- Gabriel I, Mallet S, Leconte M. 2003. Differences in the digestive tract characteristics of broiler chickens fed on complete pelleted diet or on whole wheat added to pelleted protein concentrate. *British Poultry Science* 44, 283-290.
- Gras R, Benoit M, Deffontaines JP, Duru M, Langlet A. 1989. Le fait technique en agronomie, activités agricoles, concepts et méthodes d'étude, INRA-éditions-L'Harmattan éd., 184 p.
- Guéméné D, Guy G. 2004. The past, present and future of force-feeding and "foie gras" production. *World's Poultry Science Journal* 60, 210-222.
- Leinonen I, Williams AG, Wiseman J, Guy J, Kyriazakis I. 2012a. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Broiler production systems. *Poultry Science* 91, 8–25.
- Leinonen I, Williams AG, Wiseman J, Guy J, Kyriazakis I. 2012b. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Egg production systems. *Poultry Science* 91, 26–40.
- Rey-Valette H, Clément O, Aubin J, Mathé S, Chia E, Legendre M, Caruso D, Mikolasek O, Blancheton JP, Slembrouck J, Baruthio A, René F, Levang P, Morissens P, Lazard J. 2008. Guide de Co-construction - projet ANR EVAD. 144 p.
- Sauvant D, Perez JM, Tran G. 2004. Tables of composition and nutritive value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish. eds INRA Editions, Paris and Wageningen Academic Publishers, The Netherlands. 304pp.
- Winer BJ, Broan DR, Michels KM. 1991. Statistical principles in experimental design. Third edition. McGraw-Hill, Sydney.

DISCUSSION GENERALE

Partie A : Intérêts zootechniques et limites de l'utilisation des céréales sous forme simplifiée et d'une substitution du maïs par du sorgho dans l'alimentation des oies en croissance

Le premier objectif de ce travail de thèse était d'évaluer la faisabilité et les conséquences i/ d'une alimentation fermière présentée sous la forme d'un mélange contenant des céréales entières ou applaties et des granulés riches en protéines et ii/ de la substitution du maïs par du sorgho dans la ration alimentaire des oies en phase de croissance-finition et pendant le gavage sur les performances des animaux. L'ensemble des résultats que nous avons obtenus sont synthétisés dans le tableau 16.

1. Effets de la forme de présentation de l'aliment

Au cours de nos essais (1, 2 et 3), nous avons observé que l'utilisation d'aliment sous la forme non granulée pendant la période de croissance-finition entraîne i/ une augmentation de la consommation alimentaire des animaux et de leur poids à la fin de la période de croissance ; ii/ une augmentation du développement de l'intestin et une réduction du volume du jabot et iii/ une augmentation de la mortalité des animaux, en particulier chez les mâles, pendant la phase de gavage. Mais l'utilisation d'aliment sous la forme non granulée pendant la période de croissance-finition n'affecte pas la qualité des produits (magret et foie gras).

1.1. Effets de la forme de présentation de l'aliment sur la consommation des animaux et la croissance des animaux

L'utilisation de graines de céréales sous forme simplifiée (entières ou applaties) peut difficilement se faire dès la naissance des animaux sans risquer de diminuer leurs performances. Cela suppose donc une phase de transition entre l'aliment dit de « démarrage », généralement distribué jusqu'à la 6^{ème} semaine d'âge, et le mélange de graines et de granulés riches en protéines. Au cours de nos essais, nous avons observé une modification de la consommation des animaux au moment de cette transition alimentaire (-33% ; essai 1) ou au moment des changements de rythme alimentaire (+16% ; essai 3). Plusieurs éléments impliqués dans le mode de régulation de l'ingestion des oiseaux peuvent expliquer ce phénomène.

Tableau 17. Partie A. Récapitulatif des principaux résultats zootechniques obtenus au cours du travail de thèse

Travaux	Facteurs ou paramètres étudiés	Principaux résultats	
		Elevage	Gavage
Influence du mode de présentation des céréales et de la substitution du maïs par du sorgho dans l'alimentation des oies pendant la phase d'élevage	ESSAI 1 Présentation du sorgho (Farine, mélange, granulé)	- Consommation alimentaire supérieure des oies nourries avec le mélange plutôt qu'avec des granulés ou de la farine (18 893g vs. 17 902g ; $P < 0,05$) - IC similaires (6,91, $P > 0,05$) - Poids des oies nourries avec de la farine inférieurs à ceux des oies nourries avec des granulés ou du mélange (5 302 vs. 5 612 g, $P < 0,01$)	Ø
	ESSAI 2 Céréale (maïs et sorgho) Présentation (mélange et granulé)	- Consommation alimentaire supérieure des oies nourries avec du mélange comparée à celles nourries avec des granulés (+5,53% ; $P < 0,05$) ; pas d'effet céréale (15 028 ; $P > 0,05$) - IC supérieur pour les oies nourries avec des granulés comparé à celles nourries avec du mélange (12,7 vs. 11,4 ; $P < 0,05$) ; pas d'effet céréale - A la fin de l'élevage, poids des oies nourries avec des granulés inférieurs à ceux des oies nourries avec du mélange (+4%, $P < 0,001$), pas d'effet céréale - Volume de jabot pour les oies nourries avec des granulés supérieur à ceux des oies nourries avec du mélange (+10%, $P < 0,05$), pas d'effet céréale	- Aucun effet ni de la présentation, ni de la céréale sur les paramètres étudiés après le gavage
	ESSAI 3 Présentation du sorgho (mélange, granulé)	- Consommation alimentaire et IC des oies similaires (respectivement 14 224g et 8,34 ; $P > 0,05$) - A la fin de l'élevage, le poids vifs était 3,6 % moins lourd dans le groupe granulé que dans le groupe mélange ($P < 0,01$) - Le comportement des oies a été influencé par les périodes d'accès à la mangeoire, ainsi le pourcentage d'animaux en train de se nourrir augmentait pendant que le temps d'accès à la mangeoire se réduisait ($P < 0,001$), mais pas d'effet présentation ($P > 0,05$)	Ø
Etude la substitution du maïs par du sorgho en élevage et/ou en gavage	ESSAI 4 Niveau d'incorporation de sorgho dans la pâtée de gavage	Ø	- Même quantité distribuée (13 220g, $P > 0,05$) - Pâtée 100% sorgho (-4% IC et +8% poids de foie ; $P < 0,05$) - Foie plus jaune avec du maïs que du sorgho
	ESSAI 5 Céréale (maïs et sorgho) Phase de distribution (élevage et/ou gavage)	Pas d'effet céréale sur la consommation et l'IC pendant l'élevage	- Même quantité de nourriture distribuée en gavage (12 739 g, $P > 0,05$) - La mortalité supérieure dans le groupe Sorgho en élevage Maïs en gavage (14,29% vs. 3,58%, $P < 0,05$) - Après gavage, les oiseaux nourris avec du sorgho avaient des foies plus lourds ($P < 0,001$) et moins jaune ($P < 0,001$) que les oiseaux nourris avec du maïs

La consommation d'aliment est influencée par les besoins de l'individu et par ses préférences alimentaires (Bouvarel *et al* 2010). On peut distinguer deux types de régulation de l'ingestion des aliments. A long terme, l'ingestion est régulée au niveau central à partir des boucles de rétroaction venant des tissus périphériques afin d'assurer l'équilibre énergétique, et ceci de concert avec la recherche de l'homéostasie protéique et de l'homéothermie. Ainsi, chez les volailles, l'ingestion fait intervenir des signaux provenant du tractus gastro-intestinal et agissant au niveau central. A court terme, l'ingestion est régulée par la nécessité de limiter l'encombrement de l'aliment ingéré et d'assurer des apports énergétiques et de nutriments réguliers. A très court terme (< 1 minute), ce sont les signaux sensoriels qui conditionnent la réponse ingestive. Parmi eux, les capacités visuelles et tactiles sont particulièrement utilisées par les volailles pour apprécier leur aliment. Au final, le comportement alimentaire dépend de l'ensemble de ces différentes perceptions qui interagissent entre elles et dépendent aussi de l'expérience de l'animal (Bouvarel *et al* 2010).

Les résultats de l'essai 1 montrent qu'au moment du passage de l'aliment de « démarrage » à l'alimentation mélangée (céréales entières et granulés riches en protéines), les oies réalisent un tri des aliments et consomment préférentiellement les granulés riches en protéines. Cette tendance s'inverse au profit des céréales entières vers l'âge de 11 semaines (essais 1 et 2), entraînant un poids vif des animaux plus élevé à la fin de la période d'élevage (essais 1, 2 et 3). Ceci a été également observé avec un mélange de triticales, de pois, de féverole et de lupin (Leprettre *et al* 2000a).

Ce phénomène peut être expliqué par le fait 1/ qu'à court terme, c'est-à-dire au moment du changement, les animaux sont plus attirés par un aliment qui avait la forme de leur aliment précédent, 2/ qu'à plus long terme, les oiseaux équilibrent spontanément leur régime alimentaire à la diminution de leurs besoins protéiques avec l'âge (Hughes 1984). Ce phénomène a également été observé chez les poulets de chair recevant des céréales entières (Emmans 1991, Covasa et Forbes 1994, Forbes et Shariatmadari 1994).

De plus, comme chez les autres volailles, la consommation d'aliment par les oies peut être influencée par la couleur (Roper et Marples 1997, Lecuelle *et al* 2010), la texture (Bouvarel *et al* 2009), la taille (Auvergne *et al* 2008a ; essai 1) et/ou la flaveur (Capretta et Moore 1970) de la nourriture. L'oie est un animal grégaire dont la prise alimentaire est

influencée par le comportement du groupe. Ainsi, la facilitation sociale (Clayton 1978) et l'allélomimétisme alimentaire (Hughes 1971, Keeling et Hurnik 1996), c'est-à-dire l'augmentation de la fréquence ou de l'intensité des réponses ou de l'initiation de réponses particulières dues à la présence d'autres animaux engagés dans un comportement, vont entraîner une consommation ou au contraire une néophobie du groupe vis-à-vis des aliments (Nielsen 2004). Toutefois, le déterminisme de la prise alimentaire reste peu connu chez l'oie (Marcilloux et Auffray 1981, Ramseyer 2009).

L'utilisation de différentes matières premières (triticale, pois, féverole, lupin : Leprettre *et al* 2000a, Auvergne *et al* 2006 ; maïs : Auvergne *et al* 2008a, essai 2 ; sorgho : essais 1, 2 et 3) présentés sous des formes variées (granulés, farines plus ou moins grossières, graines concassées, graines entières) a permis de montrer que les jeunes oies consomment plus facilement les particules dont la taille est comprise entre 2 et 4 mm. Ce n'est qu'à partir de 8 semaines d'âge qu'elles consomment aisément des particules dont la taille est supérieure à 4 mm. En conséquence, l'utilisation du maïs sous forme de graines entières est à éviter avant cet âge et doit être remplacée par celle du blé, du triticale ou du sorgho. En revanche, le maïs peut être utilisé sous forme aplatie ou concassée (essai 2). Il convient toutefois de limiter la présence de particules fines dans le mélange pour éviter le gaspillage. D'ailleurs, les résultats de l'essai 1 montrent que l'utilisation de céréale sous forme de farine réduit les performances des animaux. Nous avons également observé que les effets d'un changement d'aliment sont dépendants de l'âge (essai 2) et donc du poids (essai 3) et de l'expérience passée des animaux, au moment de la transition. Ainsi, une transition entre l'aliment de démarrage et de croissance, plus tardive, affecte moins l'ingestion et les performances de croissance des oies à 8 qu'à 7 semaines d'âge. En conséquence, pour limiter les effets de la première distribution d'aliment sous forme non granulée, les moments des transitions alimentaires entre deux aliments aux caractéristiques physiques différentes devraient être progressives et adaptées au développement des animaux.

1.2. Effets de la forme de présentation de l'aliment sur le tractus digestif des animaux

Comme cela a été démontré chez les autres volailles (Forbes et Covasa 1995, Noirot *et al* 1998, Carré 2000, Amerah *et al* 2007, Mirghelenj et Golian 2009, Lu *et al* 2011), nous avons observé que la forme physique de l'alimentation distribuée pendant la phase d'élevage

affecte le développement des différentes parties du tractus digestif des oies (essais 1 et 2). Ainsi, nous avons montré que l'utilisation de graines entières tend à augmenter le développement des intestins comparée à l'utilisation de granulés complets (essai 2). Cependant, malgré la mise en place de la restriction alimentaire, le volume du jabot n'augmente que de manière partielle avec l'utilisation des graines entières. Par exemple, nous avons montré que le volume du jabot est plus petit (-10%, essai 2) chez les oiseaux nourris avec un mélange de granulés protéiques et de graines entières que chez ceux nourris avec des granulés complets. Ces résultats peuvent être expliqués par une plus faible capacité d'hydratation des graines entières que des granulés dans lesquels les graines ont été préalablement broyées avant le passage en presse. Nous avons montré que la forme de présentation d'une matière première modifie sa capacité d'hydratation (essai 2). En effet, les processus de broyage et de granulation réduisent la taille des particules et augmentent leur surface de contact avec l'eau ; de plus, la granulation gélatinise partiellement l'amidon, ce qui accroît également sa capacité d'hydratation (Pinnavaia et Pizzanrari 1998).

Nous formulons l'hypothèse que c'est la plus faible capacité d'hydratation des graines entières, comparées à l'aliment granulé, qui explique la réduction du volume du jabot en fin de période croissance-finition et qui entraîne à son tour une plus forte mortalité pendant la phase de gavage. En effet, pendant le gavage, les animaux reçoivent des quantités importantes d'aliment en seulement 4 repas. L'aliment est donc stocké transitoirement dans le jabot qui doit posséder un développement suffisant au moment de la mise en gavage des animaux pour éviter les troubles digestifs ou la mortalité. Le programme alimentaire des oies destinées au gavage contient des phases de restriction et de libération de l'ingestion spontanée des animaux afin de développer le volume du jabot et de les préparer au gavage. Nos résultats suggèrent que l'utilisation de graines de céréales entières en phase de croissance-finition nécessite de réadapter l'itinéraire technique de préparation des animaux pour le gavage pour limiter leur effet négatif sur la mortalité des animaux pendant le gavage.

2. Effets de la céréale

Au cours de nos travaux, nous avons testé la faisabilité et les conséquences d'une utilisation du sorgho pendant la phase de croissance-finition (essai 1, 2 et 3) et / ou pendant la phase de gavage (essai 4 et 5). Nos résultats montrent qu'il est zootechniquement envisageable et intéressant d'utiliser du sorgho en substitution du maïs pendant ces deux phases de la production du foie gras (Tableau 16). En effet, le foie des animaux est plus lourd lorsqu'ils sont gavés avec du sorgho. En revanche, le sorgho modifie la couleur des foies. Enfin, un changement de céréales entre les phases de croissance-finition et de gavage augmente la mortalité des animaux. Une différence de composition chimique entre les deux céréales peut expliquer ces phénomènes.

2.1.Effets du type de céréale sur les performances des animaux

Le maïs et le sorgho présentent des caractéristiques nutritionnelles, et notamment une teneur en amidon, similaires (Sauvant *et al* 2004). En revanche le type d'amidon, principalement le rapport amylopectines / amylose, diffère entre les deux céréales (Jenkins et Donald 1995, D'Alfonso et McCracken 2002). Ainsi, la teneur en amylopectines est plus élevée dans le sorgho que dans le maïs corné denté (95 % vs. 72 % ; Matalanis *et al* 2009). Or, il a été montré que chez les oiseaux la digestibilité des amylopectines est plus élevée que celle de l'amylose (Skiba *et al* 2005, Zhou *et al* 2010). Nous formulons l'hypothèse que cette différence de composition chimique entre les deux céréales explique, au moins partiellement, le poids de foie plus élevés chez les animaux gavés avec du sorgho (essai 5).

Le sorgho diffère également du maïs par une teneur en protéines légèrement plus élevée (8,1% vs. 9,4% ; Sauvant *et al* 2004). En conséquence, la pâtée de gavage est légèrement plus riche en protéines lorsqu'elle est réalisée à base de sorgho plutôt qu'au maïs (+16 % ; essai 5). Le déclenchement de la stéatose hépatique nécessite un apport très élevé en glucides hautement digestibles (Hermier *et al* 1999) et de nombreux travaux ont montré que le poids de foie en fin de gavage est lié à l'ingestion d'énergie sous forme glucidique pendant le gavage (Cazeils 2000). Toutefois, le niveau protéique de la pâtée semble également être un élément important des performances de gavage puisque Nir *et al* (1972) rapportaient que l'utilisation du soja, matière première riche en protéines, augmentait le poids des foies gras.

En conséquence, la teneur en protéines légèrement plus élevée du sorgho pourrait aussi expliquer partiellement l'augmentation du poids de foie chez les animaux gavés avec du sorgho.

Nos résultats montrent également qu'un changement de céréale (sorgho / maïs) entre les phases d'élevage et de gavage augmente la mortalité des animaux et réduit leur poids de foie (essai 5). Ces résultats peuvent aussi être expliqués par les différences de composition nutritionnelle entre les deux céréales et notamment le ratio amylopectines / amylose. En effet, les enzymes qui permettent la digestion de ces deux molécules sont différentes (Tester *et al* 2004) et il a été montré que la capacité de digestion intestinale s'adapte progressivement aux apports nutritionnels avec l'âge (Bedford 1996). Par conséquent, une augmentation brutale de l'arrivée de composés nouveaux dans le tube digestif pourrait peut-être dépasser la capacité de digestion et entraîner une rupture de l'homéostasie chez les animaux plus fragiles. Cette hypothèse reste toutefois à démontrer. Nos observations suggèrent néanmoins la nécessité pour le tube digestif de s'adapter à la matière première qui sera distribuée en quantités importantes pendant le gavage et il paraît donc souhaitable d'incorporer la céréale qui sera utilisée pour le gavage des animaux dans l'aliment distribué au cours de la phase de croissance-finition.

2.2. Effets de la céréale sur la qualité des produits

Au cours de notre travail, nous avons observé que l'utilisation du sorgho engendre une faible intensité de la couleur jaune du magret (essai 5) et du foie gras (essais 4 et 5). Ceci peut être expliqué par les teneurs en caroténoïdes et en vitamine A inférieures ($0,1$ vs. $0,83 \cdot 10^3$ UI / kg) dans le sorgho par rapport au maïs (Sauvant *et al* 2004). Un phénomène similaire a été précédemment observé dans la peau du poulet de chair et dans le jaune d'œuf (Gualtieri et Rapaccini 1990).

Nous avons également observé une teneur en lipides du muscle du magret légèrement plus élevée chez les oiseaux nourris avec du sorgho pendant la période de croissance-finition (essai 5). Mais la céréale influence surtout la composition en acides gras du magret comme précédemment observé dans le muscle pectoral de poulets nourris avec du sorgho (Cherian *et al* 2002) ou chez des oies nourries avec des tourteaux de noix (Bouiller-Oudot *et al* 2002). Les niveaux plus élevés d'acides oléique (C18:1) et linoléique (C18:3) et le niveau inférieur

d'acide linoléique (C18:2) dans le magret des oiseaux nourris avec du sorgho semblent, au moins en partie, être liés à des différences dans la composition en acides gras entre les deux céréales. En effet, les trois principaux acides gras du maïs et du sorgho sont l'acide palmitique (C16:0 ; 15%), l'acide oléique (C18:1 ; 25 et 32%, respectivement) et l'acide linoléique (C18:2 ; 54 et 45%). Le sorgho est donc plus riche en C18:1 que le maïs et plus pauvre en C18:2, ce qui se retrouve dans le profil d'acides gras du muscle pectoral, comme cela a été démontré dans la plupart des produits issus des animaux monogastriques. Toutefois, il existe également une part de synthèse ou de dépôt préférentiel propre à l'animal puisque l'acide gras majoritaire du magret est l'acide oléique (46%) tandis que cet acide ne représente que 25 et 32% des acides gras dans le maïs et le sorgho, respectivement.

La céréale distribuée au cours de la période de gavage n'a pas d'influence sur la composition en acides gras du foie gras (essai 5). L'acide oléique est le principal acide gras contenu dans le foie gras (57% de la teneur totale en acides gras), tandis que l'acide linoléique représente moins de 1% des acides gras (Lepretre *et al* 1998, Cobos *et al* 2000, Molette *et al* 2001, Molee *et al* 2005). L'acide palmitique (C16:0) et l'acide stéarique (C18:0) représentent 21% et 14% des acides gras totaux tandis que les autres acides gras semblent être d'une importance mineure car ils représentent moins de 6% du total.

Nos résultats suggèrent que la composition du régime alimentaire offert pendant la période de croissance-finition influence principalement la qualité du magret tandis que les caractéristiques du foie gras dépendent principalement du régime donné pendant la période de gavage ce qui est en accord la dynamique de développement de ces tissus et avec les résultats de Auvergne *et al* (1995).

Partie B : Intérêts et limites d'une modification du système d'alimentation des oies sur la durabilité de la production du foie gras

Le deuxième objectif de notre travail était d'évaluer les conséquences de la substitution du maïs par du sorgho pendant les périodes de croissance-finition et / ou de gavage ainsi que l'utilisation d'aliment sous forme partiellement non-granulée sur la durabilité du système de production du foie gras d'oie à deux niveaux d'approches : le produit et l'atelier de production. Pour cela nous avons utilisé deux méthodes d'analyse multicritère (ACV et S+durable ?). Cela nous a permis de confronter nos hypothèses de départ sur les avantages potentiels des innovations mises en oeuvre à la réponse des animaux et aux performances des ateliers production ou aux impacts potentiels de la fabrication du produit. L'ensemble des résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 17.

1. Intérêts et limites de l'utilisation de sorgho dans l'alimentation des oies sur la durabilité de la production du foie gras

La filière de production de foie gras utilise majoritairement du maïs pour l'alimentation des animaux. Le sorgho est nutritionnellement proche du maïs mais il est moins gourmand en eau et en intrants (Amigues *et al* 2006). Notre hypothèse reposait sur l'idée que la substitution du maïs par du sorgho pouvait être une solution pour réduire les impacts environnementaux du système de production. En effet, une analyse de cycle de vie (ACV) réalisée sur le foie, de l'obtention d'un œuf jusqu'à la sortie de l'abattoir, a montré une réduction des impacts environnementaux liés à la production de 1kg de foie gras (-5 à -15% en fonction des impacts calculés ; partie 6). A l'opposé, une évaluation de la durabilité prenant en compte les trois piliers de la durabilité, réalisée à l'échelle de l'atelier de production (partie 7), montre une réduction des scores de durabilité du pilier Environnement, quelle que soit la phase d'élevage pendant laquelle est pratiquée sa distribution (croissance-finition et / ou gavage). Cependant, les scores obtenus dans les deux autres piliers de durabilité montrent que la substitution du maïs par du sorgho permet une amélioration des performances de durabilité économique et sociale dans le cas où la substitution est totale (croissance-finition et gavage). Notons toutefois que ces résultats globaux, c'est-à-dire résultant d'une agrégation des résultats par pilier de durabilité, cachent des résultats disparates entre chaque critère de durabilité. En effet, l'utilisation du sorgho améliore la performance de durabilité de certains critères (viabilité, efficacité du processus, indépendance) mais dégrade la performance d'autres critères (efficacité de la main d'œuvre, rentabilité).

Tableau 18. *Partie B. Récapitulatif des résultats de durabilité du système en fonction de la stratégie d'alimentation*

	Influence de la présentation ¹				Influence de la céréale ²			
	Groupe CMM ₁	Groupe CSM ₁	Groupe MMM ₁	Groupe MSM ₁	Groupe CMM ₂	Groupe CMS ₂	Groupe CSM ₂	Groupe CSS ₂
Aliment en élevage ³	CM	CS	MM	MS	CM	CM	CS	CS
Aliment en gavage	Maïs	Maïs	Maïs	Maïs	Maïs	Sorgho	Maïs	Sorgho
<i>Méthode ACV (% d'amélioration par rapport au témoin)</i>								
Changement climatique	0	6,4	-3,9	-13,7	0	6,3	-8,9	17,7
Eutrophisation	0	-1,1	-4,4	-24,0	0	-1,2	-19,5	1,8
Acidification	0	4,1	-3,9	-17,5	0	4,1	-13,4	12,4
Toxicité terrestre	0	9,9	-4,1	-9,2	0	9,8	-5,2	24,2
Utilisation d'énergie non-renouvelable	0	9,3	-3,0	-8,8	0	9,3	-4,7	24,2
Eau utilisée	0	29,2	-3,4	17,3	0	29,3	21,8	64,0
Occupation des surfaces agricoles	0	-5,2	-5,0	-29,7	0	-5,7	-24,7	-6,8
<i>Méthode S+Durable?</i>								
Pilier Economie	0		+ 0,62		0	-0,17	-0,10	0,32
Pilier Environnement	0		+ 0,31		0	-0,92	-0,03	-0,52
Pilier Social	0		-0,82		0	-0,40	0,29	0,20

¹ Essai 2 ; ² Essai 5³CM : Granulé complet contenant 50% de maïs ; CS : Granulé complet contenant 50% de sorgho ; MM : mélange contenant 50% de maïs concassé et 50% de granule riche en protéines ; MS : mélange contenant 50% de sorgho et 50% de granule riche en protéines.

2. Intérêts et limites de l'utilisation d'aliment sous forme partiellement non granulée dans l'alimentation des oies sur la durabilité de la production du foie gras

La filière de production du foie gras utilise majoritairement des aliments sous forme granulée pour nourrir les animaux pendant la période d'élevage. L'utilisation d'un aliment composé d'un mélange de céréales sous forme simplifiée et de granulés riche en protéines pour améliorer la durabilité du système de production reposait sur deux hypothèses : i/ une réduction des impacts environnementaux de la production du foie gras liée à la simplification du processus de fabrication de l'aliment et ii/ une meilleure acceptabilité sociale liée à l'utilisation d'un aliment jugé plus « naturel » (Gabriel *et al* 2003).

Une évaluation des performances de durabilité (parties 6 et 7) confirme au moins partiellement nos hypothèses de départ concernant les impacts environnementaux. A l'échelle de l'atelier de production, nous montrons une amélioration de la performance environnementale grâce notamment à une réduction de l'indice de consommation pendant la phase de croissance-finition. L'analyse du cycle de vie montre que cette stratégie alimentaire ne diminue que très faiblement les impacts environnementaux de la production d'1 kg d'aliment ($< 1\%$; partie 6). Les conséquences sur les impacts environnementaux de la production d'1 kg de foie gras dépendent de la nature de la céréale utilisée. En effet, lors de l'utilisation du sorgho sous forme de graines entières, les impacts environnementaux de la production d'1 kg de foie gras sont augmentés (10%) alors qu'au contraire, l'utilisation de maïs concassé n'a pas d'effet. A l'échelle de l'atelier de production, nous observons également une réduction de la performance de durabilité sociale expliquée par une réduction du rendement à la cuisson et une augmentation de la mortalité des animaux pendant le gavage. Notons que nous n'avons pas évalué les effets de la forme de présentation de l'aliment sur l'image de la production auprès du consommateur qui était pourtant une de nos hypothèses de départ.

Partie C : Analyse critique des méthodes d'évaluation de la durabilité utilisées

Les méthodes que nous avons utilisées dans notre travail pour évaluer les conséquences des innovations sur la durabilité du système de production présentent plusieurs avantages mais aussi des limites. Le niveau d'approche « atelier de production » correspond bien à l'échelle où les innovations sont mises en œuvre. Il est adapté pour évaluer à la fois les performances dans l'atelier d'élevage et dans l'atelier de gavage. Toutefois, ce niveau d'approche peut ne pas rendre compte de l'ensemble des effets liés à une innovation qui peut se trouver à l'extérieur de l'atelier de production. Par exemple, les résultats obtenus avec la méthode S+ durable ? montrent que l'utilisation du sorgho détériore la performance environnementale de l'atelier de production ce qui est en contradiction avec les résultats obtenus par la méthode ACV à l'échelle du produit qui, elle, montre au contraire une réduction des impacts environnementaux liés à la fabrication du foie gras. Cette contradiction souligne les incohérences qui peuvent exister lors des changements d'échelle d'analyse (van der Werf *et al* 2007).

Les impacts environnementaux de la production d'aliment pour le porc (van der Werf *et al* 2005, Mosnier *et al* 2011), le saumon (Pelletier et Tyedmers 2007) ou de la volaille (Mosnier *et al* 2011) ainsi que les conséquences de l'intégration des contraintes environnementales dans la formulation des aliments ont été précédemment étudiés (Nguyen *et al* 2011). Les résultats ont montré que l'utilisation d'aliments non-granulés (van der Werf *et al* 2005) et l'utilisation de matières premières ayant moins d'impacts (Nguyen *et al* 2011) réduit les impacts environnementaux de la fabrication des aliments. D'un autre côté, des études zootechniques ont démontré la faisabilité technique (Gabriel *et al* 2003, Umar Faruk *et al* 2010) de l'utilisation des aliments non-granulés (grains concassés, broyés, ou en entiers) chez les volailles. Cependant, peu d'études ont cumulé les deux types d'approche : analyse des cycles de vie et évaluation des performances zootechniques. Nos résultats montrent que le gain théorique, estimé par l'ACV, de l'utilisation d'un aliment dont la fabrication engendre moins d'impacts environnementaux n'est pas toujours transformé en une réduction réelle des impacts de la fabrication du produit si cet aliment entraîne une dégradation des performances zootechniques (exemple de l'utilisation du sorgho sous forme de graines entières, voir paragraphes précédents). L'analyse des cycles de vie est une méthode d'estimation des impacts environnementaux potentiels. Lors d'une modification du processus de fabrication

d'un produit, l'utilisation de l'ACV devrait toujours être réalisée après une nouvelle évaluation des performances du système de production après cette modification du processus.

L'évaluation de la sensibilité des résultats issus de l'analyse des cycles de vie est une question d'actualité (Chen et Corson 2012). Dans notre travail, nous avons défini un cycle de production du foie gras d'oie standard représentant les pratiques françaises moyennes. Nous avons également utilisé des itinéraires techniques et des rendements moyens pour le maïs et le sorgho dans leurs bassins de production majoritaires (Landes et Midi Pyrénées, respectivement). Toutefois, les pratiques de production du foie mais également des céréales présentent quelques disparités régionales. Il serait intéressant d'étudier les conséquences de la prise en compte de ces disparités dans l'analyse afin de percevoir sa sensibilité.

La définition du système est un élément primordial lorsqu'on analyse la durabilité qui peut conditionner, au moins partiellement, les conclusions d'une étude (Lopez-Ridaura *et al* 2009). Les analyses de cycles de vie sur les produits d'origine agricole s'arrêtent souvent à l'obtention du produit brut. Pourtant, Davis *et al* (2010) ont montré qu'il était intéressant de ne pas s'arrêter à la porte de l'abattoir mais d'aller jusqu'à la prise en compte des habitudes alimentaires du consommateur. En effet, le mode de production mais également les lieux de production, de consommation, de transformation et de conditionnement du produit ont une influence forte sur ses impacts environnementaux. Ces résultats soulignent qu'une méthode doit être utilisée avec beaucoup de prudence en prenant en compte les besoins particuliers de l'utilisateur et les caractéristiques propres de la méthode (van der Werf *et al* 2007).

Parmi les méthodes d'analyse de la durabilité, la méthode ACV a bénéficié d'un travail de standardisation internationale qui fixe le cadre et les règles d'utilisation de la méthode (famille des normes ISO 14 040). Au contraire, la méthode S+durable ? repose sur une grille d'objectifs de durabilité assignés aux ateliers de production qui a été définie dans le cadre d'une démarche participative (Fortun-Lamothe *et al* 2012), et à ce stade de son développement son utilisation laisse aux utilisateurs le choix des indicateurs de durabilité. Or, le choix des indicateurs peut avoir des conséquences importantes sur les résultats de l'analyse. Il conviendrait sans doute de poursuivre le développement de la méthode S+durable ? Premièrement, il conviendrait de définir de manière participative les indicateurs à utiliser. Cela limiterait la subjectivité de la méthode dans sa forme actuelle (choix des indicateurs par l'utilisateur). Cela permettrait également de proposer des indicateurs composites dont les

différents termes pourraient faire l'objet d'une pondération discutée collectivement. Ceci éviterait que l'utilisation de plusieurs (n) indicateurs pour l'évaluation d'un même critère entraîne une réduction de leur poids au sein du critère ($1/n$). Deuxièmement, les écarts-types de ces indicateurs (qui sont à la base de la transformation des données en scores) pourraient ne pas dépendre exclusivement des résultats du système témoin obtenus lors d'une seule expérimentation mais pourraient provenir d'une base de données d'origine professionnelle (réseau de fermes de références) ou scientifique (compilation de données expérimentales). Les résultats seraient alors plus robustes. En effet, lors d'une évaluation de la durabilité, la valeur de référence permet à l'utilisateur de comparer ses résultats et de juger de leur valeur (Piorr 2003) donc de les interpréter (Bockstaller *et al* 2008). Le résultat obtenu pour un indicateur ne veut rien dire en soi, c'est par comparaison qu'il prend son sens (Girardin *et al* 1999, Rey-Valette *et al* 2008, Vilain *et al* 2008).

Enfin, dans notre cas, l'évaluation n'a pas été complète puisque certains critères de durabilité proposés dans la grille n'ont pas été évalués. Une réflexion collective permettrait soit de combler cette lacune en proposant des indicateurs mesurables (totalement ou partiellement) en conditions expérimentales, soit de modifier le mode de calcul pour éviter les déséquilibres d'analyses liés à une évaluation incomplète.

PERSPECTIVES

Notre travail met clairement en évidence les relations qui existent entre les deux sous systèmes biotechniques : l'atelier d'élevage et l'atelier de gavage. Ainsi, les pratiques d'élevage conditionnent très fortement les résultats de l'atelier de gavage, comme nous l'avons vu à la fois avec l'utilisation de céréale sous forme simplifiée et l'utilisation du sorgho. Nos résultats suggèrent également que pour améliorer la durabilité du système, une innovation ne doit pas dégrader les performances zootechniques des animaux dans un des deux ateliers. En effet, l'analyse du cycle de vie montre qu'une augmentation de la mortalité, ainsi qu'une réduction des performances pondérales ou de l'efficacité alimentaire engendrent une augmentation des impacts environnementaux par kg de produit. D'un point de vue pratique, il nous semble donc que, à l'issue de ce travail, les perspectives de recherches portent en premier lieu sur une meilleure maîtrise technique de l'utilisation du sorgho et des céréales sous forme simplifiée pour maintenir les performances zootechniques actuelles. Cela permettra que l'utilisation de ces aliments ayant un moindre impact environnemental améliore la performance environnementale de la fabrication du produit. Mais ce travail a également permis de soulever des manques de connaissances sur les besoins nutritionnels, les facteurs de régulation de la prise alimentaire ainsi que le développement structurel et fonctionnel du tractus digestif des oies.

1. Maîtrise technique de l'utilisation de graines entières dans l'alimentation des oies

D'un point de vue pratique, il s'agit de limiter les effets négatifs observés lors de l'utilisation des graines entières. En effet, avec une alimentation mélangée à base de graines entières de sorgho, nous observons à la fin de la période croissance-finition des animaux plus lourds (essai 1, 2 et 3) présentant des jabots peu développés (essai 2). Cela pénalise les performances des oies pendant le gavage en raison notamment d'une augmentation de la mortalité. Il semble intéressant de proposer un programme alimentaire permettant de limiter ces effets négatifs. Les travaux de Umar Faruk *et al* (2010) ont montré, chez la poule pondeuse, que l'utilisation d'une alimentation séquentielle améliore les indices de consommation et diminue le dépôt de gras abdominal. Cette technique semble donc prometteuse chez l'oie en croissance pour utiliser les graines entières de sorgho tout en limitant ses inconvénients sur l'excès de poids en fin de gavage. Il conviendra de vérifier si cela permet également le développement attendu du volume du jabot.

2. Connaissance des besoins nutritionnels des oies et système d'alimentation

Les résultats de l'essai 1 montrent que les animaux augmentent progressivement leur consommation de céréales au cours de la période de croissance-finition. Cela suggère que les animaux adaptent progressivement leur ingestion à leurs besoins nutritionnels. Il semble donc intéressant de continuer à préciser l'évolution du besoin nutritionnel des animaux. Si l'aliment est distribué sous forme de granulés complets, cela permettra de proposer en fin de phase d'élevage un aliment plus adapté aux besoins des animaux (moins riche en protéines ?). Si l'aliment est composé de graines entières distribuées en mélange, en libre choix ou en alimentation séquentielle, cela permettra d'ajuster le ratio céréale / granulés protéiques afin d'optimiser les performances des animaux.

Le déclenchement et la stimulation de la stéatose hépatique nécessite des apports élevés en glucides digestibles. Toutefois, le niveau protéique de la pâtée semble également un facteur important pour le développement des foies. L'augmentation du poids de foies n'est pas forcément un objectif intéressant en soi puisqu'au delà d'un certain seuil (950 g) leur valeur commerciale est dégradée. En revanche, une stimulation de la stéatose hépatique pourrait permettre d'envisager une réduction de la durée de gavage (1 à 2 jours) pour l'obtention de foie ayant les poids demandés par la profession. Ceci permettrait d'améliorer les performances de durabilité sociale de l'atelier de production (durée du travail) tout en maintenant, voire améliorant, la performance de durabilité économique.

En perspective, il semble donc intéressant de mieux préciser les apports optimum de protéines au cours de la phase de gavage. Il conviendra cependant de vérifier les conséquences environnementales d'une augmentation de la teneur en protéine de la ration de gavage.

3. Connaissance du rythme et compréhension des facteurs de régulation de l'ingestion chez l'oie

De manière générale, nous avons vu que les oies sont soumises tout au long de leur vie à des changements d'aliment et à des rythmes d'accès aux mangeoires évolutifs afin d'augmenter leur capacité d'ingestion et de les préparer à recevoir une forte quantité d'aliments dans une période courte (gavage). Or, lors de ces phases de transitions, nous avons fréquemment observé des modifications de l'ingestion des animaux, et parfois une réduction de leurs performances. On peut supposer que la gestion de ces transitions vient se confronter

aux capacités d'adaptation comportementale et digestive des animaux face à des modifications des caractéristiques sensorielles et physico-chimiques des aliments. En perspective, il semble donc nécessaire de mieux comprendre le mode de régulation de l'ingestion chez les oies.

Nous avons vu (essai 1) qu'un changement de forme de présentation de l'aliment pouvait affecter l'ingestion des animaux. Des travaux précédents ont montré le rôle de la taille des particules dans la régulation de l'ingestion (Auvergne *et al* 2008a). Il semble également utile de préciser le rôle des autres facteurs de régulation (odorat, vision...) dans la régulation de la prise alimentaire. D'un point de vue pratique, afin de réduire au maximum la chute de consommation au moment des changements d'aliment, il semble utile de réaliser une distribution progressive de tout nouvel aliment en l'incorporant pendant une semaine avec l'aliment précédent. La transition, ainsi progressive, laissera le temps nécessaire à l'animal pour s'adapter et permettra de limiter la chute de performance.

Dans tous nos essais, et quelles que soit les modalités testées, nous avons observé que le nombre de repas non distribués était assez important au début de la phase de gavage (données non présentées). Il semble donc y avoir ici une marge de progrès très importante dans la maîtrise de l'atelier de gavage. Il semble nécessaire de mieux connaître le rythme d'ingestion des oies et d'affiner la mise en place de l'alimentation par repas pour mieux préparer les animaux au gavage.

Il a été montré qu'un épisode de prise alimentaire comporte trois phases : une phase pré-ingestive caractérisée par la sensation de faim et la recherche active d'aliment, une phase prandiale correspondant à la période de prise alimentaire et à la mise en place progressive du rassasiement et une phase post-prandiale caractérisée par l'état de satiété dont la durée est variable (Blundell 1991). La régulation des apports alimentaires peut se faire à la fois sur la quantité et la qualité des aliments ingérés au cours d'un épisode de prise alimentaire, ce qui met en jeu le processus de rassasiement, et sur la durée de l'intervalle entre deux prises alimentaires (Savory 1999). De plus, la motricité gastro-intestinale adaptée à un certain rythme d'ingestion a besoin de délais d'adaptation lors de changement de rythmes alimentaires (Duke 1982, Duke 1992). On ne dispose cependant que de peu de données sur l'adaptabilité du tube digestif aux transitions alimentaires.

Chez l'oie, la mise en place d'un accès restreint à la mangeoire à partir de 8 semaines d'âge a pour objectifs i/ d'instaurer une alimentation par repas chez les animaux (accès quotidien à la mangeoire réduit) et ii/ d'habituer les animaux à ingérer leur ration journalière en un temps restreint afin de les préparer à la phase de gavage. La transition entre une alimentation *ad libitum* et une alimentation par repas (2 heures d'accès par jour) conduit à une réduction des quantités consommées d'environ 15%. Après une à deux semaines d'adaptation, et en absence de changement d'aliment, on retrouve une consommation quotidienne similaire à celle observée avec un accès libre à la mangeoire (essai 1). Ainsi synchroniser les heures d'accès à la mangeoire, sans modifier leur durée totale, au rythme d'ingestion naturel pourrait permettre de limiter les troubles digestifs de l'animal qui sont fréquemment rencontrés au début du gavage. Cela nécessite de mieux connaître le rythme d'ingestion naturel des oies.

4. Connaissance du développement structurel et fonctionnel du tractus digestif des oies

Un développement suffisant du volume du jabot à la fin de la phase d'élevage est un élément clé de la réussite du gavage (Dubois *et al* 2010). Dans l'essai 2, nous avons observé qu'une capacité d'hydratation des aliments - en particulier des graines - réduite, pouvait expliquer un faible développement du jabot des animaux et par conséquent augmenter la mortalité des animaux pendant le gavage. Or, il a été montré que la capacité d'hydratation d'un aliment est corrélée avec sa teneur en parois cellulaires (Robertson et Eastwood 1981, Buffo *et al* 1998, Giger-Reverdin 2000) et liée à la nature de l'amidon (Pinnavaia et Pizzanrari 1998). Il semble donc intéressant de mieux comprendre les relations entre la capacité d'hydratation des aliments et le développement du jabot. Il semble que la taille des particules soit également un facteur impliqué dans la capacité d'hydratation des aliments. Ce point mérite donc également d'être étudié. D'un point de vue pratique, l'incorporation à un taux élevé de matières premières à forte capacité d'hydratation dans l'alimentation des oies au cours de la phase de finition semble une perspective très intéressante pour augmenter le volume du jabot et préparer les animaux au gavage. Ces aliments à forte capacité de rétention hydrique sont généralement des co- voire des sous-produits de matières premières (son de blé, drêche, coques, pulpe...). On peut d'ailleurs formuler l'hypothèse que leur incorporation pourrait permettre également de diminuer les impacts environnementaux et réduire le coût économique de l'aliment.

Les résultats de l'essai 5 montrent qu'un changement de céréale utilisé entre les phases d'élevage et de gavage (sorgho / maïs) pénalise fortement les performances des animaux pendant la phase de gavage : augmentation de la mortalité des animaux et réduction du poids des foies. En perspective, il semble donc intéressant de comparer la digestibilité du maïs et du sorgho chez l'oie en croissance, en interaction avec leur forme de présentation (graine entière ou dans un aliment granulé). Plus spécifiquement, il semble intéressant de comparer les digestibilités de l'amylose et de l'amylopectine chez l'oie, par exemple en utilisant des variétés de maïs qui présentent des teneurs différentes pour ces deux composés. Il semble également utile de préciser la dynamique d'adaptation du tractus digestif à un nouvel aliment ainsi que la dynamique de dégradation de ces composés. En effet, à l'heure actuelle, le dernier repas des animaux gavés est géré en fonction de l'heure de leur sacrifice. Au cours d'un jeune (même d'assez courte durée), la lipolyse hépatique s'enclenche diminuant progressivement le poids des foies et donc la performance des animaux et la rentabilité de l'atelier. Une gestion fine des apports de glucose au niveau hépatique avant le sacrifice, par l'utilisation d'un aliment dont la dynamique de digestion retardée anticipe le jeune, serait un moyen pratique et rentable de limiter les pertes économiques liées à une mauvaise gestion du délai repas / sacrifice.

D'un point de vue pratique, on peut recommander d'incorporer la céréale qui sera utilisée pour le gavage des animaux dans l'aliment distribué au cours de la phase de croissance-finition afin d'adapter le tube digestif et de limiter les conséquences d'une transition alimentaire entre les phases de croissance-finition et de gavage.

D'après Lavigne *et al* (2000) et Dubois *et al* (2010), la granulométrie idéale d'une pâtée de gavage consiste en un mélange de 58% de farine de maïs et de 42% de graines de maïs. Nos résultats montrent que ce mélange permet d'obtenir un profil granulométrique contenant 48% de particules de taille supérieure à 4 mm et 43% de particules dont la taille est comprise entre 0,5 et 2 mm (essai 5). Or, le gavage a été réalisé avec succès à partir d'une pâtée à base de sorgho présentant un profil granulométrique totalement différent (46% de particules de taille comprise entre 2 et 4 mm et 36% de particules dont la taille est comprise entre 0,5 et 2 mm). En perspective, il semble intéressant de mieux préciser les relations entre la granulométrie de l'aliment distribué pendant le gavage et les performances des animaux. L'utilisation d'une matière première de présentation unique, par exemple sous forme de farine grossière seulement au lieu d'un mélange graines / farine réduirait le temps de travail des gaveurs et permettrait d'améliorer leurs conditions de travail et leur productivité.

CONCLUSIONS

Ce travail de thèse visait à évaluer les effets i/ du mode d'alimentation (industrielle ou fermière) en phase de croissance et ii/ de la substitution du maïs par du sorgho dans la ration alimentaire des oies en phase de croissance et pendant le gavage sur les performances des animaux et la durabilité du système d'élevage. Ce travail avait pour ambition de proposer des innovations dans le système d'élevage afin de réduire les impacts environnementaux de la production de foie gras d'oie sans fragiliser sa rentabilité économique ni affecter la qualité des produits, améliorant de ce fait sa durabilité.

D'un point de vue zootechnique, nos résultats montrent que la nature de la céréale (maïs vs sorgho) utilisée pendant la phase de croissance n'a pas influence sur le poids vif des animaux mais peut augmenter le taux de mortalité des animaux pendant la phase de gavage. L'incorporation de sorgho pendant la phase de gavage entraîne une augmentation du poids des foies, donc une diminution de leur valeur commerciale et une réduction de l'intensité de leur couleur jaune. L'utilisation de graines entières pendant la phase d'élevage augmente la consommation d'aliment, le poids corporel et le développement des intestins pendant la phase de croissance mais également la mortalité des animaux pendant la phase de gavage. En conséquence, avant d'être diffusées, ces deux innovations méritent donc quelques adaptations de l'itinéraire technique de production afin de maîtriser leurs conséquences négatives sur la mortalité pendant le gavage. Toutefois, elles offrent des perspectives très intéressantes pour réduire les impacts environnementaux et améliorer la durabilité de la production de foie gras d'oie. D'un point de vue cognitif, ce travail met en lumière les relations qui existent entre les pratiques dans l'atelier d'élevage et les performances dans l'atelier de gavage, justifiant, s'il le fallait, l'intérêt d'une approche systémique du fonctionnement du système de production du foie gras. Ce travail propose aujourd'hui la première évaluation des impacts environnementaux de la production de foie gras à l'aide de la méthode de l'analyse des cycles de vie. Nos résultats donnent également un éclairage sur les effets des changements d'échelle dans l'évaluation de la durabilité.

L'ensemble de nos travaux offrent des perspectives de recherches intéressantes. A court terme et d'un point de vue pratique, il suggère des adaptations dans la gestion des pratiques d'alimentation pour améliorer les performances des ateliers de production. A plus long terme et d'un point de vue scientifique, il soulève des manques de connaissances sur les besoins nutritionnels, les facteurs de régulation de la prise alimentaire ainsi que le développement structurel et fonctionnel du tractus digestif des oies

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

-A-

- AFNOR., 1977. Aliments des animaux. Dosage des cendres brutes. NF V 18-101, Assoc. Française Normalisation, Paris, France.
- AFNOR., 1982. Aliments des animaux. Détermination de la teneur en eau. NF V 18-109, Assoc. Française Normalisation, Paris, France.
- AFNOR., 1993a. Aliments des animaux. Détermination de la cellulose brute NF V03-040, Assoc. Française Normalisation, Paris, France.
- AFNOR., 1993b. Aliments des animaux. Dosage des acides aminés. NF V18-113, Assoc. Française Normalisation, Paris, France.
- AFNOR., 1997a. Aliments des animaux. Dosage de la matière grasse. NF V 18-117, Assoc. Française Normalisation, Paris, France.
- AFNOR., 1997b. Aliments des animaux. Dosage de l'azote, méthode par combustion (DUMAS). NF V 18-120, Assoc. Française Normalisation, Paris, France.
- AFNOR., 2003. SD21000 Développement durable. Responsabilité sociétale des entreprises. 42 pp.
- AGPM (Association Générale des Producteurs de Maïs)., 2012. <http://www.agpm.com>.
- AGRESTE (La statistique, l'évaluation et la prospective agricole)., 2010. Enquête pratiques culturelles. Retrieved May 20, 2012, from <http://agreste.agriculture.gouv.fr/>.
- Ali N.M.M., El Tinay A.H., Elkhailifa A.E.O., Salih O.A., Yousif N.E., 2009. Effect of alkaline pretreatment and cooking on protein fractions of a high-tanin sorghum cultivar. *Food Chem.*, 114, 649–651.
- Althaus H.J., Chudacoff M., Hirschier R., Jungbluth N., Osses M., Primas A., 2007. Life cycle inventories of chemicals. Final report ecoinvent data v2.0, vol. 8. Swiss Centre for the Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- Amerah A.M., Ravindran V., Lentle R.G., Thomas D.G., 2007. Influence of feed particle size and feed form on the performance, energy utilization, digestive tract development, and digesta parameters of broiler starters. *Poult. Sci.*, 86, 2615-2623.
- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A., 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72pp.
- Andersson K., Ohlsson T., Olsson P., 1998. Screening life cycle assessment (LCA) of tomato ketchup: a case study. *J. Clean. Prod.*, 6, 277–288.

- Antoine S., Demaure E., Mombrun M., Sacquet A.M., 2001. Territoires et développement durable. Paris, Comité 21, 51 pp.
- Arshad M.A., Martin S., 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 88, 153-160.
- ARVALIS-Institut du végétal 2010. Culture et utilisation du sorgho grain. pp 27.
- Aubin J., Van der Werf H.M.G, Petit J., 2005. Contribution de l'analyse du cycle de vie à l'évaluation du développement durable de l'aquaculture, Académie d'agriculture, octobre, academie-agriculture.fr
- Aubin J., Tocqueville A., Haury J., Snoussi N., Amrouche S., Marle M., 2007. Evaluation environnementale des piscicultures de truite en France par approches combinées: Idaqua environnement. 1^{ères} Journées recherche filière piscicole, Paris, France. 4pp.
- Auvergne, A., Babilé R., Bouillet-Oudot M., Manse H., Latil G., 1995. Influence of two feeding rates on muscular and liver composition in force-fed mule ducks. XII European symposium on the quality of poultry meat. Zaragoza, Spain. 181-188.
- Auvergne A., Leprettre S., Lavigne F., Babilé R., Dubois J.P., 2006. Utilisation de protéagineux métropolitains dans des mélanges fermiers par les oies grises du sud-ouest en phase de finition. 7^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Arcachon, France, 4pp.
- Auvergne A., Lavigne F., Dubois J.P., 2008a. Utilisation du maïs en alimentation fermière pour les oies en période de croissance-finition. 8^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Arcachon, France, 4pp.
- Auvergne A., Tortereau F., Rémignon H., Lavigne F., Dubois J.P., 2008b. Effets des conditions d'éclosion et de démarrage sur le poids du pectoral à la mise en gavage et les résultats de gavage. 8^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Arcachon, France, 4pp.
- Auvergne A., Dubois J.P., Lavigne F., Bijja M., 2010. Effets des conditions de températures et du délai d'alimentation en démarrage sur les résultats d'élevage et de gavage des oies. 9^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à foie Gras. Bordeaux, France. 4pp
- Auvergne A., Arroyo J., Bijja M., Lavigne F., Dubois J.P., 2012. Intérêt d'une alimentation multiphase pour l'élevage des oies destinées au gavage.. Essais S107-S1013. Rapport d'étude CIFOG.

-B-

- Babilé R., Chambert S., Everlet P., Auvergne A., Manse H., 1998. Caractérisation des tissus adipeux après gavage des canards au maïs ou au mélange figue-maïs. 3^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Bordeaux, France. 133-135.
- Balog J.M., Millar R.I., 1989. Influence of the sense of taste on broiler chick feed consumption. *Poult. Sci.*, 68, 1519-1526.
- 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 pp.
- Banfield M.J., Kwakkel R.P., Forbes J.M., 2002. Effects of wheat structure and viscosity on coccidiosis in broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 98, 37-48
- Basset-Mens C., 2005, Propositions pour une adaptation de l'Analyse de Cycle de Vie aux systèmes de production agricole. Mise en œuvre pour l'évaluation environnementale de la production porcine, thèse de doctorat, spécialité Science de l'environnement, Agrocampus Rennes, 241 pp.
- Basset-Mens C., van der Werf H.M.G., 2005. Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agri. Ecosyst. Environ.*, 105, 127-144.
- Basset-Mens C., van der Werf H.M.G., Robin P., Morvan T., Hassouna M., Paillat J.M., Vertès F., 2007. Methods and data for the environmental inventory of contrasting pig production systems. *J. Clean. Prod.*, 15, 1395-1405.
- Basset-Mens C., Ledgard S., Boyes B., 2009. Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand. *Ecol. Econ.*, 68, 1615-1625.
- Bate-Smith E. C., 1969. Luteoforol (3',4,4',5,7-pentahydroxyflavan) in *Sorghum vulgare* L. *Phytochemistry.*, 8, 1803-1810.
- Bedford M.B., 1996. Interaction between ingested feed and the digestive system in poultry. *J. Appl. Poultry Res.*, 5, 86-95.
- Bijja M., Dubois J.P., Lavigne F., Auvergne A., Arroyo J., Fernandez X., 2010. Qualité des parcours de palmipèdes : comparaison de la conduite en parcours tournants et en parcours fixe. 9^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Bordeaux, France. 197-201.
- Black J.M., Owen M., 1986. Determinants of social rank in goose flocks: acquisition of social rank in young geese. *Behaviour.*, 102, 129-146.

- Blonk H., Lafleur M., van Zeijts H., 1997. Towards an environmental infrastructure of the Dutch food industry: exploring the information conversion of five food commodities. Amsterdam, The Netherlands IVAM Environmental Research. University of Amsterdam.
- Blundell J.E., 1991. Pharmacological approaches to appetite suppression. *Trends Pharmacol. Sci.*, 12, 147-157.
- Bockstaller C., Girardin P., van der Werf H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *Eur. J.Agron.*, 7, 261-270.
- Bockstaller C., Guichard L., Makowski D., Aveline A., Girardin P., Plantureux S., 2008. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review, *Agron. Sustain. Dev.*, 28, 139-149.
- Bockstaller C., Espagnol S., Guichard L., Petit J., Raison C., Vertès F., 2010. Stratégies de choix des méthodes et outils d'évaluation environnementale en systèmes d'élevage. In : S. Espagnol, P. Leterme (eds) *Elevages et environnement*, 15-64. Editions Quae, Versailles, France. Editions Educagri, Dijon, France.
- Boer D.I.J.M., 2002. Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. *Livest. Prod. Sci.*, 80, 69-77.
- Boggia A., Paolotti L., Castellini C., 2010. Environmental impact evaluation of conventional, organic and organic-plus poultry production systems using life cycle assessment. *World's Poultry Sci. J.*, 66, 95-114.
- 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 pp.
- Bonnier G., Douin R., Poinso J., 1990. La grande flore en couleurs de Gaston Bonnier. Editions Belin, Paris, 1401 pp.
- Bonny S., 2004. 1994. Les possibilités d'un modèle de développement durable en agriculture. Le cas de la France. *Le courrier de l'environnement de l'INRA.*, 23, 5-15.
- Bouiller-Oudot M., Leprettre S., Dubois J. P., Babilé R., 2002. Utilisation du tourteau de noix en gavage : incidence sur les produits d'oies grasses. 5^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Pau, France. 132-135.
- Bouvarel I., Vallée C., Lescoat P., Ferreira G., Chagneau A.M., Constantin P., Leterrier C., 2008. Effects of various energy and protein levels on feed preferences in meat-type chickens used to sequential feeding. *Animal.*, 2, 1674-1681.
- Bouvarel I., Chagneau A.M., Lecuelle S., Lescoat P., Ferreira G., Duvaux-Ponter C., Leterrier C., 2009. Feed composition and hardness interact in preference and intake in chickens. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 118, 62-68.

- Bouvarel I., Tesseraud S., Leterrier C., 2010. L'ingestion chez le poulet de chair : n'oublions pas les régulations à court terme. *INRA Prod. Anim.*, 23, 391-404
- Bravo L., 1998. Polyphenols: Chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. *Nutr. Rev.*, 56, 317-333.
- Buffo R.A., Weller C.L., Parkhurst A.M., 1998. Relationships among grain sorghum quality factors. *Cereal Chem.*, 75, 100-104.
- Burkhardt D., 1982. Birds, berries and UV. A note on some consequences of UV vision in birds. *Naturwissenschaften.*, 69, 153-157.
- Brundtland B.M., 1989. Notre avenir à tous. Chapitre 2: vers un développement soutenable. Commission mondiale sur l'environnement (CMED), Editions du fleuve, Montréal, Canada, 51-77.
- Burhol P.G., 1982. Regulation of gastric secretion in the chicken. *Scand. J. Gastroenterol.*, 17, 321-323.
- Butler L.G., Reidl D.J., Lebryk D.G., Blytt H.J., 1984. Interactions of proteins with sorghum tannin: mechanism, specificity and significance. *J. Amer. Oil Chem. Soc.*, 61, 916-920.

-C-

- Cagampang G.B., Kirleis A.W., 1984. Relationship of sorghum grain hardness to selected physical and chemical measurements of grain quality. *Cereal Chem.*, 61, 100-105.
- Capretta P.J., Moore M.J. 1970. Appropriateness of reinforcement to cue in the conditioning of food aversions in chickens (*Gallus gallus*). *J Comp Physiol Psychol.*, 72(1), 85-89.
- Carré B., 2000. Effets de la taille des particules alimentaires sur les processus digestifs chez les oiseaux d'élevage. *INRA Prod. Anim.*, 13 (2), 131-136.
- Casey J.W., Holden N.M., 2005. Analysis of greenhouse gas emissions from the average Irish milk production system. *Agric. Syst.*, 86, 97-114.
- Cazeils J. L., 2000. Caractérisation de la composition lipidique des membranes plasmiques des hépatocytes de foies d'oies: relation avec le rendement technologique des foies gras. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique, Toulouse, France.
- Cederberg C., Mattson B., 2000. Life cycle assessment of milk production – a comparison of conventional and organic farming. *J. Cleaner Prod.* 8, 49-60.
- Cederberg C., Stadig M., 2003. System expansion and allocation in life cycle assessment of milk and beef production. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 8, 350-356.

- Chagneau A.M., Bessonneau D., Bouchot C., Lescoat P., Picard M., Lessire M., 2006. Broiler short-term feed preferences measured with srabox, a new feed choice procedure. *Poult. Sci.*, 85, 808-815.
- Chang S.I., Fuller H.L., 1964. Effect of tanin content of grain sorghums on their feeding value for growing chicks. *Poult. Sci.*, 43, 30-36.
- Chen X., Corson M., 2012 Analysis and propagation of uncertainty in agricultural LCA (Poster); in: Corson, M.S., van der Werf, H.M.G (Eds), Book of Abstracts of the 8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2012), 1-4 October 2012, Saint-Malo, France. INRA, Rennes, France, p. 933.
- Cherian G., Selvaraj R. K., Goeger M. P., Stitt P. A., 2002. Muscle fatty acid composition and thibarbituric acid-reactive substances of broilers fed different cultivars of sorghum. *Poult. Sci.*, 81, 1415-1420.
- Chevalier D., André S., Merlet F., Besson M., Milier E., Bouvarel I., 2007. Incorporation de céréales à la ferme dans l'alimentation des volailles de chair en filière longue. 7èmes Journées de la Recherche Avicole, Tours, 188-192.
- CIFOG (Comité Interprofessionnel des palmipèdes à FOie Gras)., 2012. Rapport économique. Assemblée Générale du 22/06/2012. Saint Palais France.
- CIVAM / Réseau agriculture durable., 2002. Évaluer la durabilité d'un système de production – approche globale, méthodes et diagnostics. 2ème édition. Cahiers techniques de l'agriculture durable, 61 pp.
- Clayton D. A., 1978. Social facilitated behaviour. *Q. Rev. Biol.*, 53, 373-390.
- Clemens E.T., Stevens C.E., Southwort M., 1975. Sites of organic acid production and pattern of digesta movement in the gastrointestinal tract of geese. *J. Nutr.*, 105, 1341-1350.
- Cobos A., Veiga A., Diaz O., 2000. Chemical and fatty acid composition of meat and liver of wild ducks (*Anas platyrhynchos*). *Food Chemistry.*, 68, 77-79.
- Conan L., Metayer J.P., Lessire M., Widiez J.L., 1992. Metabolizable energy content of cereal grains in poultry. Recent yearly surveys in France. *INRA Prod. Anim.*, 5, 329-338.
- CORPEN., 2006. Estimation des rejets d'azote, de phosphore, de potassium, de calcium, de cuivre et de zinc par les élevages avicoles. Comité d'orientation pour les pratiques agricoles respectueuses de l'environnement, 55pp.
- Covasa M., Forbes J.M., 1994. The effect of social interaction on selection of feeds by broiler chickens. *Br. Poult. Sci.*, 35, 817.

- Crévieu I., Carré B., Chagneau A.M., Guéguen J., Melcion J.P., 1997. Effect of particle size of pea (*Pisum sativum* L) flours on the digestion of their proteins in the digestive tract of broilers. *J. Sci. Food Agric.*, 75, 217-226.
- Crosson P., Shalloo L., O'Brien D., Lanigan G.J., Foley P.A., Boland T.M., Kenny D.A., 2011. A review of whole farm systems models of greenhouse gas emissions from beef and dairy cattle production systems. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 166-167 29-45.
- Cumming R.B., 1992. Mechanisms of biological control of coccidiosis in chickens. In: *Proceedings of the Australian Poultry Science Symposium*, Sydney, Australia, 46-51.
- Cumming R. B., 1994. Opportunities for whole grain feeding. In "9th European Poultry Conference", Vol. II, pp. 219-222. WPSA, Glasgow.

-D-

- D'Alfonso T.H., McCracken K., 2002. Global corn quality variability. *Proceedings of the Multistate Poultry Meeting*, Indianapolis, Indiana, May 14-16.
- Daghir N.J., 2008. *Poultry Production in Hot Climates*, 2nd Edition, Published by CAB International, Wallingford, Oxfordshire, UK, pp.387.
- Dalal R.C., Lawrence P., Walker J., Shaw R.J., Lawrence G., Yule D., Doughton J.A., Bourne A., Duivenvoorden L., Choy S., Moloney D., Turner L., King C., Dale A., 1999. A framework to monitor sustainability in the grains industry. *Aust. J. Exp. Agr.*, 39, 605-620.
- Davis J., Sonesson U., Baumgartner D.U., Nemecek T., 2010. Environmental impact of four meals with different protein sources: Case studies in Spain and Sweden. *Food Res. Int.*, 43, 1874-1884.
- Dehaynin N., 2007. *Utilisation du sorgho en alimentation animale*. Thèse de doctorat vétérinaire, Lyon 2007 ; 109pp.
- de Vries M., de Boer I.J.M., 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science.*, 128, 1-11.
- Dubois J.P., Auvergne A., Babilé R., Verdier M., Lavigne F., 1993. L'alimentation des oies à gaver. Optimisation et influence sur la croissance et sur le développement musculaire jusqu'à l'âge de 18 semaines (1^{er} résultat). 1^{ères} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Bordeaux, France. 37-48.
- Dubois J.P., Guichard F., Auvergne A., Guy G., Babilé R., Leprettre S., Lavigne F., 1996a. Comparaison des performances de croissance et d'engraissement de trois types génétiques

- d'oies. 2^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Bordeaux, France. 5-8.
- Dubois J.P., Auvergne A., Babilé R., Verdier M., Leprettre S., Lavigne F., Vieillecroze D., 1996b. Le point des facteurs d'amélioration de la production d'oies gavées. 2^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Bordeaux, France. 89-92.
- Dubois J.P., Lavigne F., Leprettre S., Merillou D., Auvergne A., Babilé R., 1998. Elevage des oies à gaver, « Guide à destination des éleveurs ». 3^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Bordeaux, France. 87-90.
- Dubois J.P., Leprettre S., Lavigne F., Babilé R., 2006. Conditions de démarrage des oisons. Détermination des besoins en température pendant la phase de démarrage. Incidence de la teneur énergétique de l'aliment. 7^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Arcachon, France. 192-196.
- Dubois J. P., Bijja M., Auvergne A., Lavigne F., Fernandez X., Babilé R., 2008. Qualité des parcours de palmipèdes : choix des espèces végétales, rendement et résistance au piétinement. 8^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à foie Gras. Arcachon, France. 107-110.
- Dubois J. P., Auvergne A., Lavigne F., Fernandez X., Babilé R., 2010. Le nouveau guide pratique du gavage. 9^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Bordeaux, France. 255-258.
- Dunning J.B., 1992. CRC Handbook of Avian Body Masses, Boca Raton, CRC Press, p.19.
- Douglas J.H., Sullivan T.W., Bond P.L., Struwe F.J. 1990 Nutrient composition and metabolizable energy values of selected grain sorghum varieties and yellow corn. Poultr. Sci., 69, 1147-1155.
- Dozier W.A., Behnke K., Kidd M.T., Branton S.L., 2006. Effects of the addition of roller mill ground corn to pelleted feed on pelleting parameters, broiler performance, and intestinal strength. J. Appl. Poultr. Res., 15, 236-244.
- Duke G.E., 1982. Gastrointestinal motility and its regulation. Poultr. Sci., 61, 1245-1256.
- Duke G.E., 1992. Recent studies on regulation of gastric motility in turkeys. Poultr. Sci., 71, 1-8.

-E-

- Elkin R. G., Freed M. B., Hamaker B. R., Zhang Y., Parsons C. M., 1996. Condensed tanins are only partially responsible for variations in nutrient digestibilities of sorghum grain cultivars. *J. Agric. Food Chem.*, 44, 848-853.
- Emmans G.C., 1991. Diet selection by animals: theory and experimental design. *Proceedings of Nutrition Society.*, 50, 59-64.
- Engberg R.M., Hedemann M.S., Steinfeldt S., Jensen B.B., 2004. Influence of whole wheat and xylanase on broiler performance and microbial composition and activity in the digestive tract. *Poult. Sci.*, 83, 925-938.
- European Union Council Directive 1009/2009/EC., 2009. on the protection of animals at the time of slaughter or killing. *Official Journal of European Community L 303*, 1-30.

-F-

- Farell D., 2004. Management, nutrition and products of domestic geese: a review. *Proc. Aust. Poult. Sci. Sym.*, 139-144.
- Farré I., Faci J.M., 2006. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agric. Water Manage.*, 83, 135-144.
- Fernandez X., Bouillet-Oudot M., Molette C., Bernadet M. D., Manse H., 2011. Duration of transport and holding in lairage at constant postprandial delay to slaughter-Effects on fatty liver and breast muscle quality in mule ducks. *Poult. Sci.*, 90, 2360-2369.
- Fisher C., Mc Nab J. M., 1987. Techniques for determining the metabolizable energy (ME) content of poultry feeds. *Recent advances in animal nutrition*. Haresign, W. and Cole, D.J.A. editors, Butterworths, London. 3-18.
- Folch J., Lees M., Sloane-Stanley C., 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissue. *J. Biol Chem.*, 226, 497-509.
- Food and Agriculture Organization (FAO) 2002. Technical conversion factors (TCF) for agricultural commodities. Retrieved May 18, 2010, from <http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/methodology/tcf.pdf>.
- Forbes J.M., Shariatmadari F., 1994. Diet selection for protein by poultry. *World's Poult. Sci. J.*, 50, 7-24.
- Forbes J.M., Covasa M., 1995. Application of diet selection by poultry with particular reference to whole cereals. *World's Poult. Sci. J.*, 51, 149-165.

- Fortun-Lamothe L., Litt J., Coutelet G., Gidenne, T., 2012. A participatory approach to define objectives, criteria and indicators for evaluating the sustainability of rabbit rearing units. In 10th World Rabbit Congress. Sharm el-Sheikh, Egypt. 5pp.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., van Dorland R., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In *Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, (ed. S Solomon, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor and HL Miller), pp. 129–234. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- FranceAgrimer 2012. Les produits carnés, avicoles et laitiers. Les données statistiques de FranceAgriMer / direction Marchés, études et prospective / édition 2012.
- Frigero D., Weiss B., Kotrschal K., 2001. Spatial proximity among adult siblings in graylag geese (*Anser anser*): evidence for female bonding. *Acta Ethologica.*, 3, 121-125.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hirschier R., Hellweg S., Humbert S., Köllner T., Loerincik Y., Margni M., Nemecek T., 2007. Implementation of life cycle impacts assessment methods. Ecoinvent report no. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.

-G-

- Gabriel I., Mallet S., Leconte M., 2003. Differences in the digestive tract characteristics of broiler chickens fed on complete pelleted diet or whole wheat added to pelleted protein concentrate. *Br. Poult. Sci.*, 44, 283-290.
- Gabriel I., Mallet S., Leconte M., Travel A., Lalles J.P., 2008. Effects of whole wheat feeding on the development of the digestive tract of broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 142, 144-162.
- Gac A., Béline F., Bioteau T., 2006. Flux de gaz à effet de serre (CH₄, N₂O) et d'ammoniac (NH₃) liés à la gestion des déjections animales – Synthèse bibliographique et élaboration d'une base de données, rapport final, Cemagref-Ademe, 97 pp.
- Gentle M.J., Breward J., 1986. The bill tip organ of the chicken. *J. Anat.*, 145, 79-85.
- Gerber M., Astigarraga L., Bockstaller C., Fiorelli J.L., Hostiou N., Ingrand S., Marie M., Sadok W., Veysset P., Ambroise R., Peigné J., Plantureux S., Coquil X., 2009 Le modèle

- Dexi-SH* pour une évaluation multicritère de la durabilité agroécologique des systèmes d'élevage bovins laitiers herbagers. *Innovations Agronomiques* 4, 249-252.
- Giger-Reverdin S., 2000. Characterisation of feedstuffs for ruminants using some physical parameters. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 86, 53-69.
- Girardin P., Bockstaller C., Van der Werf H.M.G., 1999. Indicators: Tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *J Sustain. Agr.*, 13, 5-21.
- Gras R., Benoit M., Deffontaines J.P., Duru M., Langlet A., 1989. Le fait technique en agronomie, activités agricoles, concepts et méthodes d'étude, INRA-éditions-L'Harmattan éd., 184 pp.
- Grasse P.P., 1963. Botanique. Masson et Cie, Paris, 1039 pp.
- Gualtieri, M., and S. Rapaccini. 1990. Sorghum grain in poultry feeding. *World's Poult. Sci. J.*, 46, 246-254.
- Groupe National Interprofessionnel des Semences et plants (GNIS) 2004. Catalogue français des espèces et variétés - http://www.gnis.fr/index/action/page/id/257/nom//idfr/SORGHO/page_num/0.
- Guéméné D., Guy G., 2004. The past, present and future of force-feeding and "foie gras" production. *World's Poultry Sci. J.*, 60, 210-222.
- Guinée J.B., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., van Duin Rand Huijbregts M.A.J., 2002. Life cycle assessment: an operational guide to the ISO standards. Centre of Environmental Science, Leiden University, Leiden, the Netherlands.
- Guy G., Baéza E., Salichon M.R., Juin H., Rousselot-Pailley D., 1998. Influence des conditions d'élevage de l'oie sur la production de foie gras et de viande. *Ann. Zootech.* 47, 215-224.
- Guy G., Buckland R., 2002. Goose Production. *FAO Animal Production and Health Paper*, 154. Rome.

-H-

- Haas G., Wetterich F., Köpke U., 2001. Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. *Agri. Ecosyst. Environ.*, 83, 43-53.
- Hagerman A.E., Zhao Y., Johnson S., 1997. Methods for determination of condensed and hydrolysable tanins. In: *Antinutrients and phytochemicals in food*. ACS Symposium Series 662. American Chemical Society, Washington DC, pp. 209-222.
- Halberg N., van der Werf H.M.G., Basset-Mens C., Dalgaard R., de Boer I.J.M., 2005. Environmental assessment tools for the evaluation and improvement of European livestock production systems, *Livest. Prod. Sci.* 96, 33-50.
- Haudicourt A.G., Hedin L., 1943. *L'homme et les plantes cultivées*. Gallimard, Paris, 233 pp.
- Hauschild MZ., 2005. Assessing environmental impacts in a life cycle perspective. *Environ. Sci. Technol.* 39, 81A-88A.
- Heinroth O.A., 1911. Beiträge zur Biologie, insbesondere Psychologie und Ethologie der Anatiden. *Verhandlungen des internationalen Ornithologenkongresses*, Berlin.
- Henuk Y.L., Dingle J.G., 2002. Practical and economic advantage of choice feeding systems for laying poultry. *World's Poult. Sci. J.*, 58, 199-208.
- Heppner F.H., Convissar J.L., Moonan Jr. D.E., Anderson J.G. T. 1985. Visual Angle and Formation Flight in Canada Geese (*Branta canadensis*). *The Auk.*, 195-198
- Hermier D., Salichon M.R., Guy G., Peresson R., Mourot J., Lagarrigue S., 1999. La stéatose hépatique des palmipèdes gaves: bases métaboliques et sensibilité génétique. *INRA Prod. Anim.*, 12, 265-271.
- Hernandez, E.B., Viejo, E.G., Carro, R.C., 1997. Study of the swelling capacity of a mild laxative formulation. *Pharm Acta Helv.*, 72, 75-80.
- Herrero M., Thornton P. K., Notenbaert A. M., Wood S., Msangi S., Freeman H. A., Bossio D., Dixon J., Peters M., van de Steeg J., Lynam J., Parthasarathy Rao P., Macmillan S., Gerard B., McDermott J., Seré C., Rosegrant M., 2010. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. *Science.*, 327, 822-825.
- Hervieu B., 2002. Le développement durable : une nécessité pour nourrir le monde ? Le dossier de l'environnement de l'INRA n°22.
- Hetland H., Svihus B., Olaisen V., 2002. Effect of feeding whole cereals on performance, starch digestibility and duodenal particle size distribution in broiler chickens. *Br. Poult. Sci.*, 43, 416-423.

- Hetland H., Svihus B., Krogdahl A., 2003. Effects of oat hulls and wood shavings on digestion in broilers and layers fed diets based on whole or ground wheat. *Br. Poult. Sci.*, 44, 275-282.
- Hill K.J., 1971. The physiology of digestion. In: Bell, D.J., Freeman, B.M. (Eds.), *Physiology and Biochemistry of the Domestic Fowl*. Academic Press, London, Great Britain, pp. 25–49.
- Horton H.R., Moran L.A., Ochs R.S., Rawn J.D., Scrimgeour K.G., 2000. *Principes de Biochimie* Ed. DeBoeck Universités – 752pp.
- Hsu J.C., Lu T.W., Chiou P.W.S., Yu B., 1996 Effects of different sources of fibre on growth performance and apparent digestibility in geese. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 60, 93-102.
- Hughes B.O., 1971. Allelomimetic feeding in the domestic fowl. *Br. Poult. Sci.*, 12, 359-366.
- Hughes B.O., 1984. The principles underlying choice feeding behavior in fowls with special reference to production experiments. *World's Poult. Sci. J.*, 40, 141-150.

-I-

- Information Science, Technology and Applications (ISTA) 2009. *Oil world annual 2009*, vol. 1 ISTA Mielke GmbH, Hamburg, Germany.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (ed. HS Eggleston, L Buendia, K Miwa, T Ngara and K Tanabe), IGES, Japan.
- ISO, 2006a. ISO 14040 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. ISO (Organisation Internationale de Normalisation), Genève, Suisse.
- ISO, 2006b. ISO 14044 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices. ISO (Organisation Internationale de Normalisation), Genève, Suisse.

-J-

- Jacquot L., 1988. Les matières premières alimentaires. In : Rosset R. (éd). *L'aviculture française*, ITSV, Paris, 375-380.
- Jamroz D., Jakobsen K., Orda J., Skorupinska J., Wiliczekiewicz A., 2001. Development of gastrointestinal tract and digestibility of dietary fibre and amino acids in young chickens, ducks and geese fed diets with high amounts of barley. *Comp. Biochem. Physiol.*, A, 131, 657-668.
- Jansman A.J.M., 1993. Tanins in feedstuffs for simple-stomached animals. *Nutr. Res. Rev.*, 6, 209-263.

- Jenkins P.J., Donald A.M., 1995. The influence of amylose on starch granule structure. *Int. J. Biol. Macromol.*, 17, 315-321.
- JOCE (Journal Officiel des Communautés Européennes)., 1971a. Dosage de l'humidité. L279/8. Eur-Op News, Luxembourg, Luxembourg.
- JOCE (Journal Officiel des Communautés Européennes)., 1971b. Dosage des cendres brutes. L155/20. Eur-Op News, Luxembourg, Luxembourg.
- Johns C.O., Brewster J.F., 1916. Kafirin, an alcohol-soluble protein from kafir, andropogon sorghum. *J. Biol. Chem.*, 28, 59-65.
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., Shaked, S., 2010. Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse.
- 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 pp.
- Jondreville C., Van Den Broecke J., Gatel F., Grosjean F., Van Cuwenberghe S., Seva 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.
- Jones R.B., Roper T.J., 1997. Olfaction in the domestic fowl: a critical review. *Physiol. Behav.*, 62, 1009-1018.
- Jordan, D., Umar Faruk M., Lescoat P., Ali M.N., Štuhec I., Bessei W., Leterrier C., 2010. The influence of sequential feeding on behaviour, feed intake and feather condition in laying hens. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 127, 115-124.
- Journal Officiel., 1999. Loi d'orientation agricole. Loi n°99-574 du 9 juillet 1999. *J. Off. République Française* du 10 juillet 1999.
- Judd W.S., Campbell C.S., Kellog E.A., Stevens P., 2002. Botanique systématique, une perspective phylogénétique. De Boeck Université, Paris – Bruxelles, 467 pp.
- Jungbluth N., Chudacoff M., Dauriat A., Dinkel F., Doka G., Faist Emmenegger M., Gnansounou E., Kljun N., Schleiss K., Spielmann M., Stettler C., Sutter J.; 2007. Life cycle inventories of bioenergy. Ecoinvent report no. 17. Swiss Centre for the Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- Jungbluth N., Itten R., 2012. Environmental impacts of food consumption and its reduction potentials; in: Corson, M.S., van der Werf, H.M.G (Eds), *Book of Abstracts of the 8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2012)*, 1-4 October 2012, Saint-Malo, France. INRA, Rennes, France, p. 14.

-K-

- Keeling L.J., Hurnik J.F., 1996. Social facilitation acts more to the appetitive than the consummatory phase of feeding behavior in domestic fowl. *Anim. Behav.*, 52, 11-15.
- Kempster H. L., 1916. Food selection by laying hens. *Journal of the American Association of Instructors and Investigators in Poultry Husbandry.*, 3, 26-28.
- Kotrschal K., Hemetsberger J., Dittami J., 1993. Food exploitation by a winter flock of graylag geese: behavioral dynamics, competition and social status. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 33, 289-295.
- Kozak J., Bodi L., Janan I., Karasi M., 1997. Improvements in the reproductive characteristics of hungarian upgraded and grey lands geese in Hungary. *World's Poult. Sci. J.*, 53, 197-201.

-L-

- Lamprecht J., 1986. Structure and causation of the dominance hierarchy in a flock of bar-headed geese *Anser indicus*. *Behaviour.*, 96, 28-48.
- Lamprecht J., 1987. Female reproductive strategies in bar-headed geese (*Anser indicus*)-why are geese monogamous. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 21, 297-305.
- Landais E., 1998. agriculture durable:les fondements d'un nouveau contrat social? *Le Courrier de l'environnement*, 33.
- Larbier M., Leclercq B., 1992. Nutrition et alimentation des volailles. INRA éditions, Paris, 355pp
- Lascoumes P., 2005. Le développement durable: vecteur d'innovations politiques? *Le développement durable. Les termes du débat*. Armand Colin : 95-107
- Lavigne F., Dubois J.P., Leprettre S., 2000. Guide pratique du gavage des oies : normes pratiquées à la Ferme de l'oie. 4^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Arcachon, France. 117-120.
- Laviron F., Chagneau A.M., Lecuelle S., Lescoat P., Leterrier C., Bouvarel I., 2010. Pellet hardness effects short-term intake during diet change-over in turkeys. 24-26 August, 13th Eur. Poult. Congr., Tours, France, Poster Session 1.
- Lebas F., Lamboley B., 1999. Liquid phase sifting determination of the size of particles contained in pelleted rabbits feeds. *World Rabbit Science.*, 7, 229-235.
- Leclercq B., Blum J.C., Sauveur B., Stevens P., 1987. Nutrition of geese. In *Feeding of non-reminans livestock*, p. 110-112, Butterworths, Londres.

- Lecuelle S., Bouvarel I., Chagneau A.M., Lescoat P., Laviron F., Leterrier C., 2010. Feeding behaviour in turkeys with a changeover from crumbs to pellets. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 125, 132-142.
- Lecuelle S., Bouvarel I., Chagneau A.M., Laviron F., Lescoat P., Leterrier, C., 2011. Early visual experience of food does not appear to reduce subsequent feed neophobia in turkey. *Poult. Sci.*, 9, 1-9.
- Leeson S., Caston L.J., 1993. Production and carcass yield of broilers using free-choice cereal feeding. *J. Appl. Poult. Res.*, 2, 253-258.
- Leeson S., Caston L., Summers J.D., 1996. Broiler response to diet energy. *Poult. Sci.*, 75, 529-535.
- Leeson S., Summers J.D., 1997. Feeding programs for waterfowl, in: *Commercial Poultry Nutrition*. Second edition, pp. 332-340 (Ontario, University Books).
- Leinonen, I., Williams A. G., Wiseman J., Guy J., Kyriazakis I., 2012a. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Broiler production systems. *Poult. Sci.*, 91, 8-25.
- Leinonen, I., Williams A. G., Wiseman J., Guy J., Kyriazakis I., 2012b. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Egg production systems. *Poult. Sci.*, 91, 26-40.
- Leprettre S., 1993. Influence de la saison et du mode de rationnement en élevage, sur les performances de croissance et de gavage des oies. Mémoire d'ingénieur INPT-ENSAT 78pp.
- Leprettre S., Babilé R., Auvergne A., Dubois J.P., Manse H., Verdier M., 1997. Food restriction in Landese geese breeding: influences on growth and carcass composition during the growing period and after force-feeding. 11th European Waterfowls Symposium, World Poultry Science Association, Nantes, France, 569-574.
- Leprettre, S., A. Auvergne, H. Manse, R. Babilé, J. P. Dubois, and M. Candau. 1998. Effect of the starvation period before slaughter on biochemical composition and sterilization yields of goose fatty livers. *Sci. Aliments.*, 18, 415-422.
- Leprettre S., Dubois J.P., Lavigne F., Babilé R., 2000a. Système d'élevage des oies et performances de croissance. 4^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Arcachon, France. 4pp.
- Leprettre S., Dubois J.P., Lavigne F., Babilé R., 2000b. Densité en élevage et performances de croissance chez l'oie destinée au gavage. 4^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Arcachon, France. 4pp.

- Leprettre S., Dubois J.P., Lavigne F., Combebiac R., Babilé R., 2002. Nouvelle méthode d'appréciation de la capacité d'ingestion en gavage. 5^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras. Pau, France. 118-121.
- Life Cycle Assessment (LCA) Food database., 2007. Retrieved May 18, 2010, from <http://www.lcafood.dk/>.
- Lopez-Ridaura S., Werf H.V.D., Paillat J.M., Le Bris B., 2009. Environmental evaluation of transfer and treatment of excess pig slurry by life cycle assessment. *J. Environ. Manage.*, 90 (2), 1296-1304.
- Lorenz K., 1935. Der Kumpan in der Umwelt des Vogels. *Journal für Ornithologie.*, 83, 137-213.
- Lorenz K., Kalas S., Kalas K., 1978. *Das Jahr der Graugans*. Piper Verlag, München.
- Lu J., Kong X. L., Wang Z. Y., Yang H. M., Zhang K. N., Zou J. M., 2011. Influence of whole corn feeding on the performance, digestive tract development, and nutrient retention of geese. *Poult. Sci.*, 90, 587-594.

-M-

- Mabayo R.T., Okumura J.I., Hirao A., Sugita S., Sugahara K., Furuse M., 1996. The role of olfaction in oil preference in the chicken. *Physiol. Behav.*, 59, 1185-1188.
- Makkar H.P.S., 1989. Protein precipitation methods for quantitation of tanins: a review. *J. Agric. Food Chem.*, 37, 1197-1202.
- Mancebo F., 2006. *Le développement durable*. Armand Colin, Paris, 29 p.
- Marcilloux J.C., Auffray P., 1981. Détermination du profil alimentaire de l'oie de race landaise. *Reprod. Nutr. Dévelop.*, 737-748.
- Marcilloux J.C., Auffray P., 1982. Importance du noyau ventro-médian de l'hypothalamus dans la régulation du comportement alimentaire de l'oie de race landaise. *Reprod. Nutr. Dévelop.*, 123-134.
- Martaresche M., Le Fur C., Magnusson M., Faure J.M., Picard M., 2000. Time structure of behavioral patterns related to feed pecking in chicks. *Physiol. Behav.*, 70, 443-451.
- Martin P., Bateson P., 1986. *Measuring Behaviour*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 48-69.
- Maslow A., 1943. A Theory of Human Motivation. *Psychological Review*, 50, 370-96. Reprinted in C. Stacey & M. DeMartino (Eds.)

- Matalanis A.M., Campanella O.H., Hamaker B.R., 2009. Storage retrogradation behavior of sorghum, maize and rice starch pastes related to amylopectin fine structure. *J. Cereal Sci.*, 50, 74-81.
- McClymont G.L., Duncan D.C., 1952. Studies on nutrition of poultry. III. Toxicity of grain sorghum for chicks. *Aust. Vet. J.*, 28, 229-233.
- Meltzer A., 1987. Acclimatization to ambient temperature and its nutritional consequences. *World's Poultry Sci. J.*, 43, 33-44.
- Metayer J.P., Grosjean F., Castaing J., 1993. Study on variability in French cereals. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 43, 87-108.
- Meynard J.M., Cerf M., Guichard L., Jeuffroy M.H., Makowski D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie.*, 22, 817-829.
- Mirghelenj S.A., Golian A., 2009. Effects of feed form on development of digestive tract, performance and carcass traits of broiler chickens. *J. Anim. Vet. Adv.*, 8, 1911-1916.
- Mitaru B.N., Reichert R.D., Blair R., 1985. Protein and amino acid digestibilities of reconstituted and boiled sorghum grains varying in tannin contents. *Poult. Sci.*, 64, 101-106.
- Molee, W., Bouiller-Oudot M., Auvergne A., Babilé R., 2005. Changes in lipid composition of hepatocyte plasma membrane induced by overfeeding in duck. *Comp. Biochem. Physiol. B.*, 141, 437-444.
- Molette C., Berzaghi P., Dalle Zotte A., Remignon H., Babilé R., 2001. The use of near-infrared reflectance spectroscopy in the prediction of the chemical composition of goose fatty liver. *Poult. Sci.*, 80, 1625-1629.
- Mollenhorst H., Berentsen P.B.M., de Boer, I.J.M., 2006. On-farm quantification of sustainability indicators: an application to egg production systems. *Br. Poult. Sci.*, 47, 405-417.
- Moore S.J., 1999. Food breakdown in an avian herbivore: who needs teeth? *Aust. J. Zool.*, 47, 625-632.
- Moran E.T., 1982. Food seeking. In: *Comparative nutrition of fowl and swine, the gastrointestinal systems*. Amazon Co.UK (Ed), M.E.T. University of Guelph, 5-16.
- Mosnier E., van der Werf H.M.G., Boissy J., Dourmad J.Y., 2011. Evaluation of the environmental implications of the incorporation of feed-use amino acids in the manufacturing of pig and broiler feeds using Life Cycle Assessment. *Animal.*, 5:12, 1972-1983.
- Morrison W. R., Smith L. M., 1964. Preparation of fatty acid methyl esters and dimethylacetals from lipids with boron fluoride-methanol. *J. Lipid Res.*, 5, 600-608.

Mousel M., 1995. Le développement durable. Cahiers Devenirs / Fondation Ailes, n°21.

-N-

National Research Council. 1994. Nutrient requirement of poultry, 9th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.

Nemecek T., Kägi T., 2007. Life cycle inventories of Swiss and European agricultural production systems. Final report Ecoinvent report v2.0, no. 15, Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich and Dübendorf, Switzerland.

Nguyen T.T.H., Bouvarel I., Ponchant P., van der Werf H.M.G., 2011. Using environmental constraints to formulate low-impact poultry feeds. *J. Clean. Prod.*, 1-10.

Nielsen B.L., 2004. Behavioural aspects of feeding constraints : do broilers follow their gut feeling ? *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 86, 251-260.

Nir I., Perek M., Katz Z., 1972. The influence of soybean meal supplemented to maize diet of forced-fed geese upon their liver, organ and blood plasma components. *Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys.*, 12, 77-89.

Nir I., Shefet G., Aaroni Y., 1994a. Effect of particle size on performance. 1. Corn. *Poult. Sci.*, 73, 45-49.

Nir I., Hillel R., Shefet G., Nitsan Z., 1994b. Effect of particle size on performance. 2. Grain texture interactions. *Poult. Sci.*, 73, 781-791.

Nir I., Twina Y., Grossman E., Nitsan Z., 1994c. Quantitative effects of pelleting on performance, gastrointestinal tract and behavior of meat-type chickens. *Brit. Poult. Sci.*, 35, 589-602.

Nitsan Z., Dvorin A., Nir I., 1981. Composition and amino acid content of carcass, skin and feathers of the growing gosling. 1981. *Br. Poult. Sci.*, 22, 49-57.

Noirot V., Bouvarel I., Barrier-Guillot B., Castaing J., Zwick J.L., Picard M., 1998. Céréales entières pour les poulets de chair : le retour ? *INRA Prod. Anim.*, 11(5), 349-357.

Nyachoti C.M., Atkinson J.L., Leeson S., 1996. Response of broiler chicks fed a high-tanin sorghum diet. *J. Appl. Poult. Res.*, 5, 239-245.

Nyachoti C. M., Atkinson J. L., Leeson S., 1997. Sorghum tanins: A review. *World's Poult. Sci. J.*, 53, 5-21.

-O-

Osorio D., Vorobyev M., Jones C.D., 1999. Colour vision of domestic chicks. *J. Exp. Biol.*, 202, 2951-2959.

-P-

Payraudeau S., van der Werf H.M.G., 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods, *Agr. Ecosyst. Environ.*, 107, 1-19.

Pelletier N., Tyedmers P., 2007. Feeding farmed salmon: is organic better? *Aquaculture.*, 272, 399-416.

Picard M., Faure J.M., 1997. Comportement : Scan ou focal, faut-il choisir ? 2^{èmes} Journées de la Recherche Avicole., 2, 213-216.

Picard M., Melcion J.P., Bouchot C., Faure J.M., 1997. Picorage et préhensibilité des particules alimentaires chez les volailles. *INRA Prod. Anim.*, 10, 403-414.

Picard M., Le Fur C., Melcion J.P., Bouchot C., 2000. Caractéristiques granulométriques de l'aliment : le «point de vue» (et de toucher) des volailles. *INRA Prod. Anim.*, 13, 117-130.

Picard M., Melcion J.P., Bertrand D., Faure J.M., 2002. Visual and tactile cues perceived by chickens. In: *Poultry feedstuffs: supply, composition and nutritive value*. Mc Nab and Boorman (Eds), 279-298.

Pinnavaia G.G., Pizzanrari S., 1998. Evaluation of the degree of gelatinization by water holding capacity. *Starch.*, 50, 64-67.

Pierr H.P., 2003. Environmental policy, agri-environmental indicators and landscape indicators. *Agr. Ecosyst. Environ.* 98., 17-33.

Plavnik I., Macovsky B., Sklan D., 2002. Effect of feeding whole wheat on performance of broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 96, 229-236.

Portella F.J., Caston L.J., Leeson S., 1988. Apparent feed particle size preference by broilers. *Can. J. Anim. Sci.*, 68, 923-930.

Pottiez E., Conan S., Merlet F., Lescoat P., Bouvarel I., 2011. Une démarche de co-construction d'indicateurs de développement durable pour les filières avicoles biologiques. 9^{èmes} Journées de la Recherche Avicole. Tours, France, 29-30, March 2011.

Pousga S., Boly H., Ogle B., 2005. Choice feeding of poultry: a review. *Livestock Research for Rural Development.*, 17, 4.

Preston C.M., McCracken K.J., McAllister A., 2000. Effect of diet form and enzyme supplementation on growth, efficiency and energy utilisation of wheat-based diets for broilers. *Br. Poult. Sci.*, 41, 324-331.

-Q-

Quentin M., Bouvarel I., Picard M., 2004. Short and long term effects of feed form on fast- and slow-growing broilers. *J. Appl. Poult. Res.*, 13, 540-548.

-R-

Rameseyer A., 2009. Les mécanismes collectifs de décision dans les déplacements de groupe chez trois espèces domestiques : oies (*Anser domesticus*), ovins (*Ovis aries*) et bovins (*Bos taurus*). Thèse de doctorat. Université de Strasbourg, France.

Raveling D.G., 1969. Preflight and flight behavior of Canada geese. *The Auk.*, 86, 671-681.

Rey-Valette H., Clément O., Aubin J., Mathé S., Chia E., Legendre M., Caruso D., Mikolasek O., Blancheton J.P., Slembrouck J., Baruthio A., René F., Levang P., Morissens P., Lazard J., 2008. Guide de Co-construction - projet ANR EVAD. 144 pp.

Riley J., 2001 Indicator quality for assessment of impact of multidisciplinary systems, *Agr. Ecosyst. Environ.*, 87, 121-128.

Robertson J.A., Eastwood M.A., 1981. An investigation of the experimental conditions which could affect water-holding capacity of dietary fibre. *J. Sci. Food Agric.*, 32, 819-825.

Roche M., 1981. Comportement alimentaire et motricité digestive des oiseaux. *Reprod. Nutr. Dev.*, 21, 781.

Rodgers N. J., Choct M., Hetland H., Sundby F., Svihus B., 2012. Extent and method of grinding of sorghum prior to inclusion in complete pelleted broiler chicken diets affects broiler gut development and performance. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 171, 60-67.

Rogers P.J., 1995. The development of the brain and behaviour in the chicken, CAB Int., Wallingford, UK, 95-110.

Romanov M.N., 1999. Goose production efficiency as influenced by genotype, nutrition and production systems. *World's Poultr. Sci. J.*, 55, 281-294.

Rooney L., 2005. Ten myths about tanins in sorghums. *Int. Sorghum Millets Newsletter* 46, 3-5.

- Roper T.J., Marples N.M., 1997. Colour preferences of domestic chicks in relation to food and water presentation. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 54, 207-213.
- Rostagno H.S., Featherston W.R., Rogler J.C., 1973. Studies on the nutritional values of sorghum grains with varying tanin contents for chicks. 2. Amino acid digestibility studies. *Poult. Sci.*, 52, 772-778.
- Roussely M., 2000. Synthèse sur les performances techniques des souches d'oies pour la production de foie gras. 4^{èmes} Journées de la Recherche sur les Palmipèdes à Foie Gras, Arcachon, France. 9-12.
- Rouvier R., Poujardieu B., Rousselot-Pailley D., Larrue P., Esteve D., 1992. Paramètres génétiques des caractères de croissance, de gavage et de foie gras dans le croisement de deux souches d'oies (*Anser anser*) sélectionnées. 1992. *Genet. Sel. Evol.*, 24, 53-69.
- Roy P., Nei D., Orikasa T., Xu Q., Okadome H., Nakamura N., Shiina T., 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *J. Food Eng.*, 90, 1-10.
- Roy P., Orikasa T., Thammawong M., Nakamura N., Xu Q., Shiina T., 2012. Life cycle of meats: An opportunity to abate the green gas emission from meat industry in Japan. *J. Environ. Manage.*, 93, 218-224.
- Rugg W. C., 1925. Feeding Experiments, free choice feeds. Victoria Department of Agriculture Bulletin 54, 36-56.

-S-

- Salinas I., Pro A., Salinas Y., Sosa E., Becerril C.M., Cuca M., Cervantes M., Gallegos J., 2006. Compositional variation amongst sorghum hybrids: Effect of kafirin concentration on colour and energy. *J. Cereal Sci.*, 44, 342-346.
- Sastry L.V.S., Paulis J.W., Bietz J.A., Wall J.S., 1986. Genetic variation of storage proteins in sorghum grain: Studies by isoelectric focusing and highperformance liquid chromatography. *Cereal Chem.*, 63, 420-427.
- Sauvant D., Perez J. M., Tran G., 2004. Tables of composition and nutritive value of feed materials: Pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish. INRA Editions, ed. Wageningen Academic Publishers, the Netherlands.
- Sauveur B., Rousselot-Pailley D., Larrue P., 1988. Energy feeding of geese breeders. *INRA Prod. Anim.*, 1, 209-214.
- Savory C.J., 1999. Temporal control of feeding behaviour and its association with gastrointestinal function. *J. Exp. Zool.*, 283, 339-347.

- Selle P. H., Cadogan D. J., Li X., Bryden W. L., 2010. Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 156, 57-74.
- Skiba F., Barrier-Guillot B., Metayer J.P., Champion M., 2005. Effet du type de maïs et du type d'amidon sur la valeur alimentaire du maïs pour le poulet de chair. 6^{èmes} Journées de la Recherche Avicole. St Malo, France. 4pp.
- Spencer C.M., Cai Y., Martin R., Gaffney S.H., Goulding P.N., Magnolato D., Lilley T.H., Haslam E., 1988. Polyphenol complexation—some thoughts and observations. *Phytochemistry.*, 27, 2397-2409.
- SOLAGRO., 2002. Quels diagnostics pour quelles actions agro-environnementales ? Coll. SOLAGRO : les actes. SOLAGRO (Ed), 10-11 octobre, Toulouse, France, 270 pp.
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., De Haan C., 2006. Livestock's long shadow –environmental issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italie, 408 pp.
- Stock R.A., 1999. Nutritional benefits of specialty grain hybrids in beef feedlot diets. *J. Anim. Sci.*, 77, Suppl. 2, 208-212.
- Sturkie P. D., 1986. *Avian Physiology*. Fourth edition. Springer-Verlag, New York, NY.
- Svihus B., Herstad O., Newman C.W., Newman R.K., 1997. Comparison of performance and intestinal characteristics of broiler chickens fed on diets containing whole, rolled or ground barley. *Br. Poult. Sci.*, 38, 524-529.
- Svihus B., Hetland H., 2001. Ileal starch digestibility in growing broiler chickens fed on a wheat-based diet is improved by mash feeding, dilution with cellulose or whole wheat inclusion. *Br. Poult. Sci.*, 42, 633-637.
- Svihus B., Kløvstada K.H., Perez V., Zimonjaa O., Sahlströmb S., Schüllerc R.B., Jeksrud W.K., Prestløkkene E., 2004a. Physical and nutritional effects of pelleting of broiler chicken diets made from wheat ground to different coarsenesses by the use of roller mill and hammer mill. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 117, 281-293.
- Svihus B., Juvik E., Hetland H., Krogdahl A., 2004b. Causes for improvement in nutritive value of broiler chicken diets with whole wheat instead of ground wheat. *Br. Poult. Sci.*, 45, 55-60.

-T-

- Taylor J.R.N., Schüssler L., Van Der Walt W.H., 1984. Fractionation of proteins from low-tanin sorghum grain. *J. Agric. Food Chem.*, 32, 149-154.

- Taylor J., Bean S.R., Ioerger B.P., Taylor J.R.N., 2007. Preferential binding of sorghum tanins with α -kafirin and the influence of binding on kafirin digestion and biodegradation. *J. Cereal Sci.*, 46, 22-31.
- Taylor R.D., Jones G.P.D., 2004. The incorporation of whole grain into pelleted broiler chicken diets. II: Gastrointestinal and digesta characteristics. *Br. Poult. Sci.*, 45, 237-246.
- Tester R.F., Karkalas J., Qi X. 2004. Starch structure and digestibility Enzyme-Substrate relationship. *World's Poult. Sci. J.*, 60, 186-195.

-U-

- Umar Faruk M., Bouvarel I., Meme M., Rideau N., Roffidal L., Tukur H.M., Bastianelli D., Nys Y., Lescoat P., 2010. Sequential feeding using whole wheat and a separate protein–mineral concentrate improved feed efficiency in laying hens. *Poult. Sci.*, 89, 785-796.

-V-

- van der Werf H.M.G, Petit J., 2002. Évaluation de l'impact environnemental de l'agriculture au niveau de la ferme : comparaison et analyse de 12 méthodes basées sur des indicateurs, *Courrier de l'Environnement.*, 46, 121-133.
- van der Werf, H.M.G., Petit, J., Sanders, J., 2005. The environmental impacts of the production of concentrated feed: the case of pig feed in Bretagne. *Agr. Syst.*, 83, 153-177.
- van der Werf HMG, Tzivilakis J, Lewis K, Basset-Mens C. 2007 Environmental impacts of farm scenarios according to five assessment methods. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 118, 327-338.
- van der Werf H.M.G, Kanyarushoki C, Corson M.S., 2011. L'Analyse de Cycle de Vie : un nouveau regard sur les systèmes de production agricole. *Innovations Agronomiques.*, 12, 121-133.
- Verdier J.L., 2007. Etude de marché : Un potentiel de développement bien réel. Conférence de presse Sorgho du 1er février 2007 – Hôtel Elysées Régencia Paris 16ème. ARVALIS-Institut du végétal Paris 2007, 4 pp.
- Vilain L., 2003. La méthode IDEA. Indicateurs de durabilité des exploitations agricoles. Guide d'utilisation. Deuxième édition, Educagri éditions, 151 pp.
- Virupaksha T.K., Sastry L.V.S., 1968. Studies on the protein content and amino acid composition of some varieties of grain sorghum. *J. Agric. Food Chem.*, 16, 199-203.

-W-

- Warrick B.E., 2012. <http://soilcropandmore.info/crops/Grasses/Johnsongrass/Johnsongrass-Sorghum-halpense.htm>.
- Watterson J. J., Butler L. G., 1983. Occurrence of an unusual leucoanthocyanidin and absence of proanthocyanidins in sorghum leaves. *J. Agric. Food Chem.*, 31, 41-45.
- Watterson, J.J., Shull, J.M., Kirleis, A.W., 1993. Quantitation of α -, β -, and γ -kafirins in vitreous and opaque endosperm of *Sorghum bicolor*. *Cereal Chem.*, 70, 452-457.
- Weeks C.A., Danbury T.D., Davies H.C., Hunt P., Kestin S.C., 2000. The behaviour of broiler chickens and its modification by lameness. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 67, 111-125.
- Williams A.G., Audsley E., Sandars D.L., 2006. Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities. Main Report Defra Research Project ISO205, Bedford: Cranfield University and Defra.
- Winer B. J., Broan D. R., Michels K. M., 1991. Statistical principles in experimental design. Third edition. McGraw-Hill, Sydney.
- Würdinger I., 1979 Olfaction and feeding behaviour in juvenile geese (*Anser a. anser* and *Anser domesticus*) *Zeitschrift für Tierpsychologie.*, 2, 132-135.
- Woog F., Schwarz K., Hulme M., 2012 All you can eat: do peck rates of Greylag Geese (*Anser anser*) vary with age and social status? *J. Ornithol.* DOI: 10.1007/s10336-012-0831-5
- World's Poultry Science Association (WPSA) n.d. Working Group V: Method of dissection of broiler carcasses and description of parts. Terms used for parts of poultry in different languages (ed. J. Fris Jensen). World's Poultry Science Association, European Federation, Denmark.
- Wu Y.B., Ravindran V., Thomas D.G., Birtles M.J., Hendriks W.H., 2004. Influence of method of whole wheat inclusion and xylanase supplementation on the performance, apparent metabolisable energy, digestive tract measurements and gut morphology of broilers. *Br. Poult. Sci.*, 45, 385-394.

-Y-

- Yang H.M., Wang Z.Y., Wang J., Shi S.R., Zhu X.H., 2009. Effects of caecectomy on digestibility of crude protein, calcium, phosphorus, neutral detergent fibre and acid detergent fibre in geese. *Arch. Geflügelk.*, 73,189-192.

Yo T., Vilariño M., Faure J.M., Picard M., 1997. Feed pecking in young chickens: new techniques of evaluation. *Physiol. Behav.*, 61, 803-810.

-Z-

Zened A., Troegeler-Meynadier A., Nicot M.C., Combes S., Cauquil L., Farizon Y., Enjalbert F., 2011. Starch and oil in the donor cow diet and starch in substrate differently affect the in vitro ruminal biohydrogenation of linoleic and linolenic acids. *J. Dairy Sci.*, 94, 5634-5645.

Zhou Z., Wan H.F., Li Y., Chen W., Qi Z.L., Peng P., Peng J., 2010. The influence of the amylopectin/amylose ratio in samples of corn on the true metabolizable energy value for ducks. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 157, 99–103.

Résumé / Abstract

Résumé

Ce travail de thèse présente une synthèse de 5 expérimentations qui ont été réalisées afin d'évaluer les possibilités techniques (essais 1 et 4), l'intérêt zootechnique (essais 2, 3 et 5) et les conséquences sur la durabilité d'une substitution du maïs par du sorgho dans la ration alimentaire des oies en phase de croissance-finition et pendant le gavage. Le mode d'alimentation (entièrement granulée ou sous la forme d'un mélange de graines de céréales entières et de granulés riches en protéines) a également été étudié. Nous avons mesuré les performances des animaux (gain de poids, IC, consommation, développement corporel comportement alimentaire) ainsi que la qualité des produits (magret et foie gras) obtenus après gavage. Nous avons évalué *in fine* les conséquences de ces innovations sur la durabilité du système de production du foie gras à l'échelle de l'atelier de production (méthode S+Durable?) et sur le cycle de production d'un kilo de foie gras (méthode des ACV).

Nos résultats montrent que la nature de la céréale (maïs vs. sorgho) utilisée pendant la phase de croissance-finition (6 à 14 semaines) n'a aucune influence sur les performances des animaux. Cependant, nous avons observé que la consommation d'aliments (+ 5% ; $P < 0,05$), le poids vif (+ 4% ; $P < 0,05$) et le développement des intestins (+ 9% ; $P < 0,05$) en phase de croissance-finition étaient plus élevés lorsque le régime alimentaire contenait des graines entières. L'incorporation de sorgho pendant la phase de gavage, entraîne une augmentation du poids des foies gras (+ 11% ; $P < 0,05$) et une diminution de l'intensité de la couleur jaune du foie gras (- 25% ; $P < 0,05$). Une substitution totale du maïs par du sorgho pendant les phases d'élevage et de gavage réduit les impacts environnementaux de la fabrication d'1 kg de foie gras et améliore les performances de durabilité économique et sociale de l'atelier de production.

L'ensemble des résultats suggère que l'utilisation de sorgho dans l'alimentation des oies est techniquement possible pendant les phases de croissance-finition et de gavage, prometteuse zootechniquement et intéressante pour améliorer la durabilité du système de production.

Mots-clés : sorgho, maïs, oie, durabilité, foie gras

Abstract

This thesis presents a summary of five experiments which were conducted to evaluate the technical feasibility (studies 1 and 4), zootechnical interest (studies 2, 3 and 5) and consequences on sustainability performance of the substitution of corn by sorghum in the diet of geese in growing-finishing period and during overfeeding. The form of diet presentation (totally pelleted or in form of a mixture of cereal whole seeds and protein rich pellets) was also studied. We measured animal performance (weight gain, FCR, feed intake, body characteristics, feeding behavior) and product quality (magret and foie gras) obtained after overfeeding period. We evaluated ultimately the consequences of these innovations on the sustainability of the foie gras production system at the level of rearing unit (S + Durable? method) and over the production cycle of 1 kg of foie gras (LCA method).

Our results showed that the type of cereal (corn vs. sorghum) used during the growing-finishing period (6-14 weeks) has no effect on animal performance. However, we observed that feed intake (+ 5%; $P < 0.05$), body weight (+ 4%; $P < 0.05$) and the gut development (+9%; $P < 0.05$) during the growing-finishing period were higher when the diet contained whole grains. The use of sorghum during the overfeeding resulted in an increased weight of fatty liver (+11%; $P < 0.05$) and a decreased in the intensity of its yellow color (-25%; $P < 0.05$). A total substitution of corn by sorghum during both growing and overfeeding periods reduced the environmental impacts of 1 kg of foie gras production and increased the economic and social performance of the rearing unit.

These results suggest that the use of sorghum in the diet of geese is feasible both during the growing-finishing and overfeeding period, promising from a zootechnical point of view and interesting to improve the sustainability of production system

Keywords: sorghum, corn, goose, sustainable, foie gras