



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**Ecole Nationale Supérieure Agronomique**

**ENSA**

**THÈSE**

Présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat en Sciences Agronomiques

**THÈME**

**VALEUR NUTRITIONNELLE DE QUELQUES CEREALES  
LOCALES MESUREE CHEZ LE COQ  
SOU MIS AU STRESS THERMIQUE**

**Par**

**NADJIA ALLOUCHE**

**Soutenue devant le jury :**

**Président :** Mr GHOZLANE Faissal.

Professeur E.N.S.A d'Alger.

**Promoteur :** Mme BOUDOUMA Dalila

Professeure E.N.S.A d'Alger.

**Examineurs :**

Mme AIN BAZIZ Hacina

Professeure E.N.S.V d'Alger.

Mr KADI Si Ammar

Professeur UMM de Tizi-Ouzou.

**Année universitaire : 2020/2021**

# *Dédicaces*

*À*

*La mémoire de mon regretté papa, pour qui je prie Dieu le  
tout Puissant de L'accueillir dans son vaste paradis*

*À ma très chère maman*

*À mon très cher fils Mohammed-boualem*

*À mon cher et tendre mari, Sofouane*

*À toute ma famille et mes proches*

*À tous mes amis (es) en particulier Safia et Djamila*

*À tous mes enseignants durant mon cursus*

# Remerciements

*Pour moi, présenter mes sincères remerciements est autant un plaisir qu'un devoir : Je tiens à exprimer ma haute gratitude au bon Dieu de m'avoir ouvert les portes du savoir et de m'avoir donné courage et volonté pour finaliser ce travail.*

*Je tiens également à adresser mes remerciements les plus sincères à*

- + Ma promotrice **Mme BOUDOUMA, D.** pour ses précieux conseils, pour son sérieux et sa patience.*
- + Mr **GHOZLANE, F.** pour nous avoir fait l'honneur de présider notre jury.*
- + Mme **AINBAZIZ, H** et Mr **KADI, S.A.** pour avoir accepté d'examiner notre travail.*
- + Mr **BOUDJENAH** le directeur de l'**ITELV** ainsi qu'à Melle **ZITOUNI, G.** pour nous avoir mis à notre disposition le matériel animal.*

*Je remercie également*

- + Le personnel technique du laboratoire d'analyses fourragères de l'**ENSA** en particulier **Mme KAZI AOUEL, S.***
- + Le personnel administratif et technique du laboratoire de **CIRAD** de Montpellier en particulier Mr **BONNAL, L** et Mr **BASTIANILI, D.***
- + Mr **BENMESSAOUD N;** Mr **KACI, A.** de l'**ENSA** et Mr **LAWRENCE,** pour leurs conseils et leur aide.*
- + Mes amis (es) **Djamila, Safia et Farida** auxquelles je souhaite beaucoup de réussites.*
- + Un grand merci pour ma très chère « **maman** » qui m'a toujours soutenu et encouragé.*

*ALLOUCHE N*

## RESUME

---

L'étude des grains de céréales est un critère important dans l'évaluation des possibilités du développement de l'aviculture via le volet « alimentation avicole », qui est une filière consommatrice de céréales, particulièrement le maïs. Paradoxalement, elle contribue à l'instabilité de la filière avicole, notamment, dans le contexte Algérien.

Notre étude a visé 2 objectifs : la caractérisation du profil chimique et nutritionnel de quelques cultures céréalières traditionnelles en Algérie: le millet perlé, le triticales et l'orge. Puis, l'effet de la chaleur sur la valeur nutritionnelle des 3 céréales. Ceci, a été étudié chez le coq de population locale (*Gallus gallus*) évoluant en conditions de température modérée et élevée. Dans les deux conditions thermiques, la mesure de la valeur nutritionnelle a été effectuée « in vivo » par la méthode du bilan digestif, par voie directe. L'ensemble des résultats des mesures effectuées sur les 3 céréales locales est comparé à ceux obtenus pour le maïs grain.

- Sur le plan **chimique**, les grains de céréales testées se distinguent entre-elles par leurs teneurs en matière grasse, leur teneur en protéines et par la cellulose brute. Elles diffèrent peu de par leur concentration en amidon, tandis que leurs teneurs en énergie brute se rapprochent globalement.

Comparé au maïs, le millet se distingue par un profil chimique intéressant se caractérisant par des teneurs relativement élevées en protéines (15,13 vs 8,33 %MS), en matière grasse (4,73 vs 5,23 %MS) et en énergie brute (4551vs 4394 kcal/kg MS). Les grains de triticales se révèlent également intéressants, comparés au maïs, du point de vu profil chimique : de par leur teneur protéique (14,50 vs 8,33 %MS) et une concentration en amidon non négligeable (62,44 vs 70,08 %MS), les dotant ainsi d'un potentiel en EB appréciable, comparable à celui du maïs (4394 vs 4350kcal/kg MS).

- Sur le plan **nutritionnel**, la meilleure utilisation nutritionnelle est en faveur du millet grâce à son potentiel chimique. Le millet, devant le maïs réputé exempt de FAN, se caractérise par un potentiel comparable en termes de digestibilité de l'amidon (d'environ 99%) et de celle des protéines (86,20 vs 87,46 %) ainsi qu'en termes d'EM (3744vs 3789kcal/kg MS). Avec des valeurs des coefficients de digestibilité de l'amidon, des protéines, des MG et de l'EM, respectives de 99,73 ; 83,91 ; 27,76%MS et 3316 kcal/kg MS, le triticales constitue le 2<sup>ème</sup> potentiel concurrent au maïs. Quant à l'orge, ses taux élevés en cellulose (7,65%MS) et les éventuelles FAN qu'il renferme, lui accusent une dévalorisation en termes de potentiel nutritionnel exploitable.

Globalement, les critères nutritionnels mesurés sur ces grains de céréales chez des coqs de population locale ne sont pas modifiés lorsque ceux-ci sont soumis à une température ambiante élevée (33°C), durant une période de 10 jours. En revanche, l'effet de la chaleur est expressif dans quelques mesures (dans le cas de la digestibilité de la MG du maïs et du millet ou la digestibilité réelle des protéines de l'orge) quand il s'agit d'une comparaison intra-espèce. Ce qui nous permet une meilleure prise en compte de la variabilité de la valeur nutritionnelle d'une même céréale dans des conditions environnementales différentes. Le type de coq fermier utilisé lors de nos essais se révèle être intéressant à étudier puisqu'il recèle des capacités de résistance à la chaleur.

Mots clés : bilan digestif, chaleur, coq, composition chimique, maïs, millet, valeur nutritionnelle, orge, triticales.

## ABSTRACT

---

The study of cereal grains is an important criterion in the evaluation of the possibilities of the development of the "poultry feed" component, which is a sector that consumes cereals, particularly maize. Paradoxically, it contributes to the instability of the poultry industry, particularly in the Algerian context.

Our study had two objectives: the characterization of the chemical and nutritional profile of some traditional cereal crops in Algeria: millet, triticale and barley. Then, the effect of heat on the nutritional value of the three cereals. This has been studied in the rooster of local population (*Gallus gallus*) evolving in conditions of moderate and high temperature. Under the two thermal conditions, the measurement of the nutritional value was carried out "in vivo" by the digestive balance method, by direct route.

All the results of the measurements carried out on the 3 local cereals are compared with those obtained for grain corn.

**Chemically**, the cereal grains tested differ from one another by their fat, then by their protein content and crude fiber. They differ little in their starch concentration, while their gross energy contents are generally similar. Compared to corn, millet is distinguished by an interesting chemical profile characterized by relatively high levels of protein (15.13 vs 8.33 % DM), fat (4.73 vs 5.23 % DM) and gross energy (4551 vs 4394 kcal/kgMS). The grains of triticale are also interesting, compared to corn, from the point of view of chemical profile, by their protein content (14.50 vs 8.33 % DM) and a significant starch concentration (62.44 vs 70.08 % DM), thus endowing them with an appreciable GE potential, similar to that of corn (4394 vs 4350kcal / kg DM).

- From a **nutritional** standpoint, the best nutritional use is in favor of millet thanks to its chemical potential. Millet, ahead of corn known to be FAN-free, is characterized by a comparable potential in terms of starch digestibility (around 99%) and that of proteins (86.20 vs 87.46%) as well as 'in terms of ME (3744 vs 3789kcal / kg DM). With values of the digestibility coefficient of starch, protein, fat and ME, respectively 99.73; 83.91; 27.76% DM and 3316 kcal / kg DM, triticale constitutes the second potential competitor to corn. As for barley, these high levels of cellulosic fibers (7.65% DM) and the possible FAN it contains, accuse it of a devaluation in terms of exploitable nutritional potential.

Overall, the nutritional criteria measured on these cereal grains in roosters from the local population are not modified when they are subjected to a high ambient temperature (33 ° C) for a period of 10 days. On the other hand, the effect of heat is expressive in a few measurements (in the case of the digestibility of the fat of corn and millet or the real digestibility of the proteins of barley) when it is a question of an intra- species comparison. This allows us to better take into account the variability of the existing nutritional value of the same cereal under different environmental conditions. The type of farm rooster used in our trials is interesting to study since it has heat resistance capabilities.

Keywords: digestive balance, barley, chemical composition, heat, maize, millet, nutritional value, rooster, triticale.

## ملخص

تعتبر دراسة الحبوب معياراً مهماً في تقييم امكانيات تطوير شعبة تربية الدواجن من خلال قسم " علف الدواجن" المستهلك للحبوب وخاصة الذرة. ومن المفارقات أنه يساهم في عدم استقرار هذه الشعبة، خاصة في السياق الجزائري.

هدفت دراستنا إلى توصيف الخصائص الكيميائية والتغذوية لبعض محاصيل الحبوب التقليدية في الجزائر: الدخن ، تريتیکال والشعير. ثم تأثير الحرارة على القيمة الغذائية للحبوب الثلاثة. تمت دراستنا على ديك محلي (جالوس جالوس) في ظروف مناخية حرارية معتدلة وعالية.

في ظل الشرطين الحراريين، تم قياس القيمة الغذائية في الجسم الحي بطريقة التوازن الهضمي، بالطريقة المباشرة.

تمت مقارنة جميع نتائج القياسات التي أجريت على الحبوب المحلية الثلاثة مع تلك التي تم الحصول عليها من حبوب الذرة.

- كيميائياً، تختلف الحبوب المختبرة عن بعضها البعض من حيث محتواها من الدهون ، ثم محتواها من البروتين والألياف الخام تختلف قليلاً في تركيز النشا، بينما محتويات الطاقة الإجمالية متشابهة بشكل عام)

بالمقارنة مع الذرة، يتميز الدخن بمظهر كيميائي مثير للاهتمام يتميز بمستويات عالية نسبياً من البروتين (15.13 مقابل 8.33% ماج)، والدهون (4.73 مقابل 5.23% ماج) والطاقة الخام (4551 مقابل 4394 كيلو كالوري / كغ ماج). تعتبر حبيبات تريتیکال أيضاً مثيرة للاهتمام، مقارنة بالذرة، من ناحية المظهر الكيميائي، من خلال محتواها من البروتين (14.50 مقابل 8.33% ماج) وتركيز النشا الكبير (62.44 مقابل 70، 08% ماج)، وبالتالي منحهم قدرات الطاقة الخام ملحوظة، يمكن مقارنتها بإمكانيات الذرة (4394 مقابل 4350 كيلو كالوري / كغ ماج)

- من الناحية التغذوية ، فإن أفضل استخدام غذائي هو الدخن بفضل قدرات محتواه الكيميائي. يتميز الدخن ، الذي يتقدم على الذرة المشهورة بأنه خالي من العوامل المضادة للتغذية ، بإمكانيات مماثلة من حيث معامل قابلية هضم النشا (حوالي 99%) والبروتينات (86.20 مقابل 87.46%) وكذلك من حيث الطاقة القابلة للاستبدال ( 3744مقابل 3789 كيلو كالوري / كغ ماج) . مع قيم معاملات هضم النشا والبروتينات ، المادة الدهنية و الطاقة القابلة للاستبدال ، على التوالي (99.73 ؛ 83.91 ؛ 27.76% ماج و 3316 كيلو كالوري / كغ ماج، تشكل تريتیکال ثاني منافس محتمل للذرة. أما بالنسبة للشعير ، فإن محتواها العالي من الألياف السليلوزية ( 7.65% ماج) و العوامل المضادة للتغذية التي يحتمل أن يحتوي عليها ، تجعل قيمته منخفضة من حيث الإمكانيات الغذائية القابلة للاستغلال.

عموماً، لم يحدث تغيير في المعايير الغذائية التي تم قياسها على هذه الحبوب عند الديوك المحليين عند تعرضها لدرجة حرارة محيطية عالية (33 درجة مئوية) لمدة 10 أيام. من ناحية أخرى ، يكون تأثير الحرارة معبراً في بعض القياسات ( في حالة قابلية هضم دهون الذرة والدخن أو قابلية الهضم الحقيقية لبروتينات الشعير ) عندما يتعلق الأمر بمقارنة داخلية لنفس صنف الحبوب. هذا ما يسمح لنا أن نأخذ في الاعتبار بشكل أفضل تغيرات القيمة الغذائية لنفس الحبوب في ظل ظروف بيئية مختلفة. تبين أهمية متابعة البحوث على نوع ديك المزرعة المستخدم في تجاربنا لتمتعه بقدرات المقاومة ضد الحرارة العالية.

الكلمات المفتاحية: التوازن الهضمي، الحرارة، الديك المحلي، التركيب الكيميائي، الذرة، الدخن، القيمة الغذائية، الشعير.

## LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES ET SYMBOLES CHIMIQUES

<b>AA:</b>	Acides aminés
<b>AFNOR :</b>	Association Française de Normalisation
<b>AU :</b>	Acide urique
<b>Ca<sup>+2</sup>:</b>	Calcium
<b>CB :</b>	Cellulose brute
<b>CCK-PZ :</b>	Cholécystokinine- Pancréozymine
<b>CE :</b>	Consommation eau
<b>CEE :</b>	Communauté Economique Européenne
<b>CIC :</b>	Conseil International des Céréales
<b>CIRAD :</b>	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
<b>CNIS :</b>	Conseil National de l'information Statistique
<b>CUD :</b>	Coefficient d'utilisation digestive
<b>CUDa :</b>	Coefficient d'utilisation digestive apparent
<b>CUDN :</b>	Coefficient d'utilisation digestive de l'azote
<b>CUDp :</b>	Coefficient d'utilisation digestive des protéines
<b>CUDr :</b>	Coefficient d'utilisation digestive réel
<b>CV :</b>	Coefficient de variation
<b>Cys:</b>	Cystine
<b>DIA :</b>	Digestibilité iléale apparente
<b>DIA :</b>	Digestibilité iléale réelle
<b>EB :</b>	Energie brute
<b>ED :</b>	Energie digestible
<b>EM :</b>	Energie métabolisable
<b>EMa :</b>	Energie métabolisable apparente
<b>EMan:</b>	Energie métabolisable apparente corrigée pour une rétention azotée nulle
<b>EMr :</b>	Energie métabolisable réelle
<b>EMrn :</b>	Energie métabolisable réelle corrigée pour une rétention azotée nulle
<b>EN :</b>	Energie nette

<b>ENA :</b>	Extractif non azoté
<b>ENE :</b>	Energie nette d'entretien
<b>ENP :</b>	Extractif net des produits
<b>ENSA :</b>	Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie
<b>EOA :</b>	Excrétas d'origine alimentaire
<b>EOE :</b>	Excrétas d'origine endogène
<b>éq :</b>	Equivalent
<b>FAN:</b>	Facteurs antinutritionnels
<b>FAO:</b>	Food and Agriculture organization
<b>Fe<sup>+2</sup>:</b>	Fer
<b>hab :</b>	Habitant
<b>Hcl :</b>	Acide chlorhydrique
<b>ITELV :</b>	Institut Technique des Elevages
<b>Kcal :</b>	Kilo-calorie
<b>MADRP :</b>	Ministère de l'Agriculture et de Développement Rural et de la Pêche
<b>MAT :</b>	Matière azotée totale
<b>MB :</b>	Métabolisme de base
<b>Mét :</b>	Méthionine
<b>MG :</b>	Matière grasse
<b>MGI</b>	Matière grasse ingérée
<b>Mg<sup>+2</sup>:</b>	Magnésium
<b>MM :</b>	Matière minérale
<b>MS :</b>	Matière sèche
<b>NaCl :</b>	Chlorure de sodium
<b>Ne :</b>	Azote endogène
<b>NFT :</b>	Azote fécal total
<b>NI :</b>	Azote ingéré
<b>NIA :</b>	Niveau d'ingestion alimentaire
<b>NTe :</b>	Azote total excrété
<b>NU :</b>	Azote urinaire

<b>OMS :</b>	Organisation Mondiale de la Santé
<b>ONAB :</b>	Office National des Aliments de Bétail
<b>ORAC :</b>	Office Régional de l'Aviculture du Centre
<b>ORAVIE :</b>	Office Régional de l'Aviculture de l'Est
<b>ORAVIO :</b>	Office Régional de l'Aviculture de l'Ouest
<b>PB :</b>	Protéines brutes
<b>PIB :</b>	Produit Intérieur Brut
<b>P<sup>0,75</sup> :</b>	Poids métabolique
<b>PNA :</b>	Polysaccharides non amylacés
<b>PV :</b>	Poids vif
<b>RN :</b>	Rétention azotée
<b>t :</b>	Tonne
<b>TEV :</b>	Température effectivement vécue
<b>TS:</b>	Tourteau de soja
<b>UP:</b>	Unité Phytasique
<b>USA:</b>	United States of America
<b>USD:</b>	United States Dollar
<b>VB:</b>	Valeur biologique
<b>Zn<sup>+2</sup>:</b>	Zinc (ion)

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Evolution du tonnage des principaux produits animaux en Algérie .....	6
Tableau 2 : Evolution des effectifs des espèces bovine, ovine et aviaire en Algérie.....	7
Tableau 3 : Apports protéiques assurés par les principales productions animales en Algérie .....	9
Tableau 4 : Evolution du taux d'autosuffisance (%) en viandes et en œufs de consommation en Algérie.....	10
Tableau 5 : Evolution indiciaire des productions animales en Algérie.....	11
Tableau 6 : Dynamique des Valeurs d'importations en filière avicole .....	13
Tableau 7 : Teneurs en quelques composants chimiques de grains de céréales et de protéagineux...	17
Tableau 8 : Composition des grains d'amidon en amylose et amylopectine.....	20
Tableau 9 : Teneurs en acides aminés essentiels des grains des principales céréales .....	23
Tableau 10 : Composition moyenne en minéraux essentiels des grains des principales céréales.....	24
Tableau 11 : Facteurs antinutritionnels de quelques grains de céréales .....	26
Tableau 12 : Composition chimique des grains de quelques céréales.....	32
Tableau13: Quelques résultats relatifs à l'utilisation des grains de millet en alimentation avicole.....	34
Tableau14 : Composition chimique (%MS) des grains de blé et de triticales.....	38
Tableau15: Quelques résultats relatifs à l'utilisation des grains de triticales en alimentation avicole.....	40
Tableau16 : Quelques résultats relatifs à l'utilisation des grains d'orge en alimentation avicole.....	43
Tableau17 : Valeurs moyennes des composants chimiques et de la valeur de l'énergie brute des grains de céréales étudiés.....	94
Tableau 18 : Composition chimique des grains de maïs rapportée par la bibliographie.....	95
Tableau 19 : Composition chimique des grains de millet rapportée par la bibliographie.....	97
Tableau 20 : Composition chimique des grains de triticales rapportée par la bibliographie.....	99
Tableau 21 : Composition chimique des grains d'orge rapportée par la bibliographie.....	102
Tableau 22 : Valeurs moyennes de la digestibilité de la MS des grains de céréales mesurées à 23°C .....	103
Tableau 23 : Niveau d'ingestion des grains de céréales testés.....	104

Tableau 24 : Valeurs moyennes de la digestibilité de l'amidon des céréales mesurée à 23C° .....	106
Tableau 25 : Quantités moyennes ingérées d'amidon des céréales à 23°C .....	108
Tableau 26 : Valeurs moyennes de la digestibilité de la MG des céréales mesurée à 23C° .....	109
Tableau 27 : Valeurs moyennes de la digestibilité des protéines des céréales mesurée à 23C° .....	111
Tableau 28 : Synthèse des résultats relatifs au CUD de la MAT chez la volaille .....	112
Tableau 29 : Utilisation azotée chez les coqs consommant les 4 types de céréales testées .....	116
Tableau 30 : Valeurs moyennes des EMa et EMr des grains de céréales étudiés .....	119
Tableau 31 : Synthèse des résultats relatifs à différentes formes de l'EM chez la volaille .....	120
Tableau 32 : Le rendement énergétique des grains de céréales testés .....	125
Tableau 33 : Effet de la chaleur sur la digestibilité de la MS des céréales testées chez le coq(%)....	126
Tableau 34 : Niveau d'ingestion alimentaire à 23 et à 33°C .....	126
Tableau 35 : Consommation d'eau à 23 et à 33°C .....	127
Tableau 36 : Effet de la chaleur sur la digestibilité apparente et réelle des protéines des céréales chez le coq (%).....	128
Tableau 37 : Effet de la chaleur sur la digestibilité de l'amidon des céréales chez le coq (%).....	130
Tableau 38 : Valeurs de la quantité moyenne ingérée d'amidon (g/j/a) des céréales testées à 23 et à 33°C .....	130
Tableau 39 : Effet de la chaleur sur la digestibilité de la MG des céréales chez le coq (%) .....	131
Tableau 40 : Quantités moyennes ingérées de MG (g/j/a) des céréales testées sous ambiances thermiques différentes .....	132
Tableau 41 : Effet de la chaleur sur l'EMa des céréales chez le coq .....	132
Tableau 42 : Effet de la chaleur sur l'EMr des céréales chez le coq.....	133
Tableau 43: Effet de la céréale et de la température élevée ambiante sur les différents paramètres.....	140
Tableau 44 : Prédiction de l'EM chez le coq (cas de céréales, température ambiante de 23°C.....	144

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de la partition de l'énergie dans l'organisme .....	15
Figure 2 : Appareil digestif de <i>Gallus gallus</i> .....	47
Figure 3 : Représentation schématique de la digestion chez le poulet.....	50
Figure 4 : Dispositif expérimental.....	78
Figure 5 : Céréales de grains étudiées.....	80
Figure 6 : Protocole expérimental de mesure de la digestibilité chez le poulet .....	83
Figure 7 : Distribution des valeurs du CUDa MS et MSI pour l'ensemble des céréales .....	104
Figure 8 : Distribution des valeurs CUDa MS et CBI pour l'ensemble des céréales.....	105
Figure 9 : Distribution des valeurs MGI et CUD MG des céréales .....	110
Figure 10 : Distribution des valeurs MGI et CUDa protéines.....	114
Figure 11 : Distribution des valeurs CUDMG et CUDa protéines.....	114
Figure 12 : Distribution des valeurs CBI et CUDa protéines.....	115
Figure 13 : Distribution des valeurs CBI et NF (g/a/Bilan).....	117
Figure 14 : Distribution des valeurs du CUD protéines et la MATI.....	117
Figure 15 : Distribution des valeurs de CBI et NFm.....	118
Figure 16 : Distribution des valeurs entre l'EMa et le niveau d'ingestion alimentaire.....	121
Figure 17 : Distribution des valeurs de l'EMa et le CUD des protéines.....	122
Figure 18 : Distribution des valeurs de l'EMa et le CUD de la MG.....	122
Figure 19 : Distribution des valeurs de l'EMa et CBI.....	123
Figure 20 : Distribution des valeurs du niveau d'ingestion alimentaire et la digestibilité de la MS.....	127

## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Vue d'ensemble des cages à métabolisme

Annexe 2 : Cage à métabolisme individuelle

Annexe 3 : Composition du prémix minéral et vitaminique

Annexe 4 : La méthode SPIR

Annexe 5 : Analyse de l'amidon par voie enzymatique

Annexe 6 : Méthode d'analyse de l'acide urique

Annexe 7 : Détermination de la valeur calorifique brute par combustion en bombe calorimétrique

Annexe 8 : Estimation de l'azote fécal par la méthode – TERPSTRA *et al.* (1976)

Annexe 9 : Article

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
 <b>CHAPITRE I : SITUATION DE LA PRODUCTION AVICOLE EN ALGERIE</b>	
I. Place de l'aviculture dans les productions animales.....	5
II. Dynamique de développement de l'aviculture.....	9
 <b>CHAPITRE II : L'APPORT ENERGETIQUE EN ALIMENTATION AVICOLE</b>	
I. Importance nutritionnelle de l'énergie en alimentation avicole.....	13
II. Modes d'expression de l'apport énergétique chez la volaille.....	13
III. Grains de céréales : principales source d'énergie en alimentation avicole.....	16
III.1. Caractéristiques des céréales.....	18
III.1.1. Glucides.....	19
III.1.2. Protéines.....	22
III.1.3. Lipides.....	23
III.1.4. Minéraux.....	24
III.1.5. Vitamines.....	25
III.1.6. Inhibiteurs nutritionnels.....	25
III.2. Particularité du maïs.....	28
III.3. Cultures de céréales ayant un potentiel de développement en Algérie et leur utilisation en alimentation avicole.....	29
 <b>CHAPITRE III : UTILISATION DIGESTIVE ET VALEUR NUTRITIONNELLE CHEZ <i>GALLUS- GALLUS</i></b>	
I. Site de la digestion.....	46
II. Physiologie de la digestion chez <i>Gallus-gallus</i> .....	49
III. Expression de la digestibilité.....	53
IV. Facteurs de variation de la digestibilité des nutriments.....	53
IV.1. Facteurs de variation de la digestibilité liée à l'animal.....	54
IV.1.1. Effet du sexe .....	54

IV.1.3. Effet de l'âge .....	54
IV.1.4. Effet lié à la microflore digestive de l'oiseau.....	55
IV.1.5. Effet des organes digestifs sur la digestibilité.....	57
IV.2. Facteurs de variation de la digestibilité des nutriments liée à l'aliment.....	57
IV.2.1. Effet de la nature des composants de l'aliment et de leur interaction avec d'autres nutriments sur leur digestibilité.....	57
IV.2.2. Les facteurs antinutritionnels .....	58
IV.2.3. Effet des traitements technologiques.....	60
IV.2.4. Niveau d'ingestion.....	61
V. Facteurs de variation de l'utilisation énergétique chez la volaille.....	62
V.1. Facteurs de variation liée à l'animal.....	62
V.2. Facteurs de variation liée à l'aliment.....	65

#### **CHAPITRE IV : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE AMBIANTE SUR LE POULET DE CHAIR**

I. Les exigences climatiques de la volaille.....	67
II. Sensibilité du poulet de chair à la chaleur.....	68
III. Réponse de la volaille face au stress thermique en climat chaud.....	69
IV. Impact de la chaleur sur la physiologie digestive du poulet de chair.....	72
V. Impact sur le métabolisme de l'énergie et des protéines du poulet de chair.....	72
VI. Impact de la chaleur sur les besoins nutritionnels du poulet de chair.....	73
VII. Interaction entre besoins nutritionnels et température ambiante élevée.....	74
VIII. Influence de la chaleur sur les performances zootechniques du poulet de chair.....	74

#### **CHAPITRE V : MATERIEL ET METHODES**

I. Mesures expérimentales.....	77
II. Dispositif expérimental.....	77
III. Matériel .....	78
III.1. Animaux.....	78
III.2. Aliment.....	78
IV. Conditions expérimentales des mesures.....	81
V. Méthodes.....	82

V.1. Protocole expérimental du bilan alimentaire.....	83
V. 2. Méthodes de mesures.....	85
V.2.1. Méthodes de mesures des paramètres d’ambiance.....	85
V.2. 2. Méthodes de mesure des paramètres zootechniques.....	85
V.2. 3. Méthodes des mesures chimiques.....	86
V.2.4. Méthode de mesure de la valeur nutritionnelle des grains de céréales.....	89
V.2.4 .1. Méthode de mesure de la valeur énergétique des grains de céréales.....	89
V.2.4.2. Méthode de mesure de la digestibilité.....	91
V.2.4. Méthodes d’analyses statistiques.....	93

## **CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION**

I. Composition chimique des grains de céréales.....	94
I.1. Composition chimique du maïs.....	94
I.2. Composition chimique du millet perlé.....	96
I.3. Composition chimique du triticale.....	99
I.4. Composition chimique de l’orge.....	101
II. Valeur nutritionnelle des grains de céréales testées .....	104
II.1. Digestibilités de la matière sèche.....	104
II.2. Digestibilités de l’amidon.....	107
II.3. Digestibilités de la matière grasse.....	110
II.4. Digestibilités des protéines .....	112
II.5. Potentiel énergétique des céréales et rendement.....	120
III. Effet de la chaleur sur la valeur nutritionnelle des grains de céréales .....	126
III.1. Digestibilités de la matière sèche.....	126
III.2. Digestibilité des protéines à 33C°.....	129
III. 3. Digestibilité de l’amidon à 33C°.....	131
III.4. Digestibilité de la matière grasse à 33C°.....	132
III.5. Utilisation de l’énergie des céréales testées à 33C°: valeur et rendement.....	133
<b>IV. Discussion générale.....</b>	<b>135</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>146</b>

# **INTRODUCTION**

L'aviculture de type intensif est l'une des solutions privilégiées pour satisfaire les besoins croissants des populations en protéines animales. L'un des avantages essentiels de cette production est l'approvisionnement de protéines à moindre coût.

Au niveau mondial, la demande en ces produits avicoles a augmenté très rapidement ces dernières années et est dictée par l'augmentation de la population, l'urbanisation dans les pays en développement et les prix des viandes concurrentes (Magdelaine, 2014). Les estimations de la FAO prévoient qu'à l'horizon 2050, la consommation mondiale en viande de volaille devrait être 2,3 fois plus importante que celle observée en 2010 (FAO, 2011).

Il est utopique de penser que cette demande soit couverte en élevant 2 fois plus de volailles et en utilisant le même niveau de ressources naturelles (FAO, 2011). En effet, la demande en matières premières agricoles (maïs, blé et soja) pour l'alimentation des animaux augmente de façon continue et importante (Ravidran, 2013a). L'écart entre l'offre et la demande de maïs et de soja devrait se creuser au cours des décennies à venir (Ravidran, 2013b).

En alimentation avicole, l'association maïs-tourteau de soja est la meilleure combinaison pour répondre aux besoins énergétiques et protéiques de la volaille. Néanmoins, dans beaucoup de pays en voie de développement, ces deux matières premières alimentaires sont totalement importées.

En Algérie, la filière avicole occupe une place de choix dans l'économie nationale. En effet, elle représente 2,86% du PIB (ONS, 2018) et 21,94 % du Produit Agricole Brut (MADRP, 2018). Cependant, l'analyse dynamique du marché des produits avicoles montre une instabilité et une fragilité de cette filière qui est dépendante du marché international en intrants alimentaires, notamment le maïs et le soja qui constituent plus des  $\frac{3}{4}$  de la ration destinée au poulet de chair. L'importation massive de maïs et de soja dont le coût sur le marché international est de plus en plus élevé nécessite une mobilisation extrêmement importante en devises.

Selon Kaci (2013), l'évolution des importations réalisées aux différents stades de la filière atteste d'une aggravation des indices de dépendance extérieure. Les importations d'intrants alimentaires, à eux seuls, ayant été multipliées par 5,3 devant les importations globales d'intrants avicoles qui sont multipliées par 3,9 entre 1986 et 2010. Pour le seul poste «matières premières» destinées à la fabrication des aliments, et seulement pour les deux matières dominantes dans la formule (maïs et tourteau de soja), la valeur des importations enregistrée en 2017 est de l'ordre de 1,33 milliards d'USD. Soit 17% du total des

importations agroalimentaires algériennes estimées à 7,767 milliards de dollars en 2017 (CNIS, 2018), ce qui explique le coût élevé du volet aliment dans la filière avicole.

Outre le fait que le secteur avicole connaît des contraintes liées aux aléas du marché en raison de sa dépendance des importations des intrants, il se démarque par sa faiblesse des performances zootechniques. La rentabilité des élevages passe par la maîtrise des coûts de production et des techniques d'élevage. Or, selon Ferrah (1993) et Kaci (2014), les performances zootechniques du secteur avicole algérien restent en deçà des normes internationales. Malgré une tendance à l'amélioration, cette situation engendre un manque à gagner et une irrégularité de la disponibilité des produits avicoles.

La chaleur est l'une des principales contraintes auxquelles les aviculteurs sont le plus souvent confrontés, à laquelle la volaille est très sensible (Cahaner *et al.*, 1992 ; Deeb *et al.*, 2002; Maak *et al.*, 2003 et Melesse et Maak *et al.*, 2005 ; Ranjan *et al.*, 2019).

Dans de nombreuses régions chaudes, notamment en Algérie, diverses enquêtes révèlent des taux de mortalité élevés en conditions estivales (Zetrouni, 2012). Un tel constat révèle l'inadaptation des recommandations d'élevage (obtenues en conditions ambiantes optimales) aux zones d'élevage avicole connaissant des épisodes climatiques chauds, plus ou moins longs.

Malgré une dynamique de croissance internationale, la production avicole notamment dans les pays en développement est ainsi face à deux importants enjeux à dimension économique. Celui de l'alimentation vu son rôle primordial dans le métabolisme animal, son coût (flexibilité en termes de matières premières disponibles, achat, transport et transformation des ingrédients) et son impact environnemental (expansion des surfaces agricole, intensification des modes de cultures, rejets environnementaux) et celui lié à l'incidence du climat chaud sur les performances des élevages avicoles.

Outre la contrainte financière générée par le couple « maïs-tourteau de soja » dans les pays en développement, ce couple ne permet pas un rendement suffisamment élevé pour compenser les effets négatifs de la chaleur sur les performances du poulet de chair en zones chaudes (Picard *et al.*, 1993).

La question de l'effet des températures élevées sur l'utilisation du potentiel nutritionnel des aliments par la volaille reste d'actualité et les éléments de réponses avancés par les scientifiques ne sont pas encore consensuels.

La recherche perpétuelle des meilleurs résultats économiques amène les scientifiques et les industriels de la filière avicole vers la recherche de « l'optimum nutritionnel ». Cet objectif implique la connaissance plus approfondie des matières premières et l'amélioration des

procès de transformation et la maîtrise des mécanismes déterminant l'ingestion, la digestion et l'utilisation des nutriments. La nécessité de répertorier et caractériser les matières premières locales susceptibles de substituer, du moins partiellement, le maïs et/ou le tourteau de soja est l'étape première de cette démarche dans un contexte climatique chaud, tel que celui présent à certaines périodes de l'année en Algérie.

Le résultat technico-économique d'un élevage avicole dépend, pour une large part, du niveau énergétique ou énergie métabolisable de l'aliment défini par le formulateur (Pesti, 1994). La décomposition du coût alimentaire en énergie et protéines (Leclerq, 1985) montre que l'apport en énergie représente 62 % du coût d'un aliment (Lessire, 1995) et 60% à 70% du coût de la production. A cet effet, l'étude des céréales est un critère important dans l'évaluation des possibilités du développement du volet « alimentation avicole » qui est une filière consommatrice de céréales, particulièrement le maïs qui constitue, selon Dronne (2018), une alternative à l'alimentation animale.

Selon les dernières prévisions du CIC (2018), les exportations de maïs atteindraient 156,7 Mt, soit 3,31% de plus en un an, une consommation mondiale de maïs de 1 112 Mt, et une production de 1 074 Mt. L'industrie de l'alimentation animale en transformera 645 Mt (+ 22 Mt en un an) car l'élevage se développe fortement dans les pays émergents.

Toutefois, la croissance tendancielle de la production mondiale du maïs est marquée par des fluctuations brutales et l'orientation d'une bonne partie de la production à des fins agroalimentaires ou industrielles (éthanol et amidon). Selon le CIC (2018) la production mondiale de maïs atteindrait 1 074 millions de tonnes en 2019 et ne sera pas suffisante pour répondre à la demande mondiale (les stocks mondiaux en juin 2019 étaient à leur plus bas niveau depuis 5 ans : - 13%). Avec des fluctuations de la production et la croissance démographique, l'écart entre l'offre et la demande va se creuser, ce qui pourrait provoquer une flambée des prix et pénaliser la capacité d'importation de cette matière de beaucoup de pays grands importateurs, dont l'Algérie.

Le maïs occupe une place importante dans la ration aviaire de point de vue économique et nutritionnel. Paradoxalement, cette céréale contribue à l'instabilité de la filière avicole en Algérie.

La production du maïs en Algérie aurait pu constituer une alternative à ce problème pour amoindrir la facture d'importation. Cependant, elle ne peut être envisagée du point de vue écologique et économique, du moins de façon durable, compte tenu tant des surfaces allouées à cette culture que des rendements obtenus et des exigences physiologiques de cette

céréale, notamment en eau. Il faut noter que l'eau en Algérie est une ressource limitée appelée à se raréfier (Akli, 2016).

Les fortes contraintes économiques et techniques que rencontre la filière avicole algérienne, ont fait l'objet depuis quelques décennies de nombreux plans de développement et de travaux de recherche. Sur le plan alimentaire, l'essentiel des travaux a porté sur la recherche de substituts partiels au maïs et au tourteau de soja (Meziane, 1983 ; Cheheb, 1981 ; Lekhal, 1986 ; Yaici, 1992 ; Boudouma, 2008). Aujourd'hui encore, il reste à identifier et caractériser sur le plan nutritionnel, des ressources énergétiques locales et connaître leur potentiel nutritif en conditions d'élevage chaudes.

A cette fin, nous avons abordé dans le cadre de ce travail de thèse, la caractérisation chimique et nutritionnelle par *Gallus gallus* des graines de millet, de triticales et d'orge produites localement. L'objectif premier de ce travail est de présenter les principales caractéristiques chimiques des 3 céréales afin de renforcer le pool d'informations relatives aux ressources alimentaires locales destinées à l'alimentation des animaux de rente. Les données consacrées à l'utilisation digestive par le coq des nutriments apportés par ces céréales ainsi que leur valeur énergétique en conditions de température optimale et élevée, devraient intéresser entre autres, les formulateurs de rations destinées à la volaille.

La première partie du manuscrit présente une synthèse d'une recherche bibliographique, décrivant le contexte dans lequel évolue la production avicole en Algérie, l'importance de l'apport énergétique chez la volaille et l'impact de la chaleur sur l'oiseau.

La deuxième partie est consacrée à la méthodologie de travail adoptée ; elle décrit les méthodes et techniques de mesures réalisées sur les graines de céréales et les coqs.

La troisième partie rapporte l'analyse des résultats obtenus ainsi que leur discussion.

La conclusion met en relief les principaux résultats et devrait permettre la réflexion sur les questionnements et perspectives soulevés au terme de ce travail.

# **CHAPITRE 1**

**SITUATION DE LA PRODUCTION AVICOLE EN ALGERIE**

L'industrialisation des élevages avicoles en Algérie s'est imposée comme l'unique solution rapide et efficace (Fenardji, 1990) pour résorber le déficit en protéines animales dans le modèle alimentaire algérien (Aardes, 1967). A cette fin, les pouvoirs publics ont initié des programmes de développement à long terme visant à :

- développer une aviculture intensive dont l'unique objectif est d'assurer dans les plus courts délais l'auto-provisionnement des populations urbaines en protéines animales et à moindre coût ;
- adopter un modèle d'élevage similaire à celui adopté à l'échelle des pays développés, à savoir un modèle avicole intensif basé sur le recours aux technologies et aux intrants avicoles industriels importés. Ce modèle est fondé sur la combinaison alimentaire maïs – TS et l'exploitation de souches aviaires hybrides importées à haut potentiel génétique ;
- réduire la valeur des importations à travers le processus de la remontée graduelle des filières avicoles avec la mise en place des élevages de reproducteurs, l'approvisionnement local en produits vétérinaires et l'industrie des équipements d'élevage.

Les offices publics issus de la restructuration de l'ONAB (ONAB, ORAVIO, ORAC et ORAVIE) ont réussi à mettre un terme aux importations de produits finis en accentuant, cependant, le recours aux importations d'intrants avicoles (poussin d'un jour reproducteur et maïs et TS) pour approvisionner les industries en amont.

Actuellement, la filière avicole algérienne a atteint un stade de développement qui lui confère une place de choix dans l'économie nationale.

### **I. Place de l'aviculture dans les productions animales**

Pour la période 2005-2017, l'Algérie a produit 757703 T de viande, 2,9 millions T de lait et 4,9 milliards d'unités d'œufs par année (Tableau 1) et plus de 2,5 millions de têtes ovines, 1,9 millions de bovins et 53,69 millions volailles dont 50,13% de poulets de chair, 49,86% de pondeuse et seulement 0,009% de dindes (Tableau 2).

Pour la même période, il est observé pour le secteur avicole la tendance à concurrencer les élevages traditionnels, essentiellement ovins en termes de production, avec une part de viande blanche moyenne de 44% de la production de viande totale, devant 30% et 16%, respectivement, de celle de viande ovine et bovine (Tableau 1).

Tableau 1 : Evolution du tonnage des principaux produits animaux en Algérie

Désignation Années	Viande blanche (T)	Viande rouge (T)	Viande bovine (T)	Viande ovine (T)	Viande Totale (T)	Œufs (x 1000)	Lait (*1000) litres	Viande blanche/Viande Totale (%)	Viande bovine /Totale (%)	Viande ovine /Totale (%)
2005	143 577	301 568	93593	175 967	445 145	352 8014	2 092 000	32	21	40
2006	201 281	298 554	95237	169 275	499 835	356 9784	2 244 000	40	19	34
2007	224 882	320 125	114 354	172 407	545 007	381 3062	2 184 846	41	21	32
2008	220 399	316 280	101 375	181 941	536 679	383 7992	2 219 708	41	19	34
2009	224 929	356 661	112 901	204 285	581 590	404 9269	2 394 200	39	19	35
2010	296 446	383 623	118 847	226 437	680 069	404 9000	2 632 900	44	17	33
2011	336 128	419 553	125 385	253 207	755 681	482 2477	2 926 959	44	17	34
2012	365 398	439 789	135 674	261 198	805 187	5 326 572	3 088 190	45	17	32
2013	418 397	467 200	139 921	279 758	885 596	5 987 024	3 368 067	47	16	32
2014	463 452	486 856	147 104	290 649	949 743	6 060 558	3 548 825	49	15	31
2015	512 206	525 647	155 037	317 989	1 022 089	6 644 517	3 753 766	49	15	31
2016	515 435	537 755	/	/	1 053 190	6 691 912	3 597 017	49	/	/
2017	530 000	544 000	/	/	1 074 000	6 500 634	2 520 000	49	/	/

Source : MADRP (2018)

Tableau 2 : Evolution des effectifs des espèces bovine, ovine et avicoles en Algérie

Années	Bovin (têtes)	Ovin (têtes)	Poulet (*1000 sujets)	Ponte (* 1000 sujets)	Dinde (sujets)
2005	1584757	18717404	77 003	14 380	/
2006	1 614 753	19 263 902	154 832	17 132	/
2007	1 657 897	19 850 823	173 000	16 380	/
2008	1 670 126	20 234 930	134 494	17 480	/
2009	1682433	21404584	114882	17283	2975457
2010	1747700	22868770	141232	19669	3429733
2011	1790140	23989330	158574,965	20647,7265	3503136
2012	1843930	25194105	169660	23132	3940000
2013	1909455	26572980	198300	26500	5400000
2014	2049652	27807734	211617,765	27472,8423	5336967
2015	2149549	28111773	241505,699	28443,194	6937014
2016	2081306	28135986	243230,092	28839,5715	5500407
2017	1895126,24	28393602	233582,568	28062,2973	5790863

Source : MADRP (2018)

Le tableau 1 met en évidence une production de viande blanche de l'ordre de 49 % de la production en 2017, alors qu'elle ne s'établissait qu'à 32 % en 2005. Cette augmentation est liée à l'accroissement des effectifs de volailles, une hausse de 304% en 2016 (Tableau 2), ce qui se traduit par un accroissement de la production passant de 143 577 t en 2005 à 530 000 t en 2017, soit une hausse de 269 vs 180 % pour les viandes rouges.

La production nationale animale assure une disponibilité réduite de par la faible diversité de ses produits. Elle assure en moyenne, pour la période 2005-2017, une disponibilité de 27kg par habitant et par année en viande, dont 13kg de viande blanche et 14kg de viande rouge. Les disponibilités du lait et des œufs de consommation sont respectivement de 77 œufs et 8kg par habitant et par an.

La part de viande blanche dans la consommation totale de viande est passée de 12% en 1970 à 33% en 1991 avec un maximum de 40% en 1986 ; actuellement, elle est de 45%. Le niveau actuel de 13 kg de viande blanche, reste encore faible comparé au niveau de consommation des pays développés qui se situe à plus de 20kg/habitant/an.

En termes de protéines disponibles, les viandes blanches apporteraient 7,58 kg/hab/an, c'est à dire 20g/hab/j, assurés particulièrement par les apports en protéines des produits de volailles qui contribuent avec 9,16 g/hab/j des approvisionnements totaux des différents produits animaux, soit 45% contre 56% pour les approvisionnements en protéines de la viande rouge et seulement 0,04% pour ce qui est du lait (Tableau 3) . Selon les recommandations de l'OMS et la FAO, de l'ordre de 60g/j/personne, l'Algérie n'a pas encore atteint ce seuil minimal recommandé et le déficit est important.

Tableau 3 : Apports protéiques assurés par les principales productions animales en Algérie

Années	Apport protéiques d'origine avicole (PC et P) (T)			Apport en protéines des autres produits animaux (T)		Part des apports protéiques d'origine avicole (%)	Part des apports assurés par les viandes rouges (%)
	Viandes blanches	Œufs	Protéines totales des produits de volaille	Viandes rouges	Lait		
2005	37 904	25402	63306	60314	73	51	48,76
2006	53 138	25702	78841	59711	79	57	43,07
2007	59 369	27454	86823	64025	77	58	42,42
2008	58185	27634	85819	63256	78	58	42,41
2009	59381	29155	88536	71332	84	55	44,60
2010	78262	29153	107415	76725	92	58	41,65
2011	88738	34722	123460	83911	103	60	40,44
2012	96465	38351	134816	87958	108	60	39,46
2013	110457	43107	153563	93440	118	62	37,81
2014	122351	43636	165987	97371	124	63	36,96
2015	135222	47841	183063	105129	131	63	36,46
2016	136075	48182	184257	107551	126	63	36,84
<b>2017</b>	139920	46805	186725	108800	88	63	36,80

Calculés à partir des données du MADPR (2018)

L'importation des viandes est un moyen de régulation du marché durant les périodes de forte demande. Les viandes importées sont principalement d'origine bovine (CNIS, 2017). En moyenne, l'Algérie importe chaque année presque 383 199 t de viande rouge (MADRP, 2018) alors que la viande blanche est totalement produite localement (tableau 4).

Tableau 4 : Evolution du taux d'autosuffisance (%) en viandes et en œufs de consommation en Algérie (2005-2017)

Désignation	Viandes blanches	Œufs de consommation	Viandes rouges
Années			
2005	100	100	55,90
2006	100	100	58,66
2007	100	100	72,38
2008	100	100	45,34
2009	100	100	67,10
2010	100	100	85,71
2011	100	100	49,15
2012	100	100	48,10
2013	100	100	44,50
2014	100	100	42,10
2015	100	100	39,09
2016	100	100	68,31
2017	100	100	47,86

2005 : Année de référence

Calculs élaborés à partir des données du MADRP (2018) et du CNIS (2018)

## II. Dynamique de développement de l'aviculture

La production animale nationale enregistre une évolution significative en termes de disponibilité des produits. De l'ordre de 445 145 T (13kg/hab/an) en 2005, la production de viande toutes espèces confondues est passée à 1 074 000 T (27kg/hab/an) en 2017, soit un accroissement de l'ordre de 141% (Tableau 5). Durant la même période, la production de viande blanche a suivi la même évolution, soit un accroissement de 269 %.

La filière avicole compte près de 234 millions de poulets de chair, 28,1 millions de poules pondeuses et 5,8 millions de dindes chair (Tableau 2). Elle a connu en moins d'une décennie, un saut significatif avec un indice de développement en termes d'effectifs de 293% par rapport à l'année de base 2005.

Tableau 5 : Evolution indiciaire des productions animales en Algérie (%)

Années	Viande blanche	Viande rouge	Viande totale	Œufs	Lait
2005	100	100	100	100	100
2006	140	99	112	101	107
2007	157	106	122	108	104
2008	154	105	121	109	106
2009	157	118	131	115	114
2010	206	127	153	115	126
2011	234	139	170	137	140
2012	254	146	181	151	148
2013	291	155	199	170	161
2014	323	161	213	172	170
2015	357	174	233	188	179
2016	359	178	237	190	172
2017	369	180	241	184	120

Source : MADRP (2018)

En 2017, la production nationale en viande blanche a connu une évolution considérable, atteignant 530 000 t contre 143 577 t en 2005 (MADR, 2018), soit une augmentation de 369%, contre 180% pour la viande rouge et de seulement 120% pour le lait, l'année 2005 étant considérée comme année de référence. Celle des œufs de consommation a connu la même tendance durant la même période en passant à 6,5 milliards d'unités produites en 2017 contre 3,5 milliards d'unités en 2005 (MADRP, 2018), soit une hausse de 184 %. Il s'agit donc d'une dynamique de production intéressante du secteur avicole, ce qui confirme leur importance dans le modèle de consommation des algériens en tant que source protéique.

Cependant, cette rapide évolution de l'aviculture a nécessité d'énormes importations d'intrants avicoles dont le pays reste dépendant et repose faiblement sur les ressources locales, qui demeurent limitées (Harbi, 1997 ; Kaci, 2014).

De ce fait, l'aviculture algérienne est en situation de totale dépendance du marché extérieur. En effet, les industries d'amont de la filière sont totalement dépendantes et subordonnées aux oligopoles technologiques qui assurent la reproduction du modèle avicole intensif à l'échelle mondiale. Leur fonctionnement repose sur le recours aux importations et passe par la mobilisation de ressources financières importantes. Ainsi, la valeur des importations des inputs avicoles est passée de 287 millions USD en 1986 à 1,33 milliard d'USD en 2017 (CNIS, 2018), soit un taux d'accroissement de 473%. Pour le seul poste « matières premières » destinées à la fabrication des aliments « maïs et tourteaux de soja », la valeur moyenne actuelle des importations dépasse un milliard de dollars soit une couverture qui a atteint les 90% de la valeur des importations totales en intrants et 94% de celle de la valeur des importations en aliment en 2017 (Tableau 6). Le même tableau indique que le maïs constitue la part la plus importante dans l'aliment composé, soit plus de 50 %.

En conclusion, la filière avicole algérienne a atteint un stade de développement qui lui confère une place de choix dans l'économie nationale en général (2,86% du PIB national) et dans l'économie agricole (21,94 % du PIB agricole), en particulier. Cette position fait que la production avicole représente en Algérie une part très importante de la production animale en général. La consommation des produits d'origine animale a évolué grâce au développement de l'aviculture, ce dernier étant quasiment dépendant de l'importation des intrants.

Tableau 6 : Dynamique des valeurs d'importations en filière avicole (Valeur 1000 USD)

<b>Années</b>	Maïs	Maïs/Total aliment (%)	TS	Soja/Total aliment(%)	CMV	Phosphate	<b>Total aliment</b>	(Maïs - soja) /Total aliment (%)	<b>Total intrants</b>
<b>2005</b>	354678	68	145897	28	11231	8526	520333	67	780898
<b>2006</b>	337764	67	147568	29	10583	9102	505018	47	1069396
<b>2007</b>	517277	69	204402	27	13953	9333	744966	93	802294
<b>2008</b>	671330	65	308078	30	17687	34914	1032008	91	1131090
<b>2009</b>	407429	54	306080	40	27285	19679	760473	47	1615489
<b>2010</b>	637627	59	390924	36	38004	18865	1085419	70	1556588
<b>2011</b>	998936	64	485340	31	40925	37820	1563021	90	1743919
<b>2012</b>	941303	63	461658	31	52456	40012	1495429	87	1722502
<b>2013</b>	891213	53	698010	42	59396	29345	1677965	102	1642900
<b>2014</b>	827281	50	764192	46	52859	25425	1669757	113	1471544
<b>2015</b>	871695	55	602066	38	74271	33619	1581651	119	1326482
<b>2016</b>	768229	55	533555	38	65083	33861	1400728	95	1471544
<b>2017</b>	774763	62	422709	34	32446	14626	1244543	94	1326482

Source : CNIS (2018)

# **CHAPITRE 2**

**APPORT ENERGETIQUE EN ALIMENTATION AVICOLE**

L'élevage avicole a connu d'importantes évolutions ces dernières décennies en raison des avancées réalisées tant sur le plan génétique que nutritionnel.

Sur le plan nutritionnel, les apports sont assurés à l'animal par le biais d'un complexe, concentré en énergie et en protéines, de type « grains de céréales-grains de protéagineuses » ou « grains de céréales-tourteau d'oléagineuses ».

### **I. Importance nutritionnelle de l'énergie en alimentation avicole**

L'énergie est un principe nutritif fondamental en alimentation avicole. Il constitue un facteur déterminant de l'utilisation optimale de tout autre élément de la ration. En effet, les volailles ajustent leur ingéré sur la concentration énergétique de la ration. Il convient donc d'estimer parfaitement ce paramètre (Lessire, 1995).

Outre l'intérêt nutritionnel de l'énergie pour la volaille, les résultats technico-économiques d'un élevage avicole dépendent, pour une large part, du niveau énergétique ou énergie métabolisable de l'aliment défini par le formulateur (Pesti, 1994). Lessire (1995) estime que l'énergie représente 62 % du coût d'un aliment moyen renfermant 3000kcal d'EM et 200g de protéines par kg. Pour Wilson et Bayer (2000) et Saleh *et al.* (2004) ce taux atteint les 70%.

### **II. Modes d'expression de l'apport énergétique chez la volaille**

Classiquement, les besoins et les apports énergétiques de l'oiseau sont exprimés par le système de l'énergie métabolisable (EM).

L'EM est définie selon Armsey (1917) comme étant l'énergie brute (EB) d'un aliment après déduction de la perte d'énergie des fèces, de l'urine et des gaz. Classiquement, l'énergie des gaz est considérée comme négligeable chez le monogastrique (Vermorel, 1978). L'EM correspond à l'énergie d'origine alimentaire disponible pour les besoins métaboliques de l'animal, c'est-à-dire les besoins d'entretien et de production.

En formulation d'aliments avicoles, le système EM est adopté car basé sur des mesures simples à réaliser (du fait du mélange urines et fèces et à condition de négliger les pertes gazeuses) donc préférable au système ED qui impose chez l'oiseau la séparation du matériel fécal de celui d'origine urinaire. Le système se décline généralement sous les formes EMa (énergie métabolisable apparente) et EMr (énergie métabolisable réelle). Cette correction permet de supprimer les variations d'origine métabolique, liées à la variabilité du niveau de synthèse protéique en fonction du stade physiologique des animaux (Carré et Roze, 1990). Par

opposition à l'énergie métabolisable réelle ou vraie (EMv), l'énergie métabolisable apparente (EMa) ne prend pas en compte les pertes d'origine endogène.

L'énergie nette (EN) est la résultante finale de l'ensemble des flux énergétiques. Elle couvre les dépenses d'entretien et de production (Blum *et al.*, 1989).

L'énergie brute ou potentielle de l'aliment est proportionnelle à la concentration des nutriments qu'elle renferme et particulièrement ceux d'origines lipidique et amylacée.

Au cours de son utilisation dans le compartiment digestif et métabolique, l'EB est transformée et les pertes d'énergie plus ou moins importantes sont générées au cours de ces processus de transformation. La figure 1 illustre la partition de l'énergie ingérée dans l'organisme animal.

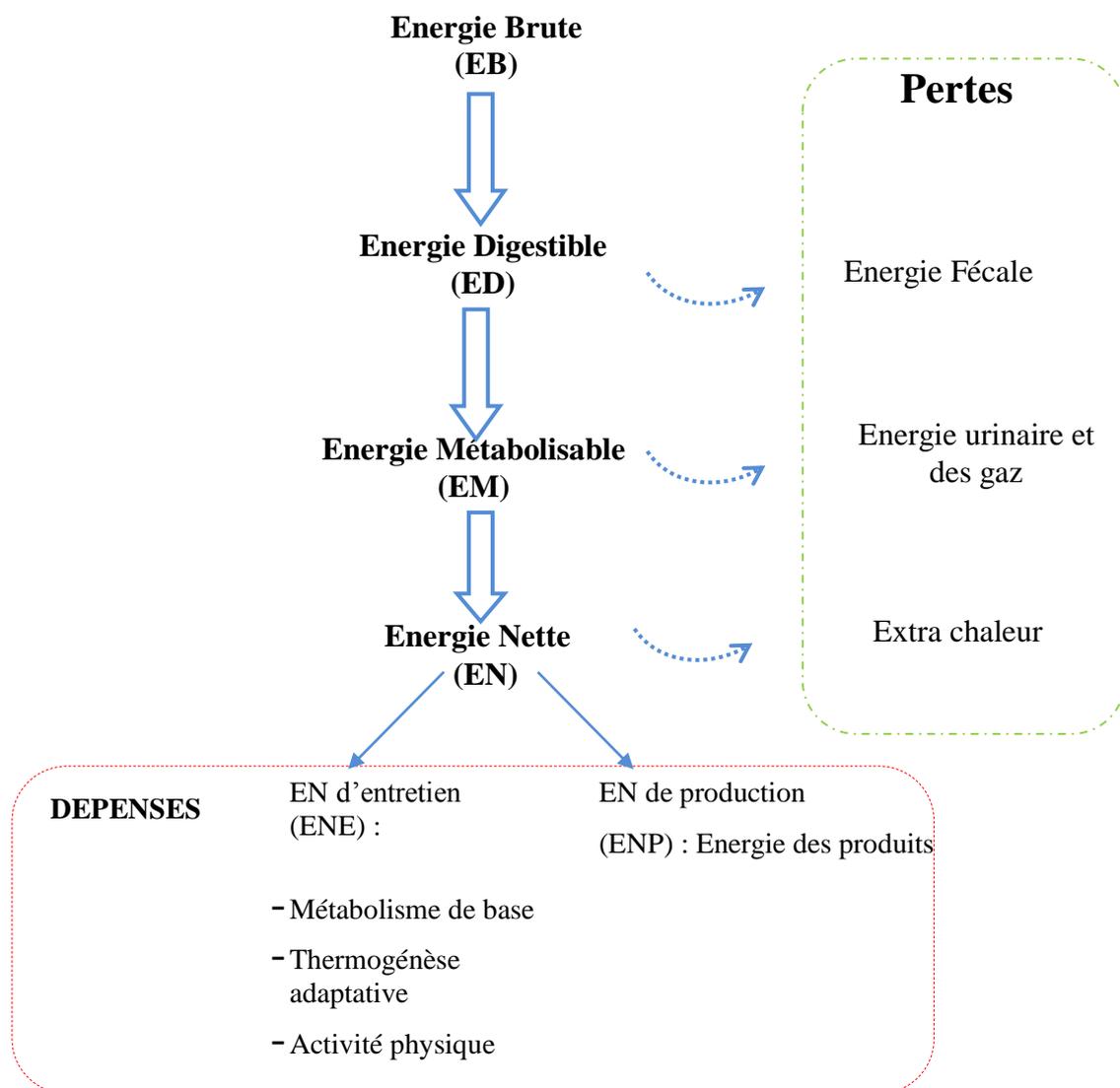


Figure 1 : Schéma de la partition de l'énergie dans l'organisme (Larbier et Leclercq, 1992)

### III. Grains de céréales : principale source d'énergie en alimentation avicole

En alimentation animale, les glucides et les lipides constituent les 2 principales sources d'énergie. Bien que les graisses et les huiles possèdent une densité énergétique environ deux fois plus élevée (37 kJ / g) que celle de la plupart des glucides (17 kJ / g), l'amidon reste la principale source d'énergie pour la volaille.

L'amidon est quantitativement le principal nutriment énergétique utilisé en alimentation avicole (Zaefarian, 2015) ; il fournit environ 60% de la teneur en EMA des aliments (Cowieson, 2005). Selon Svihus (2014a), les régimes destinés aux poulets de chair peuvent comprendre jusqu'à 50% de ce nutriment.

Les structures amylacées sont fortement présentes dans les grains de céréales, elles représentent 70 à 80% de la plupart des grains de céréales et sont en proportion moindre dans les graines de protéagineux (Tableau 7). Les céréales grains constituent donc un produit de base dans l'alimentation animale en raison de l'apport énergétique élevé indispensable à l'alimentation des animaux monogastriques et des volailles en particulier (Conan *et al.* 1992).

Outre les céréales, d'autres sources énergétiques sont utilisées en alimentation animale, tel que l'amidon des tubercules (manioc) et les issues de céréales, essentiellement représentées par les sons, germes, gruaux, farines basses. Ces derniers, sont généralement riches en fibres, ou en polysaccharides non amylacés (PNA), ce qui limite leur intérêt pour les volailles (Juin et Roinsard, 2015).

Cependant, le son de blé dur (Boudouma, 2008 ; Juin et Roinsard, 2015) et le gruaux de blé (Pelletier-Grenier et Valiquette, 2009) se sont révélés avoir un intérêt nutritionnel dans l'alimentation des volailles.

Les céréales constituent une proportion importante (> 50%) des régimes des volailles. De plus, elles contribuent, dans une certaine mesure, à l'apport en protéines de la ration (Herbert, 2017).

Quantitativement, les grains de céréales peuvent représenter, 75 voire 80% de la ration (Juin et Roinsard, 2015) ; ils couvrent 70 à 90% le besoin énergétique des volailles et 35 à 50% le besoin azoté (Zitari, 2008). Ils sont considérés comme une excellente source énergétique vu leur teneur élevée en amidon facilement digestible par les Galliformes (Klasing 2005 ; De Oliveira, 2009). Toutefois, ce potentiel nutritionnel peut varier considérablement selon le type de grain (Black, 2001).

Tableau 7 : Teneurs en quelques composants chimiques de grains de céréales et de protéagineux

	%MS	Protéines brutes	Amidon (polarimétrie)	MM	MG brute	CB	EB Kcal / kg MS)	FAN	
								(g/kgMS)	
(%MS)									
<b>Graines de céréales</b>									
								Tannins (éq. d'acide tannique)	Tannins, condensé (éq. Catéchine)
Maïs	86,2	8,8	73,5	1,6	4,3	2,7	4466	–	–
Blé	87,0	12,6	69,1	1,8	1,7	2,6	4347	–	0,3
Orge	87,1	11,8	59,7	2,6	2,0	5,2	4395	0,8	
Sorgho (tous types)	87,4	10,8	74,5	2,1	3,4	2,8	4490	–	28,6
Mil	89,6	12,4	67,2	2,7	4,9	2,7	4490	1,4	16
Triticale	87,1	11,7	67,6	2,1	1,5	2,7	4323	Viscosité 4,24 (ml / g MS) (AFNOR)*	
Seigle	86,6	10,3	62,2	2,0	1,4	2,2	4299	–	–
Avoine	87,9	11,0	40,6	3,0	5,4	13,9	4658	–	–
<b>Moyenne</b>	87,36	11,20	64,30	2,13	2,74	2,99	4434	–	–
<b>Grains de protéagineux</b>									
Lupin bleu	90,2	33,7	4,8	3,5	6	16,1	4849	–	–
Lupin jaune	88,8	42,2	6,1	4,6	5,4	16,6	4896	–	–
Lupin blanc	88,1	38	8,1	4	9,8	13,7	5064	–	–
Fève	86,6	29,0	44,7	3,9	1,4	9,1	4466	6,5	4,8
Lentille	88,3	26,9	45,7	3,8	1,6	4,9	4419	6,6	1,1
Pois	86,5	23,9	51,3	3,5	1,2	6,0	4371	0,7	0,1
Soja	88,7	39,6	6,4	5,7	21,4	6,2	5637	8.	0,4
<b>Moyenne</b>	88,17	33,33	23,87	4,14	6,69	10,37	4815		

Source : Feedipedia (2017)

Les céréales à grains les plus communément utilisées en alimentation avicole sont le maïs (*Zea mays*), le blé (*Triticum aestivum*), l'orge (*Hordeum vulgare*) et le sorgho ou le milo (*Sorgho bicolor*) (Herbert, 2017).

### III.1. Caractéristiques des céréales

Sur le plan botanique, les céréales sont apparentées aux graminées. La graine est caractérisée par la présence d'un tissu de réserve ou « albumen ».

Le grain des céréales est un caryopse nu ou vêtu de ses glumelles. Le blé, le maïs, le sorgho, le seigle et le triticales appartiennent au premier groupe, l'orge et l'avoine font partie du second (Saulnier, 2012).

La composition biochimique des grains est relativement variable d'une céréale à une autre, et au sein d'une même céréale, d'une variété à une autre. Les conditions agro-climatiques constituent également un facteur de variation de la composition chimique des grains (Dormont, 2000).

Les constituants du grain se répartissent très différemment selon les tissus. Cette répartition est commune à toutes les céréales (Saulnier, 2012) :

- l'amidon se retrouve en totalité dans l'albumen amylicé ;
- les teneurs en protéines et en lipides du germe et de la couche à aleurone sont élevées ;
- les matières minérales abondent dans la couche à aleurone et les enveloppes externes ;
- les fibres sont les constituants majeurs du péricarpe et de l'aleurone.

Malgré ces caractéristiques communes, les céréales présentent selon Saulnier (2012), des atouts nutritionnels différents en raison de la nature et de la teneur en divers nutriments (Tableau 7).

La composition chimique des grains de céréales (humidité 11–14%) est caractérisée par la teneur élevée en glucides (Tableau 7). L'amidon constitue 40-76% de la MS et les protéines entre 8 et 11%. En dehors de l'avoine dont la teneur en MG est d'environ 7%, les grains de céréales ont un faible taux en lipides (2-4%) ; la proportion en minéraux varie de 1 à 3%.

La teneur relativement élevée en vitamines du groupe B dans les grains de céréales leur confère un intérêt nutritionnel certain.

En ce qui concerne les structures et les quantités des constituants chimiques, des différences notables existent entre les céréales et même entre les espèces et les variétés au sein de chaque céréale. Lullien-Pellerin (2014) précise que les grains de céréales se distinguent également de par la morphologie du grain, des facteurs antinutritionnels qu'ils contiennent ainsi que des procédés technologiques mis en œuvre pour leur incorporation dans les aliments.

### III.1.1. Glucides

Les céréales contiennent 66 à 76% de glucides, ce qui en fait de loin le groupe de constituants le plus abondant. L'hydrate de carbone principal est l'amidon (40-76%MS), suivi de constituants mineurs tels que les arabinoxylanes (1,5-8%), les  $\beta$ -glucanes (0,5-7%), les glucides (environ 3%), la cellulose (environ 2,5%) et les glucofructanes (environ 1%) (Koehler et Wieser, 2013).

#### ➤ Amidon

L'amidon est un glucide de réserve qui se localise à près de 80% dans l'endosperme de la graine de céréale sous forme de granules (Buléon *et al.*, 1998). L'architecture moléculaire, la taille et la forme des granules varient selon le type de céréales (Svihus, 2014 b).

La taille des granules peut varier de 1 à 50  $\mu$ m. Les céréales présentant des granules de petite taille, ont une teneur en amidon plus élevée comparée à celles dont la taille est plus importante.

Les granules sont constituées de plusieurs couches composées de chaînes d'amylose et d'amylopectine et de certains composants mineurs tels que les protéines et les lipides (Jaiswal et Kumar, 2015 ; Xia *et al.*, 2015).

L'amylose et l'amylopectine sont sous forme de 2 homopolymères de D-glucopyranose. Le premier est de structure linéaire, avec des liaisons de type  $\alpha$  (1,4) et le second est de structure branchée, avec de liaisons  $\alpha$  (1,4) et 5 à 6 % de liaisons  $\alpha$  (1,6) (Buléon *et al.*, 1998 ; Saulnier, 2012 et Jacob, 2015 b). Ensemble, ils représentent environ 98 à 99% du poids sec de l'amidon (Tester *et al.*, 2004).

Dans les grains de céréales, l'amylose et l'amylopectine ont différentes tailles, formes et compositions. L'amidon des céréales est typiquement composé de 20 à 30% d'amylose et de 70 à 75% d'amylopectine (Svihus *et al.*, 2005; Saulnier, 2012). Le ratio amylose/amylopectine permet de distinguer l'amidon «cireux» de celui «highamylose» (Cowieson *et al.*, 2018). Les cultivars «cireux» ont un très haut niveau d'amylopectine (jusqu'à 100%), alors que les cultivars à «forte teneur en amylose» ou «amylostarch» peuvent contenir jusqu'à 70%

d'amylose (Van Hung *et al.*, 2006 ; Jonnala *et al.*, 2010). Un degré élevé de cristallinité (teneur élevée en amylose) est associé à des efficacités catalytiques et à un taux d'hydrolyse plus faibles (Tahir *et al.*, 2010).

Les protéines et les lipides contenus dans les granules d'amidon sont classés en 2 types : protéines et lipides de surface et ceux internes (Baldwin, 2001). En général, l'amidon de céréales renferme une concentration plus importante de protéines (environ 0,25%) et de lipides (1,0%), à celle d'autres végétaux tels que les racines ou les tubercules qui contiennent environ 0,05% de protéines et 0,1% de lipides (Baldwin, 2001 ; Wang *et al.*, 2014).

Bien qu'à l'échelle quantitative, les protéines et les lipides contenus dans les granules d'amidon soient considérés comme négligeables, leur présence, en particulier ceux de surface, ont des effets importants sur les propriétés de l'amidon (Hu, 2018).

L'amidon est une structure extrêmement hétérogène dont la composition, la cristallinité et la solubilité varient considérablement en fonction du type et de la variété de céréales (Tableau 8), et détermine son interaction avec d'autres macro et micro-nutriments dans le matériel végétal (Tester, 2004).

Tableau 8 : Composition des grains d'amidon en amylose et amylopectine

Structure amyliacée Céréales	Amylose (%)	Amylopectine (%)
Maïs	24	76
Maïs cireux	1	99
Maïs - haute teneur en amylose	75	25
Blé	25	75
Riz	18	82
Riz cireux	1	99
Sorgho	25	75
Sorgho cireux	1	99

Source : Cowieson *et al* (2018)

### ➤ Polysaccharides non amylacés

Les polysaccharides (PNA) autres que l'amidon constituent les principaux composés des parois cellulaires ; selon Messia (2017) ils sont beaucoup plus abondants dans les couches externes et les parois des cellules de l'endosperme (arabinoxylanes et cellulose) et des tissus les plus externes partiellement lignifiés que dans les couches internes des grains (pentosanes et des  $\beta$ - glucanes mixtes) de céréales.

Les PNA sont composés de pentoses ou d'hexoses (Mohamed and Rayas-Duarte, 1995). Il existe deux types de PNA, les solubles et insolubles. Du point de vue nutritionnel, les PNA sont des fibres alimentaires, celles-ci sont définies comme étant des polymères glucidiques de degré de polymérisation supérieur à 3 et qui ne sont ni digérées ni absorbées au niveau de l'intestin grêle. Le taux de fibre est variable (2 à plus de 3%) et dépend notamment de la taille du grain ; les grains de faibles dimensions (petits mils) ayant une plus grande proportion d'enveloppes (Favier, 1989).

Parmi les polysaccharides non amylacés des grains de céréales, les arabinoxylanes constituent la partie pentosane de la fraction de fibres insolubles et les  $\beta$ -glucanes sont les composants majeurs de l'endosperme amylacé et des parois cellulaires de l'aleurone. Tous les deux constituent la principale source de fibres alimentaires solubles dans les céréales (Messia *et al.*, 2017).

#### ▪ Les arabinoxylanes

Les arabinoxylanes sont l'un des principaux constituants des fibres alimentaires solubles et insolubles (Mc Cartney *et al.*, 2005) et présentent une grande hétérogénéité structurale (Izydorczyk *et al.*, 1995). Ils représentent la fraction majeure des polysaccharides de la paroi cellulaire des céréales (85-90% des pentosanes). Leur structure, linéaire, est composée de xylane  $\beta$  (1  $\rightarrow$  4) sur lequel sont liées des unités arabinofuranose par des liaisons  $\alpha$  (1  $\rightarrow$  3) et / ou  $\alpha$  (1  $\rightarrow$  2).

Les teneurs les plus élevées en arabinoxylanes sont celles du seigle (6–8%) ; le blé n'en contient que 1,5–2%.

Ils augmentent la viscosité des digestas chez les oiseaux et sont à l'origine de la réduction de la digestibilité de l'amidon (Choct *et al.*, 1999), des protéines et des lipides chez le poulet (Choct et Annison, 1992; Carré *et al.*, 2002 ; Maisonnier *et al.*, 2001a) et celle de la valeur énergétique métabolisable du blé (10 à 15 %) selon Leeson et Summers (1997).

- **Les  $\beta$ -glucanes**

Les  $\beta$ -glucanes sont également appelés lichénines et sont très présents dans l'orge (3–7%) et l'avoine (3,5–5%) mais le sont beaucoup moins dans les autres céréales (moins de 2%).

Les  $\beta$ -glucanes sont des chaînes linéaires de D-glucose liées par des liaisons mixtes  $\alpha$  1-4 (70% des liaisons) et  $\beta$  1-3 (30% des liaisons). Les  $\beta$ -glucanes sont plus solubles que les arabinoxylanes (38–69% dans l'orge, 65–90% dans l'avoine) et forment des solutions visqueuses.

- **La cellulose**

La cellulose est principalement concentrée dans les glumelles (50 à 60%), les enveloppes du grain et les parois cellulaires de la couche d'aleurone. Elle représente 5 à 6% de la matière sèche du grain de céréale (Bamouh, 1999).

### III.1.2. Protéines

Les céréales contiennent trois types de protéines : les protéines de stockage, les protéines structurelles et métaboliques et les protéines protectrices. La majorité des protéines des céréales sont des protéines de stockage (les prolamines et les globulines). Les prolamines sont riches en acides aminés proline et glycine mais pauvres en acides aminés essentiels que sont la lysine et le tryptophane (Saulnier, 2012 ; Jacob, 2015 a). En revanche, l'apport en acides aminés sulfurés des grains de céréales est plus élevé que celui des légumineuses (Favier, 1989).

La teneur moyenne en protéines des grains de céréales est stable : 8 à 11% (tableau 7), celle du blé, par exemple, peut varier de moins de 6% à plus de 20% (Koehler et Wieser, 2013). Le taux protéique dépend du génotype (céréale, espèce, variété) et des conditions de croissance (sol, climat, fertilisation). La quantité et la durée de la fertilisation azotée revêtent déterminent également la concentration azotée.

Les composés protéiques se retrouvent dans l'ensemble du grain, cependant, leur concentration est remarquablement différente d'une structure à une autre (Koehler et Wieser, 2013).

La composition en acides aminés du blé, de l'orge et du seigle est caractérisée par l'abondance en acide glutamique et en proline, caractéristiques des prolamines majeures,

tandis que le riz et l'avoine se distinguent des autres céréales par la prédominance des globulines (Saulnier, 2012). Selon le même auteur, du point de vue nutritionnel, l'apport en acides aminés essentiels des protéines des différentes céréales est similaire (Tableau 9). Par contre, d'un point de vue fonctionnel, les protéines présentent des propriétés physico-chimiques différentes inter et intra espèces.

Tableau 9 : Teneurs en acides aminés essentiels des grains des principales céréales  
(mg/100 g de grains)

mg/100g	Blé	Maïs	Riz	Orge	Seigle	Avoine
Tryptophane	160	67	101	208	154	234
Thréonine	366	354	291	424	532	575
Isoleucine	458	337	336	456	550	694
Leucine	854	1155	657	848	980	1284
Lysine	335	265	303	465	605	701
Méthionine	201	198	179	240	248	312
Cystine	322	170	96	276	329	408
Phénylamine	593	463	410	700	673	894
Tyrosine	387	383	298	358	339	573
Valine	556	477	466	612	747	937
Histidine	285	287	202	281	367	405

Source : Feedipedia (2017)

### III.1.3. Lipides

Les lipides des céréales sont concentrés membranes et organites ; leur teneur moyenne dans les grains est comprise entre 1,7 à 5,4% (Feedipedia, 2017).

La composition en acides gras des céréales est semblable : la teneur en acide linoléique comprise entre 39 et 69% et celle de l'acide oléique entre 11–36% et enfin celle de l'acide palmitique entre 18–28% (Delcour, 2010).

Selon Favier (1989), les céréales ont une faible concentration en lipides mais ces derniers sont de bonne qualité en raison de la forte proportion des acides gras polyinsaturés dont les principaux sont l'acide linoléique et l'acide linoléique.

Alors que les triglycérides constituent la classe de lipides dominante dans le germe et la couche d'aleurone, les phospho- et glycolipides sont présents dans l'endosperme.

Les lipides non polaires sont principalement présents dans la fraction lipidique libre, alors que les glycols et phospholipides font partie de la fraction liée à laquelle ils peuvent être associés (cas des protéines).

Les digalactosyldiglycérides constituent la principale classe de glycolipides. Les lipides de l'amidon sont principalement composés de lysophospholipides qui forment des complexes d'inclusion avec l'amylose (Koehler et Wieser, 2013).

### III.1.4. Minéraux

Les grains de céréales sont pauvres en minéraux ; les principaux sont le magnésium, le phosphore et le calcium (Tableau 10) mais le fer, le zinc, le cuivre, le manganèse et sélénium peuvent contribuer significativement à l'apport en minéraux de la ration alimentaire (Atkinson *et al.*, 2008).

Tableau 10 : Composition moyenne en minéraux essentiels des grains des principales céréales.

	Unité	Blé	Maïs	Millet	Sorgho	Orge	Seigle	Avoine	Triticale
Calcium	g/kg MS	0,7	0,5	0,4	0,3	0,8	1,0	1,1	0,7
Phosphore		3,6	3,0	3,3	3,3	3,9	3,5	3,6	3,9
Potassium		4,6	3,9	4,2	4,3	5,7	/	4,9	5,8
Sodium		0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	/	0,1	0,1
Magnésium		1,2	1,2	1,3	1,8	1,3	/	1,0	1,2
Manganèse	mg / kg MS	40	5	21	12	19	19	43	24
Zinc		31	21	31	24	30	25	26	27
Cuivre		6	2	6	5	12	/	3	6
Fer		78	37	48	120	184	/	110	39

Source : Feedipedia (2017)

La biodisponibilité des minéraux des grains de céréales est généralement limitée, soit par leur forme qui n'est pas facilement assimilable par l'organisme (fer non-hémique des végétaux), soit en raison de la présence de fortes concentrations d'acide phytique (60 à 80%

du phosphore du grain) de la couche d'aleurone sous forme de complexe avec des minéraux (Saulnier, 2012). En effet, l'acide phytique forme des complexes stables et indigestibles avec les minéraux principalement les cations. Ce phénomène réduit fortement la disponibilité de ces nutriments (Agnes *et al.*, 2009).

### III.1.5. Vitamines

Les céréales sont considérées comme étant de bonnes sources en vitamine E et celle de la famille B (à l'exception de la vitamine B12). Cependant, le décorticage et le blutage en éliminent une bonne partie (Favier, 1989). Selon Saulnier (2012), les céréales complètes sont des sources intéressantes de thiamine, niacine, acide pantothénique et de biotine ; leur teneur en folates (acide folique ou B9) est en revanche faible.

Selon Favier (1989), à l'exception du maïs jaune et de certains mils qui contiennent des caroténoïdes actifs, les céréales n'ont pas d'activité vitaminique A ; la vitamine C fait défaut également.

Le maïs est la céréale la moins riche en vitamines du groupe B. En revanche, il renferme des caroténoïdes rouges, à action vitaminique A et des caroténoïdes jaunes sans action vitaminique ; ces 2 substances sont absentes dans les autres grains de céréales (Bensaid, 1973).

Le sorgho et le grain de mil complet sont également une source importante de vitamines B, concentrées dans les téguments de la graine (FAO, 1991).

### III.1.6. Inhibiteurs nutritionnels

Les inhibiteurs nutritionnels que renferment les grains de céréales sont principalement représentés par le groupe des composés poly-phénoliques, tels que les tanins, les phytates et des PNA, à différentes concentrations (Tableau 11).

Les composés phénoliques sont les produits très réactifs du métabolisme secondaire des plantes. Ils constituent une très large gamme de structures chimiques et sont fonction des espèces, localisés différemment dans les organes et les tissus (Saulnier, 2012) ou encore leur stade de développement (Macheix, 2006). Ils sont représentés dans les grains de céréales par les acides phénoliques, les alkyl résorcinols, les flavonoïdes (Manach *et al.*, 2004), les lignanes et les tannins (Adlercreutz et Mazur, 1997).

Tableau 11 : Facteurs antinutritionnels de quelques grains de céréales

Céréales	Facteurs antinutritionnels
Orge ( <i>Hordeum vulgare</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inhibiteur de la protéase ;</li> <li>▪ Phytohémagglutinines ;</li> <li>▪ Acide phytique ;</li> </ul>
Riz ( <i>Oryza sativum</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inhibiteur de la protéase ;</li> <li>▪ Phytohémagglutinines ;</li> <li>▪ Acide phytique ;</li> <li>▪ Facteurs oestrogènes ;</li> </ul>
Sorgho ( <i>Sorghum bicolor</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inhibiteur de la protéase ;</li> <li>▪ Cyanogènes ;</li> <li>▪ Acide phytique ;</li> <li>▪ Tannins ;</li> </ul>
Blé ( <i>Triticum vulgare</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inhibiteur de la protéase ;</li> <li>▪ Phytohémagglutinines ;</li> <li>▪ Acide phytique ;</li> <li>▪ Facteurs œstrogènes ;</li> <li>▪ Facteur de flatulence ;</li> <li>▪ Inhibiteur de l'amylase ;</li> <li>▪ Dihydroxyphénylalanine.</li> </ul>
Maïs ( <i>Zea mays</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inhibiteur de la protéase ;</li> <li>▪ Acide phytique ;</li> <li>▪ Facteurs oestrogènes ;</li> <li>▪ Inhibiteur de l'invertase.</li> </ul>

Source : FAO (1995)

La plupart de ces composés sont, selon Lullien-Pellerin (2014), retrouvés en plus grande abondance dans les tissus périphériques du grain (enveloppes, couche à aleurone et germe).

Les polyphénols sont majoritairement retrouvés sous forme liée aux polysaccharides des parois cellulaires bien qu'ils en existent également sous forme libre ou conjuguée à des sucres (Andersson *et al.*, 2014).

Certains PAN sont spécifiques des céréales particulières tel que les avenanthramides de l'avoine et les phyto-œstrogènes du seigle (Broekaert, 2011). Les tannins sont des composés polyphénoliques ; ils regroupent les tannins hydrolysables et les tannins condensés. Leurs effets sur la valeur nutritionnelle des grains de céréales ont fait l'objet de nombreux travaux. (Salunkhe *et al.*, 1982; Butler *et al.*, 1984; Salunkhe, Chavan et Kadam, 1990).

L'acide phytique, qui constitue la forme de réserve du phosphore de la plante, représente 0,5 à 3,4 % de la MS des principales matières premières végétales utilisées en alimentation animale (Crevieu-Gabriel, 1999). Raboy (2009) rapporte que dans les grains de céréales 75% du phosphore sont sous forme d'acide phytique (myo-inositol - acide phosphorique).

Les grains de céréales renferment également du phytate (sel d'acide phytique) dont la concentration varie assez peu d'une céréale à une autre (environ 0,2% MS) mais les proportions de phosphore végétal total varient fortement (de 50 à 85%) (Pointillart et Gueguen, 1992 ; Vaculova, 2012).

La teneur et la distribution des phytates dans les graines de céréales sont très variables. Dans les graines d'orge, de blé et de riz, les phytates sont majoritairement présents (80%) dans la couche d'aleurone et le son et sont faiblement représentés dans l'embryon. En revanche, dans les grains de maïs, les phytates sont surtout présents dans l'embryon et le scutellum (O'Dell *et al.*, 1972).

L'acide phytique présente de nombreuses propriétés anti-nutritionnelles, notamment, pour les animaux monogastriques. C'est l'anti-nutriment le plus important car il est présent dans la plupart des céréales et possède une forte capacité de chélater les ions métalliques (Nadeem *et al.*, 2010 ; Saulnier, 2012) et de réduire la disponibilité du phosphore.

Outre les tannins et l'acide phytique, les grains de céréales renferment également d'autres FAN de nature glucidique tels que les polysaccharides non amylacés (PNA) dont les plus courants incluent les  $\beta$ -glucanes, les arabinoxylanes et les fructanes (Classen et Bedford, 1991).

En conclusion, les grains de céréales sont caractérisés par leur richesse en amidon et une teneur moyenne en protéines ne dépassant pas 12% de MS. Ils constituent une source d'énergie importante (FEEDIPEDIA, 2017). Les grains nus possédant les valeurs énergétiques les plus élevées ont une proportion faible d'enveloppes et une forte proportion d'albumen (Merck, 2003). Les grains de céréales sont également des sources de fibres alimentaires et de micronutriments (vitamines, minéraux et composés phénoliques).

### III.2. Particularité du maïs

Au niveau mondial, les grains de céréales utilisés dans l'alimentation de la volaille sont souvent limités au maïs, principale source d'énergie en alimentation des volailles (Cothenet et Bastianelli, 1999) et à moindre degré au blé. Ces 2 céréales présentent l'avantage de présenter une valeur énergétique peu variable d'une année à une autre.

Selon Herbert (2017), le maïs est devenu la source énergétique incontournable du modèle alimentaire adopté dans le système intensif de la production avicole.

Le maïs, une céréale de choix, pourquoi ? Pourrait-elle être cultivée en Algérie ? Et qu'en est-il des autres cultures céréalières cultivées ?

Le maïs est cultivé dans des conditions de culture très variées allant du climat tropical au climat tempéré. Présent sur tous les continents, le maïs est adapté à tous les schémas de culture : de celui vivrier (cas de l'Afrique subsaharienne) au plus intensif (cas des Etats-Unis).

Selon la FAO (2017), le maïs est la culture la plus répandue dans le monde : 1053 millions de tonnes produits sur une surface de 160 millions d'hectares devant le blé et le riz.

Les zones à haut rendement dans le monde restent relativement limitées, elles se situent principalement aux Etats-Unis et en Europe de l'Ouest. Dans ces régions, le maïs est cultivé de façon intensive et est destiné essentiellement à l'alimentation animale et aux industries de transformation. Le maïs est également cultivé en Asie, en Afrique et en Amérique du Sud pour l'alimentation humaine (FAO, 2016).

De façon générale, 60% de la production de maïs sont destinés à l'alimentation animale. Cette céréale est la principale source d'énergie en alimentation animale, notamment celle des volailles (Cothenet et Bastianelli, 1999).

En effet, les grains de maïs se distinguent par leur valeur énergétique élevée, du fait de leurs teneurs élevées en amidon et en matières grasses, mais aussi de par la grande constance de celle-ci, que ce soit en fonction de l'année ou de la région de production (Métayer *et al.*, 1993 ; NRC, 1994).

Le grain de maïs est également caractérisé par sa faible proportion en cellulose (2,5%MS) et l'absence de facteurs antinutritionnels tels que les tanins. Il est riche en acide linoléique et en pigments xanthophylles (Smith, 1992). Cependant, la teneur en protéines du maïs est faible et cette céréale doit donc être accompagnée d'un complément azoté, notamment, le tourteau de soja. Son association avec celui-ci constitue « un système », du fait de leur complémentarité (Mvondo, 1986 ; Coutard, 2010).

Le maïs est devenu le grain de référence en matière de nutrition, notamment de la volaille, auquel sont comparées les autres céréales à haute teneur énergétique.

En effet, chez les poulets de chair, le maïs fournit environ 65% du total de l'EM nécessaire à leur croissance et à leur développement. En général, 2,6 kilos de maïs sont nécessaires pour produire 500 g de viande de poulet (Leibtag, 2008).

En Algérie, la production du maïs ne peut être envisagée compte tenu tant de la limitation des surfaces allouées à sa culture, que des faibles rendements observés. De plus, la culture de maïs est exigeante en eau alors que cette ressource est en voie de diminution (Akli, 2016). Pour répondre aux exigences du marché algérien en aliments de bétail, le besoin en surface cultivable de maïs serait de 200 000 à 300 000 ha (Belaid, 2016).

Toutefois, il demeure en Algérie la pratique de cultures telles que celle de l'orge qui en Espagne et les pays Scandinaves est incorporé dans les aliments de volaille en substitution quasi totale du maïs importé, moyennant l'addition de matières grasses, de complexes enzymatiques (Benabdeldjelil, 1999) ou encore le blé qui figure dans l'aliment des volailles en Europe, au Canada, en Australie, en Nouvelle-Zélande et en Russie Fédération (Noirot *et al.* 1998).

### **III.3. Cultures de céréales ayant un potentiel de développement en Algérie et leur utilisation en alimentation avicole**

La part prépondérante de l'apport énergétique alimentaire dans le prix de revient des volailles impose la nécessité de répertorier et caractériser les matières premières locales susceptibles de substituer du moins partiellement le maïs. En effet, l'inexistence de tables alimentaires locales, constitue une autre difficulté pour la formulation alimentaire. L'identification chimique et nutritionnelle de ressources notamment énergétiques locales permettrait de disposer d'une plus grande gamme de produits qui judicieusement utilisés, pourraient réduire le coût du poste « aliment » de la filière avicole.

D'autres céréales conventionnelles produites et disponibles à grande échelle, telles que l'orge, le triticale, l'avoine, le seigle, le sorgho et le millet, peuvent être utilisées dans l'alimentation des volailles. Leur utilisation actuelle semble en deçà de leur potentiel quantitatif et qualitatif alors qu'elles sont susceptibles de fournir la plupart des éléments nutritifs nécessaires à la croissance du poulet de chair et à la production d'œufs.

De plus ces cultures, notamment l'orge et le mil, sont des cultures stratégiques face à la problématique actuelle du réchauffement climatique (Rahal-Bouziane *et al.* 2016).

Selon le même auteur, la préservation de la diversité des ressources génétiques des espèces rustiques en général et leur valorisation est impérative pour le développement durable et constitue l'une des mesures pour l'adaptation aux changements climatiques.

#### ▪ Millets

Le millet, *Pennisetum sp* est une catégorie mal définie dans les tables occidentales. C'est une plante annuelle de la famille des poacées, elle se décline sous plusieurs espèces botaniques : *Pennisetum glaucum*, *Eleusine Setaria*, *Paspalum*, *Digitaria*, *Panicum miliaceum* L., etc. (FAO, 1995). Parmi ces espèces, le millet perlé [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] est le plus important.

En Asie, la culture du millet se limite à 2 pays, l'Inde et la Chine. En Afrique, la culture du millet est pratiquée dans un grand nombre de pays. L'Afrique est la seule région du monde où la production du millet est en progression.

Selon la FAOSTAT (2016), le millet perlé est la céréale la plus importante et la plus cultivée dans le monde parmi toutes les espèces de mil, suivie par le millet (*Setaria italica*), le millet commun (*Panicum miliaceum*) et le petit doigt (*Eleusine coracana*). Il se classe au 7<sup>ème</sup> rang des céréales avec une production de 28 millions à 32 millions de tonnes par an dont 95% proviennent d'Asie et d'Afrique (FAOSTAT, 2016 ; Taylor, 2016). L'Inde en produit à elle seule, 40% de la production mondiale (FAOSTAT, 2016).

Le millet est la céréale la plus résistante à la sécheresse ; il est cultivé dans les régions où la pluviosité se situe entre 150 et 800 millimètres (Bezançon *et al.* 1997) ; il est résistant à la sécheresse par rapport aux principales céréales (Devi *et al.*, 2014). Il s'adapte aux sols peu fertiles et fortement salins ou à faible pH (Sankar *et al.*, 2014). Le millet peut être cultivé avec succès dans des conditions environnementales où le maïs et le blé ne survivent pas (Baltensperger, 2002).

Dans les régions arides et semi-arides, cette céréale contribue à la sécurité alimentaire en raison de sa durabilité dans des conditions agro-climatiques défavorables (Ushakumari *et al.*, 2004). Elle est également utilisée comme source d'aliment pour animaux, grains pour les oiseaux et fourrages pour le bétail (Dahlberg *et al.*, 2011 ; FAOSTAT, 2014 ; Yadav *et al.*, 2016). En outre, le millet résiste aux parasites et aux maladies et il a une saison de croissance courte (Devi *et al.*, 2014).

La structure et la composition des grains de millet varient considérablement en fonction des facteurs environnementaux et génétiques (FAO, 1995). La forme, la taille, les proportions

et la nature de l'endosperme, du germe et du péricarpe, la présence et l'absence d'une sous-couche et la couleur du péricarpe sont tous génétiquement déterminés (Rooney et Murty, 1982) et (FAO/INPHO, 1995).

Le grain de millet est essentiellement constitué d'amidon dont la teneur varie de 62,8 à 70,5 % et celle de l'amylose de 21,9 à 28,8 % (Boudries-Kaci, 2017). Ses teneurs relativement élevées en matières grasses, en protéines, en fibres et en minéraux (Devos *et al.*, 2006 ; Taylor, 2016) le distinguent des autres grains céréales (Tableau 12).

Les grains complets sont une source importante de vitamines du complexe B qui sont surtout concentrées dans le son (Jaybhaye, 2014).

Le millet présente une teneur protéique se situant généralement entre 9 et 13 % mais qui peut varier et s'étaler de 6 à 21 % (Feedipedia, 2017).

Les principales fractions protéiques du millet sont les gluténines (16,4-19,2% MAT) avec une prédominance (22,8 - 31,7 % MAT) des prolamines (House *et al.*, 1995 ; Da Silva et Taylor, 2005) . Les protéines du millet sont de meilleure qualité que celles de la plupart des autres céréales (Taylor, 2016).

Les protéines du millet contiennent généralement des quantités plus élevées en acides aminés essentiels, en particulier la méthionine et la cystéine par rapport à celles du maïs, du riz, du blé et du sorgho (Govindaraj, 2011).

La teneur en lipides est généralement élevée (3 à 6%) pour les millets et dépasse celle de la plupart des autres céréales classiques. Selon Leader (2004) et Jaybhaye *et al* (2014), environ 75% des acides gras du millet sont de type insaturé et l'acide linoléique est en proportion particulièrement élevée (46,3%).

Les FAN du millet sont représentées par les poly-phénols, les tanins (concentrés dans le son), l'acide phytique et les phytates (Leader, 2004 ; Boncompagni, 2018) et l'acide oxalique (Leader, 2004). Toutefois, le grain de millet renferme peu de facteurs antinutritionnels comparés à d'autres grains de céréales. En effet, comparé au seigle et au sorgho, le millet perlé est relativement pauvre en tanins ; il contient néanmoins des saponines qui sont connues pour endommager la muqueuse du tube digestif (Jacob, 2015 a).

Tableau 12 : Composition chimique des grains de quelques céréales

Céréales	Protéine (%)	MG (%)	MM (%)	Fibre brute (%)	Amidon (%)	Energie (kcal/100 g)	Ca (mg)	Fe (mg)	Thiamine (mg) (B1)	Riboflavine (B2) (mg)	Niacine (B3) (mg)
Riz (brun)	7,9	2,7	1,3	1,0	76,0	362	33	1,8	0,41	0,04	4,3
Blé	11,6	2,0	1,6	2,0	71,0	348	30	3,5	0,41	0,10	5,1
Maïs	9,2	4,6	1,2	2,8	73,0	358	26	2,7	0,38	0,20	3,6
Sorgho	10,4	3,1	1,6	2,0	70,7	329	25	5,4	0,38	0,15	4,3
Millet chandelle	11,8	4,8	2,2	2,3	67,0	363	42	11,0	0,38	0,21	2,8
Mil, Eleusine	7,7	1,5	2,6	3,6	72,6	336	350	3,9	0,42	0,19	1,1
Millet des oiseaux	11,2	4,0	3,3	6,7	63,2	351	31	2,8	0,59	0,11	3,2
Millet commun	12,5	3,5	3,1	5,2	63,8	364	8	2,9	0,41	0,28	4,5
Petit mil	9,7	5,2	5,4	7,6	60,9	329	17	9,3	0,30	0,09	3,2
Mil, Moha du Japon	11,0	3,9	4,5	13,6	55,0	300	22	18,6	0,33	0,10	4,2
Millet indigène	9,8	3,6	3,3	5,2	66,6	353	35	1,7	0,15	0,09	2,0

Sources: Hulse, Laing and Pearson, 1980; United States National Research Council/National Academy of Sciences, 1982; USDA/HNIS, 1984; FAO, 1995 <http://www.fao.org/docrep/t0818f/T0818F08.htm>

Tableau 13 : Quelques résultats relatifs à l'utilisation des grains de millet en alimentation avicole

Auteurs	Année	Taux d'incorporation	Résultats	
			Poulet de Chair	Poule Pondeuse
Singh et Barsaul	1976	100%	Augmentation du poids vif chez le coquelet	–
Sharma <i>et al</i>	1979	37%	Meilleures performances qu'avec le maïs ou le sorgho	–
Mohan ravi kumar <i>et al.</i>	1991	60%	–	Aucune influence sur : la production d'œufs, l'ingestion, l'indice de consommation ou encore le
Korane <i>et al.</i>	1991	Jusqu'à 55 %	–	Baisse de production d'œuf
Collins <i>et al.</i>	1997	60%	–	Sans réduction des performances de stratification
Purushothaman <i>et al</i>	1997	–	–	Sans réduction des performances
Abd-Elrazig et Elzubeir	1998	60%	–	Sans réduction des performances de stratification
Singh and Perez-Maldonado	1999	40-60% de la variété Katherine et le millet sibérien (Mils)	–	Sans baisse de performances pour les pondeuses.
Davis <i>et al</i>	2003	50	SAP	–
Rag <i>et al.</i>	2003	25 ou 75% Millet Perlé	Améliorations significatives de la croissance et de l'efficacité alimentaire.	–
Hidalgo <i>et al.</i>	2004	20%	SAP	–
Rama Rao	2004	✓ Mil tendre : 100% ✓ Mil finger ou millet nerle	✓ SAP ✓ Baisse de performances	–
Filardi <i>et al.</i>	2005	Jusqu'à 51%	–	Réduction linéaire de la consommation alimentaire, de la production et du poids
Manwar <i>et al.</i>	2009	75%	Réduction des rendements	–
Tornekar <i>et al.</i>	2009	25% à 50%	SAP	–
Clement	2010	100% Millet chandelle	Effets similaires sur le poids vif, la prise alimentaire et la conversion alimentaire	–
Mehri <i>et al</i>	2010	100 % Millet chandelles	Baisse des paramètres de production	Effet négatif
		75% Millet chandelle	–	Sans nuisance aux performances des poules ou à la qualité de leurs œufs
Baurhoo	2011	100%	–	Améliorations significatives de la croissance et de l'efficacité alimentaire
Baurhoo <i>et al</i>	2011	100% Millet perlé	Amélioration de la conversion du poids corporel et des aliments plus efficace qu'à 25, 50 ou 75% d'inclusion du mil	–
Kumar	2015	75% Millet chandelle	✓ SAP ✓ une bonne qualité de viande ✓ Bon rendement à l'abattage	–
Cisse <i>et al</i>	2017	100%	SAP	SAP
Tadele <i>et al</i>	2018	75%	–	Augmentation de la production d'œufs

Rq : SAP : Sans affecter les performances

Le millet chandelle se caractérise par de faibles teneurs en FAN et présente ainsi un intérêt particulier en nutrition avicole.

En Algérie, le millet a été localisé, en 1988 par Bounaga et Brac De la Perrière dans le Sahara algérien, au niveau des Oasis situés à Adrar, Béchar et El-Oued. Selon Boudries-Kaci (2017), les régions sud de l'Algérie, limitrophes des pays du Sahel, comptent un nombre appréciable de cultivars de millet perlé.

Les travaux récents dans la région d'Adrar ont permis d'inventorier et de caractériser quelques cultivars de mils Algériens (Rahal-Bouziane *et al.*, 2003 ; Rahal-Bouziane et Kharsi, 2004 ; Djabali, 2005 ; Rahal-Bouziane, 2006). Ils possèdent la particularité de pousser dans des conditions de température élevée, de sols parfois très salés et des eaux d'irrigation souterraines connues aussi pour leur forte salinité.

De par leur importance agricole qui découle de leur tolérance aux conditions météorologiques extrêmes, les millets pourraient être cultivés avec de faibles intrants dans des zones à faibles précipitations. Ses grains, grâce à des niveaux élevés d'énergie métabolisable et de protéines, à leur profil en acides aminés, et leur richesse en fibres et en lipides, sont nutritionnellement supérieurs à beaucoup d'autres grains de céréales (Boncompagni, 2018).

Cependant, en Algérie, aucune donnée statistique relative aux surfaces cultivées ou à la production de millet n'est disponible. Il constitue une céréale utilisée à l'échelle familiale à des fins de subsistance, mais également pour l'alimentation des volailles de la basse-cour.

Plusieurs études soulignent l'intérêt de l'utilisation des grains de millet en substitution au maïs chez la volaille, mais les résultats qui en découlent sont hétérogènes (Tableau 13). En effet, pour Kumar *et al.* (1991) l'incorporation du millet à 60% dans l'alimentation de la poule n'a aucune influence sur la production d'œufs, l'ingestion, l'indice de consommation ou encore le poids vif des volailles. En revanche, Korane *et al.* (1991) observent une diminution de la production d'œufs pour des niveaux d'incorporation dans l'aliment de l'ordre de 55%.

Mohan *et al.* (1991), Collins *et al.* (1997) et Abd-Elrazig et Elzubeir (1998) rapportent que le millet perlé peut être incorporé dans les régimes des volailles jusqu'à 60% sans aucun effet indésirable sur les performances de production.

Mehri *et al.* (2010) rapportent que le remplacement total du grain de maïs par du millet chandelle réduit considérablement tous les paramètres de production chez la pondeuse. En revanche, une substitution limitée à 75% n'a aucun effet délétère sur les performances des poules et la qualité de leurs œufs.

Les travaux de Gohl (1982) et Cisse *et al* (2003) indiquent que le mélange mil-maïs ou mil-sorgho aboutit à de meilleures performances que lorsque l'une ou l'autre de ces deux céréales est utilisée seule.

### ▪ Sorgho

Le sorgho (*Sorghum sp.*), proche du maïs du point de vue phylogénétique, est connu sous diverses appellations. Il est l'une des principales cultures céréalières des régions semi-arides destinée à l'alimentation humaine, animale et à usage industriel. Sa tolérance à la sécheresse et aux conditions salines en font une ressource alimentaire précieuse de ces régions (Fahmy *et al.*, 2010).

Le sorgho est la cinquième céréale la plus produite au monde. En 2011, 54 millions de tonnes de sorgho ont été produites, dont 762 697 tonnes de semences. Sous forme de grains ou de plante entière, le sorgho présente de nombreux débouchés (alimentation animale ou humaine et biomasse énergétique). Il constitue un composant de l'aliment des volailles dans plusieurs pays, notamment en Asie (Heuzé *et al.*, 2012).

Dans le contexte actuel de changement climatique global, la culture de cette céréale va probablement évoluer en raison de son adaptabilité aux températures élevées, à la rareté de l'eau et aux conditions salines (Sanchez *et al.*, 2002; Brouk et Bean 2011).

La majeure partie des glucides du sorgho est représenté par l'amidon. Les types de sorgho d'endosperme ordinaires contiennent 23 à 30% d'amylose. Néanmoins, les variétés paraffineuses contiennent moins de 5% d'amylose (Leader, 2004). Les teneurs en fibres alimentaires du sorgho varient de 6,5 à 7,9 % et 86,2 % de cette fraction sont insolubles (Waniska et Rooney, 2000).

La teneur en protéines du sorgho varie généralement de 11 à 13%, mais des valeurs parfois plus élevées sont signalées. Cette variabilité élevée est en rapport avec les conditions agro-climatiques dans lesquelles est pratiquée la culture et qui sont connues pour affecter la composition du grain (Dargo, 2017).

L'influence du génotype sur la composition en protéines du sorgho est plus forte que celle des conditions environnementales (House *et al.*, 1995). Les prolamines (33,7-38,3% MAT) constituent les principales fractions protéiques de cette graine de céréale, suivies des gluténines (5,2-8,4% des protéines totales) tel que rapporté par Da Silva et Taylor (2005).

A l'exception de plusieurs nouvelles variétés de sorgho à haute teneur en lysine, la protéine de grain est notoirement déficiente en lysine (Leader, 2004 ; Dargo, 2017).

La teneur en matière grasse du sorgho est en moyenne de 3%, elle est supérieure à celle des grains de blé et de riz. Selon Rooney (1978) et Leader (2004), la composition en acides gras est similaire à celle de l'huile de maïs, avec des concentrations élevées en acides linoléique (49%), oléique (31%) et palmitique (14%).

Les composés phénoliques du sorgho sont représentés par des acides phénoliques, des flavonoïdes et des tanins en proportions diverses selon la variété considérée (Taylor, 2016). Les glycosides cyanogéniques sont également présents dans la plupart des variétés de sorgho (Leader, 2004). Les effets antinutritionnels des composés phénoliques, notamment les tanins, réduisent significativement la digestibilité de l'énergie et des protéines chez les volailles si leur concentration est supérieure à 2,6 g/kg, soit 0,26 % (Mc Nab et Boorman, 2002). Les sorghos dits « pauvres » sont cultivés en Afrique (Anselme, 1987).

Le grain de sorgho est une source énergétique intéressante à introduire dans les régimes à base de volaille en raison de sa composition nutritionnelle très similaire à celle du maïs (Fernandes *et al.* 2013). Les tables de référence (INRA-AFZ, 2004) donnent une valeur énergétique moyenne de 3 730 kcal/kgMS chez le poulet, soit + 100 kcal/kg MS par rapport au maïs (3 630 kcal/kgMS). Le sorgho occupe le second rang parmi les céréales les plus utilisées en élevage intensif de poulets de chair, de dindons et de poules pondeuses (Beyer, 2014). Son utilisation en alimentation avicole est courante dans plusieurs pays asiatiques (Heuzé *et al.* 2012). En effet, selon Vilarino *et al.* (2010), pour la volaille, le sorgho est la céréale la plus énergétique.

D'après Jacob *et al.* (1996) et Fernandes *et al.* (2013), l'utilisation du sorgho en alimentation avicole aboutit à des performances similaires à celle d'un régime à base de maïs. Néanmoins, selon les variétés utilisées, une réduction de la consommation alimentaire et de la vitesse de croissance (Jacob et Parsons, 2013) peuvent être observée en raison de la présence de tannins et de phytates qui ont pour conséquence une réduction des performances de production chez l'oiseau, via leur effet sur la digestibilité de l'amidon et de l'azote (Selle *et al.*, 2010).

Selon Nga (2009) et Vilarino *et al.* (2010), le sorgho, particulièrement celui pauvre en tanins, peut remplacer le maïs dans la ration alimentaire destinée aux poulets de chair.

Murta *et al.* (2004) ne signalent aucun effet dépressif sur les paramètres zootechniques (le poids vif moyen, la consommation alimentaire, le taux de conversion alimentaire et la viabilité) des jeunes poulets (âgés de 8 à 45 jours) alimentés avec des régimes contenant des grains de sorgho.

Aux stades de croissance et de finition Vilarino *et al.* (2011), observent le maintien des performances des poulets recevant un régime à base de 30 et 40 % de sorgho.

Selon Boudries-Kaci (2017), le sorgho cultivé en Algérie appartient à une seule espèce qui est *sorghum bicolor (L.) Moench*. Le nom de Tafsout est utilisé au Tidikelt, abora (sorgho blanc) et talak (sorgho pigmenté) dans la région de l'Ahaggar. La culture du sorgho grain est traditionnelle et a occupé de tout temps une place non négligeable dans la sole.

Actuellement, la culture s'est raréfiée. Cependant, les régions sud de l'Algérie, limitrophes des pays du Sahel, comptent un nombre appréciable de cultivars de sorgho ayant la particularité de pousser dans des conditions de chaleur, et de salinité élevée des sols et des eaux d'irrigation (Rahal, 2016).

#### ▪ Triticale

Le triticale (*Triticale hexaploide L*) est une céréale hybride, résultant d'un croisement entre le blé (*Triticum aestivum L*) et le seigle (*Secale cereale L*), qui a fait l'objet d'un développement intensif en tant que nouvelle plante céréalière (Korver, 2004).

Il pourrait constituer une alternative très intéressante pour accroître la production céréalière au niveau mondial (Saulius *et al.* 2016).

La France est le 3<sup>ème</sup> producteur mondial de triticale, derrière la Pologne et l'Allemagne (INRA-Flickr, 2016).

Sur le plan agronomique, le triticale présente un excellent potentiel de productivité, aussi élevé que celui du blé tendre. De plus, il est mieux adapté aux conditions agronomiques difficiles (Vermorel et Bernard, 1979 ; Laroche, 1981).

Il allie potentiellement les caractéristiques nutritionnelles du blé à la rusticité du seigle (résistance aux maladies et au froid).

Sa composition chimique très variable s'apparente à celle du blé, tel que indiqué dans le tableau 14 (MacIsaac *et al.*, 2008 ; Feedipedia, 2017).

Tableau 14 : Composition chimique (%MS) des grains de blé et de triticales

	MS	Protéines	Amidon	MM	MG	CB	EB
Blé	87	12,6	69,1	1,8	1,7	2,6	4347
Triticale	87,1	11,7	67,6	2,1	1,5	2,7	4323

Source : Feedipedia, 2017

Cette variabilité, et notamment celle de ses caractéristiques azotées, est fonction de l'origine génétique, des conditions culturales et de la productivité. La teneur en protéines des lignées de triticales varie de 10 à 20%MS, valeur plus élevée que celle du blé (Myer, 2002 ; Boros, 2002). La composition en acides aminés des protéines du triticales est plus proche de celle du seigle que de celle du blé. Ainsi, à teneur en MAT identique, le triticales est plus riche en lysine que le blé ; il fournit 20% de plus de lysine que le blé (Laroche, 1981 ; Vilarino *et al.*, 2005).

Le triticales contient autant de phosphore que le blé, mais plus disponible par les monogastriques, grâce à une plus grande activité de l'enzyme permettant d'hydrolyser le phosphore phytique. Cette meilleure disponibilité du phosphore a un impact important sur la valeur alimentaire de cette céréale et sur la mise en place de stratégies alimentaires aptes à réduire l'impact environnemental de l'élevage de volaille.

Il présente une activité phytasique intermédiaire entre celle du blé et celle du seigle, respectivement 770, 450 et 5300 UP/kg MS qui diffère entre variétés. Certaines variétés de triticales ont une viscosité aussi basse que celle du blé ; le choix de la variété doit être donc, adapté au débouché (INRA-AFZ, 2004).

Comme le blé et le seigle, le triticales renferme des arabinoxylanes (Malthlouthi *et al.*, 2002 a). Selon Levy et Reichmann (2011) ; Dekic *et al.* (2012), le triticales présente plusieurs atouts nutritionnels, notamment son apport élevé en lysine (3,5%Protéines), en phosphore disponible (3,9g/kg MS) ; en potassium (5g/kg MS) ; en lysine (acide aminé indispensable pour les animaux monogastriques) et une forte valeur énergétique (4323kcal/ kg MS). C'est

la raison pour laquelle c'est une céréale économiquement intéressante pour l'alimentation animale.

Les atouts nutritionnels du triticales, son rendement plus élevé comparativement au blé et au seigle (Leeson et Summers, 1997), et le fait qu'il ne soit pas panifiable, en font un substitut potentiel au maïs très intéressant pour les aliments de tous les animaux, notamment ceux destinés à la volaille.

Les premiers travaux ont indiqué que l'utilisation du triticales en remplacement au maïs (Wilson et McNab, 1975 ; Leeson et Summers, 1987 ; Proudfoot et Hulan, 1988) et au blé (Sell, 1962), entraîne la réduction du poids vifs des poulets et une diminution de la performance de ponte chez la pondeuse). Hermes et Johnson (2004) observent les mêmes résultats, mais ils les attribuent à l'effet variétal. En effet, en alimentation du poulet de chair, l'utilisation du triticales s'est avérée intéressante (Braggy et Sharby, 1970 ; Gatel et al., 1985 ; Vieira et al., 1995).

Des travaux plus récents (Tableau 15), ne rapportent pas de détériorations de performances chez le poulet de chair alimentés avec des régimes à base de triticales à des niveaux d'incorporation allant jusqu'à 70 %.

En outre, Jondreville *et al.* (2007) rapportent que l'introduction de 45% de triticales présentant une activité phytasique dans un aliment permet de réduire la supplémentation de phosphore sous forme de phosphore monocalcique de 0,6 à 0,8 g / kg d'aliment.

Les résultats rapportés par Vilarino et al. (2005) et ceux par Djekic et al. (2012) montrent que les triticales utilisés sont mieux valorisés chez le poulet de chair que des blés à même teneur en protéines et de niveau de viscosité similaire.

Selon Vialrino et al. (2005), chez le coq, le résultat est inversé entre blé et triticales, mais les valeurs d'énergie sont plus élevées que chez le poulet. Contrairement au cas du blé, la viscosité élevée du triticales n'a pas réduit sa valeur énergétique chez le poulet. Aucun effet négatif de la viscosité n'est observé ni chez le coq, ni chez le poulet.

Antoine *et al.* (2002) proposent 2 formules «pré ponte» et «ponte» où le triticales a été incorporé respectivement à 7% et à 10%. En 2011, Ludovic et Ents recommandent l'introduction du triticales dans l'aliment de la poule pondeuse à des taux n'excédant pas les 21%.

Tableau 15 : Quelques résultats relatifs à l'utilisation des grains de triticales en alimentation avicole

Auteurs	Année	Taux d'incorporation (%)	Observations	
			Chair	Pondeuse
Vohra et al,	1991	30% à 50%	SAP le triticales pourrait être un meilleur substituant du maïs dans l'alimentation du poulet de chair	-
Belaid	1994		SAP	SAP
Mossab et Achouri	1997	10 et 20	SAP	-
Jones & Taylor	2001		SAP	-
Karaalp et Ozsoy	2001	+ 30	Réduction des rendements	-
Chapman <i>et al</i>	2005	100	aucun effet néfaste sur la productivité des poulets de chair et / ou des poules pondeuses	
Vilarino <i>et al</i>	2005	70	SAP	-
Jøzefiak <i>et al</i>	2007		Poids corporel élevé vs autres céréales	-
Macisaac <i>et al</i>	2008	45	SAP	-
Santos <i>et al</i>	2008		Poids corporel élevé vs autres céréales	-
Métayer <i>et al</i>	2011	Poulet Label (6semaines)	Valorisent bien l'énergie du triticales avec une viscosité jéjunale élevée	-
Djekic <i>et al</i>	2012	18	SAP, avec de meilleures performances comparées au blé	-
Moharrery <i>et al</i>	2015	50%		-
Saulius <i>et al</i>	2016	15	La variété Agendus a une composition chimique appropriée aux monogastrique SAP et physiologie digestive	-

Rq : SAP : Sans affecter les performances

Cependant, malgré les conclusions contradictoires rapportées dans la littérature, Dekic *et al.* (2011) ; Djekic (2012) et ARVALIS (2015) affirment que les atouts nutritionnels du triticales (source d'énergie élevée et relative richesse en lysine) lui permettent d'avoir une place particulière dans l'alimentation des volailles.

A l'échelle mondiale, le triticales est actuellement largement utilisé en alimentation avicole (poulet de chair ou poule pondeuse) dans le monde (Djekic, 2012), alors qu'en Algérie, cette céréale n'a fait à notre connaissance l'objet que de rares travaux dont celui de Mossab *et al.* (1997).

Malgré l'introduction en Algérie de la culture du triticales en 1980, celle-ci pas connu de développement perceptible. Selon l'INRA (2006), 9 variétés sont cultivées et commercialisées en Algérie. Par sa rusticité et son adaptation aux conditions bioclimatiques algériennes, le triticales constitue l'une des espèces les plus prometteuses pour la production de fourrage et de grains.

#### ▪ Orge

L'orge est une plante annuelle de la classe des monocotylédones qui appartient à la famille des Poacées (graminées) et au genre *Hordeum*. Elle comprend 31 espèces, mais seule l'orge vulgare (*Hordeum vulgare*) est couramment cultivée comme céréale pour l'alimentation animale et humaine (Baik et Ulrich, 2008).

A l'échelle mondiale, l'orge est largement cultivée ; sur le plan de la production, elle se classe au 4ème rang derrière le maïs, le riz et le blé. L'Union européenne est le plus gros producteur (144 Mt), suivie de la Russie et de l'Ukraine (FAOSTAT, 2014).

Sur le plan agronomique, un grain d'orge entier est constitué de 78 à 83 % de glucides, dont 60 à 64 % d'amidon et de 0,4 à 2,9 % de glucides simples comme le glucose ou le fructose. Sa teneur moyenne en protéines brutes est de 12% MS, elle varie de à 15 % MS, en fonction de la variété et des conditions de production (Griffey *et al.* 2010), avec un contenu en prolamines représentant environ la moitié des protéines totales (Jacob, 2015). La protéine de l'orge est, toutefois, limitée par sa pauvreté en lysine,

L'orge renferme de 2 à 3 % de lipides, dont le tiers environ est situé dans le germe, sa concentration en fibres brutes est en moyenne de 5%MS en (FEEDIPEDIA, 2017). Sa teneur en acide linoléique est nettement inférieure à celle du maïs et à celle d'autres céréales (Benabdeldjelil, 1999).

Les principaux facteurs antinutritionnels des orges sont les  $\beta$ -glucanes, polysides solubles non amylacés. Leurs concentrations dans l'orge dépendent du cultivar, des conditions de croissance, de la situation géographique, des conditions de récolte et des conditions de stockage (Jacob et Pescator, 2012). Selon Benabdeldjelil (1999), les orges des pays du Maghreb ont une teneur moyenne en  $\beta$ -glucanes de 3,5 % allant de 1,9 à 5,3% MS.

L'orge contient également de l'acide phytique. Ce composé lie le phosphore pendant la digestion, ce qui réduit sa disponibilité pour l'animal. Des variétés d'orge à faible teneur en acide phytique ont été sélectionnées, ce qui réduit les besoins en phosphore supplémentaire dans les régimes à base de volaille (Jacob, 2015b).

L'orge est traditionnellement utilisée dans les élevages avicoles de type fermier. Du fait de son taux en protéine supérieur à celui du maïs, sa disponibilité, et son coût en général attractif, cette céréale présente un intérêt certain en alimentation avicole.

La valorisation de l'orge par *Gallus gallus* dépend de plusieurs facteurs, dont les principaux sont le niveau de son incorporation dans l'aliment, l'addition éventuelle d'enzymes, l'âge et le stade d'élevage de la volaille.

Selon Jacob (2015b), l'orge est à introduire dans l'aliment volaille avec précaution en raison de la quantité de polysaccharides non amylacés (NSP) qu'il contient.

Selon la littérature (Tableau 16), l'inclusion de l'orge a été traditionnellement limitée à 20 ou 30% dans les régimes alimentaires destinés aux volailles évoluant dans un élevage de type intensif.

De tels régimes alimentaires se caractérisent par une faible valeur énergétique (2800Kcal), un taux élevé en fibres ainsi que la présence d'éventuelles substances anti nutritionnelles, tel que le  $\beta$ -glucanes peu digestes qui augmentant ainsi la viscosité du digesta, réduisent la digestibilité des protéines (Almirall *et al.* 1995). Ce profil explique le retard significatif de la croissance et la baisse de l'efficacité alimentaire observée.

Malthlouthi *et al.* (2002) précisent de plus que l'inclusion d'orge dans les régimes des poulets de chair entraîne une prolifération intestinale significative de quelques groupes bactériens (d'E. Coli et de Lactobacilles) qui diminuent les performances de l'oiseau.

Adams (2001) rapporte la pratique de l'addition de matières grasses aux régimes à base d'orge afin d'atteindre les niveaux énergétiques élevés requis pour des performances satisfaisantes.

Tableau 16 : Quelques résultats relatifs à l'utilisation des grains d'orge en alimentation avicole

Auteurs	Année	Taux d'incorporation Sans addition d'enzymes	Observations	
			Chair	Pondeuse
Larbier et Leclercq	1992	limitée à 20 ou 30%	la croissance peut être significativement retardée et l'efficacité alimentaire abaissée	/
Fernandez et Matas	2003	/		/
Drogoul <i>et al.</i>	2004	limitée à 20 ou 30%		/
Beha	1992	40%,	en stade finition, donne de bonnes performances	/
Bamouh	1999	L'inclusion de 15, 20 ou 25% d'orge sans addition d'enzyme	Donne lieu à des niveaux de performances comparables à ceux de lots ayant 0 à 10% d'orge	/
		Supérieure < 30%	une diminution du poids vif et une augmentation de l'indice de consommation	Baisse de la production sans affection du poids de l'œuf
Biggs et Parssons	2009	20%	n'a eu aucun effet négatif sur le taux de croissance	/
		35%	Réduction de croissance et l'efficacité alimentaire	/
Jeroch et Danicke	1995	/	détériorer les performances de croissance, en particulier chez les jeunes oiseaux	/
Brae <i>et al</i>	1997	Jusqu'à 30%	les aliments des adultes est sans incidence négative sur la croissance	/
l'ITELV	2011	20% et 25%, respectivement pour les phases croissance et finition.	Sans incidences négatifs	/

Il est généralement recommandé de ne pas utiliser d'orge non supplémentée en matières grasses dans les régimes de démarrage et de limiter son utilisation à 20% dans les régimes de volaille (Jacob, 2015 b). L'orge convient mieux aux régimes de ponte qu'aux poulets de chair en raison de sa teneur plus élevée en fibres et de sa valeur EM moyenne (Blair, 2008).

Selon le même auteur, une forte proportion d'orge peut être incluse dans le régime ponte sans nuire à la production d'œufs, bien que l'efficacité alimentaire soit inférieure à celle des régimes à haute teneur énergétique. Cependant, il convient de prendre en compte la faible teneur en acide linoléique qui pourrait réduire la taille des œufs.

Blair (2008) précise que la valeur nutritive de l'orge nue est comparable à celle du blé et du maïs chez la poule pondeuse adulte. Elle est au moins équivalente au blé et meilleure que celle de l'orge conventionnelle. Elle est généralement introduite dans le régime alimentaire des pondeuses à des taux de 30%. Quant à l'orge maltée, elle peut remplacer jusqu'à 30% du maïs sans effets délétères sur les performances (Haftu kebede *et al.*, 2015).

Le recours à des procédés technologiques réduit l'effet négatif des FAN de l'orge et permet son incorporation à des taux plus élevés dans l'aliment des volailles

La supplémentation des enzymes aux régimes à base d'orge remonte à une cinquantaine d'année (dès 1979 par Piton) plusieurs travaux se sont enchaînés par la suite : Blum (1980), Campbell (1984), Brufau (1990) et Bedford et Partridge (2010). Les enzymes utilisées sont principalement des  $\beta$ -glucanases (Bamouh, 1999). Leur supplémentation aux régimes à base d'orge améliore les performances de croissance des poulets de chair (Brenes, 1993 ; Svihus, 1997 ; Gracia, 2003 ; Jozefiak, 2006 ; Saki, 2010 ; Jacob, 2015 b) et des poussins Leghorn (Brenes, 1993 ; Marquardt *et al.*, 1994) donnant des performances comparables à celle obtenues avec le maïs (Marquardt *et al.*, 1994). Selon Jacob et Pescator (2012), l'utilisation d'enzymes permet la réduction de viscosité intestinale et l'amélioration de la valeur nutritive de l'orge.

Ces mêmes auteurs précisent que les régimes à base de cultivars d'orge présentant des niveaux de  $\beta$ -glucanes très différents entraînent des performances de croissance similaires lorsqu'ils sont supplémentés en enzymes. Ces dernières améliorent les performances du poulet de chair lorsque des cultivars d'orge à haute et faible viscosités sont utilisés. Néanmoins, la réponse la plus importante est observée avec les régimes renfermant des cultivars d'orge à viscosité élevée.

Il est à signaler toutefois que certains travaux dont ceux de Brenes *et al.* (1993) et Francesch (1995) n'ont rapporté aucun effet de la supplémentation de l'enzyme au régime à

base d'orge sur les performances de la poule pondeuse, ni sur la qualité de l'œuf, alors que, Torki *et al.* (2016) observent une amélioration des performances.

Les résultats des travaux relatifs aux performances de la volaille alimentée avec des régimes à base d'orge et supplémentés en enzymes sont contradictoires. La variété de l'orge, la nature des autres composants de la ration, la concentration énergétique des aliments, les caractéristiques des matières grasses du régime, la nature et la concentration d'enzymes ajoutées sont selon Bamouh (1999) les principaux facteurs de variation des performances enregistrées.

En Algérie, la culture des orges est généralement menée en milieu semi-aride, ce qui induit une composition chimique différente des orges cultivées en milieu humide tel que les orges européennes. Les orges algériennes cultivées appartiennent presque exclusivement à l'espèce *Hordeum tetrastichum* L. (orge carrée ou escourgeon d'Afrique) (Rahal-Bouziane, 2016).

D'après cet auteur, suite à une activité de sélection généalogique, plusieurs variétés d'orge ont été sélectionnées, dont les orges I.A.A. 42 et Saïda 183, l'orge à 6 rangs 839, avec l'homologation des variétés Saïda et Tichedrett. Selon Arbouche *et al.* (2008), les variétés d'orge européennes importées ont des valeurs nutritives moins importantes que celles des variétés locales.

Les travaux menés par Beha (1992) mettent en évidence que l'introduction de l'orge dans la ration du poulet de chair, à un niveau de 40% en stade finition, donne de bonnes performances. D'autres résultats des essais menés en Algérie, notamment par l'ONAB et l'ITELV, montrent la possibilité d'incorporation de l'orge sans additifs enzymatiques dans l'aliment du poulet de chair à des taux atteignant les 20% et 25% respectivement pour les phases de croissance et finition (Balamane et Boudina, 2011).

# **CHAPITRE 3**

**UTILISATION DIGESTIVE ET VALEUR NUTRITIONNELLE CHEZ**  
***Gallus-gallus***

Le rendement optimal des volailles élevées pour la production de chair ou des œufs est en partie en rapport avec la qualité des aliments ingérés. L'efficacité de la digestion et de l'absorption des nutriments conditionnent fortement la valeur nutritionnelle des aliments.

### **I. Site de la digestion**

Les volailles présentent de nombreuses particularités anatomiques et physiologiques par rapport aux mammifères. Elles sont dotées d'une adaptation morphologique et fonctionnelle de la plupart des organes et plus particulièrement de l'appareil digestif.

Les caractéristiques anatomiques et histologiques fonctionnelles du tractus gastro-intestinal aviaire sont essentielles à l'efficacité de conversion des aliments (De Verdal *et al.*, 2010)

Tel que indiqué par la figure 2, l'appareil digestif du poulet est composé d'un tube digestif composé de différents organes : cavité buccale, œsophage, jabot, estomac, intestins et de glandes annexes (foie, pancréas et glandes salivaires). Les particularités spécifiques aux oiseaux sont la présence d'un bec, la division de l'estomac en 2 parties et l'originalité de sa partie distale (le cloaque) dans lequel aboutissent à la fois le rectum, les voies urinaire et génitale ; elles distinguent l'appareil digestif du poulet de celui des mammifères (Larbier et Leclerq, 1989).

Chez la volaille, les lèvres sont remplacées par un bec composé de 2 parties : la maxille et la mandibule et il est constitué de 2 étuis cornés qui couvrent les mandibules et qui témoignent d'un régime granivore. La cavité buccale est dite aussi bucco-pharynx en raison de l'absence de voile du palais et de l'épiglotte (Larbier et Leclerq, 1989), ne renferme pas de dents (Alamargot, 1982 ; Drogoul *et al.*, 2004 a).

Chez l'oiseau adulte, les sucs salivaires sont riches en mucus qui assurent à la fois la lubrification du bol alimentaire pour faciliter son passage dans l'œsophage et l'humidification permanente de la cavité bucco-pharyngée.

#### **■ L'œsophage et le jabot**

L'œsophage est décrit par Toutain *et al.* (2006), comme étant un canal reliant la cavité pharyngienne au gésier et permettant le transit du bol alimentaire. Il est délimité par 2 sphincters : le sphincter œsophagien supérieur et le sphincter œsophagien inférieur (Toutain *et al.*, 2006). Il contient un diverticule œsophagien (une dilatation) : le jabot, dont l'épithélium est riche en glandes à mucus ; cet organe est le siège de stockage préalable des aliments.

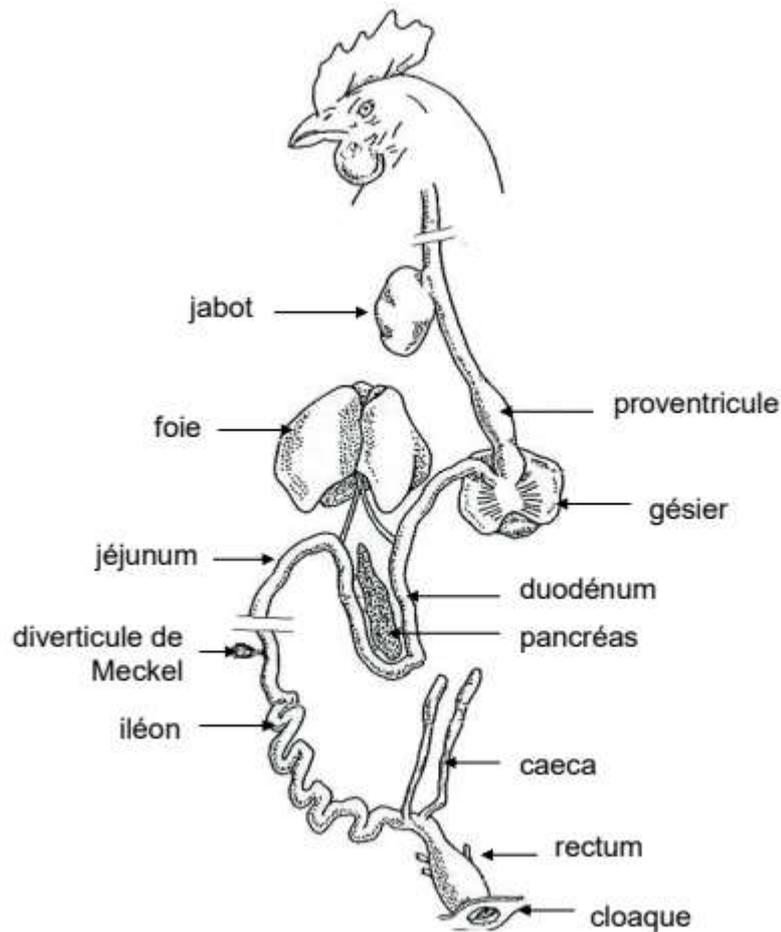


Figure 2 : Appareil digestif de *Gallus-gallus* (Gadoud *et al.*, 1992)

Le jabot joue un rôle dans le contrôle de la prise alimentaire (Larbier et leclercq, 1989), dans la régulation du transit digestif et assure l'humidification des aliments *via* le mucus sécrété (Gadoud *et al.*, 1992). Il est plus ou moins impliqué dans la digestion en fonction du mode d'alimentation : à volonté ou non (Klasing, 1998a).

#### ■ L'estomac

Selon Klasing (1999) et Toutain *et al.* (2006), l'estomac du poulet comprend deux poches, anatomiquement et physiologiquement distinctes : le ventricule succenturié (ou le pro-ventricule) et le gésier.

- ✓ Le pro-ventricule représente l'estomac glandulaire et a une activité chimique. C'est un renflement fusiforme dont la paroi interne très épaisse, est formée de lobules dont chacun constitue une glande. Sa muqueuse est très riche en glandes à mucus, sécrétant à la fois de l'acide chlorhydrique et la pepsine ; le pro-ventricule débouche dans le gésier.

- ✓ Le gésier est un organe entièrement musculaire où s'effectuent le broyage et le malaxage du chyme (MC Lelland, 1990 ; Denbow, 2000). Il est séparé du pro-ventricule et du duodénum respectivement par l'isthme et le pylore.
- L'intestin grêle est un tube d'environ 1,2 m de longueur qui fait suite au pylore. Il est conventionnellement divisé en 3 parties : le duodénum (du pylore jusqu'à la portion distale de l'anse duodénale), le jéjunum (de la portion distale de l'anse duodénale jusqu'au diverticule de Meckel) et l'iléon (du diverticule de Meckel à la jonction iléo-caecale). Sa paroi est bien équipée en glandes sécrétrices, il reçoit en amont les sécrétions du pancréas et du foie.
  - ✓ Le duodénum forme une grande anse qui enserre le pancréas, il reçoit deux ou trois canaux pancréatiques et deux canaux biliaires au niveau d'une même papille. L'emplacement de cette papille marque la fin du duodénum et le début de l'iléon (Alamargot, 1982 ; Villate, 2001).
  - ✓ Le jéjunum est divisé en deux parties : L'une proximale dite tractus de Meckel et une autre distale qui constitue l'anse supra-duodénale (Alamargot, 1982 ; Villate, 2001). Ce segment a un rôle clé, puisque tous les principaux nutriments y sont dans une large mesure digérés et absorbés. Le rôle de premier plan se reflète dans le fait que le poids de ce segment vide est généralement supérieur de 20 à 50% à celui de l'iléon (Hetland *et al.*, 2001 ; Rodgers *et al.*, 2012).
  - ✓ L'iléon est le dernier segment de l'intestin grêle ; il se termine à la jonction iléo-cécolique (Hurwitz *et al.*, 1973). L'iléon est court et rectiligne, son diamètre et sa longueur sont variables en fonction des espèces (Alamargot, 1982 ; Villate, 2001). Bien que la longueur de ce segment soit approximativement la même que celle du jéjunum (Hurwitz *et al.*, 1973), son poids est beaucoup plus faible.
- Le gros intestin, contrairement aux mammifères, est peu développé chez les oiseaux : 18 m de long chez un porc adulte et 1,6 m chez un poulet de 8 semaines (Crevieu-Gabriel, 1999). Il est marqué par la présence des 2 caeca et du rectum qui se termine par le cloaque.
  - ✓ Les caeca sont situés à la limite de l'intestin grêle, ils ont une longueur moyenne de 17 cm (Gillespie et Flanders, 2009). Selon Clench *et al.* (1995), la longueur et le calibre des caeca sont variables en fonction des types d'oiseaux. Ils sont le siège de la fermentation bactérienne qui permet l'utilisation des métabolites difficilement dégradables (cellulose) et la synthèse des vitamines du groupe B (Gadoud *et al.*, 1992). Selon Svihus (2014 a), la

fonctionnalité du caecum est très largement affectée par le régime alimentaire qui augmente en conséquence d'une quantité accrue de matières fermentescibles dans le régime.

En outre, l'absorption est une fonction importante des caeca pour laquelle ils ont été décrits comme étant le segment quantitativement le plus important de l'intestin (Svihus, 2014a).

✓ Le rectum fait suite à l'iléon et débouche dans le cloaque. Il réabsorbe l'eau de son contenu (fèces et urines).

Le cloaque est un compartiment où débouchent le tractus gastro-intestinal et l'appareil urinaire et reproducteur (Denbow, 2000).

- Les glandes annexes sont représentées par les glandes salivaires, le pancréas et le foie.
  - ✓ Les glandes salivaires sont nombreuses et dispersées (Larbier et Leclercq, 1989). Elles sont de formation exocrine chargées d'humecter la muqueuse buccale et de favoriser la déglutition des aliments. Quant à leur rôle enzymatique, il est considéré comme négligeable.
  - ✓ Le pancréas est une glande mixte situé sur le côté droit de la cavité abdominale chez tous les oiseaux et est considéré comme la plus grande glande annexée au tube digestif (Mobini, 2013 ; Deprem *et al.*, 2015). Le pancréas des oiseaux est relativement plus long que celui des mammifères (Jouanneau, 1974). La partie exocrine du pancréas est impliquée dans la synthèse et la sécrétion des enzymes responsables de la digestion des protéines, des lipides et de l'amidon (Larbier et Leclercq, 1989 ; Denbow, 2000 ; Frandson *et al.*, 2009). Les sécrétions du pancréas se déversent dans les canaux pancréatiques (au nombre de 3 chez le poulet) qui aboutissent à la partie terminale du duodénum, proche du jéjunum antérieur (Duke, 1986 a). L'ablation du pancréas réduit 70% de l'efficacité de la digestion.
  - ✓ Le foie est le siège de la synthèse et de la sécrétion des sels biliaires nécessaires à la digestion et à l'absorption des lipides (Toutaine *et al.*, 2006). La bile est évacuée par deux canalicules, l'un partant directement du foie vers le duodénum, et l'autre conduisant d'abord à la vésicule biliaire, qui débouche dans le duodénum. Ces canalicules sont reliés au duodénum dans sa partie la plus inférieure (Duke, 1986a).

**II. Physiologie de la digestion chez *Gallus-gallus***

La physiologie digestive comprend l'ensemble des processus de digestion et d'absorption. Les principales étapes de la digestion du poulet sont présentées par la figure 3.

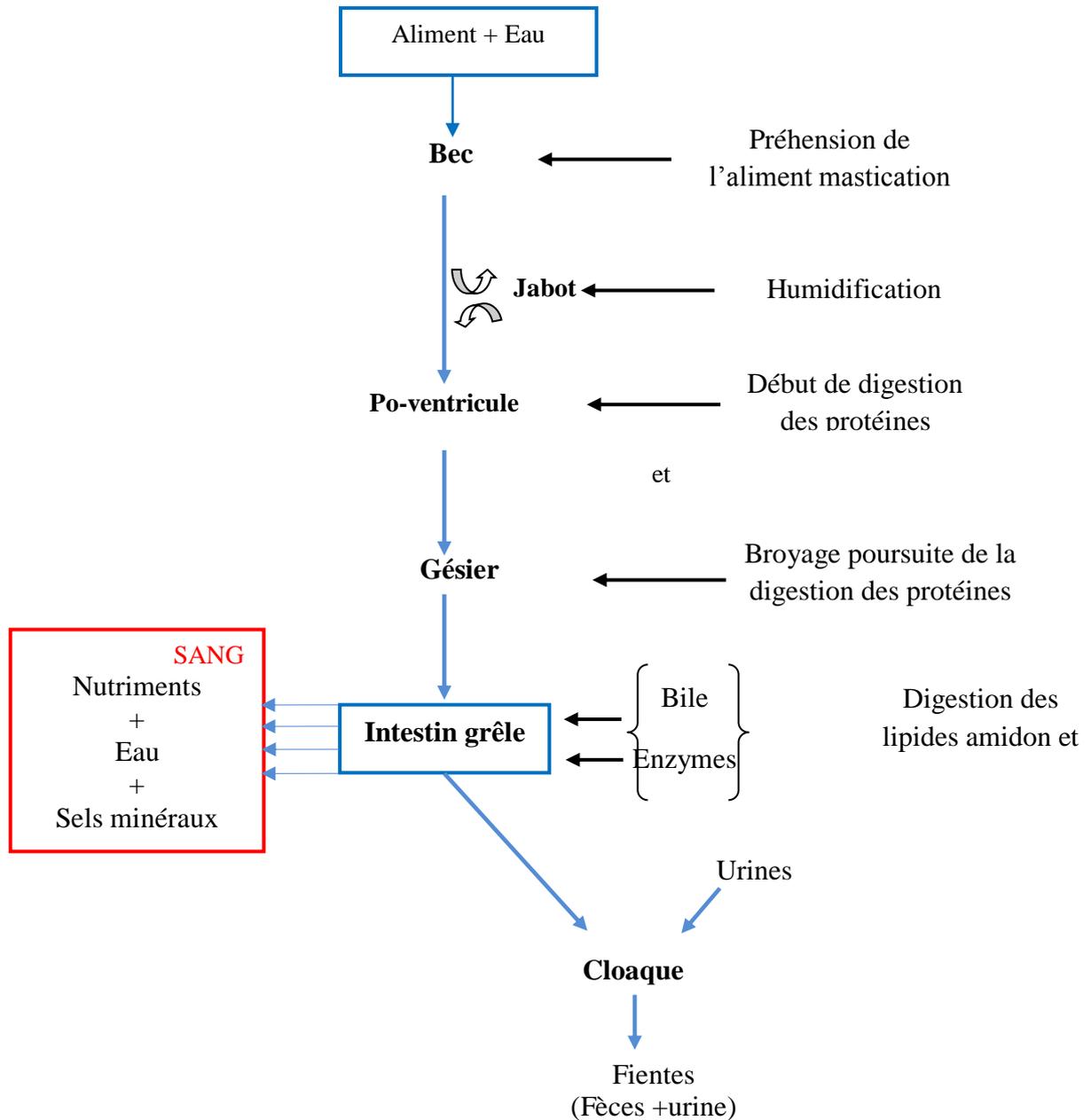


Figure 3 : Représentation schématique de la digestion chez le poulet (Surdeau et Henaff, 1979).

La digestion des composants de l'aliment est assurée par un mécanisme physique et un mécanisme enzymatique.

Les oiseaux réduisent la taille des aliments ingérés au niveau du jabot qui leur sert principalement d'organe de stockage. Une hydratation considérable a lieu dans cet organe, ce qui peut faciliter par la suite le broyage et la digestion enzymatique (Svihus, 2014a).

La principale fonction du gésier est le broyage et le mélange des particules alimentaires. Le gésier est constitué de muscles fortement myélinisés et d'une couche de koiline, ce qui facilite le processus de broyage (Svihus, 2014a).

La digestion enzymatique débute dans le pro-ventricule et s'achève au niveau de la surface apicale des entérocytes de la muqueuse intestinale (Jin *et al.*, 1998).

Les protéines sont dégradées suite à l'action successive de la pepsine (gésier) et de la chymotrypsine (intestin grêle).

L'amidon est principalement dégradé au niveau de l'intestin grêle sous l'action de l' $\alpha$ -amylase. Chez les volailles, la salive ne contient pas d' $\alpha$ -amylase et l' $\alpha$ -amylase pancréatique est la seule enzyme dégradant l'amidon (Moran, 1982 ; Wiseman, 2006).

Outre l'activité de l'amylase pancréatique, Bolton (1965) signale une hydrolyse importante de l'amidon (plus de 20%) au niveau du jabot par une amylase sécrétée par les lactobacilles (Champ *et al.*, 1983).

Les polysaccharides non amylacés sont partiellement fermentés par le microbiote du tractus gastro-intestinal de l'animal. Les produits finaux de la fermentation (PNA et les acides gras à chaîne courte) peuvent être absorbés et utilisés comme source d'énergie (Just *et al.*, 1983, Dierick *et al.*, 1989, Jorgensen *et al.*, 1997).

Chez le poulet, la solubilité dans le tractus gastro-intestinal est une condition préalable à la fermentation. Néanmoins, même si elle est solubilisée au cours du processus de digestion, une partie importante des PNA peut rester intacte (De Veries, 2015).

Pustjens *et al.*, (2014) indiquent que la durée et/ ou les conditions de l'activité enzymatique constituent des facteurs de variation de la dégradation des PNA. Chez les oiseaux, seuls les digesta liquides ou extrêmement fins peuvent constituer des substrats fermentaires pour l'activité microbienne dans les caeca. Le reste des digesta est dirigé vers le côlon qui, du fait de sa très faible taille, a une capacité très limitée de fermentation (Crevieux-Gabriel, 1999).

Les monosaccharides et les disaccharides sont soumis à des processus digestifs enzymatiques et la plupart des oligosaccharides subissent des mécanismes fermentaires (Hilmi *et al.*, 2007 ; Classen *et al.*, 2016).

Les lipides sont dégradés par l'action conjuguée de la lipase et de la colipase en présence de sels biliaires (Krogdahl et Sell, 1989 ; Jin *et al.*, 1998). Selon Tancharoenrat *et al.* (2014), la longueur de la chaîne des acides gras détermine la qualité de digestion de la structure ; le jéjunum est le site principal de la digestion de la majorité des matières grasses et des acides gras.

La fonction digestive du microbiote ou des communautés microbiennes du tractus gastro-intestinal du poulet est essentielle à l'homéostasie intestinale, au métabolisme de l'hôte et a une incidence sur la physiologie digestive des animaux (Borda-Molina *et al.*, 2018).

Le microbiote de l'appareil digestif de la volaille participe fortement à l'utilisation des aliments (Apajalahti et Vienola, 2016). Cependant, la flore bactérienne est la plus abondante et la plus diversifiée au niveau des caeca (Coates, 1980 ; Fuller, 1984 ; Furuse and Okumura, 1994 ; Apajalahti et Vienola, 2016).

Selon Yasothai (2017), le développement et la composition de la microflore intestinale de la volaille reposent sur plusieurs mécanismes complexes et dépendent de nombreux facteurs, tels que de l'âge des oiseaux, la nature des nutriments et l'environnement dans lequel ils sont élevés.

La microflore intestinale participe à la nutrition de la volaille *via* l'amélioration de la digestion par la sécrétion d'enzymes microbiennes, la synthèse des vitamines (vitamines du groupe B, notamment la B12) et la détoxification de certains facteurs antinutritionnels (Gamage, 2015).

La microflore intestinale interagit également directement avec la muqueuse du tractus gastro-intestinal (Van Leeuwen *et al.*, 2004), ce qui peut modifier la physiologie de celui-ci (Klasing *et al.*, 1999).

L'absorption met en jeu différents mécanismes d'échanges cellulaires, dont certains consomment de l'énergie et d'autres pas. Le tube digestif des oiseaux est doté d'une grande capacité d'absorption qui permet de couvrir les besoins du métabolisme basal important de cette espèce.

L'absorption des produits de la digestion (Crevieu-Gabriel, 1999) des lipides (Hurwitz, *et al.*, 1973 ; Noy *et al.*, 1995), de l'amidon (Riesenfeld *et al.*, 1980) et des protéines (Sklan *et al.*, 1980) a lieu dans la partie distale de l'intestin grêle et s'achève dans une large part dans le

jéjunum. Celle des électrolytes et de l'eau est assurée principalement au niveau des caeca (Drogoul *et al.*, 2004 a ; Svihus, 2014 a) et du gros intestin (Toutain *et al.*, 2006).

### III. Expression de la digestibilité

La digestibilité d'un aliment ou d'une matière première renvoie à la notion de biodisponibilité des nutriments que les matières premières apportent (Rougière, 2010). Au-delà de la composition chimique, elle est l'un des indicateurs les plus utilisés pour apprécier la valeur nutritionnelle de la matière première. Ainsi, la connaissance de la digestibilité des nutriments d'un aliment permet d'appréhender son efficacité nutritionnelle au niveau du compartiment digestif (Larbier et Leclercq, 1989).

Classiquement la digestibilité se décline sous 2 formes : la digestibilité apparente et la digestibilité réelle. Cette dernière est par définition supérieure à la première car elle introduit une correction relative à la fraction endogène fécale.

### IV. Facteurs de variation de la digestibilité des nutriments

La digestibilité des matières premières ou d'un aliment chez la volaille est sujette à de nombreux facteurs de variation. Ces derniers sont liés au génotype (Sorensen *et al.*, 1983 ; Leenstra et Pit, 1988 ; Jorgensen *et al.*, 1990), au sexe (Wu *et al.*, 2002), à l'âge (Hassan et Delpesh, 1986 ; Danel *et al.*, 2015 ; Métayer *et al.*, 2015), ou encore aux conditions ambiantes dans lesquelles évolue l'oiseau et aux méthodes de mesures de la digestibilité, tel que le précise Crevieu-Gabriel (1999).

Selon Métayer *et al.* (2015), pour une matière première donnée, la digestibilité de ses nutriments est liée à la composition de la matière première elle-même (nature et teneur de ses constituants, présence de facteurs antinutritionnels). Cette composition est influencée par les facteurs génétiques et environnementaux qui affectent non seulement la teneur en éléments nutritifs dans les matières premières, mais également la valeur nutritive qui prend en compte la digestibilité des éléments nutritifs contenus dans un ingrédient de l'aliment cible.

La digestibilité d'un nutriment peut être influée également par d'éventuels traitements technologiques (thermiques et/ou mécaniques) que la matière première subit par le mode de sa conservation ou par la quantité et la nature de chaque nutriment qu'elle renferme.

## IV.1. Facteurs de variation de la digestibilité liés à l'animal

### IV.1.1. Effet du sexe

Les travaux de Sorensen *et al.*, (1983), Wallis et Balnave (1984), Leenstra et Pit (1988), Gruhn et Zander (1989) ne rapportent pas d'effet significatif du sexe des volailles sur la digestibilité des nutriments. En revanche, Doeschate *et al.*, (1993) ; Ravindran *et al.*, (2002) précisent que la digestibilité des protéines est significativement plus élevée chez les oiseaux de sexe femelle.

Aucun effet du sexe n'a été observé sur la digestibilité de la matière grasse (Métayer, 2015).

### IV.1.2. Effet du génotype

Les travaux de Sorensen *et al.*, (1983), Leenstra et Pit (1988), JORGENSEN *et al* (1990), soulignent l'effet du génotype animal sur la digestibilité des nutriments. Il est clairement établi par Hassan et Delpech (1986) que la digestibilité des protéines est en rapport avec le génotype de l'oiseau. Ainsi, elle est plus élevée chez les poulets de souche ISA BROWN, comparée à celle mesurée chez la souche naine (dw) et la souche « Fayoumi ». Ces mêmes auteurs confirment ces différences en termes de CUDN, en précisant qu'elles sont cependant de trop faible amplitude pour concerner le sélectionneur.

Mossab (1995) quant à elle, souligne l'effet du génotype de l'oiseau sur la digestibilité des acides gras de l'huile de soja et du suif de bœuf.

De façon générale, Doeschate *et al.* (1993) précisent que plus la sélection des souches pour une vitesse de croissance élevée est importante, et moins est bonne la digestibilité des nutriments. Mignon-Grasteau *et al.* (2004) confirment que la variabilité individuelle de la digestion chez le poulet en croissance est d'origine génétique.

### IV.1.3. Effet de l'âge

Il est rapporté par Wallis et Balnave (1984) ; Carré *et al.* (1991) ; Batal et Persons (2002) que la digestibilité des protéines et des acides aminés augmente avec l'âge des oiseaux, suggérant que cette observation est en rapport avec l'augmentation du temps du séjour des aliments dans le tractus digestif et celle des sécrétions des enzymes protéolytiques avec l'âge des animaux. En revanche, Fonolla *et al.* (1981) ; Hakansson et Eriksson (1974) ; Larbier et Leclerq (1992) ; Zuprizal *et al.* (1992) ; Mahagna *et al.* (1995) rapportent que les meilleures digestibilités sont observées chez les jeunes oiseaux ; ils expliquent cette

observation par une meilleure efficacité de l'hydrolyse enzymatique des protéines alimentaires, ainsi que par une plus importante absorption intestinale des acides aminés. Pour certains auteurs tels que Doeschats *et al.* (1993), l'âge de l'animal n'affecte nullement la digestibilité des protéines chez le poulet, alors que Lessire (2007) rapporte que l'influence de l'âge du poulet sur la digestibilité des protéines et des acides aminés n'est pas nette.

Selon Cowieson *et al.* (2018), la digestion de l'amidon dépend du stade de croissance de l'animal. La volaille pourrait développer une capacité accrue de digestion de l'amidon au fur et à mesure que le tractus intestinal se développe suite à une production élevée d'amylase pancréatique chez les oiseaux plus âgés (Krogdahl et Sell, 1989). A l'opposé, Thomas *et al.* (2008) ; Danel *et al.* (2015) et Métayer *et al.* (2015) rapportent une meilleure digestibilité de l'amidon chez les jeunes poulets, expliquée par une forte activité enzymatique de l' $\alpha$ -amylase et des disaccharidases. Quant aux travaux de Zelenka et Ceresnakova (2005), ils précisent que l'effet de l'âge sur la digestibilité de l'amidon dépend du type de volaille : poulet à croissance lente ou croissance rapide.

Plusieurs travaux dont ceux de Wieseman (1984) et Métayer (2015) rapportent la faible utilisation des lipides par les jeunes poulets. Cette observation est liée à la faible concentration de sels biliaires conjugués responsables de la formation des micelles et donc de la solubilisation des lipides (Gabriel *et al.*, 2003).

#### **IV.1.4. Effet lié à la microflore digestive de l'oiseau**

Les bactéries du tractus gastro-intestinal du poulet influencent de manière significative l'utilisation et l'absorption des nutriments (Choct *et al.*, 1996; Smits *et al.*, 1997) . De plus, elles modulent l'état physiologique du tractus digestif et le profil immunologique des oiseaux (Klasing *et al.*, 1999).

L'aliment offert à l'oiseau met en compétition les micro-organismes du tube digestif et ceux de l'hôte ; la flore microbienne peut alors entraîner des modifications au niveau des processus digestif et augmenter les besoins énergétiques de l'oiseau (Gabriel *et al.*, 2003)

L'effet de la microflore sur la vitesse du transit intestinal a fait l'objet de plusieurs études. Chez l'oiseau, la flore ne semble pas modifier la vitesse de transit (Coates, 1973) alors que Nahashon *et al.* (1994 b) précisent que l'effet des microorganismes sur le transit digestif diffère selon le type de flore et la nature du régime alimentaire de l'oiseau.

Ainsi, alors que Salter et Fuller (1974) n'observent pas de différence de digestibilité apparente des protéines entre des animaux axéniques, Kussaibati *et al.* (1982b) observent une meilleure digestibilité chez les axéniques. Cette amélioration serait expliquée par

l'augmentation des pertes azotées d'origine endogène chez les animaux holoxéniques (Crissey et Thomas, 1988 ; Gabriel *et al.*, 2003).

Cependant, d'après Salter (1973), la microflore n'aurait un effet positif sur la digestion des protéines que dans le cas des protéines de mauvaise qualité. Ceci est confirmé par Apajalahti et Vienola (2016), expliquant qu'il existe une compétition pour les acides aminés entre le microbiote (Lactobacilles) et l'hôte, au niveau de l'intestin grêle. Ainsi, si la protéine est hautement digestible (de bonne qualité), les acides aminés sont largement absorbés dans le haut de l'intestin grêle où la croissance bactérienne est inhibée et la proportion capturée par l'hôte peut être plus élevée. Alors qu'une protéine résistante d'origine alimentaire qui s'échappe de l'iléon (une protéine de dérivation iléale) est soumise à la fermentation par des bactéries dans le caecum.

Les produits de cette fermentation (les amines, les indoles, les phénols, le crésol et l'ammoniac) sont des composés nocifs et toxiques qui, à de fortes concentrations, peuvent affecter négativement les tissus digestifs, diminuant ainsi la digestibilité.

Toutefois, ces microorganismes utilisent les protéines endogènes (les protéines produites à partir de mucus, de débris cellulaires et de la biomasse bactérienne) et les protéines alimentaires non hydrolysées par l'hôte (Gabriel *et al.*, 2006), donnant des acides gras trans-acides aminés synthétiques pouvant, dans certains cas, conduire à une excrétion endogène plus faible et fournir plus d'énergie (Jozefiak *et al.*, 2004; Adil et Magray, 2012). Ayant un rôle dans la conservation de l'azote : libération et recyclage de NH<sub>3</sub> (Gabriel *et al.*, 2005).

Les microorganismes gastro-intestinaux ont une place importante dans l'économie de l'azote chez les oiseaux (Gamage, 2015).

La microflore ne semble pas interagir dans le cas des glucides utilisables par l'hôte (amidon, dextrine, oligosaccharides et monosaccharides). En effet, elle ne modifie ni l'activité des enzymes impliquées dans leur digestion, telles que l'amylase pancréatique (Lepkowsky *et al.*, 1964) ou les disaccharidases intestinales (Siddons et Coates, 1972), ni l'absorption du glucose (Yokota et Coates, 1982). Les glucides que l'oiseau ne peut utiliser (les polysaccharides non amylacés tels que la cellulose, l'hémicellulose et les substances pectiques) sont fermentés par la microflore dans le jabot et principalement au niveau des caeca.

Chez le jeune poulet de moins de 3 semaines, la flore diminue la digestibilité fécale des lipides (Boyd et Edwards, 1967 ; Kussaibati *et al.*, 1982 a) en raison de la faible concentration en sels biliaires conjugués, résultant de leur déconjugaison par la microflore.

#### **IV.1.5. Effet des organes digestifs sur la digestibilité**

De nombreux travaux rapportent l'impact des caractéristiques des organes digestifs sur la qualité de l'efficacité digestive chez la volaille. Ainsi, il apparaît que le poids du gésier impacte positivement la digestibilité de l'amidon (Rogel *et al.*, 1987, Hetland et Svihus, 2001 ; Péron *et al.*, 2006) celle des protéines (Maisonnier *et al.*, 2001a ; Garcia *et al.*, 2007), ainsi que les valeurs de l'EMAn (Maisonnier *et al.*, 2001b; Mcentee *et al.*, 2003; Péron *et al.*, 2006; Garcia *et al.*, 2007).

Par ailleurs, il a été souvent observé une relation inverse entre les efficacités digestives et le poids des compartiments intestinaux chez le poulet en croissance (Maisonnier *et al.*, 2003 ; Péron *et al.*, 2006 ; Garcia *et al.*, 2007).

Quant à Carré (2000) et Rougiere (2010), ils rapportent que la diminution du poids du gésier et celle de la taille de l'intestin, modifient le temps de rétention du chyme dans cet organe. Rougiere (2010) précise que la diminution du poids du pancréas a pour conséquence la diminution des synthèses enzymatiques induisant une diminution de la digestion enzymatique des substances concernées dans la lumière intestinale.

### **IV.2. Facteurs de variation de la digestibilité des nutriments liée à l'aliment**

#### **IV.2.1. Effet de la nature des composants de l'aliment et de leur interaction avec d'autres nutriments sur leur digestibilité.**

Outre les facteurs de variation de la digestion liés à l'animal, la digestibilité de différents composants, tel que l'amidon, est étroitement liée à leurs caractéristiques structurales et chimiques (Cowieson *et al.*, 2018).

L'amidon est généralement assez bien digéré (Svihus, 2014 ; Cowieson *et al.* 2018), notamment celui des céréales. Néanmoins, les travaux de Carré (2004) et Zaefarian, (2015) signalent une faible digestibilité (iléale et totale) de l'amidon en raison des difficultés d'hydrolyse des granules d'amidon (Jacob, 2015) ou de l'interaction des structures amyliques avec d'autres nutriments (Saulnier, 2012 ; Svihus, 2014 b ; Jacob, 2015a).

Il est clairement établi par Zaefarian (2015) et Cowieson *et al.* (2018) que la macro et la microstructure cristalline du grain d'amidon influent sur sa digestibilité.

La taille des granules d'amidon constitue également un autre facteur affectant la digestibilité des amidons natifs (Svihus *et al.*, 2005 ; Dona *et al.*, 2010).

L'architecture granulaire et plus spécifiquement l'organisation superficielle des granules d'amidon réduisent la diffusion et l'absorption des enzymes, entraînant une moindre hydrolyse de l'amidon (Tahir *et al.*, 2010 ; Zhang *et al.*, 2013 ; Zhang *et al.*, 2015 ; Dhital *et al.*, 2017).

L'amidon natif a une structure semi-cristalline que lui confère l'amylose (Svihus, 2014b). Cette dernière structure est compacte, ce qui limite l'accessibilité des enzymes digestives dans les amidons non gélatinisés à forte teneur en amylose (Sajilata *et al.*, 2006). En effet, Saito *et al.* (2001) ; Sandhu *et al.* (2005) ; Liu *et al.* (2007) ont mis en évidence le rôle du ratio amylose/amylopectine des granules dont les amidons riches en amylose présentent une rigidité thermique et enzymatique importante.

Bien que les propriétés du granule d'amidon, tels que la taille et les composants du granule, puissent affecter la digestibilité, il existe d'autres composants non amylacés, tels que des lipides et des matrices de protéines dans le granule, susceptibles d'interférer sur sa digestion. Le piégeage des granules d'amidon dans les parois cellulaires peut constituer un facteur encore plus important entravant la digestion de l'amidon (Svihus *et al.*, 2005 ; Svihus, 2014b).

Hu *et al.*, (2018) rapportent que les protéines de surface et les lipides associés aux granules d'amidon réduisent leur hydrolyse enzymatique par l'inhibition de manière significative de leur pouvoir de gonflement et de viscosité de collage.

De plus, les amidons à haute teneur en amylose, déjà difficile à digérer du fait de la complexité de leur structure, sont caractérisés par leur fréquente association à de grandes quantités de lipides (tels que des acides gras) à la surface des granules, ce qui peut réduire davantage le taux de digestion enzymatique (Svihus *et al.*, 2005).

Les polysaccharides visqueux autres que l'amidon et l'inclusion de matières fibreuses ont également une influence importante sur la digestibilité de l'amidon. L'amidon et les glucides, plus facilement fermentescible que la cellulose, sont ciblés préférentiellement par les bactéries (Zaefarian, 2015).

#### **IV.2.2. Les facteurs antinutritionnels**

Les FAN sont des substances qui même à l'état de traces, réduisent ou empêchent totalement l'utilisation d'un élément nutritionnel, soit au niveau digestif, soit au niveau métabolique (Drogoul *et al.*, 2004 b). Ils ont des effets négatifs sur la physiologie digestive et

nutritionnelle des animaux d'élevage. Ces effets biologiques sont dus à leur capacité à se complexer avec des nutriments et/ou des enzymes (Longstaff et McNab, 1991). Parmi les FAN, figurent les fibres et les poly-phénols.

Les fibres alimentaires (PNA solubles et insolubles) affectent le processus digestif et métabolique, engendrant des impacts nutritionnels différents chez les volailles (Mateos *et al.*, 2012). De plus, selon le même auteur, la présence des fibres dans la ration dilue la concentration relative des autres nutriments et s'opposent mécaniquement à leur hydrolyse enzymatique et leur absorption.

Concernant les PNA non solubles, la cellulose et la lignine, Bachknudsen et Eggum (1983) rapportent que ces constituants réduisent l'utilisation digestive des protéines et de l'énergie des aliments destinés aux volailles. En effet, ces composés diminuent l'accessibilité des enzymes aux aliments par encapsulation physique des protéines (Saunders *et al.*, 1969 ; Gabriel *et al.*, 2007).

Les PNA, les fibres hydrosolubles, tels que les  $\beta$ -glucanes induisent une augmentation de la viscosité du bol alimentaire (Guillaume, 1978) entraînant la réduction de la dégradation de l'amidon par les enzymes amylolytiques (Zhang, 2017), ainsi que de la digestibilité des protéines (Larbier et Leqlerc, 1992 ; Saulnier, 2012). Cette diminution varie de 82 à 85% et 80 à 82% respectivement chez le coq et le poulet de chair, lorsque l'aliment est supplémenté avec 1,2% de PNA hydrolysables (Carré, 1995).

Les arabinoxylyanes sont l'un des principaux constituants des fibres alimentaires solubles et insolubles (Mc Cartney *et al.*, 2005). Ils augmentent la viscosité des digestas chez les oiseaux et sont à l'origine de la réduction de la digestibilité de l'amidon (Choct *et al.*, 1999) ainsi que celle des protéines et des lipides chez le poulet (Choct et Annison, 1992; Carré *et al.*, 2002 ; Maisonnier *et al.*, 2001a). Leeson et Summers (1997) signalent que les arbinoxylyanes peuvent réduire de 10 à 15% de la valeur d'énergie métabolisable de certaines matières premières, tel que le blé.

Les  $\alpha$ -galactosides sont l'origine d'une rétention d'eau dans l'intestin, augmentant ainsi le débit du digesta ; ils entraînent une réduction plus ou moins importante de la digestibilité des nutriments (Crevieu-Gabriel, 1999).

Selon Csaky et Fekete (2004), les animaux monogastriques dont la volaille, ne peuvent dégrader les oligosaccharides faute d' $\alpha$ -galactosidase indispensable à leur hydrolyse, ils transitent ainsi dans le gros intestin sans être digérés et sont fermentés par la flore microbienne conduisant à la production de gaz.

Concernant les tanins (polyphénols), leur structure chimique leur confère une capacité très développée à se fixer sur toutes sortes de macromolécules (le plus souvent les protéines) ou de précipiter les enzymes digestives. Il en résulte une diminution générale de la digestibilité particulièrement celle des protéines (Selle *et al.*, 2010 ; Calislar, 2018). Ainsi, dès 1972 Stephens *et al* notent que les tanins réduisent l'utilisation digestive et métabolique de l'azote chez les oiseaux. Cette action résulte de l'effet inhibiteur qu'ils exercent sur les enzymes protéolytiques (Hulse *et al.*, 1988). Ils sont aussi responsables de l'augmentation des pertes de protéines endogènes suite à la l'augmentation de la sécrétion du mucus (Sell *et al.*, 1985), des enzymes digestives (Jansman *et al.*, 1993), et celle du renouvellement cellulaire de la muqueuse intestinale (Vallet *et al.*, 1994). Quant à l'effet des tanins sur l'amidon, il est de type inhibeur de l'amylase ; les tanins se liant à l'amidon du grain plus ou moins fortement, conduisent à la réduction de sa digestibilité (Davis et Hosemey, 1979 ; Selle *et al.*, 2010).

L'acide phytique et les phytates sont considérés comme étant des facteurs antinutritionnels en nutrition des monogastriques (Nahashon et Kilonzo-Nthenge, 2013). L'augmentation de la teneur en acide phytique et de leurs sels (les phytates) affectent négativement l'utilisation de nutriments et des substances nutritives. L'acide phytique a un effet chélateur puissant vis-à-vis de différents cations tels que  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Zn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ , ce qui entrave leur disponibilité et contribue à des carences minérales vitales (Raboy, 2009; Veum *et al.*, 2009). De plus, c'est un inhibiteur des enzymes digestives (Harland et Morris, 1995 ; Selle *et al.*, 2010 ; Vaculova, 2012). Les phytates formeraient également des complexes avec les protéines alimentaires conduisant ainsi à une réduction de la digestibilité de l'azote par leur action chélatante, avec pour conséquence une réduction des performances de production chez l'animal (Crevieu-Gabriel, 1999 ; Selle *et al.*, 2010).

L'ajout de phytases dans les rations des animaux monogastriques et la production de graines ayant une faible teneur en phytates sont par conséquent, des approches très attractives pour faire face aux problèmes nutritionnels et environnementaux liés que posent les phytates (Raboy, 2001).

Les inhibiteurs trypsiques sont des peptides capables d'inhiber des protéases à sérine comme la trypsine et la chymotrypsine. Ils ont la particularité de provoquer chez le poulet, une hypertrophie du pancréas qui entraîne une hypersécrétion des enzymes pancréatiques et donc une augmentation des pertes de protéines endogènes à l'origine de la diminution de la digestibilité apparente des nutriments (Huisman et Jansman, 1991).

### IV.2.3. Effet des traitements technologiques

Généralement, le traitement technologique, qu'il soit thermique ou physique (broyage), est effectué en vue d'améliorer l'efficacité nutritionnelle (digestive et métabolique) de l'aliment. Le traitement technologique vise à détruire les facteurs antinutritionnels et à améliorer l'efficacité de certains nutriments.

#### - Traitement thermique

Selon Calet (1976), la digestibilité des composés des graines de céréales est fortement modifiée par le traitement thermique

Indépendamment de son rôle sur les FAN, le traitement thermique module la valeur nutritionnelle des matières premières ; l'impact concerne davantage les nutriments énergétiques. L'amidon est gélatinisé, améliorant ainsi les hydrolyses digestives par l'amylase pancréatique (Larbier et Leclercq., 1992). Britzman (1994) ; Crevieu-Gabriel (1999) ; Cozannet (2010), rapportent un effet bénéfique de la chaleur sur la digestibilité des protéines et des acides aminés ainsi que sur leur valeur biologique. Ces résultats s'expliquent par la modification de la structure des protéines qui détermine alors des propriétés fonctionnelles et nutritionnelles intéressantes (Montoya *et al.*, 2006). Toutefois, un traitement thermique drastique réduit la valeur biologique des protéines (Gabriel *et al.*, 2003 et Sarwar Gilani *et al.* 2012).

#### - Traitement mécanique et forme de présentation de l'aliment

La taille des particules alimentaires détermine la digestibilité des nutriments (Gonzales-Alvarado *et al.*, 2008). Cependant, Zang *et al* (2009) précisent que c'est davantage la forme de présentation de l'aliment qui est à l'origine des modifications morphologiques de l'intestin et de la digestibilité des nutriments que la taille des particules.

Le broyage consiste à réduire la taille des particules, ce qui favorise l'accessibilité des substrats aux enzymes. Ainsi, l'effet favorable d'un broyage fin est parfaitement démontré dans le cas des céréales chez le poulet (Saunders *et al* 1969). Selon Crévieu *et al.* (1997b) : une granulométrie très fine permet une hydrolyse plus importante des protéines. Cependant, en 1999, le même auteur précise que le broyage améliore la digestion des protéines mais de façon limitée car les particules alimentaires de grande taille ont un transit lent, ce qui en améliore la digestion des protéines.

Farrel *et al.* (1983) rapportent que la teneur en lipides de la graine est influencée par le traitement et la forme de présentation de l'aliment, en précisant que ceux sous forme de granulés, contiennent plus de lipides que ceux sous forme criblée ou émietlée.

#### IV.2.4. Niveau d'ingestion

En règle générale, une mauvaise digestibilité de l'amidon chez les poulets de chair n'est pas attribuée à une concentration insuffisante en  $\alpha$ -amylase dans l'intestin grêle (Wiseman, 2006). En revanche, le temps nécessaire à l'hydrolyse de l'amidon serait un facteur affectant la digestibilité de ce nutriment. Selon Svihus (2011 b), le niveau d'ingestion et la taille des particules du régime ont un effet sur la digestibilité de l'amidon par leur impact sur le temps de rétention des aliments dans le tube digestif. Thivend (1979) et Selle *et al.* (1989) précisent que l'évolution de la digestibilité de l'amidon en fonction du taux d'ingestion ne semble commencer qu'à partir d'un certain seuil qui dépend de la nature de l'amidon et de l'âge de l'animal.

Le taux de matières grasses dans l'aliment est un facteur de variation de leur digestibilité. Métayer *et al.* (2015) rapportent une faible digestibilité des matières grasses des aliments en renfermant moins.

### V. Facteurs de variation de l'utilisation énergétique chez la volaille

L'utilisation énergétique chez la volaille varie en fonction d'un certain nombre de facteurs.

#### V.1. Facteurs de variation liée à l'animal

- Facteurs de variation de l'utilisation énergétique, liés au sexe de l'oiseau

Aucun effet du facteur sexe n'a été signalé sur les valeurs de l'EMa (Begin, 1967 ; Chwalibog *et al.*, 1978) ou sur les valeurs de l'EMv (Sibbald, 1976 ; Kessler et Thomas, 1978).

- Facteurs de variation de l'utilisation énergétiques, liés au génotype

Hassan et Delpéch (1986) rapportent que l'utilisation énergétique de l'aliment est en rapport avec le génotype de l'oiseau. Ainsi, en termes d'EM, celle - ci est plus élevée chez les poulets de souche ISA BROWN, comparée à celle mesurée chez la souche naine (dw) et la souche « Fayoumi ». Les mêmes auteurs, précisent que ces différences sont cependant, de trop faible amplitude pour concerner le sélectionneur. A l'opposé Boldaji *et al.* (1981)

relèvent une similitude de valeurs EMV des graines de céréales mesurées sur coqs de souche commerciale ou naine.

Sur la base du critère, haute ou faible efficacité alimentaire, Ten Doeschate *et al.* (1993) observent que la souche sélectionnée pour sa haute efficacité alimentaire utilise mieux l'énergie de l'aliment que la souche commerciale (type Ross). Cette observation est partagée par Rougière (2010) qui rapporte des valeurs EMAn souvent plus élevées lorsqu'elles sont mesurées sur des poulets sélectionnés pour une efficacité alimentaire élevée (20%) par rapport à celles de poulets sélectionnés pour une faible efficacité alimentaire.

Des interactions entre génotype-âge ont été mises en évidence sur les valeurs EMAn (Laurin *et al.*, 1985) ou de l'EMa (Ten Doeschate *et al.*, 1993). Il y a une réduction voire une disparition de l'effet du génotype quand l'âge des individus augmente (Laurin *et al.*, 1985 ; Hassan et Delpech, 1986 ; Ten Doeschate *et al.*, 1993). Selon Rougière (2010), les comparaisons d'EMAn entre génotypes concernent surtout des poulets en croissance, puisque chez le poulet adulte, les différences d'EMAn entre génotypes ont tendance à disparaître.

- Facteurs de variation de l'utilisation énergétique, associés à l'âge

L'effet de l'âge sur l'EMa est observé dès 1960 par Sibbald *et al* et confirmé par la suite par Charalambous et Dagher (1976) ; Coates *et al.*, (1977) et Chee *et al.*, (1984). Zelenka (1968) précise que les valeurs de l'EM sont faibles durant les premiers jours d'âge (6-9 jours d'âge) et augmentent fortement jusqu'à l'âge de 14 jours, puis lentement jusqu'à 50 jours d'âge. En outre, une augmentation de 3 à 10% de l'EMAn d'un aliment, avec l'âge est observée pour des poulets appartenant à un même génotype (Zelenka, 1967 ; Laurin *et al.*, 1985; Hassan et Delpech, 1986; Bourdillon *et al.*, 1990; Ten Doeschate *et al.*, 1993; Buyse *et al.*, 1998 ; Scott *et al.*, 1998).

Le sac vitellin et la faible digestion des lipides chez les jeunes oiseaux sont les principaux facteurs liés aux variations de l'EM dues à l'âge (Wiseman, 1984). Rougière (2010), précise que l'augmentation des valeurs EMa chez les animaux plus âgés ne peut être attribuée à leur bilan azoté, celui-ci étant faible, voire nul.

Quant aux valeurs d'EMv, Sibbald (1975) indique que les variations des valeurs de l'EMv mesurées sur des sujets d'âges différents, peuvent être attribuées en partie aux variations des pertes endogènes. A l'opposé, pour Mustar et Slinger (1979), Dale et Fuller (1980) et Shires *et al.*, (1980) il n'y a pas de variation des valeurs de l'EMv d'un aliment quel que soit l'âge de l'oiseau.

- Effet de la microflore sur l'utilisation de l'énergie

Selon la littérature spécialisée (Gabriel *et al.* 2005 ; Lan *et al.*, 2005 ; Rinttila et Apajalahti, 2013 ; Yasothai, 2017), la microflore gastro-intestinale de la volaille a un effet déterminant sur l'utilisation de l'énergie du régime alimentaire avec toutefois des impacts différents. Selon Gabriel *et al.* (2003), l'origine des différences quant à l'effet de la microflore sur le métabolisme de l'énergie est le type d'aliment qui entraîne une modulation de la flore.

Bien que la microflore intestinale puisse avoir des effets bénéfiques sur la digestion de certains composants de l'aliment, elle a également un effet délétère sur l'utilisation de l'EM par l'organisme (Lan *et al.*, 2005). Cette inhibition résulte de la concurrence entre la microflore gastro-intestinale et l'hôte pour les substrats (Muramastu *et al.*, 1994), notamment, lorsque l'énergie alimentaire est fournie sous forme de substrats facilement digérés par les oiseaux (Yasothai, 2017). La réduction de la valeur EM de l'aliment est également liée aux pertes occasionnées suite à la fermentation des glucides disponibles pour l'animal et l'augmentation des pertes endogènes (Kussaibati *et al.*, 1982 b). La microflore entraîne une augmentation des besoins énergétiques engendrant une réduction de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie (Gabriel *et al.*, 2003) chez le poulet de chair à croissance rapide, limitant ainsi les valeurs EM des régimes (Lan *et al.*, 2005 ; Yasothai, 2017). Par ailleurs, comme celle des mammifères, la microflore digestive des oiseaux, réduit l'utilisation des lipides, en limitant le rôle des sels biliaires (Souilem et Gogny, 1994; Brugere-Picoux et Silim, 1992).

L'impact positif de la microflore est lié à la conversion directe de certains composants alimentaires (par la fermentation d'oligosaccharides et de polysaccharides non hydrolysables), en métabolites à haute valeur énergétique par des bactéries spécialisées (Yasothai, 2017), tels que l'acide lactique et les acides gras à chaîne courte dont l'utilisation fournirait plus d'énergie à l'hôte (Lan *et al.*, 2005) .

De façon générale, les facteurs alimentaires qui augmentent l'activité microbienne intestinale peuvent réduire l'utilisation de l'énergie (Choct, 1999). En outre, selon Gamage (2015), les besoins en énergie sont augmentés en raison des dépenses énergétiques consacrées à la détoxification de diverses substances produites par les bactéries intestinales.

## V.2. Facteurs de variation liés à l'aliment

- Effet des composants de l'aliment sur l'utilisation de l'énergie

De nombreux facteurs liés à l'aliment sont responsables de la variabilité du potentiel énergétique de l'aliment destiné à la volaille.

Les lipides et les polysaccharides (particulièrement l'amidon) sont les principales sources d'énergie dans l'alimentation des volailles. Leur digestibilité est en rapport étroit avec leur potentiel énergétique et celui du régime.

La majeure partie de l'énergie nécessaire à la croissance des poulets est fournie selon Svihus, (2014 b) principalement par l'amidon (jusqu'à 50%). Ce dernier participe à raison de 60% à la teneur EMa des aliments pour volaille (Cowieson, 2005).

Les PNA contribuent à la valeur nutritive des régimes pour volaille à la fois directement, en tant que source d'énergie (De veries, 2015), et indirectement par leurs effets sur les processus digestifs et métaboliques. De manière générale, la contribution de PNA à l'approvisionnement en énergie de l'oiseau est mineure (Jorgensen *et al.*, 1996), bien que les fibres dans la nutrition de la volaille soient souvent associées à une disponibilité réduite d'énergie en raison de son rôle mineur dans l'approvisionnement en énergie et de l'interférence avec les processus digestifs.

Des quantités faibles à modérées de fibres (jusqu'à 50 g / kg) pourraient être bénéfiques pour le développement gastro-intestinal, améliorant ainsi la digestibilité des nutriments (De Veries, 2015). Le rôle des lipides sur le niveau énergétique de la ration semble être limité en raison de leur niveau d'incorporation faible à modéré dans celle-ci.

Yaowitz (1970) et Barrowman (1978) rapportent que la variation des valeurs énergétiques de l'aliment est due en grande partie aux caractéristiques des lipides qu'il renferme. Il est bien établi chez la volaille que la composition en acides gras, saturés ou non et la quantité en acide gras libres constituent un facteur de variation important de l'énergie métabolisable du régime. Toutefois, il est à noter que la digestibilité des acides gras dépend largement de leur structure : longueur de chaîne carbonée, présence de doubles liaisons et nature des acides gras (Wiseman, 1984). Il est reconnu que le degré de saturation des acides gras a une influence majeure sur la digestibilité des lipides, ainsi que sur la valeur EMa (Wiseman *et al.*, 1991). Leur taux d'incorporation dans l'aliment, l'âge de l'oiseau et éventuellement l'espèce aviaire sont également des facteurs déterminants de leur concentration énergétique (Lessire *et al.*, 2003).

- Effet des micronutriments

Une déficience exagérée en vitamine B réduit la valeur EM du régime des jeunes poulets (Lockart *et al.*, 1966) et des coqs (Guo et Summer., 1970). Une teneur élevée de l'aliment en matières minérales aboutit également à une réduction de la valeur EMA (Sibbald *et al.*, 1961 ; Sibbald et Hamilton, 1977).

- Effet de la forme de l'aliment

La forme de présentation de l'aliment ne semble pas avoir un effet significatif sur son potentiel énergétique (Mc Intosh *et al.*, 1962). Moran *et al.* (1968) précisent toutefois que l'aliment granulé a une meilleure EMA en raison de son plus grand niveau d'ingestion.

Farrel *et al* (1983) observent que chez le poussin, les valeurs de l'énergie des céréales (maïs, l'orge et du blé) sous forme de miettes sont plus faibles que lorsque ces trois types de grains de céréales sont présentés à l'état de farine ou sous forme de granulé. Chez le coq, seule la forme granulée du blé a une valeur d'EM supérieure aux autres formes de présentation. Pour Lacassagne (1988), la granulation améliore légèrement les valeurs énergétiques des aliments, notamment chez le jeune oiseau.

- Effet du niveau d'ingestion alimentaire

Selon plusieurs auteurs, le niveau d'ingestion alimentaire affecte les valeurs EMA, tandis que son impact sur les valeurs EMv est rapporté de façon contradictoire par la bibliographie. Ainsi Hochi *et al.* (1970) indiquent que la réduction du niveau d'ingestion de 60 à 80% de la quantité *ad libitum* n'influence pas la valeur EM du régime utilisé. Han *et al.*(1976) confirment qu'il n'y a aucune répercussion sur la valeur EM avec une ingestion de 60% de l'*ad libitum*.

# **CHAPITRE 4**

**INFLUENCE DE LA TEMPERATURE AMBIANTE SUR LE POULET  
DE CHAIR**

Les oiseaux sont des homéothermes, ils sont caractérisés par le maintien d'une température interne à un niveau élevé et constant, dans une plage de température ambiante donnée (Voituron et Teulier, 2017), leurs échanges sont fortement dépendants de l'environnement (Larbier *et al.*, 1992). Leur température corporelle se situe entre 41 à 42°C pour un coq adulte (Meltzer, 1983).

Des variables climatiques telles que la température, l'humidité, le rayonnement et la vitesse du vent affectent directement le mécanisme de thermorégulation et les flux de chaleur des animaux (NRC, 1981). Parmi l'ensemble des variables environnementales, l'une des plus importantes est la température car elle affecte toutes les échelles du vivant, de la vitesse de réaction biochimique à la distribution des espèces dans le milieu (Solero, 2004).

### **I. Les exigences climatiques de la volaille**

Les variations de température constituent une contrainte forte pour l'ensemble des êtres vivants. Ces derniers y réagissent par des mécanismes de régulation permettant le maintien de l'homéostasie. Cependant, la température ambiante indiquée par le thermomètre est insuffisante pour appréhender l'environnement climatique. En effet, il faut distinguer la température de l'air de la température effectivement vécue par les animaux qui est fonction du rapport température/humidité. Ainsi, 4 points d'hygrométrie supplémentaires ont sensiblement le même effet physiologique qu'une augmentation de température de 1°C (Rudeau *et al.*, 1999). L'hygrométrie idéale se situant entre 55 et 70% (Valancony, 1999).

L'effet de l'humidité est en synergie avec celui de la température ; toutes les 2 agissent d'une manière combinée sur le confort thermique des animaux, engendrant la plus grande incidence sur les conditions de vie des volailles ainsi que sur leurs performances (Valancony, 1999). L'élévation de l'hygrométrie réduit les possibilités d'évaporation et accroît donc la sensation de stress thermique.

La faculté d'adaptation des volailles, surtout celle des poussins, a des limites assez étroites qui s'élargissent par la suite. Elle varie au cours du nyctémère et en fonction de l'âge, du sexe, de la maturité sexuelle, de l'état nutritionnel des animaux et de la température d'élevage (Sinurat *et al.*, 1987). En deçà et au-delà d'une température-seuil (températures critiques inférieures et supérieures), l'animal maintient son homéothermie grâce au phénomène physiologique de thermorégulation. Cette capacité de thermorégulation se matérialise en fonction de la température ambiante par la thermogénèse ou la thermolyse.

Le maintien de l'homéothermie impose que la production de la chaleur générée par le métabolisme soit parfaitement en équilibre avec les pertes de chaleur (Hermann et Cier., 1970 ; Larbier *et al*, 1992). Toutefois, selon De Basilio (2002), les fluctuations de la température corporelle en climat chaud indiquent que la thermolyse a une efficacité limitée chez le poulet de chair. Cet équilibre énergétique chez les homéothermes résulte du bilan qui s'établit entre les entrées et les sorties d'énergie.

Les premières (entrées d'énergie) sont assurées par la consommation d'aliment, qui, au niveau cellulaire, génère des métabolites. Ces derniers résultent de la digestion des glucides et des lipides (rôle énergétique) et des protéines (rôle structural). Ces composés sont ensuite transformés, au cours de la digestion, en nutriments. Les secondes (sorties d'énergie) représentent les dépenses d'énergie. La thermogénèse est assurée par le métabolisme basal, l'activité physique, la thermogénèse de thermorégulation et la thermogénèse alimentaire ou extra-chaleur. Pour maintenir la température du noyau central relativement fixe, l'homéotherme doit éliminer l'excès de chaleur par le mécanisme de la thermolyse.

## II. Sensibilité du poulet de chair à la chaleur

En production avicole, le stress thermique désigne la réaction de l'animal à des températures ambiantes élevées ou froides. L'exposition à la chaleur ambiante recouvre 2 aspects différents, selon la durée et l'amplitude de l'élévation de la température ambiante (Tesseraud et Temim, 1999).

Ainsi, une augmentation brutale et de courte durée (de l'ordre de quelques heures) induit chez le poulet de chair un stress thermique aigu qualifié de « coup de chaleur » (De Basilio et Picard, 2002). La réponse de l'organisme est, elle aussi, immédiate et intense, impliquant des changements physiologiques immédiats et radicaux convergeant vers un seul objectif, la survie de l'animal. Dans ce cas, de fortes mortalités sont enregistrées dans les élevages. En revanche, une élévation modérée, généralement cyclique (températures ambiantes entre 29 et 35°C et plus fraîches la nuit) et sur une période prolongée (de quelques jours à quelques semaines), provoque un stress thermique chronique.

Dans des conditions de stress aigu ou chronique, pour le maintien d'une homéothermie, la réaction de l'animal au stress est une réponse adaptative, qui est à la fois physiologique et comportementale à laquelle s'associent des réactions végétatives, lui permettant de réguler sa production de chaleur, puisqu'elle permet d'améliorer son confort et donc sa productivité. Cette réponse est responsable des perturbations métaboliques, de l'équilibre biochimique et

du comportement alimentaire qui sont le reflet de l'altération de l'axe corticotrope suite à un stress (Nichelmann et Tzsechentke, 2002). C'est un état de stress qui correspond à une intensification de la mobilisation énergétique de l'organisme qui doit soutenir l'effort pour s'adapter à la situation nouvelle. Le niveau de fonctionnement y est plus élevé : c'est « l'hétérostasie » où les changements sont relativement faibles sur une durée assez longue, ce qui permet à l'animal de s'adapter à son nouvel environnement (acclimatation) et atteindre un nouvel état d'équilibre « l'homéostasie » (Diane, 2007). Dans ce cas, les mortalités sont légèrement augmentées et les performances de croissance altérées (De Basilio *et al.*, 2002).

En situation d'hyperthermie, l'animal ne peut éliminer suffisamment de calories, en particulier par évaporation, le bilan calorique devient positif et par voie de conséquence, la température interne s'élève. Cette élévation conduit à son tour à une augmentation de la production de chaleur par l'animal, l'organisme est alors entraîné rapidement dans une succession de phénomènes qui se stimulent réciproquement et aboutissent à la mort.

La température critique maximum est en moyenne de 46°C et l'hyperthermie devient très nette à une température ambiante de 42°C. La température interne est déjà sensible au-delà d'une ambiance thermique de 25°C, l'accroissement est de l'ordre de 0,15°C par degré d'élévation de la température externe.

### III. Réponse de la volaille face au stress thermique en climat chaud

Le stress thermique entraîne des conséquences comportementales, physiologiques, neuroendocriniennes, moléculaires, immunitaires sur les oiseaux, dont elles diminuent également les performances de production (Lara et Rostagno, 2013 ; Lin *et al.*, 2006).

Les oiseaux soumis au stress thermique subissent des modifications physiologiques spécifiques (Smith, 1973 ; Tankson *et al.*, 2001 ; Dagher, 2009). Ces changements sont contrôlés par les opérations intégrées des organes et du système endocrinien afin de réduire la charge thermique. Les réponses physiologiques comprennent l'acclimatation à des températures ambiantes élevées (Yalcin *et al.*, 2001) et les changements dans la consommation d'aliments et d'eau (Donkoh, 1989; Hafez *et al.*, 2011).

La modification des dépenses énergétiques constitue une autre réponse physiologique des oiseaux au stress thermique en conditions chaudes. Les pertes sensibles diminuent et les pertes par évaporation augmentent à partir d'une température supérieure à 29°C ou à 27°C lorsque l'humidité relative est élevée (El Boushy et Van Marle, 1978 ; Mack *et al.*, 2013).

L'augmentation des pertes évaporatoires en climat chaud est associée à un accroissement du rythme respiratoire. En effet, le halètement apparaît vers 28-29°C chez le poulet et se traduit par une très forte augmentation de la fréquence respiratoire accompagnée d'une diminution du volume tidal (Dawson, 1982), nécessitant de l'énergie et entraînant une alcalose du sang (Butcher et Miles, 2011 ; Hafez *et al.*, 2011) qui limite la croissance du poulet (Lin *et al.*, 2006) . Yahav (2009) souligne que ce mécanisme est d'autant plus efficace que l'humidité relative est faible. Cependant, la capacité des volailles à éliminer la chaleur par voie sensible ou par évaporation est limitée.

Chez des poulets en croissance placés dans un environnement adapté, environ 7 % de l'EM sont utilisés pour l'activité physique mais le rationnement alimentaire pourrait augmenter cette proportion jusqu'à 15 % (Wenk et Vanes, 1976). Le halètement représente à lui seul jusqu'à 12 % de l'accroissement de production de chaleur entre 35 et 40°C de température ambiante. Toutefois l'accroissement de la demande énergétique par les muscles respiratoires pourrait être compensé par la diminution de la demande des autres tissus conduisant à peu ou pas de variation de la production de chaleur totale (Hillman *et al.*, 1985).

Ainsi, à moins que le métabolisme basal ne soit réduit par acclimatation ou adaptation génétique ou que la tolérance à l'hyperthermie soit améliorée, la production de chaleur est diminuée par une augmentation de la consommation d'eau et une réduction de l'ingéré alimentaire. La consommation d'eau augmente instantanément lorsque le poulet de chair subit un stress thermique pour compenser les pertes d'eau corporelle lors des pertes de chaleur latente.

La consommation volontaire d'aliments diminue engendrant une baisse de l'extra-chaleur afin de maintenir l'homéothermie (Mac Leon et Geraert, 1988). Selon Dagher (2009), une telle réduction de la consommation alimentaire représente environ 67% de la réduction du taux de croissance chez les oiseaux.

L'animal compense les effets de la chaleur en réduisant l'extra-chaleur en lien avec la thermogénèse endogène ou thermogénèse alimentaire par une diminution de leur consommation alimentaire (Rao ; Nagalakshimi et Reddy, 2002) ou de nutriments spécifiques induisant une production excessive de chaleur (Mashaly *et al.*, 2004 ; Syafwan *et al.*, 2012). En effet, selon Geraert (1991), l'extra-chaleur, qui est typiquement de l'ordre de 15-30 % de l'EM avec des aliments complets, varie avec la composition alimentaire.

La majeure partie de l'énergie alimentaire se trouve sous forme de glucides ou de lipides, d'où l'importance de préciser l'intérêt des glucides ou des lipides comme source énergétique qui dépend de la température ambiante. Les lipides ont l'extra-chaleur la plus

basse des trois classes de nutriments. Ainsi, l'ingestion des glucides produit une augmentation de la chaleur équivalente à 10-15% de l'énergie métabolisable tandis que la graisse peut en produire entre 0 et 5%. Quant aux protéines, elles représentent la plus forte contribution à la thermogénèse alimentaire par rapport aux deux autres nutriments (Tasaki et Kushima 1979 ; Musharaf et Latshaw, 1999). Aussi, augmenter les niveaux protéiques alimentaires ne peut pallier la réduction de performances observée en climat chaud (Husseini et al, 1987). De plus un excès d'apport ou un déséquilibre en acides aminés entraîne un catabolisme accru et une production de chaleur augmentée.

De nombreux auteurs notamment Charles *et al.*,(1981) et plus récemment Etches *et al.* (2008) notent que les effets des températures élevées sont spécifiques et n'agissent pas seulement *via* la nutrition. En effet, un contrôle neuro-hormonal serait impliqué dans l'initiation et le maintien des mécanismes naturels utilisés par les oiseaux pour dissiper la chaleur en période de stress thermique (Haitook, 2006; Lara et Rostagno, 2013). Parmi les hormones les plus impliquées dans la thermorégulation, figurent les hormones thyroïdiennes : tri-iodothyronine ( $T_3$ ) et thyroxine ( $T_4$ ) dont les niveaux sont modifiés lors du stress thermique (Hahn *et al.*, 1966; Mujahid, 2011). Elles n'ont pas la même capacité de régulation de la production de chaleur (Geraert, 1991). Lorsque les oiseaux subissent un stress thermique les niveaux de  $T_3$  et  $T_4$  sont réduits afin de limiter l'élévation de leur température corporelle (Davison *et al.*, 1980).

Outre la  $T_3$  et la  $T_4$ , Etches *et al.*(2008) rapportent que de nombreuses autres hormones sont impliquées dans la lutte contre le stress thermique chez la volaille, telles que la corticostérone (hormone cortico-surrénalienne) et la vasopressine ou ADH (Daghir, 2008). La libération de la vasopressine, déclenchée par l'état de déshydratation, stimule la réabsorption de l'eau par les reins.

Selon Marder (1973) et Verrinder (2008, les protéines du stress thermique (chaperons moléculaire) ont la capacité de se lier à différentes protéines cellulaires thermosensibles afin d'éviter qu'elles ne subissent de modification structurelle irréversible. Une telle réponse peut être spécifique à une race et des travaux ont montré que l'expression dominante du gène chez les espèces indigènes, lorsqu'elle était injectée dans le génome des races commerciales, améliorait leurs performances sous stress thermique.

Le stress thermique inhibe la fonction immunitaire (Mashaly *et al.*, 2004 ; Mujahid, 2011). A titre d'exemple, le faible poids du thymus, de la rate, du foie et l'augmentation du rapport hétérophiles à lymphocytes sont tous des indicateurs de cette réponse immunitaire réduite sous l'effet de la chaleur.

#### IV. Impact de la chaleur sur la physiologie digestive du poulet de chair

Plusieurs auteurs rapportent une diminution de la digestibilité des nutriments suite à la modification par la chaleur de la physiologie digestive des oiseaux (Bonnet, 1990 ; Zuprizal, Chagneau et Larbier 1992 ; Zuprizal *et al.* 1993 ; Bonnet *et al.*, 1997 ; Boudouma *et al.*, 2013).

En effet, Bonnet (1990) observe que les températures ambiantes élevées ont un effet dépréciateur de la digestibilité des nutriments suite aux modifications anatomiques d'organes digestifs chez le poulet de chair, telles que la diminution de la taille du gésier, la réduction de la longueur et de la taille des intestins ainsi que la diminution du poids du pancréas. Ces modifications induisent à leur tour une réduction de la dégradation physique des aliments, une réduction du processus digestif par la réduction du temps du transit digestif et la baisse de la synthèse enzymatique. Selon le même auteur, cette dépréciation de la digestibilité des nutriments est également liée à l'effet de dilution des enzymes digestives, engendré par les quantités d'eau consommée élevées. Ce qui diminue l'efficacité des attaques enzymatiques et réduit la durée du transit digestif.

Tesseraud et Temim (1999) rapportent que la diminution de la digestibilité des constituants de l'aliment à chaud est d'autant plus élevée qu'elle est plus faible au départ.

La fonction d'absorption des nutriments serait également modifiée par la température ambiante. Bonnet *et al.*, (1997) rapporte que l'absorption des nutriments est réduite lors du stress thermique suite à l'augmentation des quantités d'eau consommées qui accélère le transit digestif et réduit l'efficacité de leur absorption. De plus, la diminution du poids du jéjunum et de l'iléon serait à l'origine de la réduction des processus d'absorption (Bonnet, 1990). En revanche, Dibner *et al.*, (1992) ; Mitchell et Carlisle (1992) observent une forte absorption du glucose et du galactose par la membrane intestinale en conditions *in vitro*, lorsque les oiseaux sont exposés à la chaleur. Cette observation est confirmée *in vivo* par Garriga *et al.*, (2005) qui montrent qu'en conditions de stress thermique, la muqueuse du jéjunum du poulet de chair a une grande capacité d'absorption du glucose.

#### V. Impact sur le métabolisme de l'énergie et des protéines du poulet de chair

Le premier substrat énergétique du poulet est le glucose provenant de la digestion enzymatique de l'amidon. Les oiseaux ont développé des mécanismes adaptatifs originaux leur assurant un métabolisme énergétique actif caractérisé par une température et une glycémie basales élevées (42°C et 2 g/L). Ils présentent une glycémie basale aussi élevée,

avec des niveaux plasmatiques d'insuline semblables à ceux des mammifères (Simon *et al.*, 2011), sans que par ailleurs cela ne perturbe le fonctionnement des tissus contrairement aux autres espèces non aviaires (Rideau *et al.*, 2012). En conditions thermiques élevées, Padilha *et al.*, (2005) observent chez le poulet de chair des modifications de l'utilisation du glucose par les tissus et de son contrôle par l'insuline.

Chez les oiseaux exposés à la chaleur, il y a une diminution de la sensibilité à l'insuline à l'état basal, ce qui pourrait réduire l'apport énergétique sous forme de glucose au muscle, limitant ainsi les capacités de synthèse protéique. A l'inverse, à l'état nourri, l'augmentation de la réponse à l'insuline pourrait favoriser la lipogenèse hépatique aboutissant à l'excès d'adiposité chez les poulets élevés en conditions chaudes. Les lipides déposés proviennent donc, essentiellement d'une synthèse *de novo* à partir des glucides alimentaires.

Selon Tesseraud et Temim (1999), en conditions chaudes la proportion d'énergie retenue par le poulet de chair sous forme de lipides est plus élevée alors que celle retenue sous forme de protéines. Cette observation résulterait des modifications de l'utilisation du glucose, en relation avec une altération de la sécrétion d'insuline et de la sensibilité des tissus à cette hormone.

Concernant les protéines, il est établi qu'elles sont renouvelées dans tout organisme, c'est-à-dire synthétisées et dégradées en permanence. Or, selon Temim *et al.*, (1998), la chaleur réduit significativement la protéosynthèse suite à la diminution du potentiel de synthèse puisque l'efficacité de la phase de traduction des protéines est peu modifiée, ainsi que la protéolyse. Selon les mêmes auteurs, la protéosynthèse étant plus affectée que la protéolyse, le dépôt protéique est ainsi réduit. Tesseraud et Temim (1999) confirment les modifications du métabolisme protéique en lien avec la diminution du dépôt protéique et son efficacité à chaud.

Un régime riche en protéines accroît le gain de poids et la rétention protéique, mais l'amélioration est moindre en ambiance chaude. Cependant, cet effet bénéfique de la distribution d'un régime riche en protéines pourrait varier au chaud, selon le génotype du poulet en fonction de leur vitesse de croissance et leur état d'engraissement (Cahaner *et al.*, 1995). Selon Tesseraud *et al.*, (1997), à température élevée, (32°C), l'alimentation du poulet de chair avec des régimes riches en protéines ne modifie significativement, ni l'intensité de la protéosynthèse, ni le potentiel de synthèse ou l'efficacité traductionnelle. Elle tend, par contre, à réduire la protéolyse, ce qui contribue à améliorer le dépôt protéique.

## VI. Impact de la chaleur sur les besoins nutritionnels du poulet de chair

La plupart des effets à long terme des températures ambiantes élevées chez le poulet de chair semblent agir *via* la nutrition et il semblerait que même les effets aigus du stress thermique pourraient être influencés par l'état nutritionnel de l'oiseau ou par la qualité de l'aliment (Geraert, 1991).

Les besoins nutritifs doivent satisfaire les besoins d'entretien et de production. Le premier besoin de l'animal concerne ses dépenses énergétiques. En effet après l'eau, les constituants énergétiques sont ceux dont la privation affecte le plus rapidement la santé de l'animal et sa survie. Le besoin énergétique d'entretien qui inclut, au-dessus du métabolisme de base, une partie de l'activité physique et de l'utilisation de l'aliment serait réduit en conditions chaudes (Sykes 1977), permettant ainsi une plus grande disponibilité d'énergie pour la production si l'apport des autres nutriments est adéquat.

Concernant les protéines, dès 1962, Scott attirait déjà l'attention sur la fluctuation du besoin protéique de l'oiseau selon la saison, montrant ainsi le rôle que peut avoir la chaleur ambiante sur le besoin azoté par le relai de la consommation de l'animal. En climat chaud, les concentrations en acides aminés et en minéraux devront être légèrement augmentées par rapport aux recommandations en climat tempéré. Lorsque la température ambiante est plus élevée, les besoins d'entretien sont réduits mais l'indice de conversion est amélioré par la concentration plus forte des acides aminés.

## VII. Interaction entre besoins nutritionnels et température ambiante élevée

Charles *et al.*, (1981) rapportent l'absence d'interaction entre la température ambiante et le besoin nutritionnel du poulet de chair ; ils suggèrent que les effets de la chaleur sont spécifiques et qu'ils n'agissent pas seulement *via* la nutrition, mais aussi par l'intermédiaire d'un contrôle neuro-hormonal. Cette hypothèse est confirmée par Abdelsamie *et al.* (1983) qui observent qu'il est difficile d'améliorer le gain de poids, et particulièrement celui la masse maigre chez le poulet de chair élevé au chaud, par la seule modification de la composition alimentaire. Pour Larbier et Leclercq (1992) en élevant la température ambiante, l'efficacité alimentaire est améliorée et l'indice de consommation est réduit.

### VIII. Influence de la chaleur sur les performances zootechniques du poulet de chair

Les impacts du stress thermique à chaud sur la volaille entraînent une réduction de la production dans les exploitations (Cahaner *et al.*, 1996 ; Ynis et Cahaner, 1999 ; Soleimani *et al.*, 2010). La qualité de la viande du poulet est également dépréciée (Sohail *et al.*, 2012).

Les modifications des performances des volailles évoluant en conditions chaudes, résultent des changements observés par plusieurs auteurs au niveau de la sphère digestive et métabolique. En effet, la réponse de la volaille à l'élévation des températures se matérialise par la diminution du métabolisme de base, de l'utilisation digestive des aliments, la réduction de l'énergie métabolisable, celle de l'ingéré alimentaire, de l'efficacité de conversion de l'alimentation et l'alcalose respiratoire décrites par de nombreux auteurs (Adams *et al.*, 1996 ; Temim *et al.*, 2000 ; Oskan, 2003, Ozbey *et al.*, 2004 ; Balnave et Brake, 2005 et Ziad, 2006).

Ces modifications entraînent une diminution du gain de poids quotidien associée à une immunodépression, les rend plus sensibles à diverses autres agressions (Hermann et Cier, 1970 ; Sohail *et al.*, 2012). Washburn et Eberhart (1988) précise que cet effet est observé, quelle que soit le génome de la volaille.

Le poulet de chair a fait l'objet de nombreux travaux relatifs à l'effet du stress thermique dû en raison de sa plus grande sensibilité à la chaleur comparée à celle des autres oiseaux à croissance plus lente (Garriga *et al.*, 2005), particulièrement en phase de finition (Géarert *et al.*, 1996 a).

Il est actuellement admis que les performances maximales du poulet de chair en croissance sont obtenues dans des conditions optimales des températures variant entre 18 et 20°C (Yalcin *et al.*, 2001), quoique pour Reece et Deaton (1971), l'utilisation optimale des aliments par le poulet de chair se fait à une température ambiante de l'ordre de 21°C.

Le poulet est sensible à la température ambiante qui, selon Yalcin *et al.* (2001) et Lara et Rostagno (2013) est susceptible de modifier à la fois sa vitesse de croissance et d'engraissement et l'augmentation de la mortalité.

Plusieurs auteurs (Smith, 1990 ; Geraert *et al.*, 1996a ; Borges *et al.*, 2004 et Daghir, 2009) rapportent que l'élévation de la température corporelle, suite à l'augmentation de température ambiante, a un effet négatif sur les performances de croissance des oiseaux. En effet, une réduction de 63% du taux de croissance est attribuée à une réduction de la consommation alimentaire (Dale et Fuller, 1979). Une chute de 23% du poids vif corporel résulte d'une réduction de 15% de l'apport alimentaire (Yalcin *et al.*, 2001). Mitchell et

Goddard (1990) et Geraert (1991) signalent les mêmes effets, même lorsque les consommations sont égalisées.

La faible consommation alimentaire et la réduction de la digestibilité des aliments, observées chez le poulet de chair exposé à une température élevée sont à l'origine d'une réduction de l'apport en nutriments et de la réduction de la croissance et du rendement en viande (Yalcin *et al.*, 2001).

Outre, la diminution de la quantité de l'aliment consommée, Gous et Morris (2005) ; Attia *et al.* (2009) expliquent cette baisse de croissance à une qualité moindre des aliments exposés à des températures élevées.

Geraert *et al.*, (1996 a) associent la baisse de croissance du poulet de chair en conditions chaudes, à une diminution de l'efficacité du dépôt protéique, suggérant de profondes modifications du métabolisme protéique et de l'utilisation et de la régulation du glucose. A cet effet, Rideau (1997) démontre l'implication de la sécrétion d'insuline et son action dans diverses perturbations métaboliques qui accompagnent ou induisent des défauts de croissance.

Parallèlement à ces travaux, Tesseraud *et al.*, (1997) observent que l'augmentation du taux protéique du régime semble améliorer la croissance et le dépôt des protéines corporelles des animaux élevés en environnement chaud.

Outre la diminution de la consommation alimentaire et la croissance des poulets, la chaleur augmente significativement leur engraissement (Sonayia *et al.*, 1990 ; Aïn Baziz *et al.*, 1996 et Geraert *et al.*, 1996 a). Selon Geraert *et al.* (1996 b), la glycémie et l'insulinémie basale des poulets soumis à la chaleur ne sont pas modifiées, témoignant d'une insulino résistance déjà signalée par Padilha *et al.* (1994) au niveau des tissus périphériques chez le poulet élevé à des températures élevées.

En effet, dès 1979, Bray et York notent que l'engraissement du poulet par la résistance basale à l'insuline pouvait traduire une difficulté de captation du glucose par les cellules musculaires. Un plus faible prélèvement périphérique de glucose par les muscles pourrait augmenter la disponibilité en glucose pour la lipogénèse dans le foie, favorisant le stockage de lipides. Tesseraud et Temim (1999) n'expliquent pas le fort engraissement des poulets élevés en conditions de chaleur par une lipogénèse hépatique accrue, mais plutôt par une moindre utilisation des réserves corporelles, la lipogénèse n'étant pas augmentée.

Selon Renaudeau *et al.* (2012), le problème étant majoritairement lié au métabolisme, ce sont les animaux à haut niveau de production qui sont les plus impactés par les effets de la chaleur. Leur haut niveau d'ingestion induit une production élevée de chaleur métabolique en dégageant plus de chaleur suite au processus digestif intense des aliments. Ainsi, ils ressentent

plus fortement les effets de la chaleur que les animaux moins productifs ayant une prise alimentaire moindre.

Outre la réduction du rendement en viande, la qualité de la viande est également compromise chez les oiseaux stressés par la chaleur, c'est le cas du poulet de chair (Tankson *et al.*, 2001 ; Dai *et al.*, 2012; Imik *et al.*, 2012). Lorsque les oiseaux sont soumis à un stress thermique, les réserves de glycogène s'épuisent rapidement et sont associées à une faible rétention d'eau en raison de la dénaturation des protéines dans les viandes, il en résulte une dépréciation de la texture de la chair (Imik *et al.*, 2012). De plus, le niveau de dépôts adipeux est augmenté (Furlan *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2007; Rosa *et al.*, 2007).

# **CHAPITRE 5**

**MATERIEL ET METHODES**

La mesure du potentiel nutritionnel de grains de maïs (céréale de référence) et de céréales produites en Algérie (millet, triticale et orge) a été réalisée chez le coq (*Gallus gallus*) de population locale évoluant en conditions de température modérée et élevée.

Les essais sur animaux ont été menés au département de zootechnie de l'ENSA et l'analyse chimique des céréales étudiées et des excréta a été réalisée au laboratoire d'alimentation animale du CIRAD (Montpellier).

## I. Mesures expérimentales

En production animale, l'intérêt nutritionnel que revêt une matière première est fonction de son profil chimique, de son acceptabilité par les animaux, et de la biodisponibilité de ses nutriments. Ce premier screening est appelé à être affiné dans un deuxième temps par des considérations d'ordre économique et environnemental.

Les objectifs assignés aux essais réalisés dans le cadre de cette étude sont :

- L'étude comparative de la composition chimique du grain de maïs (céréale de référence) et celle des grains de millet, d'orge et de triticale, cultivés en Algérie ;
- L'évaluation du potentiel nutritionnel des céréales grains locales comparé à celui du maïs, lorsqu'elles sont distribuées à des coqs placés en conditions d'ambiance optimale et chaude.

La méthodologie de travail mise en place à cet effet a reposé sur la mesure :

- a- Des principaux composants chimiques des 4 céréales étudiées ;
- b- De leur potentiel énergétique chez le coq fermier exposé à des températures ambiantes de 23°C et 33°C ;
- c- De la digestibilité (apparente et réelle) de leur matière sèche, de leurs protéines, amidon et MG chez le coq fermier exposé à des températures ambiantes de 23°C et 33°C ;

Il a été également étudié l'effet de la température ambiante sur la température corporelle des coqs et leur consommation d'eau au cours des 2 essais.

## II. Dispositif expérimental

La valeur nutritionnelle de maïs, millet, orge et triticale est étudiée chez le coq à l'entretien. En début d'expérimentation sur la base de leur poids vifs, suivant un dispositif factoriel 2x2 à groupes appariés, 2 lots différents de par la température ambiante ont été

constitués: le premier est soumis à une température optimale (**to**) et le second est soumis à une température élevée (**te**). Dans chaque lot les 4 groupes de coqs sont alimentés avec une des quatre céréales étudiées (figure 4).

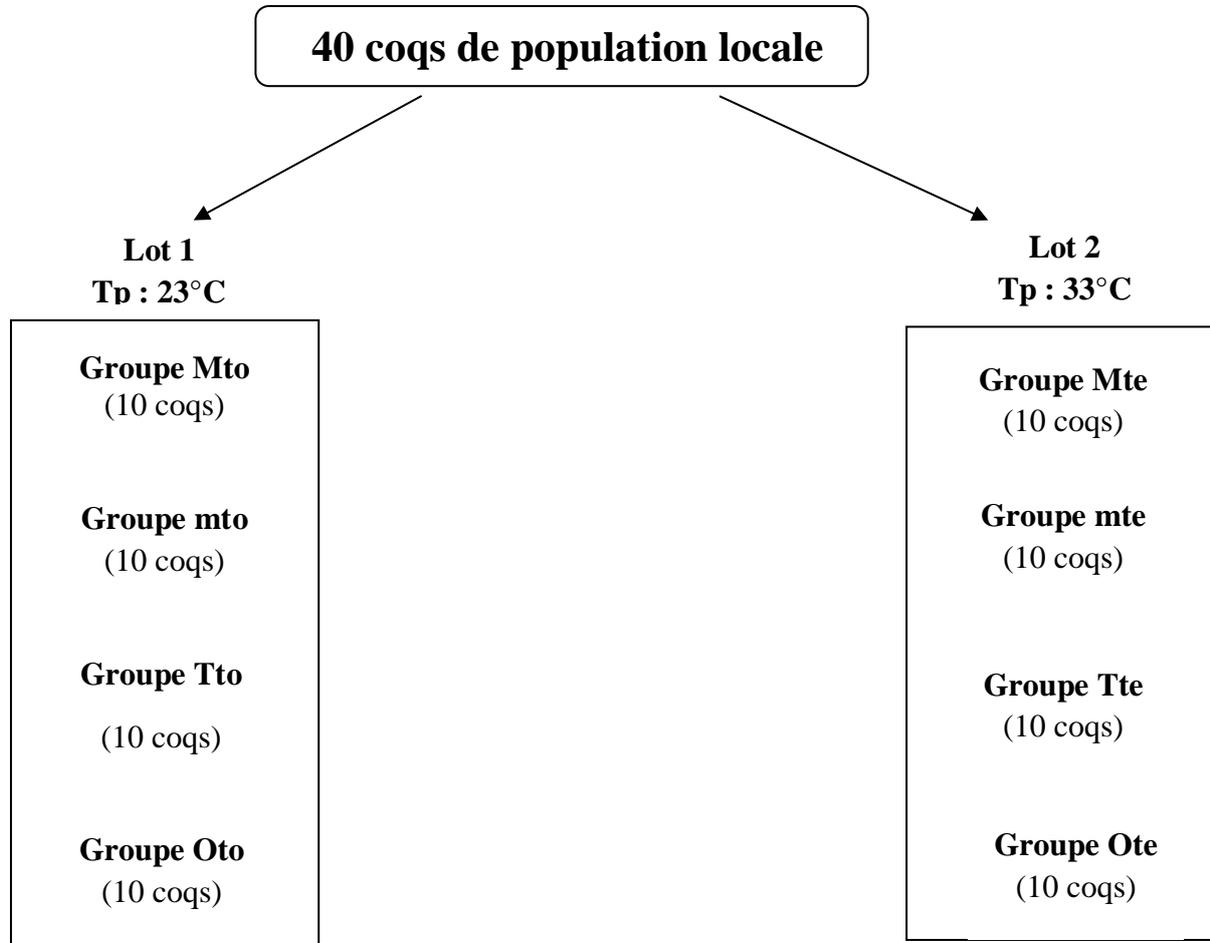


Figure 4 : Dispositif expérimental

Où les lots constitués de 1 à 8 sont :

Mto : Maïs T° optimale ;	MtE : Maïs T° élevée ;	mto : Millet T° optimale ;	mtE : Millet T° élevée
Tto : Triticale T° optimale ;	TtE : Triticale T° élevée ;	Oto : Orge T° optimale ;	OtE : Orge T° élevée

### III. Matériel

#### III.1. Animaux

Le modèle animal utilisé est le coq (âgé en moyenne de 2 ans). Il constitue un modèle de référence, car présentant un métabolisme à l'entretien, il permet de mesurer des digestibilités et des valeurs d'EM sans qu'elles ne soient biaisées par le déroulement de métabolisme de production particulier. Le coq est considéré comme le meilleur estimateur de la valeur nutritionnelle des aliments destinés aux volailles, pouvant être utilisé durant de longues périodes expérimentales et supportant relativement aux jeunes oiseaux, des régimes déséquilibrés (Sibbald et Price, 1980).

Les coqs utilisés (au nombre de 40) sont de type fermier et apparentés à 4 phénotypes différents (se distinguant les uns des autres par la couleur des pattes, la couleur du plumage et la présence ou non d'une huppe). Ils proviennent de l'institut technique d'élevage de Baba Ali (ITELV) où leur élevage a été mené sur parcours ; leur poids vif moyen à leur réception est de  $1973 \pm 116$ g.

#### III.2. Aliment

Les analyses chimiques et les bilans digestifs ont été réalisés sur des grains de maïs (**M**) de triticale (**T**), d'orge (**O**) et de millet perlé (**m**) représentés par la figure 5.

- Le maïs grain (*Zea mays*) est commercialisé par l'office national d'aliment pour bétail de Kouba. Cette céréale est importée et constitue à nos jours en Algérie, la céréale de base des aliments destinés aux volailles (Meziane *et al.*, 2013) ;

- Le millet perle (*Pennisetum glaucum*) (mil pénicillaire, petit mil, mil chandelle), provient d'une culture menée dans la wilaya d'Adrar ;

- Le triticale (*Triticum secale*) de type « printemps » est issu d'un échantillon de récolte dans la wilaya de Tipaza ;

- L'orge (*Hordeum vulgare*, variété Saïda) nous a été fournie par la station expérimentale de l'ITGC d'El-Harrach. Ces 3 céréales locales sont issues de la récolte de 2012.



Figure 5 : Céréales grains étudiées

#### IV. Conditions expérimentales des mesures

##### ➤ Local

Le local de mesures sur coqs est un espace de 30 m<sup>2</sup>, présentant au centre et tout le long des 4 parois latérales, des paillasse d'un mètre de hauteur sur lesquelles les cages à métabolisme ont été disposées. Les mesures classiques de désinfection prophylactique du local ont été prises avant la mise en place des animaux.

### ➤ Cages

Les cages à métabolisme utilisées pour la réalisation du bilan digestif sont en fer galvanisé, elles se présentent sous forme d'un bloc composé dans le sens de la hauteur de 2 cages individuelles (photo en annexe 1). Chaque cage présente les dimensions suivantes : 35 (l) x 26 (L) x et 38 (H) cm de profondeur ; elle est munie d'une mangeoire et d'un abreuvoir ainsi que d'un plateau coulissant permettant de collecter les fientes de l'oiseau (photo en annexe 2).

Les cages sont disposées les unes face aux autres afin de faciliter l'adaptation des coqs à leurs nouvelles conditions de vie (espace, modalités d'alimentation et d'abreuvement) tel que préconisé par Appeleby *et al.* (2004).

### ➤ Conditions d'ambiance

Les mesures de bilan digestif sur coqs ont été réalisées dans 2 conditions d'ambiance différentes : en conditions d'ambiance optimale, telle que recommandée en élevage du poulet de chair (**to**) et en conditions d'ambiance chaude (**te**).

### ✚ Température

L'essai à température modérée s'est déroulé dans une ambiance maintenue à  $23,17 \pm 0,47^{\circ}\text{C}$ , elle correspond à une zone de confort thermique dans laquelle la régulation thermique par les volailles et la conversion alimentaire sont optimisées.

L'essai « température élevée » (**te**) a été réalisé à  $33,33 \pm 0,60^{\circ}\text{C}$ , elle reflète en moyenne le niveau thermique enregistré dans des élevages avicoles algériens en conditions chaudes (Picard *et al.*, 1993).

Les 2 niveaux expérimentaux d'amplitude thermique ont été maintenus grâce au contrôle d'un chauffage à gaz et d'un climatiseur installés dans le local où se sont déroulés les bilans alimentaires.

### ✚ Humidité relative

En conditions de température de  $23^{\circ}\text{C}$ , l'humidité relative de l'air du local a été maintenue à  $68,42 \pm 3,02\%$ . En ambiance chaude, le degré hygrométrique du local a été contrôlé à l'aide d'humidificateurs afin de le maintenir aux alentours de  $62,87 \pm 2,75\%$ . Ces 2 niveaux d'hygrométrie se situent dans la gamme de 55 à 80% recommandée par la plupart des

auteurs, en fonction de la saison et de la température ambiante (Castello, 1990 et Fedida, 1996)

### Ventilation

Le jeu d'ouverture et de fermeture des ouvertures du local a permis de maintenir durant les essais menés, les conditions de température et d'hygrométrie fixées par les protocoles expérimentaux.

### Eclairage

L'éclairage du lieu de déroulement des essais sur coqs a été assuré en continu par 2 néons, assurant une homogénéité de la répartition de la lumière dans le local et stimulant le niveau d'ingestion des coqs. En effet, la lumière blanche diffusée à faible intensité (2 Watts/m<sup>2</sup>) concourt à maintenir les animaux dans une ambiance calme propice à leur état de bien-être.

## V. Méthodes

La mesure de la valeur nutritionnelle des grains de céréales étudiées a été effectuée *in vivo* par la méthode du bilan digestif par voie directe. Le bilan digestif a été inspiré du protocole de la « méthode de référence » de Bourdillon *et al.* (1990a), se basant sur le principe de collecte totale des excréta (Sibbald, 1976).

### V.1. Protocole expérimental du bilan alimentaire

Le protocole suivi pour chaque lot et chaque groupe de coqs comprend 4 étapes : La phase d'adaptation, un jeûne de 24h, la phase du bilan digestif proprement dit et un dernier jeûne de 24h (Figure 6).

J : jour ; P : pesée des coqs

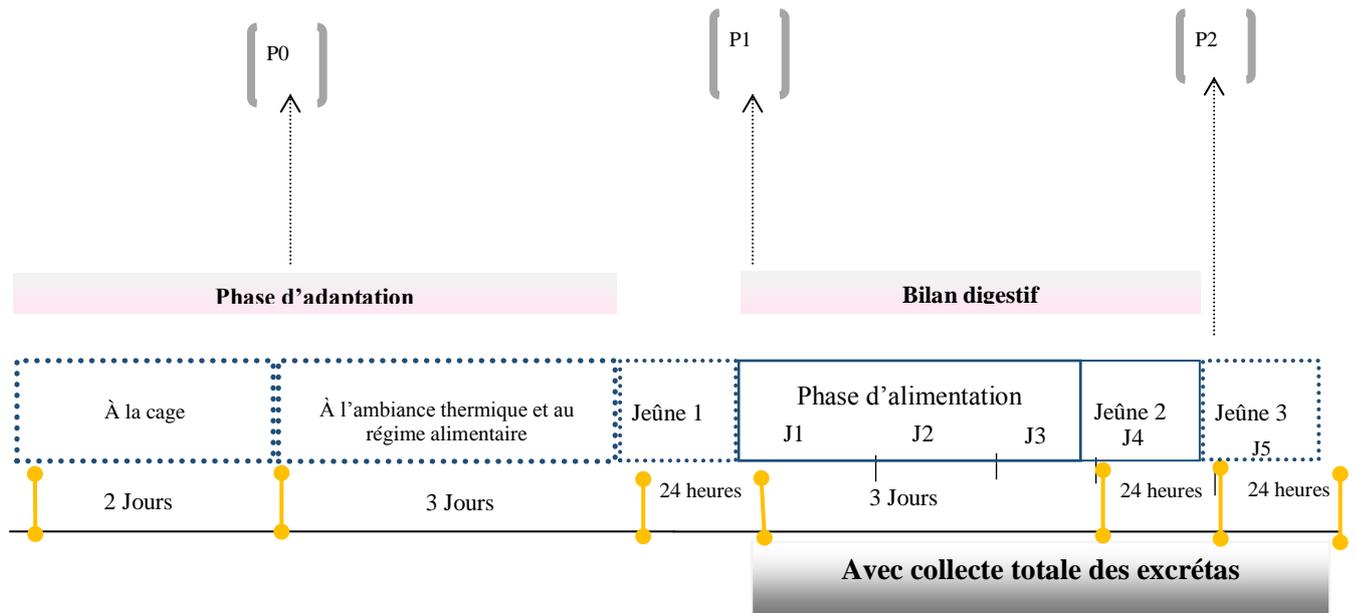


Figure 6 : Protocole expérimental de mesure de la digestibilité chez le poulet (Bourdillon *et al.*, 1990)

#### ➤ La période d'adaptation

Cette phase dure 5 jours ; elle a pour but d'adapter l'oiseau à son nouvel environnement : cage, aliment et conditions de température et d'humidité relative.

Les coqs ont été individuellement installés en cages et ont reçu durant cette phase de l'aliment ponte (aliment distribué lors de leur élevage sur parcours). Par la suite, ils ont été répartis sur la base d'un poids vif homogène (P0 de  $1070 \pm 109$  g) selon le dispositif expérimental décrit en figure 4.

#### ➤ Le jeûne 1

A l'issue des 5 jours d'adaptation, les animaux ont été répartis sur la base d'un poids vif homogène (P0 de  $1070 \pm 109$  g) selon le dispositif expérimental décrit en figure 4.

Leur mise à jeun durant 24 h (jeûne 1) a permis d'assurer la vacuité du tractus gastro-intestinal des résidus de l'aliment ingéré précédemment. L'accès des coqs à l'eau a été laissé libre.

➤ La période du bilan digestif

La durée du bilan digestif proprement dit a été de 4 jours (J1 à J4), répartis en 3 jours d'alimentation et 1 jour de jeûne. Les grains de millet, du triticale et d'orge ont été distribués entières, tandis que les grains de maïs ont été concassés (0,5 mm de diamètre). La forme de présentation des grains de céréales n'a pas d'impact sur leur utilisation digestive (Noirot et *al.*, 1998).

La distribution des grains s'est faite 2 fois par jour (9 et 16h) à raison de 150g/coq à J1, J2, et J3. L'eau de boisson a été enrichie par un complexe minéral-vitaminique (10 ml/ l) dont la composition est rapportée en annexe 3.

Au lendemain de chaque jour d'alimentation (à J2, J3 et J4), les excréta de chaque coq sont collectés à la même heure (9h). La même opération a concerné le refus alimentaire.

➤ Le jeûne 2

A J4, les coqs ont été soumis à un jeûne de 24h afin de collecter en début de J5 les excréta représentant les résidus alimentaires de l'ingéré précédent.

Les excréta sont identifiés, débarrassés des desquamations, plumes et particules alimentaires, puis conservées à - 20°C. Pour chacun des 2 bilans digestif, les excréta collectés pour chaque coq à J2, J3, J4 et J5 sont cumulés et constituent l'excréta d'origine alimentaire (EOA) ; il est identifié et conservé à -20°C.

➤ Le jeûne 3

A J5, les coqs ont été de nouveau soumis à 24h de jeûne ; le lendemain les excréta d'origine endogène (EOE) sont collectés et ont été soumis au même traitement que les EOA. Durant le jeûne, les coqs ont eu libre accès à l'eau.

Les EOE des 10 coqs de chaque groupe et de chaque lot ont été « poolés » par mélange de fraction aliquotes (en moyenne 1,6 g/ coq).

Préalablement aux analyses chimiques, les EOA ont été décongelés et ont fait l'objet d'une dessiccation complète en étuve portée à 62°C pendant 24h, puis pesés. Après une réhumidification pendant 2h à l'air ambiant, ils sont broyés (particules de 0,5 mm de diamètre).

Les excréta d'origine alimentaire de chaque coq (de chaque groupe et de chaque lot) ont fait l'objet d'analyses chimiques pour la détermination de leur teneur en azote, amidon, EB et en AcU. La teneur en azote, en AcU et en EB des excréta d'origine endogène a été

mesurée sur le pool obtenu en cumulant les excréta de chaque groupe dans chacune des conditions de température.

## V. 2. Méthodes de mesures

### V.2.1. Méthodes de mesures des paramètres d'ambiance

La température ambiante ainsi que l'humidité relative ont été relevées quotidiennement (4 fois/ jour) chaque jour (à 8h, 12h, 14h, et 16h) durant l'expérimentation en conditions d'ambiance chaude et tempérée.

### V.2. 2. Méthodes de mesure des paramètres zootechniques

#### ➤ Quantité d'aliment et d'eau consommées

Durant les bilans digestifs, l'ingéré alimentaire (IA) en grains de céréales est mesuré quotidiennement par différence entre la quantité distribuée et celle refusée. Il est exprimé en gramme de MS/j/a.

La consommation quotidienne d'eau (CE) a été également mesurée par différence entre l'eau distribuée et celle restante dans les abreuvoirs après 24h. Elle est exprimée en ml/j/animal et ml/ j /kgP<sup>0,75</sup>.

Le ratio consommation d'eau (CE) et consommation d'aliment(CA) a été calculé.

#### ➤ Pesées des animaux

Durant le bilan proprement dit, les pesées des coqs ont été effectuées à J1 et J5 (9h). Elles sont réalisées à l'aide d'une balance électronique  $\pm 0,1$  kg de portée, elles sont exprimées en kg PV et en kg P<sup>0,75</sup>.

#### ➤ Mesure de la température corporelle des coqs

La prise de la température corporelle des coqs a été effectuée en fin de journée (16h) à J1, J2, J3, J4, J5, J6 du bilan digestif.

A l'aide d'un thermomètre à sonde, placé à 6 cm de profondeur du cloaque, dans le côlon terminale (De Basilio *et al.*, 2001), la température rectale a été enregistrée après 10 secondes environ de stabilisation de la valeur affichée.

### V.2. 3. Méthodes des mesures chimiques

➤ Les analyses chimiques ont été réalisées selon la méthode classique et celle de spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR). Le principe de la SPIR est rapporté en annexe 4. Les analyses ont été effectuées en triple quel que soit le type d'échantillon (céréales et excréta). Selon le principe chimique à déterminer, le diamètre des particules des broyats est de 0,5 ou de 1mm, selon les recommandations d'AFNOR (1982). Un broyeur de type ultra-centrifuge (Retsch ZM100) a été utilisé pour cette opération.

➤ Les analyses chimiques effectuées sont celles de :

- -La matière sèche des grains de céréales et des excréta d'origine alimentaire et endogène ;
- L'azote des grains de céréales et des excréta d'origine alimentaire ;
- L'amidon des grains de céréales et des excréta d'origine alimentaire ;
- La cellulose brute et les matières minérales des grains de céréales ;
- L'énergie brute des grains de céréales et des excréta d'origine alimentaire et endogène ;
- L'acide urique et l'azote fécal des excréta d'origine alimentaire et endogène.

➤ L'aliment et les excréta d'origine alimentaire et endogène ont fait aussi l'objet des mêmes analyses chimiques par la SPIR, à l'exception de la cellulose brute des grains de céréales.

➤ Matière sèche (MS)

➤ La matière sèche des grains de céréales a été déterminée par dessiccation dans une étuve à 103°C, pendant 3 heures (AFNOR, 1989).

➤ Amidon

Le mode opératoire suivi pour la mesure de l'amidon par la voie enzymatique est celui décrit par AFNOR (1997) ; il est porté en annexe 5.

L'amidon est déterminé dans les aliments (70 mg) ou dans les excréta (500mg) par la méthode de l'amyloglucosidase/DMSO/G6PDH. Il est hydrolysé par l'amyloglucosidase après solubilisation au diméthylsulfoxyde (DMSO, 95%) à chaud. Le glucose formé est dosé à l'aide d'un kit de dosage du glucose (Méthode BOERHINGERMANNHEIM, 1980).



### Principe de la mesure

Le principe repose sur les 3 étapes suivantes :

- La dispersion de l'échantillon à l'aide d'hydroxyde de potassium ;
- L'hydrolyse de l'amidon en unités glucose avec de l'amyloglucosidase ;
- Le dosage de glucose obtenu par le système hexokinase.



### Calcul

La teneur en amidon est calculée comme suit :

$$\text{Amidon en \%MS} = (\Delta A \times 19,42 \times D / \text{Pe}) \times (100 / \text{MS})$$

Où :

$$\Delta A = \Delta A_{\text{échantillon}} - \Delta A_{\text{blanc échantillon}} ;$$

D : Facteur de dilution éventuel à appliquer ;

Pe : Prise d'essai (g) ;

MS : Matière sèche (%).

#### ➤ Matière grasse

La teneur en matière grasse des excréta ainsi que celle des grains de céréales ont été déduites par prédiction.

#### ➤ Les protéines brutes

La concentration en protéines d'un aliment est estimée en fonction de sa teneur en azote N sur la base d'une teneur moyenne de 16 % dans les protéines (végétales ou animales). La détermination de l'azote a été réalisée par la méthode de Kjeldhal.



### Principe

La matière organique contenue dans l'échantillon est minéralisée par de l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 95%) à chaud, en présence d'un catalyseur. L'azote organique est réduit en ammoniac sous forme de sulfate d'ammonium. Une distillation du digesta par neutralisation avec la soude (Na OH 40%) à chaud permet le dégagement de l'ammoniac qui, récupéré dans de l'acide borique, est titré avec de l'acide sulfurique à 0,1 N.



## Calcul

La teneur en azote et en protéines sont calculée comme suit :

La teneur en azote est :

$$N(\%) = (V \times 0,14 / PE) \times 100$$

La teneur en Matières Azotées Totales est :

$$MAT(\%) = (V \times 0,14 / PE) \times 6,25$$

Où :

**V** : Volume d'acide sulfurique 0,1 N ajouté lors de la titration (ml) nécessaire à la neutralisation pour la prise d'essai ;

**PE** : Prise d'essai (g).

➤ Matières minérales (MM)

La matière minérale est obtenue après calcination de la matière organique dans un four à moufle pendant 4 heures à 550°C (AFNOR, 1977). Elle est calculée comme suit :

$$MM (\%) = MS - MO$$

Où :

**MS** : Matière sèche ;

**MO** : Matière organique ;

➤ Cellulose brute (CB)

La teneur en cellulose brute des échantillons a été déterminée par la méthode de WEENDE (1909) qui repose sur le principe de 2 hydrolyses successives, l'une acide (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et l'autre basique (NaOH). Elles sont suivies d'un lavage à l'acétone, un étuvage (de 8h à 105°C) et d'une calcination de 3h à 550°C dans un four à moufle (AFNOR, 1982). Les résultats sont exprimés par la formule suivante :

$$CB (\%) = \left[ (P' - P'') / \text{Poids sec de l'échantillon} \right] \times 100$$

Où :

**P'** : Poids à l'étuvage correspondant au poids de la cellulose brute sèche avant calcination (g) ;

**P''** : Poids après calcination correspondant au poids des cendres de la cellulose brute (g).

➤ Acide urique

La teneur en azote urique des fèces est déterminée par spectrophotométrie par la méthode de Marquardt (1983). Le principe de la méthode se base sur l'absorbance dans l'ultra-violet d'échantillon d'excréta mis en solution dans l'acide perchlorique. La description de la méthode est en annexe 6.

Le calcul se fait via la courbe « étalon » de la densité optique (DO). A partir de la fonction  $DO=f$  (concentration en acide urique, en mg/ml), la concentration des échantillons

est calculée selon la formule suivante :  $AU (\%) = \left( \frac{DO \times Ve}{a \times PE \times 1000} \right) \times 100$

Où :

**AU** : Acide urique ;

**DO** : Densité optique lue à 285 nm :  $DO=f$  (concentration d'acide urique, en mg/ml);

**a** : Pente de la droite ;

**PE** : Prise d'essai d'excréta (g MS) ;

**Ve** : Volume d'extraction (ml).

#### V.2.4. Méthode de mesure de la valeur nutritionnelle des grains de céréales

##### V.2.4 .1. Méthode de mesure de la valeur énergétique des grains de céréales

➤ Teneur en énergie brute des grains de céréales

La valeur calorifique brute du millet, triticale, orge et maïs et des excréta a été mesurée en bombe calorimétrique adiabatique de type (IKA C2000). L'annexe 7 décrit la méthode de mesure.



#### Principe

Le principe de la mesure repose sur la combustion totale d'une prise d'échantillon (conditionnée sous forme d'une pastille de 1 à 2g) sous oxygène dans une bombe calorimétrique adiabatique.



#### Calcul

La valeur calorifique brute est calculée à partir de l'augmentation de la température de l'eau contenue dans le calorimètre et de la capacité calorifique réelle moyenne de l'appareil.

Elle est exprimée en kcal/g par rapport à la matière sèche de l'échantillon selon l'expression suivante :  $Q = \left( (C \times \Delta t) - e / PE \right) \times 100 / MS$

Où :

**Q** : Valeur calorifique brute (kcal/ kg MS) ;

**C** : Capacité calorifique réelle du calorimètre (kcal par degré Kelvin) ;

**$\Delta t$**  : Elévation de température lors de la combustion (degré Kelvin) ;

**e** : Correction de la chaleur de combustion du fil d'ignition (kcal) ;

**PE**: Prise d'essai (g) ;

**MS** : Matière sèche de l'échantillon (%).

#### ➤ Energie métabolisable

La valeur de l'énergie métabolisable des grains de céréales étudiés est exprimée selon le système de l'énergie métabolisable apparente « EMa » et l'énergie métabolisable réelle « EMr ».

Les oiseaux utilisés dans nos essais étant à l'entretien, nous avons opté pour la formule de l'énergie métabolisable sans correction azotée comme valeur d'énergie métabolisable.

#### ➤ Energie métabolisable apparente (EMa)

C'est en fait l'énergie disponible pour les besoins métaboliques de l'animal, c'est-à-dire les besoins d'entretien et de production. Le calcul de l'EMa s'appuie sur la mesure individuelle de la quantité ingérée et de l'énergie brute des fientes et des aliments, selon la formule suivante :  $EMa \text{ (kcal/kg)} = (Q_a \times EB_a - Q_{ex} \times EB_{ex}) / Q_a$

Où:

**Q<sub>a</sub>** : Quantité d'aliment ingérée (g) ;

**EB<sub>a</sub>** : Énergie brute de l'aliment (kcal/kg) ;

**Q<sub>ex</sub>** : Quantité d'excréta (g) ;

**EB<sub>ex</sub>** : Énergie brute des excréta (Kcal/kg).

#### ➤ Energie métabolisable réelle (EMr)

Cette forme d'énergie est une correction de l'énergie métabolisable classique par rapport à la fraction d'énergie contenue dans les excréta d'origine endogène qui accompagne l'excrétion des fientes d'origine alimentaire. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\text{EMr (kcal/kg)} = \text{EMa} - \left[ (\text{EBen} \times \text{Qen}) / \text{Qa} \right]$$

Où :

**EMa** : Energie métabolisable apparente (kcal/kg) ;

**EBen** : Énergie brute des excréta d'origine endogène (kcal/kg) ;

**Qen** : Quantité d'excréta d'origine endogène (g) ;

**Qa** : Quantité d'aliment ingéré (g),

#### V.2.4.2. Méthode de mesure de la digestibilité

La digestibilité d'un aliment ou d'un principe nutritif rend compte de la fraction dégradée dans le tube digestif de l'animal et qui est supposée être absorbée par l'animal. Elle se base sur la mesure de la quantité de ce composant ingéré (QI) auquel est défalquée la quantité de ce même composant présent dans les excréta (Qex). La différence est ainsi rapportée à la quantité d'aliment ingéré. Elle est classiquement appréciée par le coefficient de digestibilité apparente dont le calcul est exprimé par la formule suivante :

$$\text{CUDa (\%)} = (\text{QI} - \text{Qex} / \text{QI}) \times 100.$$

Quant à la digestibilité réelle ou vraie, c'est une digestibilité corrigée par rapport aux composants provenant de la fraction endogène de l'animal. La correction de la valeur de la digestibilité apparente par rapport à la fraction des résidus d'origine non alimentaire (enzymes, desquamation, etc.) permet le calcul du CUDr selon l'équation :

$$\text{CUDr (\%)} = \text{CUDa} - \left[ (\text{QCen}) / \text{QCf} \right]$$

Où:

**QCf**: Quantité du principe nutritif de la ration ingéré (g de MS) ;

**QCen** : Quantité du principe nutritif excrété d'origine endogène (g de MS).

La digestibilité apparente de la matière sèche, des protéines et de l'amidon des céréales expérimentales ont été mesurées chez les coqs placés en conditions de température modérée et élevée.

Quant à la digestibilité réelle, elle n'a été calculée que pour les protéines et la matière sèche des céréales distribuées dans les 2 lots expérimentaux.

➤ Mesure de la digestibilité des protéines du millet, du triticale et de l'orge

Chez les oiseaux, le cloaque constitue un réceptacle où la fraction indigestible et les résidus du métabolisme cellulaire se mélangent pour former les excréta. Afin de séparer la fraction azotée fécale de la fraction azotée urinaire, nous avons utilisé la méthode de Terpstra et De Hart (1974).

- Méthode de mesure de l'azote fécal

Le but de cette dernière vise à séparer chimiquement l'azote protéique de sa fraction fécale et des excréta urinaires (annexe 8).



#### Principe

Il consiste à dissoudre l'acide urique dans une solution de formaldéhyde à pH 4,7. Les protéines non digérées sont précipitées avec une solution d'acétate de plomb et à l'éthanol. L'azote du précipité est ensuite dosé par la méthode Kjeldhal suivant le même mode opératoire que celui décrit pour le dosage de l'azote d'un aliment.

La teneur de l'azote fécal total est calculée selon l'équation suivante (Larbier et Leclercq, 1992) : **N.F.T = 1,29 N.P.E - 0,02 N.T.E**

Où :

**N.F.T** : Azote fécal total (g de MS) ;

**N.P.E** : Azote des protéines précipitées à l'acétate de plomb et à l'éthanol (g de MS) ;

**N.T.E**: Azote total des excréta (g de MS).

Le résultat final est exprimé en g/g de MS en tenant compte de la matière sèche des fientes.



#### Calcul de la teneur des protéines fécales

$$\text{Protéines brutes fécales (\%MS)} = \text{N.F.T} \times 6,25$$

#### V.2.4. Méthodes d'analyses statistiques

Le traitement statistique des données est réalisé à l'aide du logiciel « STATISTICA » version 6. Les résultats d'analyses chimiques et des bilans digestifs ont fait l'objet d'une analyse statistique descriptive (moyenne et écart-type). Dans les 2 conditions de températures, les valeurs moyennes de digestibilité et d'EM des 4 céréales grains ont été soumises à une analyse de variance à un facteur de classification, puis soumises à un test de comparaison

« Newman- Keuls » ; elles sont considérées différentes pour une valeur de probabilité ( $P < 0,05$ ). Des équations de prédiction de l'EM ont été établies par le programme de régression linéaire simple.

# **CHAPITRE 6**

**RESULTATS ET DISCUSSION**

## I. Composition chimique des grains de céréales

Le tableau 17 rapporte la composition chimique moyenne et la teneur en énergie brute des grains de maïs, de millet perlé, de triticale et d'orge analysés.

Tableau 17 : Valeurs moyennes des composants chimiques et de la valeur de l'énergie brute des grains de céréales étudiés

	MS (%)	MAT (%MS)	Amidon (%MS)	MG (%MS)	CB (%MS)	MM (%MS)	EB (kcal/kg MS)
Maïs	92,67 <sup>a</sup> ±0,14	8,33 <sup>a</sup> ±0,01	70,08 <sup>a</sup> ±1,98	4,73 <sup>a</sup> ±0,34	3,21 <sup>a</sup> ±0,24	1,51 <sup>a</sup> ±0,02	4394 <sup>a</sup> ±7
Millet perlé	91,76 <sup>b</sup> ±0,16	15,13 <sup>b</sup> ±0,06	64,63 <sup>b</sup> ±1,00	5,23 <sup>b</sup> ±0,69	3,97 <sup>b</sup> ±0,13	1,75 <sup>b</sup> ±0,04	4551 <sup>b</sup> ±2
Triticale	87,31 <sup>c</sup> ±0,10	14,46 <sup>c</sup> ±0,13	62,44 <sup>c</sup> ±1,60	1,77 <sup>c</sup> ± 0,53	3,54 <sup>a</sup> ±0,16	2,04 <sup>c</sup> ±0,09	4348 <sup>c</sup> ±2
Orge	87,38 <sup>c</sup> ±0,09	10,01 <sup>d</sup> ±0,13	57,18 <sup>d</sup> ±0,96	1,95 <sup>c</sup> ±0,31	7,65 <sup>c</sup> ±0,20	2,9 <sup>d</sup> ±0,02	4287 <sup>d</sup> ±7

a, b, c, d : Sur une même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes ( $P < 0,05$ ).

### I.1. Composition chimique du maïs

Le maïs a une teneur moyenne de MS de 92,67% dont la plus grande fraction est représentée par l'amidon (70,08 %MS). La concentration en MS de cette céréale est supérieure à celles rapportées par de nombreuses références dont celle de la table de Feedipedia (2012) qui affiche une valeur de 86,3%.

Le taux moyen des matières azotées totales du maïs est de 8,33%MS, il est de même ordre de grandeur que celui rapporté par Smith *et al.* (1987) : 8,2%MS ; Feedipedia (2017) : 8,2%MS. Il se situe également dans la gamme des valeurs du tableau 18 qui regroupe quelques données bibliographiques de composition chimique du maïs grain.

La teneur en amidon de 70,08% MS de notre échantillon de maïs est inférieure à la majorité des données du tableau 18, contrairement à sa concentration en matière grasse qui, de l'ordre de 4,73%MS, y est relativement plus élevée.

La concentration en énergie brute du maïs (4394 kcal/kg MS) est inférieure à celles rapportées par Storey et Allen (1982) : 4616 kcal/kg MS ; Maliboungou *et al.* (1998) : 4510 kcal/kg ; Feedipedia (2017) : 4466 kcal/kg MS et par INRA CIRAD AFZ : 4450 kcal/kg MS. En revanche, elle est supérieure à celle indiquée par Kesraoui (1992) : 4220 kcal/kg MS.

Tableau 18 : Composition chimique des grains de maïs rapportée par la bibliographie

Source	Variété ou origine	Composants						
		MS	MAT (%MS)	Amidon (%MS)	MG (%MS)	CB (%MS)	MM (%MS)	EB (kcal/kg MS)
INRA-CIRAD-AFZ (2017)	Maïs	86,3	8,9	73,9	4,1	2,6	1,4	4450
Feedstuffs Analysis (2016)	Maïs jaune	86	7,5	–	3,5	1,9	1,1	–
Feedipedea (2012)	Europe	86,3	9,4	73,4	4,3	2,5	1,4	4469
	Afrique du Nord et Moyen-Orient	86,2	8,8	73,5	4,3	2,7	1,6	4469
	Amérique du Nord	87,2	9,5	73,1	4,1	2,3	1,4	4469
	Sub-saharienne Afrique de l'Est	90,0	8,0	73,3	4,5	2,4	4,3	4493
Neerusha Baurhoo (2011)	Canadienne	88,26	6,49	57,43	2,87	–	–	–
Nijimbere (2003)	Sénégalaise	88,1	10,5	–	3,46	3,15	–	–
Lawrence <i>et al</i> , (1995)	–	–	8,1	–	2,9	–	–	4154
Adeola et Orban (1995)	/	–	7,5	–	1,51	–	–	3788
Larbier et Leclercq (1992)	France	86	10,2	72,50	–	2,4	1,45	–

La teneur en CB du maïs (3,21%MS) est relativement élevée d'environ 1point par rapport à celles rapportées par Smith *et al.* (1987) : 2,3% MS ; Maliboungou (1989) : 2% MS ; Larbier et Leclerq (1992) : 2,4% MS ; Feedipedia (2017) : 2,7 % MS et INRA CIRAD AFZ (2017) : 2,6%MS.

La valeur moyenne du taux de matières minérales est de 1,5%MS, elle s'apparente à la gamme des valeurs tabulées de Feedipedia (2017) : 1,6%MS et INRA CIRAD AFZ (2017) : 1,4%MS. Elle apparait de même concentration que celles affichées par Feedipedia (2012) pour les graines de provenance d'Europe (1,4%MS), mais elle est faible par rapport à celle des graines d'origine sub-saharienne d'Afrique de l'Est (4,5%MS). Elle est également basse à celle indiquée par INRA (1984) : 3,6% MS ; Kesraoui (1992) : 1,9% MS ; Nijimbere (2003) : 3,15% MS et Feedipedia (2012).

## I.2. Composition chimique du millet perlé

La teneur moyenne en MS des grains de millet perlé est de 91,76 %. Elle s'avère relativement élevée à celles rapportées par la documentation spécialisée (Tableau 19).

Le taux protéique du millet perlé est de 15,13%MS ; cette concentration apparait élevée par rapport à l'ensemble des valeurs rapportées par la documentation consultée (Tableau 19) qui varient de 10%MS (Cisse *et al.* 2017) à 14,75%MS (Singh, 2004). Cependant, elle se situe dans la gamme des valeurs rapportées par Ladu (2000) pour le millet soudanais : 14-17%MS

La teneur moyenne en amidon du millet perlé (64,63%MS) est inférieure à la plupart des valeurs citées par la bibliographie (Tableau 19). Cependant, elle se rapproche des résultats d'analyses rapportés par Hulse *et al.* (1980) :63,8%MS ; Singh et Perez-Maldonado (1999) pour la variété Katherine d'Australie : 63,4%MS ; INRA-CIRAD AFZ (2017) pour la variété *Panicum miliaceum* : 64,2%MS et elle se situe dans la gamme des valeurs rapportée par Ladu (2000) pour le millet soudanais : 58-70,1%MS.

Tableau 19 : Composition chimique des grains de millet rapportée par la bibliographie

Source	Variétés ou origine	Composants						
		MS (%)	MAT (%MS)	Amidon (%MS)	MG (%MS)	CB (%MS)	MM (%MS)	EB (kcal/ kg MS)
Cisse <i>et al.</i> (2017)	<i>Pennisetum glaucum</i> (Mali)	92,60	10	–	4,50	2,05	2,82	4168
INRA-CIRAD AFZ (2017)	<i>Pennisetum glaucum</i>	89,10	12,5	67,1	4,9	3,1	2,8	4560
	<i>Panicum miliaceum</i>	90,10	13,9	64,2	5,7	7,3	3,9	4613
<i>Feed Stuffs Analysis</i> (2016)	<i>Pennisetum glaucum</i>	90	12	–	4,2	1,8	2,5	–
Feedipedia (2015)	<i>Pennisetum glaucum</i>	89,60	12,4	67,2	4,9	2,7	2,7	–
Bekoye (2011)	<i>Pennisetum glaucum</i> (Côte d’ivoir)	90,50	9,9 - 11	71-77,5	4,2	–	1,6-1,9	–
Baurhoo <i>et al.</i> (2011)	<i>Pennisetum glaucum</i> (Canada)	88,96	12,88	40,83	5,41	–	–	–
Singh (2004)	<i>Pennisetum glaucum hybride</i> (Australie)	MP3 : 88,7 MP4 : 88,9 MP31 : 88,6	MP3 : 14,75 MP4 : –	MP3 : 68,1 MP4 : 66,3 MP31 : –	MP3 : 6,4 MP4 : –	MP3 : 2,1 MP4 : –	MP3 : 2,1 MP4 : –	MP3:4541,12 MP4:4541,11 MP31 : 4541
Nijimbere (2003)	<i>Pennisetum glaucum</i> (Sénégal)	91	9,6	–	–	3,47	2,92	–
Nir (2003)	<i>Panicum miliaceum</i> (Proso )	90	11,6	–	–	–	–	–
	<i>Pennisetum glaucum</i>	90	14	–	–	–	–	–
Ladu (2000)	Soudan	92- 24	14-17	58-70,1	2 - 4	2,3 - 4,8	1,6 - 2	–
Singh <i>et al.</i> (1999) (Australie)	Katherine	88,9	13,7	63,4	6,5	5,1	2,3	4589
	Siberian	90	11,8	53	5,4	5,4	4,3	4565
Malibougou <i>et al.</i> (1998)	<i>Pennisetum typhoides</i>	87,60	11,7	–	–	1,8	1,5	4426
Lawrence <i>et al.</i> (1995)	–	–	12	–	–	6,7	–	4347
Adeola et Orban (1995)	–	–	11,1	–	–	5,06	–	4132
Serna-Saldivar <i>et al.</i> (1991)	–	–	11,3 à 12,7	–	–	–	–	–
Mahamat-Silaye (1981)	Sénégal	–	13,9	–	–	–	–	3940
Hulse <i>et al.</i> (1980)	–	–	–	63,8	–	5,2	3,1	–

La concentration en matière grasse du millet perlé (5,23%MS) se rapproche des valeurs rapportées par différentes sources bibliographiques (Tableau 19), notamment celles rapportées par Feedipedia (2015) : 4,9%MS et INRA CIRAD AFZ (2017) : 4,9%MS. Elle est faible par rapport au millet de variété *Kathrine* d'Australie : 6,5%MS et le millet hybride (MP31, MP3 et MP4) : 6,4%MS.

La concentration en énergie brute du millet perlé est de 4551kcal/kg MS. Elle apparaît relativement élevée à la plupart des valeurs rapportées par la bibliographie, notamment celle du millet sénégalais dont le potentiel énergétique rapporté par Mahamat-Silaye (1981) n'est que de 3940 kcal/kg MS (Tableau 19). En revanche, elle est inférieure à celle indiquée par INRA-CIRAD AFZ (2017) et par Singh et Perez-Maldonado (1999) respectivement, pour les variétés, *Panicum miliaceum* et *Kathrine* d'Australie.

Le millet perlé présente une teneur en cellulose brute de 3,97% MS qui se situe dans la gamme de la plupart des valeurs indiquées par le tableau (19). Elle reste relativement faible par rapport à celle rapportée par Hulse (1980) ; Adeola et Orban (1995) ; Lawrence *et al.* (1995) ; Singh et Perez-Maldonado (1999) ; INRA-CIRAD AFZ (2017) pour la variété *Panicum miliaceum* et Singh (2004) pour le millet hybride (Tableau 19).

La valeur moyenne des MM du millet perlé s'établit à 1,75%MS ; elle se situe dans la même gamme des valeurs comprises entre 1,6 et 2%MS, rapportées par Ladu (2000) et Bekoye (2011), respectivement pour les variétés du millet ivoirien (*Pennisetum glaucum* (L.)) et le millet soudanais. En revanche, la concentration observée de ce nutriment est relativement faible à celles des grains de millet sénégalais rapportée par Nijimbere (2003) : 2,92% MS ; Cisse *et al.* (2017) : 2,82% MS et à celle tabulée par Feedipedia (2017) : 2,7% MS et par INRA-CIRAD AFZ (2017) pour les 2 variétés (Tableau 19).

Le millet perlé testé se distingue par un potentiel énergétique élevé (4551 kcal d'EB/kg MS) comparé à celui du triticale (+203 kcal EB/kg MS) et de l'orge (+264 kcal EB/kg MS) et même par rapport à celui du maïs (+ 155 kcal EB/kg MS), malgré une teneur moindre en amidon comparée à celle du maïs (64 vs 70%MS). En revanche son taux en matière grasse (5,23 vs 4,73%MS) et en matière protéique (15,13 vs 8,33%MS pour le maïs) justifierait cet écart.

### I.3. Composition chimique du triticale

La valeur moyenne de la matière sèche du triticale (87,31 %) est de même ordre que les données de MS rapportées par la bibliographie (Tableau 20). En revanche, elle est inférieure comparée à celle tabulée par Feedstuffs analysis (2016) : 90%.

La concentration en protéines des grains de triticale est de 14,46 %MS, elle se distingue par une teneur élevée comparée à celles présentées par Vilarino (2005) : 10,70%MS pour le triticale à faible viscosité et 12,31%MS pour celui à viscosité élevée ; par Feedipedia (2012) : 11,7%MS et par INRA CIRAD AFZ (2017) : 11,5%MS (Tableau 20).

Tableau 20 : Composition chimique des grains de triticale rapportée par la bibliographie

Source	Origine	Composants						
		MS (%)	MAT (%MS)	Amidon (%MS)	MG (%MS)	CB (%MS)	MM (%MS)	EB (kcal/kg MS)
INRA CIRAD- AFZ (2017)	Française	86,8	11,5	67,7	1,40	2,90	2,00	4320
Feedepidea (2012)	–	87,1	11,7	67,6	1,50	2,70	2,1	4323
<i>FeedStuffs Analysis</i> (2016)	–	90	12,5	–	1,50	1,8	2,5	–
Saulius <i>et al.</i> (2016)	SU Agendus	87	11,57	68,00	1,3	1,35	1,53	–
Kowieska <i>et al.</i> (2011)	–	–	–	–	1,50	–	–	–
Vilarino (2005)	Viscosité élevée	87,13	12,31	67,94	–	3,50	1,85	4429
	Viscosité faible	86,78	10,70	68,97	–	3,33	1,93	4420
ARVALIS (1995)	Française	87,20	10,1-2,2 ≈11,3	67,0-69,7 ≈68,3	–	2,2-2,5	1,8-2	–

En revanche, les grains de triticale présentent une concentration moindre en amidon (62,44% MS) que celles affichées dans le tableau 20. La teneur en MG des grains de triticale est de 1,77% MS. Elle se rapproche de celles indiquées par Kowieska *et al.* (2011) : 1,5%MS ; FeedStuf Analysis (2016) : 1,5%MS ; Feedipedia (2012) :1,5%MS et *par* INRA CIRAD AFZ (2017) : 1,4%MS.

L'EB des grains de triticale est de 4348 kcal/kg MS, elle s'éloigne peu de celles rapportées par Feedipedia (2012) : 4323kcal/kg MS et INRA CIRAD AFZ (2017) : 4320

kcal/kg MS. Elle est relativement inférieure à celle indiquée par Vilarino (2005) : 4429 et 4420kcal/kg MS, respectivement pour les variétés à viscosité élevée et faible.

La teneur moyenne en cellulose brute (3,54% MS) du triticale est comprise dans la gamme des valeurs bibliographiques du tableau 20 et est supérieure à celle rapportée par Feed Stuf Analysis (2016) : 1,8%MS et par Saulius *et al.* (2016) : 1,35%MS.

La teneur moyenne de MM que renferme le triticale est de 2,4%MS. Elle s'aligne avec les valeurs de la gamme indiquée par ARVALIS (1995) : 1,8 à 2% MS ainsi qu'avec celles rapportées par le Tableau 20.

Comparés au grain de maïs, ceux du triticale présentent un potentiel en protéines (8,33 *vs* 14,46% MS) et en amidon (64,63 *vs* 62,44% MS) appréciables, ce qui explique alors leur teneur énergétique comparable à celle du maïs (4394 *vs* 4348kcal d'EB/kg MS).

#### **I.4. Composition chimique de l'orge**

La valeur moyenne de la MS de l'orge étudiée (87,38 %) s'apparente aux valeurs indiquées par la documentation spécialisée (Tableau 21). En revanche, elle est inférieure à celles rapportées par Arbouche *et al.* (2008) pour les deux variétés locales Tichedrett (91,5%) et Saïda (92,5 %) et relativement élevée à celle des orges françaises (85,7%) indiquée par Larbier et Leclercq (1992).

L'orge étudiée étant de variété Saïda (variété locale), il n'est pas donc surprenant d'observer une teneur en matières azotées de 10% comparable à la valeur de 10,6% rapportées par Arbouche *et al.* (2008) et Kesraoui (1992) pour la même variété d'orge (Tableau 21).

De plus, la concentration protéique de l'orge algérienne est comparable à celle d'origine marocaine et française (Tableau 21). En revanche, elle s'éloigne de celle de variété Tichedrett analysée par Arbouche *et al.* (2008) : 15,5% MS et de celle figurant dans la table Feedipedia (2012) :11,8%MS.

La teneur en amidon des grains d'orge testés (57,18% MS) est inférieure à l'ensemble des valeurs que rapporte la documentation spécialisée (Tableau 21).

La teneur moyenne en matière grasse de l'orge analysée (1,95%MS) se situe dans la gamme des valeurs rapportées rapportée par Bamouh (1999) : 1,5-2,5%MS ; ARVALIS (1995) : 1,2- 2,5% MS et avec celles indiquées par Feedstuffs Analysis (2016) : 1,9% MS ; Feedipedia (2012) : 2% MS et INRA- CIRAD- AFZ (2017) : 1,9% MS.

Le potentiel énergétique de l'orge est de 4371kcal d'EB/kg MS, il se rapproche davantage des valeurs tabulées de Feedipedia (2012) et INRA CIRAD AFZ (2017) que des valeurs d'EB d'orge locale mesurées par Hocine (1988) et Kesraoui (1992) comme indiqué par le tableau 21.

La concentration moyenne en cellulose brute de l'orge (7,65% MS) s'aligne sur celles des variétés Saïda et Tichdrett rapportées par Arbouche *et al.* (2008). Cependant, comparée aux résultats d'analyses de Kesraoui (1992) ; ARVALIS (1995) et par Feedipedia (2017) et INRA CIRAD AFZ (2017), la teneur en CB de l'orge étudiée est plus élevée (Tableau 21).

Quant à la matière minérale de ces grains d'orge (2,9%MS), elle est de même grandeur que les données bibliographiques (Tableau 21). De par la faible teneur en amidon (57,18% MS), les grains d'orge se distinguent du maïs par leur faible teneur énergétique (4287 vs 4394 kcal/kg MS).

Les différences relatives observées entre la composition chimique des céréales testées et celles rapportée par la bibliographie, pourraient être dues à la diversité des génotypes collectés, les conditions édapho-climatiques (disponibilité en eau, la température, la fertilité des sols et les conditions environnementales) pendant le développement du grain, par les pratiques culturales, ainsi que par la méthodologie d'analyses appliquée.

Les grains de céréales étant en alimentation animale et notamment avicole recherchés pour leur potentiel énergétique, nous relevons à travers cette étude de composition chimique 2 points : Le millet perlé se distingue par un potentiel énergétique élevé (4551 kcal/kg MS) par rapport à celui du triticale (+203 kcal/kg MS) et de l'orge (+264 kcal/kg MS) et même par rapport à celui du maïs (+ 155 kcal/kg MS) et ce, malgré une moindre teneur en amidon comparée à celle du maïs (64 vs 70%MS). En revanche son taux en matière grasse (5,23 vs 4,73%MS) et en matière protéiques (15,13 vs 8,33%MS) justifierait cette distinction.

Ses teneurs en cellulose brute et les principes antinutritionnels qu'ils renferment (selon les données bibliographiques) pourraient toutefois constituer un facteur limitant à sa valorisation par la volaille. Les grains de triticale se révèlent également intéressants à

introduire en formulation d'aliment pour volaille, de par leur apport énergétique brut appréciable (4350 kcal/kg MS) et leur teneur protéique non négligeable (14,5% MS).

Tableau 21 : Composition chimique des grains d'orge rapportée par la bibliographie

Source	Variétés	Composants						
		MS (%)	MAT (%MS)	Amidon (%MS)	MG (%MS)	CB (%MS)	MM (%MS)	EB (kcal/kg MS)
INRA CIRAD AFZ (2017)	–	87,2	11,2	60	1,9	5,4	2,5	4380
Feedstufes Analysis (2016)	–	89	11,5	–	1,9	5	2,5	–
Feedipedia (2012)	–	87,1	11,8	59,7	2	5,2	2,6	4395
Arbouche <i>et al.</i> (2008)	Tichedrett	91,5	15,5	–	–	7,8	2,7	–
	Saïda	92,5	10,6	–	–	7,8	–	–
Kesraoui (1992)	Saïda	–	10,6	59	–	5,8	–	4280
Bamouh (1999)	Marocaine	89,5	10,3	60	1,5-2,5	7,5	3,6	3792
Larbier et Leclercq (1992)	Orges françaises	85,7	10	66,4	–	–	2,6	–
Hocine (1988)		–	–	–	–	4,5		4296
Cerning- Beroad et Guilbot (1985)		–	–	60	–	–	–	–
Lasztity (1984)		–		73	–	–	–	–
Dessilva <i>et al.</i> (1983)		–	–	75	–	–	–	–
Story et Allen (1982)	MOREX	–	–	–	–	–	–	4287

Les graines de céréales testées se distinguent entre-elles par leurs teneurs en matière grasse affectée du plus haut coefficient de variation (CV= 53%), puis par leur teneur en protéines (CV= 21%) et en cellulose brute (CV= 45%). Elles diffèrent peu de par leur concentration en amidon (CV= 8%), tandis que leurs teneurs en énergie brute se rapprochent globalement (CV= 2%)

## II. Valeur nutritionnelle des grains de céréales testées

L'ensemble des résultats de cette partie d'étude a été obtenu après des mesures réalisées sur coqs soumis à une température optimale de 23C°.

### II.1. Digestibilités de la matière sèche

Les valeurs moyennes de la digestibilité de la matière sèche des céréales testées sont consignées dans le tableau 22.

Tableau 22 : Valeurs moyennes de la digestibilité (%) de la MS des grains de céréales mesurée à 23C°

Céréales	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
CUDa MS	83,71 <sup>a</sup> ±1,35	80,76 <sup>b</sup> ±3,05	74,43 <sup>c</sup> ±3,28	71,48 <sup>d</sup> ±1,31
CUDr MS	84,64 <sup>a</sup> ±1,31	82,64 <sup>b</sup> ±1,49	75,52 <sup>c</sup> ±3,18	72,71 <sup>d</sup> ±1,59

*a,b,c,d : Sur une même ligne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes (P<0,001)*

La digestibilité apparente de la MS du maïs est de 83,71%, elle se distingue (P<0,001) de celles des 3 autres céréales dont la MS est moins digestible. Pour le millet perlé, le triticale et l'orge les digestibilités de la MS sont respectivement de 80,76 ; 74,43 et 71,48%. Ces 3 valeurs, diffèrent très significativement entre elles.

Ainsi, nous enregistrons des écarts des valeurs de la digestibilité par rapport au maïs de 4, 9 et 12 points, respectivement pour le millet, le triticale et l'orge.

L'écart observé entre les valeurs de digestibilité de la MS du maïs et celle des céréales locales (particulièrement du triticale et de l'orge), ne serait pas lié au niveau de l'ingéré de la MS (Tableau 23). Car, avec un R=45% ; R<sup>2</sup>= 20% ; (P=0,008), illustré par la figure 7, le niveau d'ingestion ne paraît pas être un argument plausible pour expliquer cette différence de digestibilité.

Tableau 23 : Niveau d'ingestion des 3 céréales testées

Céréale	Maïs	Millet	Triticale	Orge
Niveau d'ingestion (%)	54,89 <sup>a</sup> ±7,22	68,15 <sup>b</sup> ±12,21	48,07 <sup>a</sup> ±8,69	51,09 <sup>a</sup> ±7,02

Sur la même ligne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes (P<0.01)

En effet, le triticale et l'orge, à des niveaux d'ingestion comparables à celui du maïs, ces 2 céréales montrent un CUD de MS très hautement faible (P<0,001).

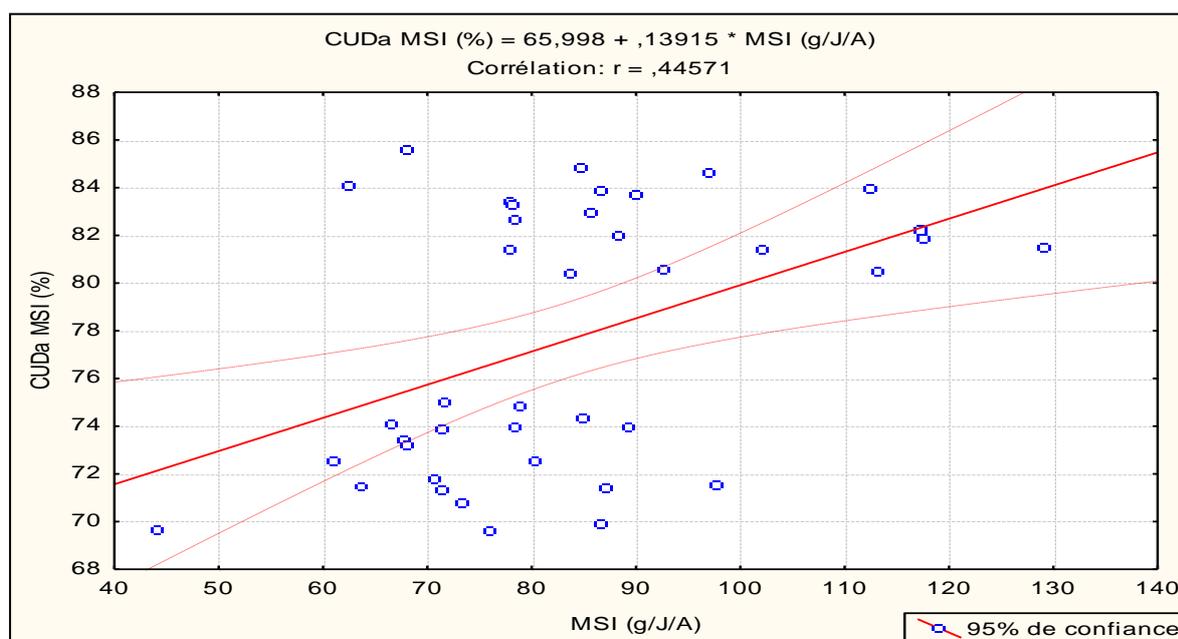


Figure 7 : Distribution des valeurs du CUDa MS et MSI pour l'ensemble des céréales (R=45% ; R<sup>2</sup>= 20% ; P=0,008)

Quant au millet avec un niveau d'ingestion plus élevé que celui du maïs, il a un CUD de MS plus important. Ce qui n'est pas soutenu par Sibbald et Morse (1983), en rapportant que la vitesse de transit est d'autant plus lente que la quantité de matière sèche ingérée est diminuée, par conséquent une meilleure digestibilité.

Ces différences observées par rapport à la céréale référentielle pourraient être expliquées par l'effet des fibres cellulosiques (R= - 52% ; R<sup>2</sup>= 27% ; P=0,0005) que renferme chacune des céréales testées (Figure 8). Ainsi qu'à une éventuelle présence de facteurs

antinutritionnels qui réduisent la dégradation chimique des nutriments soit en inhibant les enzymes impliquées dans cette fonction, soit en augmentant la vitesse de transit digestif.

En effet, les FAN du millet sont représentées par les poly-phénols, les tanins (concentrés dans le son), l'acide phytique et les phytates (Leader, 2004 ; Boncompagni, 2018) et l'acide oxalique (Leader, 2004) et des saponines qui sont connues pour endommager la muqueuse du tube digestif. (Jacob, 2015 a).

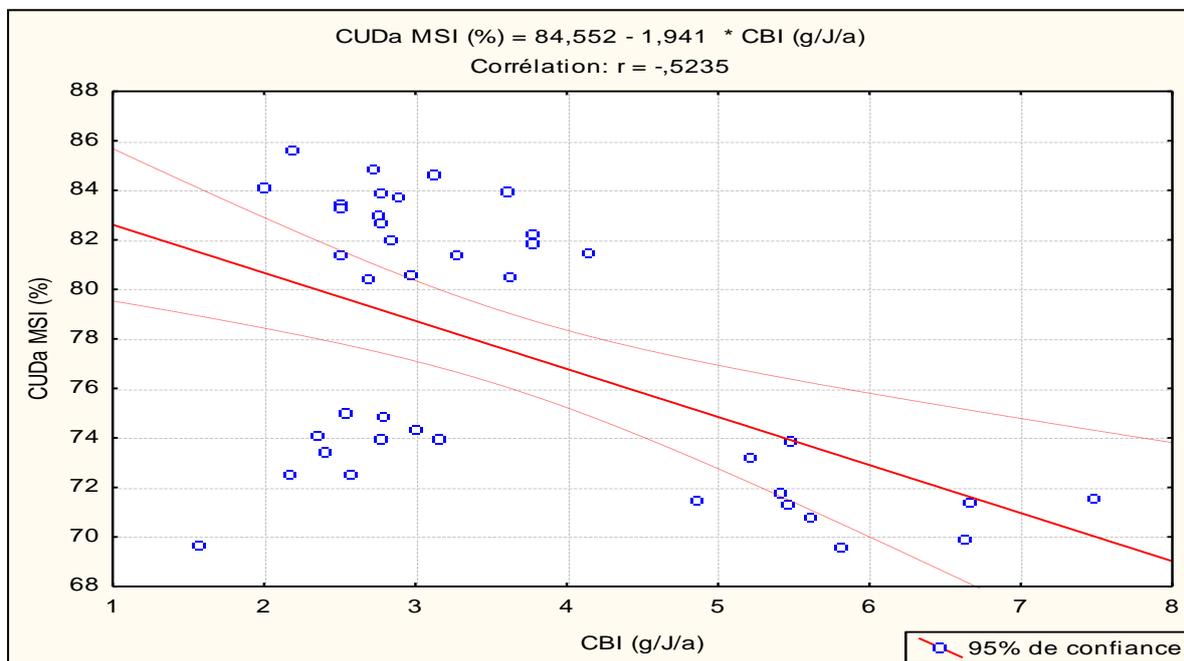


Figure 8 : Distribution des valeurs CUDa MS et CBI pour l'ensemble des céréales

( $R = -52\%$  ;  $R^2 = 27\%$  ;  $P = 0,0005$ )

Les principaux facteurs antinutritionnels des orges sont les  $\beta$ -glucanes, des polysides solubles non amylacés, des composants peu digests variant de 1,5 à 8,5%, augmentant ainsi la viscosité du digesta et réduisant la digestibilité des protéines (Almirall *et al.* 1995).

Leurs niveaux dans l'orge dépendent du cultivar, des conditions de croissance, du lieu de culture et des conditions de récolte et de stockage (Jacob et Pescator, 2012).

Les orges des pays du Maghreb ont une teneur moyenne en  $\beta$ -glucanes de 3,5 % allant de 1,9 à 5,3% de matière sèche (Benabdeldjelil, 1999). Cette céréale contient également de l'acide phytique ; ce composé lie le phosphore pendant la digestion, ce qui réduit sa disponibilité pour l'animal (Jacob, 2015b).

Quant au triticale, comme le blé et le seigle, il contient des arabinoxylanes (Mathlouthi *et al.*, 2002 a). Ces derniers augmentent la viscosité des digestas chez les oiseaux et sont à

l'origine de la réduction de la digestibilité de l'amidon (Choct *et al.*, 1999), des protéines et des lipides chez le poulet (Choct et Annison, 1992; Carré *et al.*, 2002 ; Maisonnier *et al.*, 2001) et celle de la valeur énergétique métabolisable du blé : 10 à 15 % (Leeson et Summers 1997).

Outre les aspects de composition chimique qui sont en faveur de la meilleure digestibilité de la MS du maïs, sa présentation aux coqs sous forme concassée a sans doute optimisé sa dégradation enzymatique relativement à celle des grains de céréales locales, qui elles, ont été distribuées entières.

Quant à la digestibilité réelle de la MS, elle est respectivement de 84,64 ; 82,64 ; 75,52 ; 72,71% pour le maïs, le millet perlé, le triticales et l'orge (Tableau 22). Par définition, elle est plus élevée que la digestibilité apparente. Les valeurs des CUDr MS des 4 céréales diffèrent statistiquement entre elles ( $P < 0,001$ ).

Les écarts entre les valeurs CUDa et CUDr de la MS sont respectivement de 0,93 ; 1,88 ; 1,09 ; 1,23 points pour le maïs, le millet perlé, le triticales et l'orge. Il est à noter que l'écart le plus élevé entre la valeur CUDa et celle CUDr est observé pour le millet perlé. Le millet perlé aurait occasionné une plus forte excrétion du matériel endogène par rapport aux 3 autres céréales. Sa teneur relativement élevée en CB (3,97% contre 3,21 ; 7,65 ; 3,54 % pour le maïs, orge et triticales) aurait joué un rôle abrasif, accentué par l'effet des saponines que rapporte Jacob (2015a) et qui sont connues pour les dommages qu'elles occasionnent à la muqueuse digestive.

## II.2. Digestibilités de l'amidon

Les valeurs moyennes de digestibilité de l'amidon des grains de céréales testées sont rapportées dans le tableau 24.

Tableau 24 : Valeurs moyennes de la digestibilité de l'amidon des céréales mesurée à 23C°

Céréale	Maïs	Millet perlé	Triticales	Orge
CUD Amidon (%)	99,41 <sup>a</sup> ±1,07	99,69 <sup>a</sup> ±0,16	99,73 <sup>a</sup> ±0,24	99,48 <sup>a</sup> ±0,35

*a,b, : sur la même ligne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes ( $P < 0,05$ ).*

Elles s'établissent respectivement à 99,4 ; 99,48 ; 99,73 et 99,69%, pour le maïs, le millet perlé, le triticales et l'orge et sont statistiquement comparables entre elles ( $P < 0,05$ ).

Ces résultats sont en accord avec les données bibliographiques. En effet, dès 1955, Bolton rapporte pour les graines de céréales des digestibilités moyennes de l'amidon de l'ordre de 100%. Métayer *et al.* 2015 ; signale pour ce nutriment des digestibilités qui varient entre 88 et 99%. De plus, le CV de la digestibilité de l'amidon, des 4 céréales de l'ordre de 0,58%, exprime une faible variabilité.

Ces 2 principales observations s'éloignent des données bibliographiques qui rapportent que la digestibilité de l'amidon des graines de céréales secondaires est inhibée par les FAN qu'elles renferment.

En effet, la présence des  $\beta$ -glucanes de l'orge, des arabinoxylanes du triticale (Hesselman et Aman, 1986 ; Choct *et al.*, 1992) ainsi que les tannins et les phytates du millet (Dieng, 1998; Selle *et al.*, 2010 ; Jacobs et Parsons, 2013) empêchent la dégradation de l'amidon par les enzymes amylolytiques. De plus, la lignine et les polysaccharides non hydrolysables par les enzymes endogènes du tube digestif de la volaille, qu'il renferme, sont à l'origine de la mauvaise digestibilité des nutriments (Gohl, 1982 ; Maisonnier *et al* 2001).

La présence de fortes teneurs en amylose dans l'orge constitue également une entrave à la digestibilité de l'amidon en réduisant le taux de dégradation enzymatique, comme signalé par Li *et al* (2004), Stevnebo *et al.* (2006).

La similitude de la digestibilité de l'amidon des 3 céréales locales avec celle du maïs qui est une céréale réputée exempte de facteurs antinutritionnels nous amène à supposer :

- Que les céréales locales étudiées ne renferment pas des concentrations importantes de FAN à même d'altérer la digestibilité de leur potentiel amylicé.
- Que les FAN présents dans le matériel végétal testé n'ont pas d'effets délétères chez le coq, tel que rapporté par Rotter *et al.* (1990) concernant les  $\beta$ -glucanes.
- Que les coqs de population locale utilisés pour cette étude, sont moins sensibles aux effets des FAN.

L'ingestion moindre par les coqs des grains d'orge et de triticale comparée à celle du maïs et du millet perlé, aurait permis une meilleure attaque enzymatique sur l'amidon.

Selon Sibbald et Morse (1983) la vitesse de transit de l'aliment est d'autant faible que la quantité ingérée est moindre, qu'il y aurait une meilleure activité enzymatique de dégradation. Cette observation confirme celle de Longe et Oluyemi (1980) qui rapportent quant à eux, que la digestibilité de l'amidon augmente quand le taux de l'amidon ingéré diminue.

En effet, la quantité d'ingestion de l'amidon du maïs et du millet perlé étant significativement supérieure ( $P < 0,001$ ) à celle de l'orge et du triticale (Tableau 25), expliquerait la similitude des valeurs de la digestibilité de l'orge et du triticale à celles du

Tableau 26 : Valeurs moyennes de la digestibilité de la MG des céréales mesurée à 23°C

Tableau 25 : Quantités moyennes ingérées d'amidon des céréales à 23°C

Céréales	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
Quantité d'amidon ingérée (g/j/a)	53,48 <sup>a</sup> ± 7,04	60,62 <sup>a</sup> ± 10,86	39,30 <sup>b</sup> ± 7,11	38,29 <sup>b</sup> ± 5,26

*a, b : sur la même ligne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes ( $P < 0,001$ )*

millet perlé et du maïs.

Cependant, aucun lien entre l'ingestion de l'amidon et sa digestibilité n'est mis en évidence par nos résultats. Il y aurait eu une meilleure synchronisation de l'action des enzymes sur les molécules cibles et le transit digestif du bol alimentaire, qui aurait été prolongé grâce au faible niveau d'ingestion. Ceci aurait permis un effet compensateur de caractéristiques dépréciatrices de ces deux céréales testées. D'où, l'effet bénéfique d'une alimentation fractionnée, jouant sur le niveau d'ingestion, pour améliorer la capacité digestif des nutriments par l'animal.

Cet effet compensateur pourrait être expliqué aussi par la contribution de la microflore digestive chez le coq qui aurait trouvé une structure de l'amidon de l'orge, du triticale et du millet perlé favorable à la dégradation, tout en lui permettant de valoriser son utilisation.

Selon Bewa *et al.* (1979) et Kussaibati *et al.* (1982 b), la digestibilité de l'amidon n'est pas influencée par la microflore digestive. Néanmoins, la structure de l'amidon qui conditionne sa digestibilité influe sur les conditions d'action de la microflore digestive. Cette dernière aurait réduit l'attaque de la cellulose en s'orientant vers la dégradation de l'amidon, tel que rapporté par Raviere (1972) lorsque l'apport nutritionnel est caractérisé par la concentration forte d'une structure glucidique difficile à hydrolyser tel que la cellulose.

Céréale	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
CUD MG(%)	84,02 <sup>a</sup> ± 4,24	73,25 <sup>b</sup> ± 9,16	27,76 <sup>c</sup> ± 10,91	37,75 <sup>d</sup> ± 6,69

*a, b, c, d : sur la même ligne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes (P<0,001)*

Nous pouvons aussi signaler que, contrairement aux 3 céréales testées, la présentation du maïs sous forme de broyat aurait contribué à sa bonne digestibilité, en assurant plus d'accessibilité des enzymes à leur substrat, tel que rapporté par Zerbo (2012).

### II.3. Digestibilités de la matière grasse

Les valeurs moyennes des CUD de la MG figurent dans le tableau 26. Elles sont de 84,02 ; 73, 25 ; 27,76 et 37,75% respectivement, pour le maïs, le millet perlé, le triticale et l'orge. Toutes 4, sont statistiquement différentes entre elles (P<0,0001).

Le maïs se distingue par une meilleure digestibilité de la MG (84%), suivie de celle du millet perlé (73%). Celle du triticale, avec seulement 27,76%, se classe en dernier après celle de l'orge (37,75%).

La valeur moyenne du CUD de la matière grasse du maïs (84,02%) est comparable à celle signalée par Kesraoui (1992) : 85,17% et elle est supérieure à celle rapportée par Khan *et al.* (2006) (78,3%) et Almirall *et al.* (1995) (76,7%). Quant à la valeur trouvée pour l'orge (37,75%), elle s'éloigne de celle mesurée par Kesraoui (1992) (77,06%) mais se rapproche de celle signalée par Svihus *et al.* (1997) : 38%.

La faible digestibilité de la MG enregistrée avec le millet perlé par rapport à celle du maïs ne relèverait pas de l'action des FAN, puisque ces derniers ne se sont pas exprimés avec les 2 autres nutriments, à savoir les protéines et l'amidon. En revanche, ceci s'expliquerait par une éventuelle différence de la structure de leurs fractions lipidiques, en termes de saturation, longueur des chaînes d'acides gras et présence des acides gras libres. A ce titre, Wiseman (1991) et Tancharoenrat *et al.* (2014) observent que le degré de saturation des acides gras a une influence majeure sur leur digestibilité, les AG saturés sont moins digestibles que les AG insaturés. Autrement dit, la digestibilité des acides gras est d'autant plus élevée que leur degré d'insaturation et la longueur de la chaîne sont importantes.

En effet, selon Leader (2004) ; Jaybhaye *et al.* (2014) environ 75% des acides gras du millet perlé sont insaturés et l'acide linoléique est particulièrement élevé (46,3%).

La faible digestibilité des matières grasses de l'orge et du triticale comparée à celles du maïs et du millet perlé, serait liée à la présence éventuelle des FAN. Par ailleurs, la microflore intestinale réduirait à 1/3 environ le contenu intestinal en sels biliaires conjugués diminuant ainsi le volume micellaire (Borgstrom, 1967) tout en induisant une mauvaise solubilisation micellaire des acides gras libérés par la lipolyse.

Selon Smits et Annison (1996), une mauvaise digestion des graisses peut survenir au cours de la réduction du recyclage et de la faible concentration résultante en sels biliaires chez les oiseaux nourris avec des régimes contenant des niveaux élevés des polysaccharides non amylacés. En effet, la présence des polysaccharides non amylacés favorise l'activité bactérienne qui peut augmenter la déconjugaison des acides biliaires. La bile déconjugée ne peut pas être réabsorbée et sera excrétée, engendrant ainsi une sous exploitation des lipides. En effet, nous avons établi un effet réducteur entre la quantité de CB et la digestibilité de la MG ( $R = -33\%$  ;  $R^2 = 11\%$ ,  $P < 0,01$ ).

Outre les FAN, nous avons également observé que le niveau d'ingestion de la MG a un effet sur sa digestibilité (Figure 9) :  $R = 81\%$  ;  $R^2 = 66\%$  ;  $P < 0,001$ .

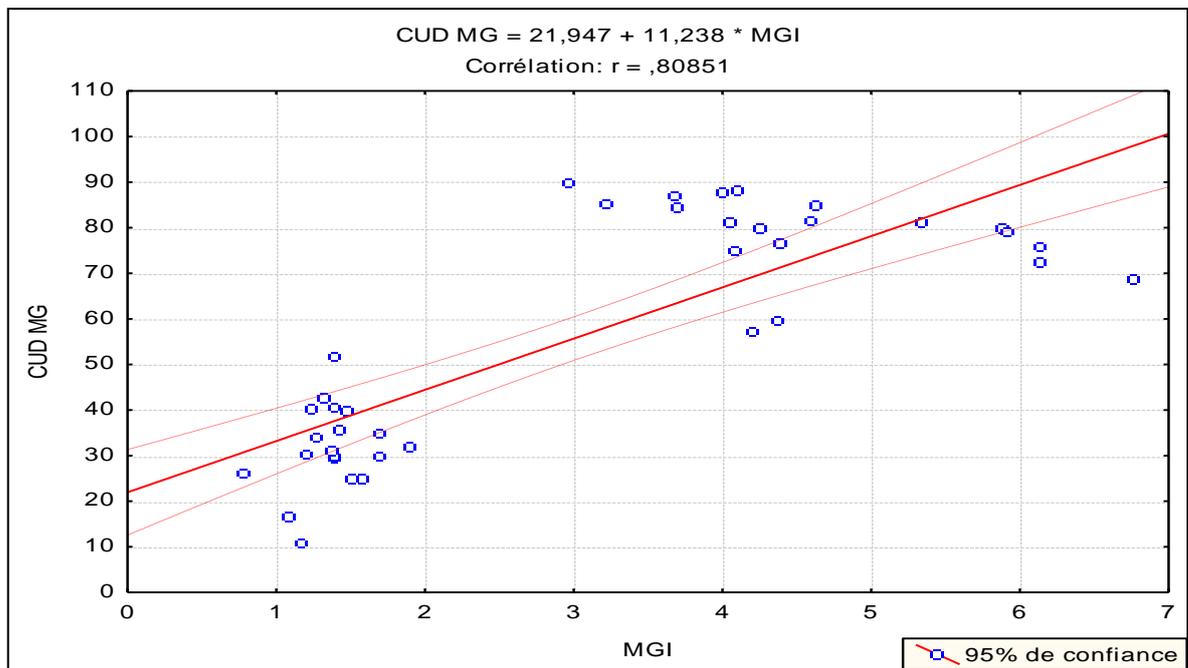


Figure 9 : Distribution des valeurs MGI et CUD MG des céréales

#### II.4. Digestibilités des protéines

Les valeurs moyennes des coefficients de la digestibilité apparente et réelle des protéines des céréales testées, sont signalées dans le tableau 27.

Les CUDa des protéines s'établissent à 86,20 ; 87,46 ; 83,91 et 70,45% respectivement pour le maïs, le millet perlé, le triticale et l'orge.

La dispersion (CV) des valeurs des CUD des protéines des céréales testées est de

Tableau 27 : Valeurs moyennes de la digestibilité des protéines des céréales mesurée à 23C°

Céréale	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
CUDa Protéine (%)	86,20 <sup>a</sup> ±1,47	87,46 <sup>a</sup> ±2,23	83,91 <sup>b</sup> ±2,46	70,45 <sup>c</sup> ±1,49
CUDr Protéine(%)	87,42 <sup>a</sup> ±1,39	88,12 <sup>a</sup> ±2,20	84,70 <sup>b</sup> ±2,38	72,04 <sup>c</sup> ±1,90

*a,b,c : sur la même ligne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes (P<0,001)*

8,70%. Les protéines du maïs et du millet perlé sont digérées de façon comparable par le coq tandis que les protéines du triticale (84%) et surtout celle de l'orge (70%) le sont moins (P<0,001).

L'analyse de la variance révèle une différence très hautement significative (P<0,001) des CUDa des protéines entre les céréales testées. Tandis que les digestibilités du maïs (86,20%), et du millet perlé (87,46%) sont comparables, celles du triticale (83,91%) et de l'orge (70,45%) s'en éloignent et sont très faibles (P<0,001). Le type des protéines des 4 céréales graines pourraient être à l'origine de ces différences (Lessire *et al.*, 1985 ; Parsons *et al.*, 1998). En effet, plusieurs études *in-vitro* ont mis en évidence l'influence de la structure des protéines sur leur hydrolyse (Deshpande et Damoradan 1989a ; Oria *et al.*, 1995 et Perrot 1995).

La valeur moyenne du CUDa des protéines du maïs (86,20%) s'aligne à celles rapportées par de nombreuses références (Tableau 28) dont celles de Guillaume(1980) et Kesraoui (1992) qui signalent des teneurs respectives de 85,3 ; 83,2 et 86,71%. Elle est supérieure à celles rapportées par Bamouh (1999) (67-79%), Khan *et al.* (2006) (61,5 %), Rutherford *et al.* (2007) (79,1%) et Abudabos *et al.* (2010) (75,3%).

Pour ce qui est de l'orge, la digestibilité moyenne de ses protéines (70,45%) est inférieure à la plupart des valeurs citées par la bibliographie (Tableau 28).

Tableau 28 : Synthèse des résultats relatifs au CUD de la MAT chez la volaille

Céréale	Auteurs	CUD MAT (%)
Maïs	Bamouh (1999)	67-79
	Abudabos <i>et al.</i> (2010)	75,3
	Khan <i>et al.</i> (2006)	61,5
	Rutherford <i>et al.</i> (2007)	79,1
	Guillaume(1980)	83,2
	kesraoui (1992)	86,71
Millet	/	/
Triticale	/	/
Orge	Marquardt <i>et al.</i> (1994)	84,6
	Onderci <i>et al.</i> (2008)	74
	Almirall <i>et al.</i> (1995)	74,1
	Svihus <i>et al.</i> (1997)	63
	Kouache (1988)	81,72
	Kesraoui(1992)	80,76

Cependant, elle est de même grandeur que celles rapportées par Almirall *et al.* (1995) :74,1% et Onderci *et al.* (2008) : 74% et elle est supérieure à celle notée par Svihus *et al.* (1997) (63%).

Selon la littérature, le millet perlé, comparé au maïs, renferme des facteurs antinutritionnels, tels que les PNA hydrosolubles qui entraînent une réduction de la digestibilité des protéines. Ceci induit une augmentation de la viscosité du bol alimentaire.

Le niveau de digestibilité des protéines du millet perlé local ne concorde pas avec ce profil et s'expliquerait par une faible teneur voire même une éventuelle absence de ces facteurs antinutritionnels dans le millet perlé local ou encore par la tolérance des coqs utilisés pour la mesure aux FAN. Cependant, Jacob (2015 a) précise que pour la variété millet perlé, la concentration en tanins est faible et ils sont sans effet nocif sur l'utilisation digestive des nutriments.

La teneur en matière grasse ingérée relativement élevée du millet perlé (16,04 g/j/a) par rapport à celle du maïs (11,78 g/j/a), aurait contribué à la compensation des éventuels effets dépréciateurs des PNA hydrosolubles et des saponines. L'explication de l'amélioration de la digestibilité des protéines du millet perlé comparée au maïs par le niveau d'ingestion de la

MG, est imputée au ralentissement du transit digestif, tel que rapporté par Martinez *et al.* (1995), Danicke *et al.* (1997) et Lin *et al.* (1997) et que Martinez *et al.* (1995) expliqueraient par l'inhibition de la motricité du gastro-intestinale par l'intermédiaire de la CCK-PZ. En outre, Lessire *et al.* (1985) et Parsons *et al.* (1998) rapportent que chez le coq, la valeur de la digestibilité des protéines est élevée lorsque les régimes renferment une concentration forte en matières grasses. Nos données vérifient cette observation à travers la figure 10 qui montre que la digestibilité des protéines est très liée ( $P < 0,001$ ) à la quantité de la MG ingérée, avec un  $R = 64\%$  et  $R^2 = 41\%$ . Ainsi via ces relations il apparait que la MG pourrait être un bon prédicteur de la digestibilité des protéines :  $CUDaN (\%) = 74,42 + 0,84 \times MGI$ .

L'effet de la nature des matières grasses est un autre facteur explicatif de la digestibilité des protéines du millet perlé car selon Kussaibati *et al.* (1983), l'utilisation digestive des protéines est améliorée lorsque l'apport lipidique est sous forme d'acides gras insaturés. Or, 75% des lipides du millet sont composés d'acides gras polyinsaturés (Leader, 2004 ; Jaybhaye *et al.*, 2014).

Selon nos résultats, la digestibilité des protéines est corrélée au seuil de  $P < 0,0001$  avec la digestibilité de la MG à un niveau de 58% (Figure 11). La variation de la digestibilité protéique des grains est expliquée à 33% par la digestibilité des lipides.

Quant à la faible digestibilité protéique du triticales (83,91%) par rapport à celles du maïs et du millet perlé, elle serait imputée selon les données bibliographiques aux arabinoxylanes qu'il renferme et qui en augmentant la viscosité des digestas, occasionnent une réduction de la digestibilité des protéines et des lipides chez le poulet (Choct et Annison, 1992 ; Carré *et al.*, 2002 ; Maisonnier *et al.*, 2001).

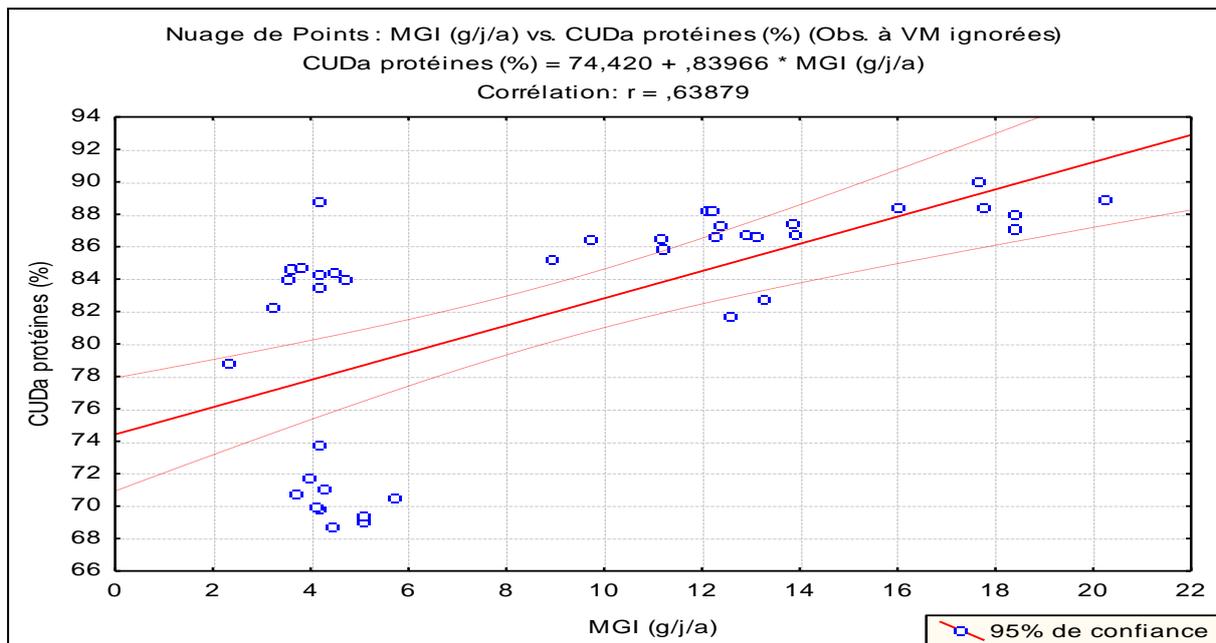


Figure 10 : Distribution des valeurs MGI et CUDa protéines

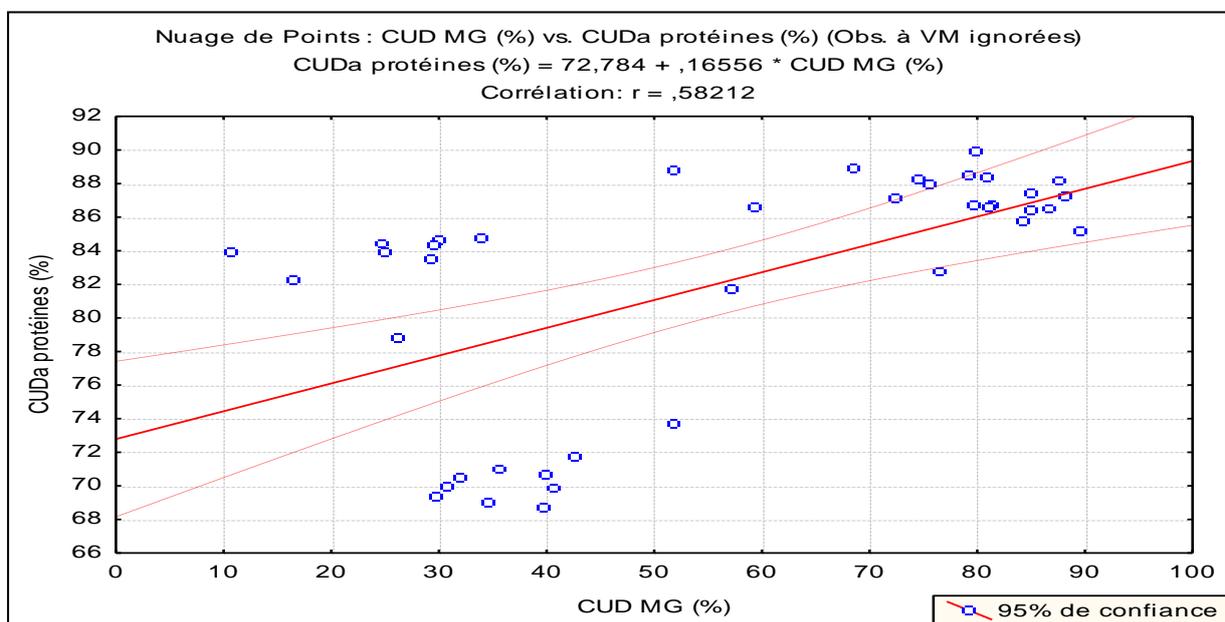


Figure 11 : Distribution des valeurs CUDMG et CUDa protéines

L'utilisation protéique de l'orge par les coqs est de loin la plus faible ( $P < 0,0001$ ), avec un écart de 16, 17 et 13 points comparée respectivement à celles du maïs, du millet perlé et du triticale. La teneur élevée de l'orge en CB (7,65 vs 3,21 ; 3,97 ; 3,54% respectivement pour le maïs, le millet perlé et le triticale) serait à l'origine de ce résultat.

En effet, une corrélation négative ( $R = -81\%$ ) très hautement significative ( $P < 0,0001$ ) est observée entre les quantités de CBI et la digestibilité protéique des graines (Figure 12).

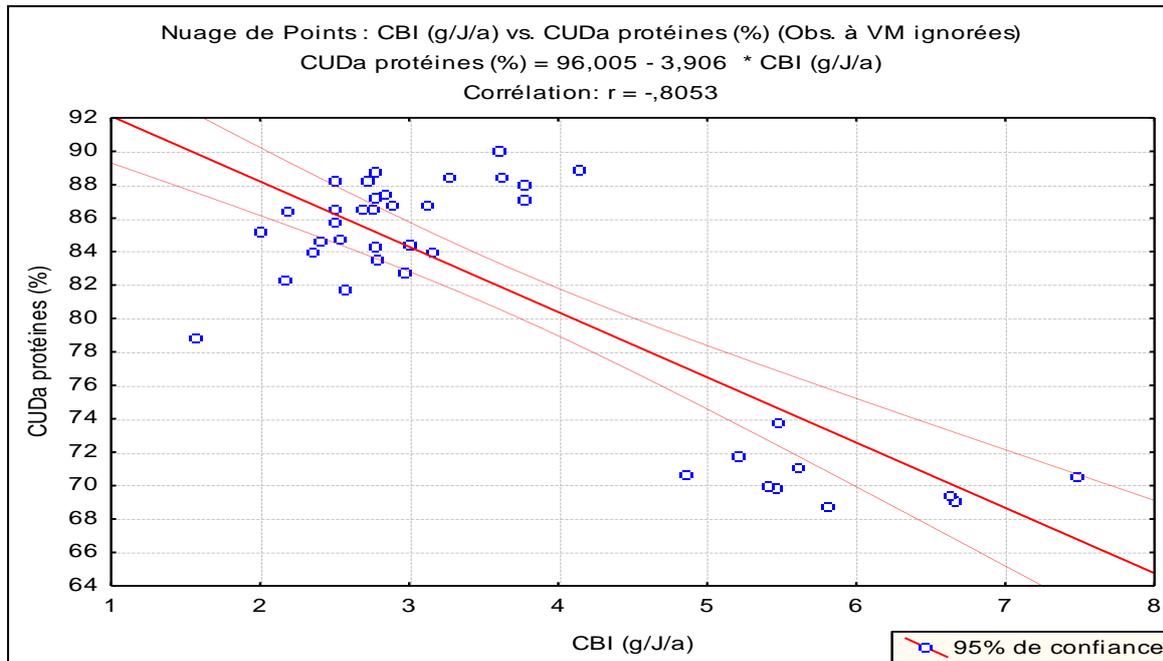


Figure 12 : Distribution des valeurs CBI et CUDa protéines

Les études menées par Leterme *et al.* (1996) et , Leterme *et al.* (2000) et Leterme et Thewis (2004) font apparaitre que les fibres des grains d'orge sont à l'origine de perte importantes d'azote. En se gorgeant d'eau, elles prennent un volume très important dans l'intestin, ce qui cause à la fois une plus grande production de sécrétion et une moindre réabsorption des protéines sécrétées. En effet, la perte fécale d'azote (g/j/a) est évaluée respectivement à 0,15 ; 0,29 ; 0,27 et 0,36 pour le maïs, le millet perlé, le triticale et l'orge (Tableau 29). Celle occasionnée par l'orge s'éloigne statistiquement des 3 autres ( $P < 0,001$ ).

En dépit, de la faible teneur en azote de l'orge, la part élevée de l'azote fécal observée après sa consommation, pourrait être expliquée par une augmentation de l'excrétion protéique probablement d'origine intestinale provenant tel que rapporté par Okumura *et al.* (1980), d'une synthèse protéique microbienne élevée, liée à la présence de la cellulose.

Szylati et Charlet (1981) rapportent que la digestibilité des protéines est réduite en présence de la microflore digestive dont la prolifération est induite par les fibres alimentaires. Dans ce cas de figure, les protéines alimentaires seraient utilisées pour la synthèse protéique microbienne au détriment de l'animal hôte. L'augmentation des sécrétions par les muqueuses de l'intestin serait une forme de défense du tissu intestinal contre l'effet abrasif des fibres.

Tableau 29 : Utilisation azotée chez les coqs consommant les 4 types de céréales testées

Céréale	Mais	Millet perlé	Triticale	Orge
NI (g/j/a)	1,10 <sup>a</sup> ± 0,14	2,47 <sup>b</sup> ± 0,44	1,67 <sup>c</sup> ± 0,30	1,23 <sup>a</sup> ± 0,17
NTe (g/j/a)	0,91 <sup>a</sup> ± 0,13	1,94 <sup>b</sup> ± 0,34	1,39 <sup>c</sup> ± 0,24	1,02 <sup>a</sup> ± 0,15
NF (g/j/a)	0,15 <sup>a</sup> ± 0,03	0,29 <sup>b</sup> ± 0,05	0,27 <sup>b</sup> ± 0,04	0,36 <sup>c</sup> ± 0,06
Ne (g/a/ bilan)	0,36 <sup>a</sup> ± 0,05	0,44 <sup>a</sup> ± 0,09	0,41 <sup>a</sup> ± 0,24	0,41 <sup>a</sup> ± 0,12
NFe (g/a/ bilan)	0,04 <sup>a</sup> ± 0,006	0,04 <sup>a</sup> ± 0,01	0,04 <sup>a</sup> ± 0,02	0,06 <sup>a</sup> ± 0,01
NFe (g/P <sup>0,75</sup> )	0,00015 <sup>a</sup> ± 0,00002	0,00016 <sup>a</sup> ± 0,00003	0,00015 <sup>a</sup> ± 0,0001	0,00022 <sup>b</sup> ± 0,0001

*a, b, c : sur la même ligne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes (P<0,001)*

*NI : Azote ingéré ; NTe : Azote total excrété ; NF : Azote fécal ; NFe : Azote fécal endogène ; Ne : Azote endogène.*

Outre l'effet de la cellulose brute, la viscosité du milieu intestinal engendré par les  $\beta$  - glucanes, entraîne une augmentation de la vitesse de transit du digesta, à l'origine de la moindre digestibilité des nutriments, dont les protéines.

Les données expérimentales obtenues montrent une corrélation (R=45%) significativement positive (P<0,001) entre l'excrétion des protéines endogènes et l'ingestion de cellulose brute des céréales. La variation de l'excrétion azotée endogène sous l'effet de l'ingéré cellulosique est illustrée par la figure 13.

Outre, l'effet de la teneur en CB et d'éventuels FAN des grains de céréales sur la digestibilité de leur potentiel protéique, nous avons relevé une relation significativement élevée (R= 47% ; P<0,001) entre l'ingéré protéique et la digestibilité des protéines (Figure 14). Ce qui contredit le rapport de Kussaibati (1982), en affirmant que le niveau d'ingestion n'a aucun effet sur la digestibilité des protéines.

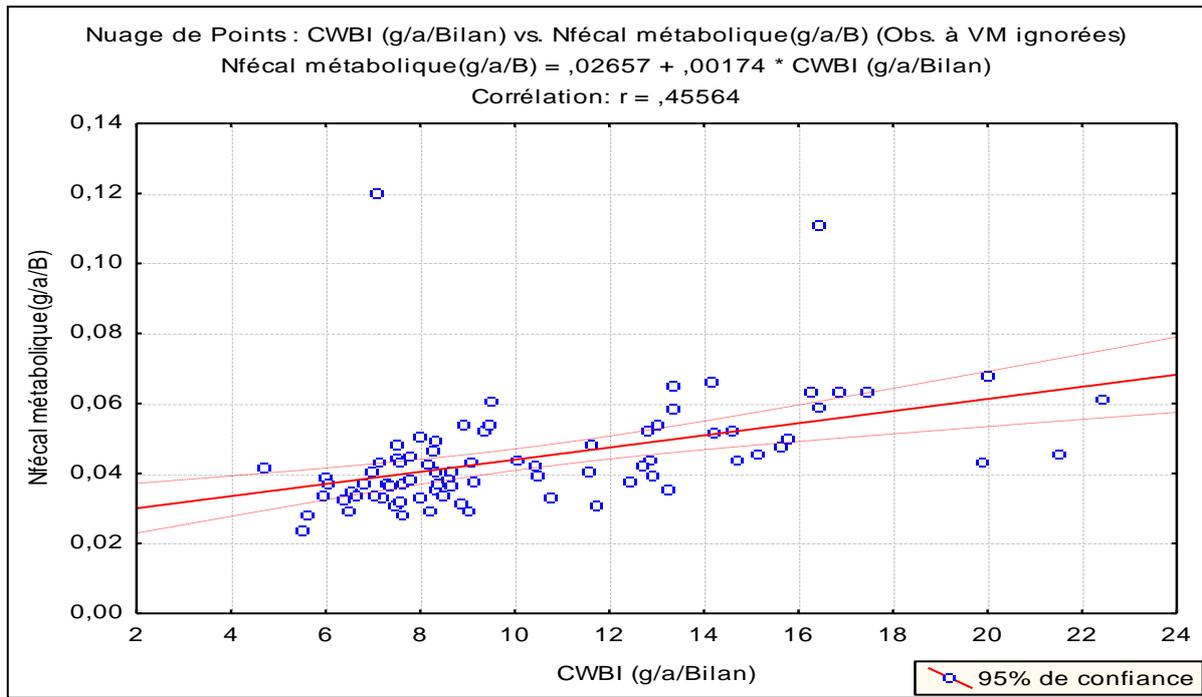


Figure 13 : Distribution des valeurs  $CB_1$  et NF (g/a/Bilan)

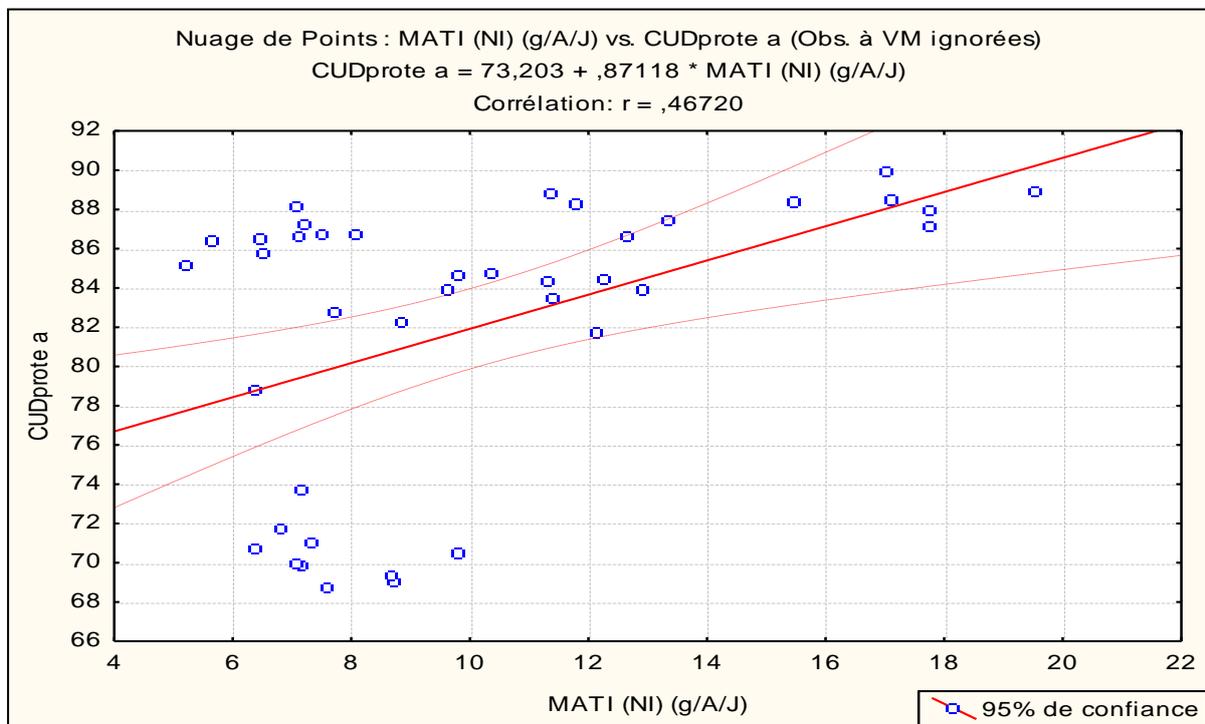


Figure 14 : Distribution des valeurs du CUD protéines et la  $MAT_1$

Quant à la digestibilité réelle des protéines, elle est respectivement de 0,87 ; 0,72 ; 0,84 et de 0,88 pour le maïs, le millet perlé, le triticale et l'orge. Sur la base de ce critère, les céréales testées sont classées de façon similaire par rapport au critère CUDa.

Il est à noter que le CUDr des protéines de l'orge est supérieur de 2 points au CUDa, contrairement aux autres céréales où l'écart n'excède pas 1 point.

Nous n'observons pas de corrélation entre la quantité d'azote ingérée et celle d'azote fécal endogène excrétée et ce malgré l'ingestion de quantités d'azote différentes entre les céréales testées. Ceci signifierait que l'excrétion endogène n'a pas été affectée par l'ingéré précédant la mise à jeun. Notre observation ne concorde pas avec celle de Masao et Okumura (1981) pour lesquels l'excrétion azotée durant le jeûne varie en fonction de la quantité d'azote précédemment ingérée et de Van Es (1981) et Sibbald (1982) qui précisent que la fraction endogène varie avec la nature et la quantité d'aliment ingérée.

Exprimée en g/kg P<sup>0,75</sup>, la quantité d'azote fécal endogène est statistiquement ( $P < 0,05$ ) différente (Tableau 29) ce qui signifierait que l'azote endogène excrété est en rapport avec le poids métabolique des animaux.

Tel que rapporté par de nombreuses études, l'excrétion de l'NFm des coqs est significativement corrélée au niveau d'ingestion de la CB (Figure 15) ( $R = 47\%$  ;  $R^2 = 22\%$ ).

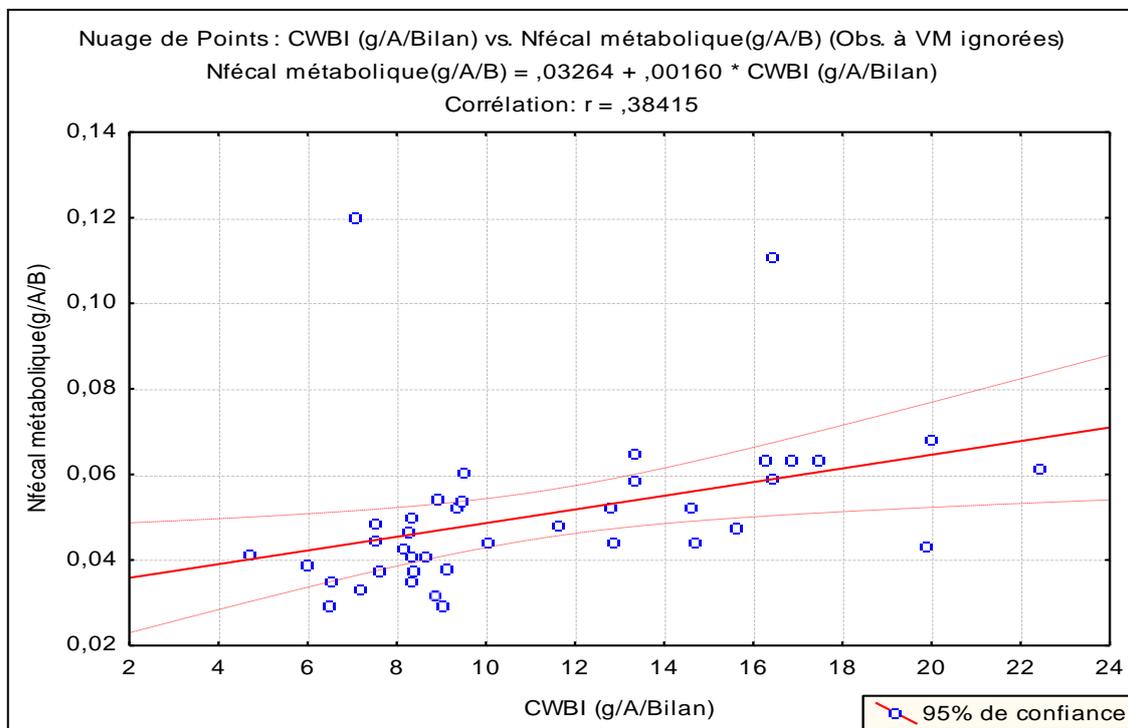


Figure 15 : Distribution des valeurs de CBI et NFm

## II.5. Potentiel énergétique des céréales et rendement

Les valeurs moyennes relatives à l'EMa et l'EMr des 4 grains de céréales sont consignées dans le tableau 30.

Le maïs, millet perlé, triticale et orge ont des valeurs moyennes d'EMa respectives de 3744 ; 3789 ; 3316 et 3091,46 kcal/kgMS.

Tableau 30 : Valeurs moyennes des EMa et EMr des grains de céréales étudiés.

Céréale	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
EMa (kcal/kgMS)	3744 <sup>a</sup> ±70,66	3789 <sup>a</sup> ±123	3316 <sup>b</sup> ±131	3091 <sup>c</sup> ±55
EMr (kcal/kgMS)	3775 <sup>a</sup> ±70	3813 <sup>a</sup> ±123	3351 <sup>b</sup> ±127	3135 <sup>c</sup> ±65
EM%EB	85,19 <sup>a</sup> ±1,6	83,25 <sup>a</sup> ±2,7	76,26 <sup>b</sup> ±3,02	72,12 <sup>c</sup> ±1,27

a, b, c : sur la même ligne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes ( $P < 0,001$ )

Chez le coq adulte nourri *ad libitum*, les bilans azotés sont le plus souvent proches de zéro, donc les valeurs de l'EMan et EMa sont très voisines (Vilarino, 1996). Il est alors permis de comparer les valeurs d'EMa obtenues aux valeurs corrigées par rapport à un bilan azoté nul répertoriées dans la bibliographie. Ces valeurs mesurées sont relativement supérieures ou concordent à l'ensemble des données consultées qui affichent une gamme variant de 2750 à 3795kcal/kg MS (Tableau 31). Boros *et al.* (2004) expliquent les différences de l'EMa entre espèces par une fermentation plus élevée des structures glucidiques chez l'oiseau adulte.

L'analyse de la variance révèle une différence très hautement significative de l'utilisation de l'énergie des différentes céréales ( $P < 0,001$ ). Néanmoins, les valeurs de l'EMa du maïs (3744 kcal/kg MS) et du millet perlé (3789 kcal/kg MS) sont comparables entre elles et significativement plus élevées que celles observées pour le triticale (3316 kcal/kg MS) et l'orge (3091,46 kcal/kg MS).

Tableau 31 : Synthèse des résultats relatifs à différentes formes de l'EM chez la volaille

EM	Références	Origine	EMan Coq (kcal/kg MS)	EMan Poulet (kcal/kgMS)	
<b>Maïs</b>	INRA-CIRAD (2017)		3660	3580	
	Feedstufes Ingredient Analysis	Maïs jaune		EMa: 3373 (Volaille)	
	Feedipedea (2012)	Europe		3681	3609
		Sub-saharienne Afrique de l'Est		3633	3537
		Amérique du Nord		3681	3609
	Neerusha Baurhoo (2011)	Maïs Canada		-	3355
	Nijimbere (2003)	Sénégal		-	3718
	Nir (2003)	-		-	3350
	Maliboungou <i>et al.</i> (1998)	-		-	3943
	Larbier et Leclercq (1992)	France		-	3350-3430
Vilariño <i>et al.</i> (1996)				EMa: 3796	
<b>Millet</b>	Cisse <i>et al.</i> (2017)	Mali		3567 TMEN	
	INRA-CIRAD (2017)	Mil ( <i>Pennisetum glaucum</i> )	3170 (EMan)	3090 (EMan)	
		Mil commun ou blanc ( <i>Panicum miliaceum L.</i> )	3740	3640	
	Feedstufes Ingredient Analysis table (2016)				EMa:3240 (volaille)
	Feedipedea (2015)	<i>Pennisetum glaucum</i>	3274		-
		Mil commun ou blanc ( <i>Panicum miliaceum L.</i> )			4015 (Volaille) (EMan)
	Neerusha Baurhoo (2011)	Millet Perlé Canadien			3093
	Nijimbere (2003)	Sénégal		-	3166
	Nir (2003)	Millet perlé		-	2675
		Millet proso		-	2898
	Maliboungou <i>et al.</i> (1998)	République Africaine (le Nord et le Nord-Est.)		-	3803
	Singh est Perez-Maldonado (1999)	Millet perlé Australien		-	Katherine: EMa: 3585
			-	Seberian: EMa: 3227	
Mahamat-silaye (1981)	Mil Souna (Sénégal)		-	3940	
<b>Triticale</b>	INRA-CIRAD (2017)	-	3370	3220	
	Feedstufes Ingredient Analysis table (2016)	-		EMa: 3150 (volaille)	
	Feedipedea (2012)	-	3394	3227	
<b>Orge</b>	INRA-CIRAD (2017)	-	3140	2280	
	Feedstufes Ingredient Analysis table (2016)	-		EMa: 2750 (volaille)	
	Feedipedea (2012)	-	3155	2701	
		-		EMa (kcal/kg MS))	
	Bamouh (1999)	-	2854	2885	

Le test de corrélation révèle que la composition chimique des grains de céréales testées est très fortement corrélée (95%,  $P < 0,0001$ ) à leur potentiel en énergie. Près de 90% des variations de l'EM de grains de céréales en rapport avec leur composition chimique sont expliqués par leur teneur en MG, en MM et en CB. Ces relations sont traduites par les équations suivantes :

$$\text{EMa (kcal/kg MS)} = 2880,1 + 176,77 \text{ MG (\%MS)} ; R=90\%; R^2=81\%$$

$$\text{EMa (kcal/kg MS)} = 4530,4 - 510,1 \text{ MM (\%MS)} ; R= - 87\%; R^2= 76\%$$

$$\text{EMa (kcal/kg MS)} = 4045,7 - 127,5 \text{ CB (\%MS)} ; R= -78\%; R^2=60\%.$$

A l'opposé, la concentration d'amidon n'apporte aucune explication à la variabilité de l'EM des céréales étudiées.

Malgré une plus forte digestibilité de la MG qu'il contient par rapport à celle du millet, et un même degré de digestibilité des protéines et de l'amidon, le maïs a une valeur énergétique comparable à celle du millet perlé. L'effet du niveau alimentaire, tel que rapporté par Kussaibati (1978), pourrait être à l'origine de cette observation. En effet, selon cet auteur, lorsque le niveau alimentaire augmente, la valeur de l'EM chez le coq, diminue. Nos données ne confirment pas cette observation puisqu'elles ont mis en exergue une corrélation hautement significative ( $p < 0,001$ ) entre le niveau alimentaire et l'utilisation de l'énergie (Figure 16).

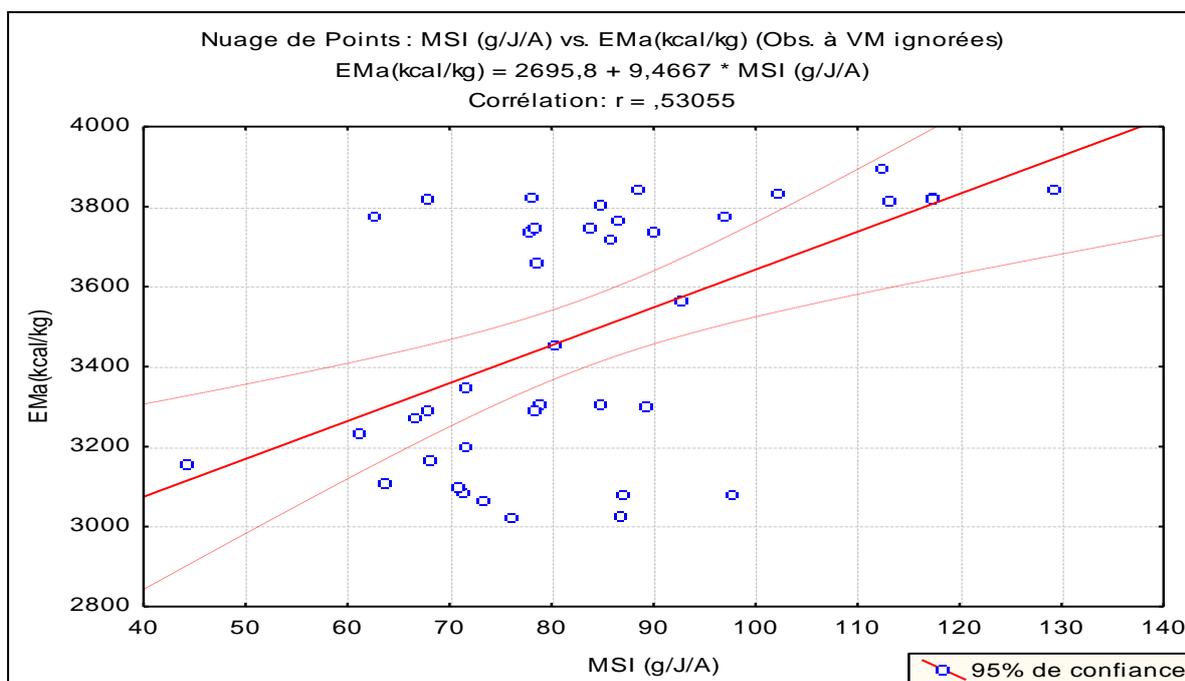


Figure 16 : Distribution des valeurs entre l'EMa et le niveau d'ingestion alimentaire

La valeur énergétique du maïs et celle du millet perlé sont très élevées ( $P < 0,001$ ) par rapport à celle de l'orge et du triticale. La digestibilité élevée de la MG et celle des protéines du maïs et du millet perlé par rapport à celles des 2 autres céréales, expliqueraient en partie cette différence.

En effet, des variations des valeurs relatives à l'EM sont expliquées respectivement à 77 et 76% par la digestibilité des protéines et celle de la matière grasse, avec des corrélations, très hautement significatives ( $P < 0,0001$ ) mises en évidence entre l'EM avec la digestibilité des protéines ( $R=88\%$ ) et celle de la MG ( $R=87\%$ ) des grains de céréales testées (Figure 17 et 18).

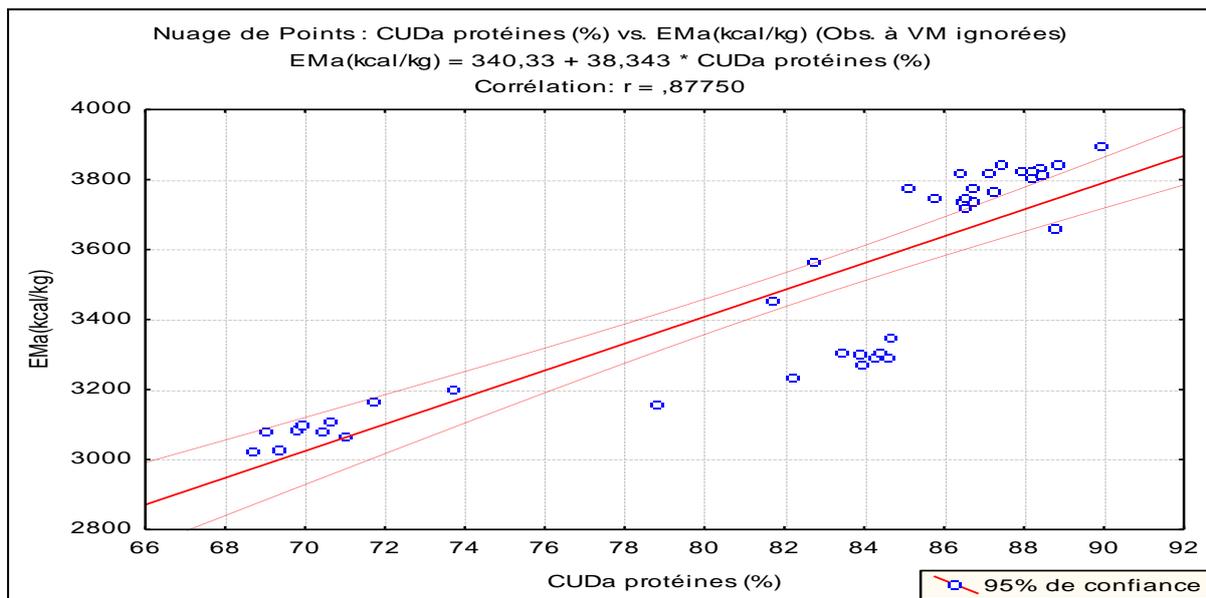


Figure 17 : Distribution des valeurs de l'EMa et le CUD des protéines

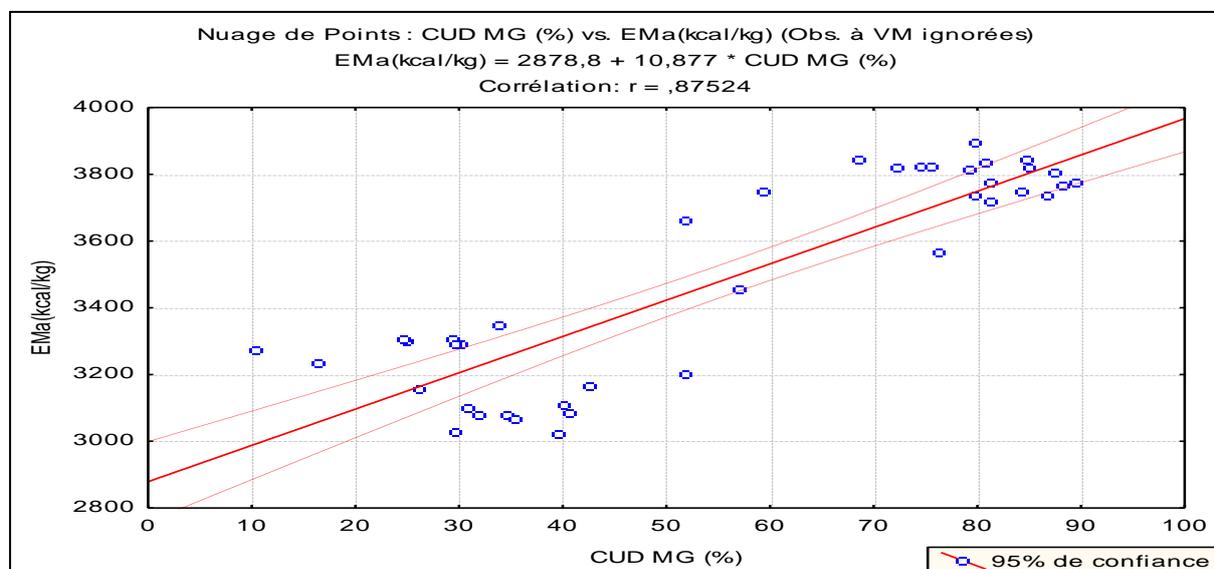


Figure 18 : Distribution des valeurs de l'EMa et le CUD de la MG

La structure protéique de chaque céréale pourrait être différente de l'autre, les protéines à structure hydrophobe solliciteraient plus d'énergie pour leur utilisation. Ceci suggérerait une utilisation concomitante de la digestibilité des protéines et l'utilisation énergétique. Ce qui signifie que la digestibilité des protéines, ou du moins pour certains types de protéines (hydrophobe), exigerait une utilisation énergétique.

La moindre concentration en EM du triticale et de l'orge serait imputée à l'effet dépréciateur des composants antinutritionnels qu'ils renferment, tel que la cellulose brute (Figure 20) et selon la bibliographie, les  $\beta$ -glucanes de l'orge et les arabinosylanes du triticale. En effet les arabinosylanes du triticale (Malthlouthi *et al.*, 2002 b) entraînent l'accroissement de la viscosité des digesta chez les oiseaux ainsi que la réduction de 10 à 15 % de la valeur énergétique métabolisable apparente (Leeson et Summers 1997). Cependant, Vilarino *et al.* (2005) ne rapportent pour les triticales aucun effet de la viscosité sur la digestibilité de l'énergie (76,5%), malgré une teneur élevée en arabinosylanes. Ils expliquent cette absence d'effet inhibiteur par la nature des glucides qui d'ailleurs donne l'avantage énergétique du triticale par rapport au blé.

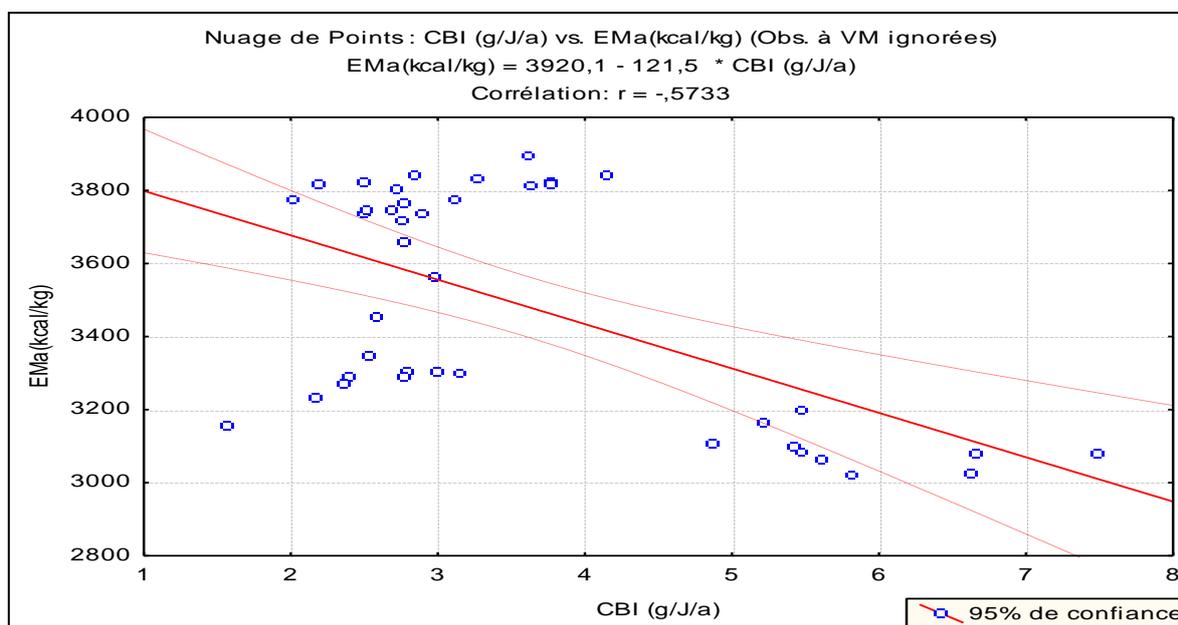


Figure 19 : Distribution des valeurs d'EMa et CBI

La teneur en MS des graines expliquerait en partie l'écart observé d'EM entre d'une part, le couple maïs et millet perlé et d'autre part celui de l'orge et le triticale ( $P < 0,001$ ). En effet, nous avons noté une similitude du taux d'humidité du millet et du maïs d'une part et de l'orge et le triticale d'autre part.

Selon Kurnick (1967) les variations d'humidité des aliments ont une influence marquée sur les valeurs EM. Cet effet a été mis en évidence par Sibbald et Slinger (1962) sur les valeurs énergétiques des graines de maïs et d'orge. Ainsi, la plus petite variation du taux de MS entraîne un écart considérable d'énergie (110kcal).

En définitive, il est à retenir que le millet perlé présente un potentiel énergétique comparable à celui du maïs en dépit d'une teneur en CB supérieure à celle du maïs (écart de 1 point) et un rendement énergétique moindre à celui du maïs.

Ces données s'éloignent de celles de la littérature spécialisée (Larbier et Leclercq, 1992 ; FAO, 1995) qui classent le millet en deuxième position après le maïs en raison de ses concentrations en MG, CB et leurs valeurs de digestibilité. Bien que le millet perlé testé renferme presque 4% de cellulose brute, celui-ci exprime de meilleures performances de digestibilité comparativement au maïs réputé exempt de FAN et ne contenant que 3% de cellulose. Le triticale, constitue également un potentiel concurrent au maïs, tandis que l'orge présente le plus faible potentiel énergétique lié à sa concentration en cellulose et en FAN, tel que la bibliographie rapporte.

La valeur de l'énergie métabolisable vraie (EMr) d'un aliment, par définition, est la correction de la valeur EMa par rapport aux pertes énergétiques endogènes des animaux (pertes fécales et urinaires) qui varient avec la nature de l'aliment. Il est donc logique qu'elle soit supérieure à sa valeur apparente EMa.

Les valeurs de l'EMr des 4 céréales testées sont signalées dans le tableau 30. Elles s'établissent à 3775 ; 3813 ; 3351 et 3135 kcal/kg MS respectivement pour le maïs, le millet perlé, le triticale et l'orge.

La correction apportée aux valeurs de leur potentiel énergétique a permis une augmentation significativement différente des céréales testées. Elle est respectivement de 31 ; 25 ; 35 ; 44 kcal/kg MS, soit 0,83 ; 0,63 ; 1,05 et 1,42% pour le maïs, le millet perlé, le triticale et l'orge. Les corrections extrêmes concernent le millet perlé (25 kcal/kg MS) et l'orge (44 kcal/kg MS).

Le rendement énergétique des différentes céréales utilisées est signalé dans le tableau 32. Il est exprimé par le rapport EM/EB. Ce rendement est en moyenne de 85,19 ; 83,25 ; 76,26 et de 72,12 %, respectivement pour le maïs, le millet perlé, le triticale et l'orge.

Tableau 32 : Le rendement énergétique des grains de céréales testés.

	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
EB (kcal/kg MS)	4394 <sup>a</sup> <sub>±7</sub>	4551 <sup>b</sup> <sub>±2</sub>	4348 <sup>c</sup> <sub>±2</sub>	4287 <sup>d</sup> <sub>±7</sub>
EMa (kcal/kgMS)	3744 <sup>a</sup> <sub>±70,66</sub>	3789 <sup>a</sup> <sub>±123</sub>	3316 <sup>b</sup> <sub>±131</sub>	3091 <sup>c</sup> <sub>±55</sub>
EMa%EB	85,19 <sup>a</sup> <sub>±1,6</sub>	83,25 <sup>a</sup> <sub>±2,7</sub>	76,26 <sup>b</sup> <sub>±3,02</sub>	72,12 <sup>c</sup> <sub>±1,27</sub>

*a, b, c : sur la même ligne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes (P<0,001)*

L'énergie du grain de maïs et de millet perlé est relativement mieux utilisée par le coq que celle du triticale et de l'orge. Cet écart de la valorisation de l'énergie brute serait expliqué par la moindre digestibilité de la MG (respectivement 27,76 et 37,75%) et protéines des 2 dernières céréales par rapport à celle du maïs et du millet perlé. De plus, la teneur en cellulose brute de l'orge (7,65%MS) étant supérieure à celles des 3 autres céréales testées (environ 3% MS), il en résulte une métabolisme de l'énergie plus faible, comme observé par Coates *et al.*(1977).

### III. Effet de la chaleur sur la valeur nutritionnelle des grains de céréales

Ce chapitre est consacré à l'analyse et la discussion de l'effet de la chaleur sur la digestibilité des grains de céréales.

#### III.1. Digestibilités de la matière sèche à 33C°

Les valeurs moyennes de la digestibilité des grains de céréales étudiées sont consignées dans le tableau 33.

Pour l'ensemble des 4 céréales, nous n'observons pas d'effet ( $P > 0,05$ ) de la chaleur sur la digestibilité apparente et réelle de la MS.

La chaleur ne modifie pas non plus le classement des céréales sur la base de la digestibilité apparente ou réelle.

Tableau 33 : Effet de la chaleur sur la digestibilité de la MS (%) des céréales testées chez le coq

	Céréales	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
	T° C				
CUDa MS	23°C	83,71 <sup>a</sup> ±1,35	80,76 <sup>a</sup> ±3,05	74,43 <sup>a</sup> ±3,28	71,48 <sup>a</sup> ±1,31
	33°C	83,61 <sup>a</sup> ±1,41	79,99 <sup>a</sup> ±3,05	74,82 <sup>a</sup> ±0,65	73,43 <sup>a</sup> ±3,31
CUDr MS	23°C	84,64 <sup>a</sup> ±1,31	82,64 <sup>a</sup> ±1,49	75,52 <sup>a</sup> ±3,18	72,71 <sup>a</sup> ±1,59
	33°C	84,65 <sup>a</sup> ±1,37	81,77 <sup>a</sup> ±1,48	75,74 <sup>a</sup> ±0,71	74,62 <sup>a</sup> ±3,36

Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre minuscule sont statistiquement différentes ( $P < 0.05$ )

Ces premiers résultats ne confortent ni ceux de Zuprizal *et al.* (1992) et de Puvadolpirod *et al.* (2000) qui rapportent que la digestibilité de la matière première a tendance à diminuer sous l'effet de la chaleur, ni ceux rapportés par Garcia *et al.* (2004) qui eux, indiquent que dans ces conditions d'ambiance, la digestibilité de la matière sèche d'une matière première céréalière, exemple du maïs et du gros millet (sorgho) augmente.

Geraert (1991) rapporte que la digestion comme l'ingestion ont un effet thermogénique. Ce qui supposerait que la lutte des oiseaux contre la chaleur ambiante se fait au détriment de l'assimilation des nutriments et de l'énergie ingérée, et conduirait à une diminution de la digestibilité de la MS ainsi que de ses principes nutritifs.

Il est à noter cependant que la chaleur a modifié le comportement alimentaire des coqs puisqu'à l'exception de ceux recevant du triticale, ils ont réduit significativement ( $P < 0,001$ ) leur consommation (Tableau 34) d'aliment et augmenté celle de l'eau (Tableau 35).

Tableau 34 : Niveau d'ingestion alimentaire (%) à 23 et à 33°C

Céréales	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
23°C	54,89 <sup>a</sup> ±7,22	68,15 <sup>a</sup> ±12,21	48,07 <sup>a</sup> ±8,69	51,09 <sup>a</sup> ±7,02
33°C	46,34 <sup>b</sup> ±6,42	54,41 <sup>b</sup> ±11,47	50,09 <sup>a</sup> ±7,13	41,86 <sup>b</sup> ±8,06

Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre minuscule sont statistiquement différentes ( $P < 0.05$ )

Tableau 35 : Consommation d'eau à 23 et à 33°C

	Céréales	Maïs	Mil	Triticale	Orge
	T° C				
Eau bue (ml/j/a)	23°C	51,47 <sup>a</sup> ±10,71	112,20 <sup>a</sup> ±22,29	90,33 <sup>a</sup> ±16,67	79,27 <sup>a</sup> ±10,88
	33°C	97,30 <sup>b</sup> ±22,32	192 <sup>b</sup> ±47	206,87 <sup>b</sup> ±7,37	178 <sup>b</sup> ±33,37

Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre minuscule sont statistiquement différentes (P<0.05)

Bien que le niveau alimentaire soit significativement diminué sous l'effet de la chaleur, il n'y a pas eu d'impact significatif sur la digestibilité des céréales, même si nous observons une relation statistiquement positive (P<0,05) entre les deux paramètres : niveau alimentaire et digestibilité de la MS (R= 45% ; R<sup>2</sup>= 20% : Figure 20).

L'augmentation significative (P<0,0001) de la consommation d'eau à 33°C (Tableau 34) aurait modifié le processus digestif et en facilitant le transit digestif, aurait diminué la digestibilité, tel que évoqué par Bonnet *et al.* (1997). Cette hypothèse repose sur l'observation d'une corrélation négative (R= - 0,55 ; R<sup>2</sup>=30%) entre la digestibilité des céréales testées et le ratio consommation d'eau : MS ingérée (P<0,001).

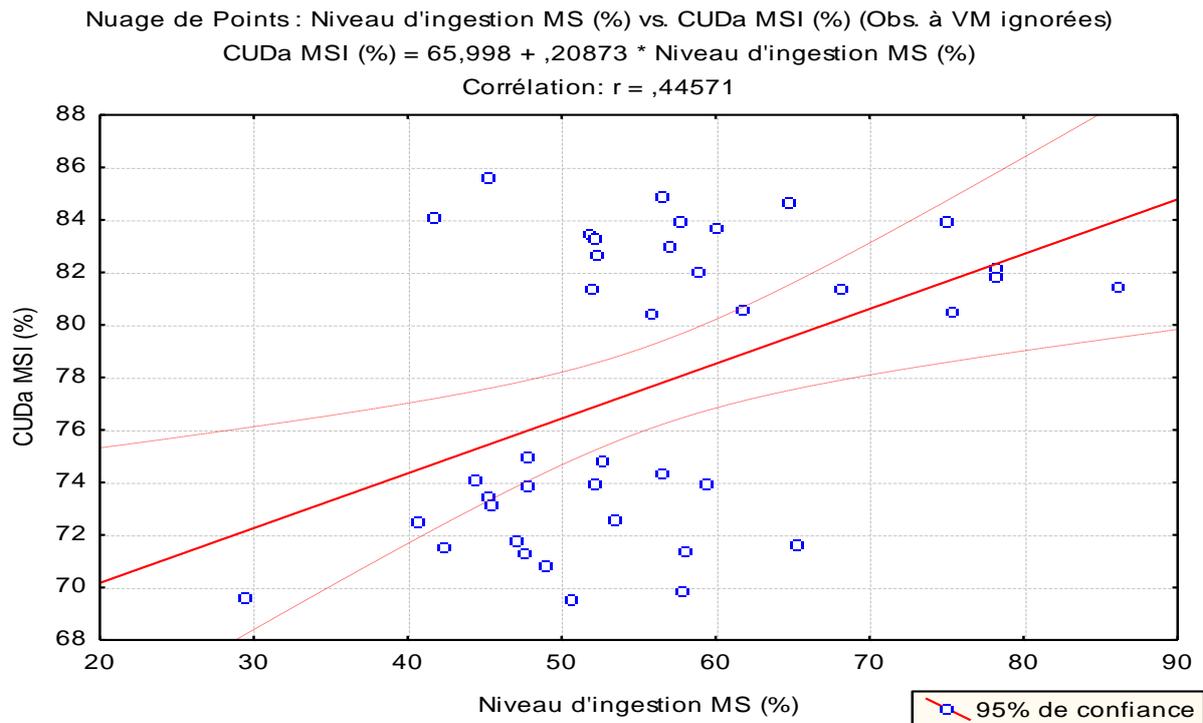


Figure 20 : Distribution des valeurs du niveau d'ingestion alimentaire et la digestibilité de la MS

La diminution des quantités de l'ingéré alimentaire conjuguée à un éventuel allongement du temps de transit digestif à chaud, rapportés par Wilson *et al.* (1980), auraient compensé la baisse de certaines activités enzymatiques à chaud démontrée par Yamazaki et Zhang (1982) et Hai *et al.* (2000), favorisant alors l'attaque enzymatique du substrat alimentaire. Ces modifications physiologiques pourraient expliquer le maintien du niveau de digestibilité constant de l'ingéré sec par les coqs en condition de chaleur.

Un aliment constitué de plusieurs matières premières, de composition chimique différente, dont la digestion exigerait l'action de plusieurs types d'enzymes simultanément activant dans des milieux à « pH » différents, abaisserait le potentiel digestif intrinsèque des constituants de l'aliment et donc sa matière sèche via le phénomène de compétitivité entre différents enzymes. Ce phénomène pourrait accentuer la baisse de l'activité de certaines enzymes à température ambiante chaude (Yamazaki et Zhang 1982), entraînant par conséquent un potentiel digestif de l'aliment amoindri. Cela supposerait que le mode de distribution séparé en conditions climatiques chaudes contribuerait à l'amortissement de l'effet négatif de la chaleur sur l'utilisation de l'aliment par les oiseaux.

### III.2. Digestibilité des protéines à 33°C°

Les résultats relatifs à l'effet de la chaleur sur la digestibilité apparente et réelle des protéines des céréales sont rapportés dans le tableau 36.

Tableau 36 : Effet de la chaleur sur la digestibilité apparente et réelle (%) des protéines des céréales chez le coq

	Céréales	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
	T° C				
CUDa protéines	23°C	86,20 <sup>a</sup> ±1,47	87,46 <sup>a</sup> ±2,23	83,91 <sup>a</sup> ±2,46	70,45 <sup>a</sup> ±1,49
	33°C	86,43 <sup>a</sup> ±1,04	89,15 <sup>a</sup> ±1,34	83,18 <sup>a</sup> ±0,68	67,09 <sup>b</sup> ±4,45
CUDr protéines	23°C	87,42 <sup>a</sup> ±1,39	88,12 <sup>a</sup> ±2,20	84,70 <sup>a</sup> ±2,38	72,04 <sup>a</sup> ±1,90
	33°C	87,51 <sup>a</sup> ±0,92	89,81 <sup>a</sup> ±1,39	83,94 <sup>a</sup> ±0,62	68,49 <sup>b</sup> ±4,48

*a,b,c : Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre sont statistiquement différentes (P<0,05)*

A la température de 33°C, les protéines du maïs, du triticale et du millet perlé sont dégradées de façon similaire qu'en conditions de température optimale. En revanche, celles de

l'orge sont moins digérées (67 vs 70%). La même tendance est observée pour les valeurs de digestibilité réelle de l'orge.

La moindre digestibilité des protéines de l'orge en conditions chaudes vérifie les observations de Tesseraud et Temim (1999), relative à la diminution de la valeur protéique d'une matière première à chaud d'autant plus qu'elle est plus faible à une température optimale et celles de Puvadolpirod *et al.* (2000). Cette observation serait liée à l'effet laxatif de la cellulose et des B-glucanes de l'orge qui, en induisant une augmentation de la viscosité du bol alimentaire (Guillaume, 1978), entraîne une réduction de la digestibilité des protéines (Larbier et Leqlerc, 1992 ; Saulnier, 2012), d'autant plus forte que la consommation d'eau augmente significativement ( $P < 0,001$ ) à 33°C. L'augmentation d'eau pour les coqs recevant l'orge et soumis à la chaleur est de l'ordre de 129%, alors qu'il n'est que de 71, 125, 89% respectivement pour les coqs alimentés avec des grains de maïs, de millet perlé et de triticale comme indiqué par le tableau 34.

Le maintien du niveau d'utilisation digestive des protéines du maïs, millet perlé et triticale en ambiance chaude ne s'aligne pas sur la tendance des résultats rapportés par Walis et Balnave (1984) ; Zuprizal *et al.* (1992) ; Dibner *et al.* (1992) et Bonnet *et al.* (1997) qui observent une diminution significative de la digestibilité des protéines chez le poulet de chair adulte (de plus de 5 semaines) exposé à une température élevée. A l'opposé, Garcia *et al.* (2004) signalent une meilleure digestibilité des protéines du maïs lorsque la température ambiante évolue de 25 à 32 °C, tandis que ce paramètre reste inchangé pour le gros millet à faible teneur en tannins.

Selon Scott (1962), sous des températures plus élevées, les besoins d'entretien en protéines sont réduits, mais l'indice de conversion sera amélioré par la concentration plus forte des acides aminés. Walis et Balnave (1984) ; Zuprizal *et al.* (1992) rapportent que cette réduction varie en fonction du type de protéines utilisées.

Les résultats contradictoires retrouvés dans la documentation spécialisée sont en partie liés à des considérations méthodologiques. En effet, le modèle animal utilisé dans les différents essais peut constituer un important facteur de variation de la digestibilité. Entre le coq et le poulet et / ou la poule, il y a une différence de sexe et d'état physiologique, donc de besoins protéiques, notamment en acides aminés indispensables qui seraient exprimés différemment sous l'effet de la chaleur, déterminant ainsi la digestibilité des protéines. Dans ce sens, les travaux de Geraert *et al.* (1996b) suggèrent que la chaleur modifie spécifiquement le besoin en certains acides aminés plutôt que le besoin protéique global.

Selon Alleman et Leclerq (1997), une mauvaise adéquation des apports en acides aminés limiterait la protéosynthèse. Cette situation se traduirait par une importante perte en protéines fécales, se répercutant sur la digestibilité des protéines alimentaires. En se basant sur ce rapport, il est logique que les résultats de nos essais ne révèlent aucun effet de la chaleur sur la digestibilité des protéines chez le coq adulte, celui-ci étant à un niveau énergétique d'entretien.

### III. 3. Digestibilité de l'amidon à 33°C

Les résultats relatifs à la digestibilité de l'amidon, à chaud, des grains de céréales chez le coq sont rapportés dans le tableau 37.

Tableau 37 : Effet de la chaleur sur la digestibilité de l'amidon (%) des céréales chez le coq

Céréales T° C	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
23°C	99,41 <sup>a</sup> ± 1,07	99,69 <sup>a</sup> ± 0,16	99,73 <sup>a</sup> ± 0,24	99,48 <sup>a</sup> ± 0,35
33°C	99,80 <sup>a</sup> ± 0,14	99,72 <sup>a</sup> ± 0,14	99,78 <sup>a</sup> ± 0,21	99,41 <sup>a</sup> ± 0,39

*a, b : Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre minuscule sont statistiquement différentes (P<0.05)*

Alors que Longe et Oluyemi (1980) signalent que la digestibilité de l'amidon augmente quand le taux de l'ingestion de ce nutriment diminue, nous n'observons pas (P>0,05) cet effet, malgré la diminution du niveau d'ingestion des 4 céréales en conditions chaudes (Tableau 38).

Tableau 38 : Valeurs de la quantité moyenne ingérée d'amidon (g/j/a) des céréales testées à 23 et à 33°C

Céréales T (° C)	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
23°C	53,48 <sup>a</sup> ± 7,04	60,62 <sup>a</sup> ± 10,86	39,30 <sup>a</sup> ± 7,11	38,29 <sup>a</sup> ± 5,26
33°C	45,14 <sup>b</sup> ± 6,26	48,40 <sup>b</sup> ± 10,21	40,96 <sup>a</sup> ± 5,83	31,37 <sup>b</sup> ± 6,04

*a, b : Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre minuscule sont statistiquement différentes (P<0.05)*

Quant aux travaux de Bonnet *et al.* (1997), ils indiquent que la digestibilité de l'amidon diminue chez le poulet de chair exposé à une température élevée, confirmant ainsi une plus grande sensibilité de l'activité des enzymes amylasiques, comparé aux enzymes protéasiques sous l'effet de la chaleur observée par Yamazaki et Zhang (1982). Le maintien du niveau de la digestibilité de l'amidon de chacune des céréales étudiées en conditions chaudes, nous amène à supposer que les coqs utilisés ont résisté à l'effet de la chaleur sur leur physiologie digestive. Les éventuelles modifications dans la physiologie de la digestion suite à la diminution de l'ingestion sous l'effet de la chaleur, auraient effacé l'effet dépréciateur de la chaleur sur la digestibilité de l'amidon.

Le tableau 37 indique également qu'en conditions chaudes, l'amidon de l'orge est significativement ( $P < 0,01$ ) moins dégradé par rapport à celui des 3 autres céréales. , sous l'effet du taux de la CB ingérée ( $R = - 44\%$  ;  $R^2 = 19\%$  ;  $P < 0,01$ ).

#### III.4. Digestibilité de la matière grasse à 33°C

Les valeurs moyennes des coefficients de la digestibilité de la MG, figurent dans le tableau 39.

Tableau 39 : Effet de la chaleur sur la digestibilité de la MG (%) des céréales chez le coq

Céréales T (° C)	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
23°C	84,02 <sup>a</sup> ± 4,24	73,25 <sup>a</sup> ± 9,16	27,76 <sup>a</sup> ± 0,91	37,75 <sup>a</sup> ± 6,69
33°C	80,10 <sup>b</sup> ± 3,19	80,73 <sup>b</sup> ± 4,52	20,89 <sup>a</sup> ± 7,20	38,51 <sup>a</sup> ± 3,78

*a, b* : Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre minuscule sont statistiquement différentes ( $P < 0,05$ )

L'analyse de la variance n'a révélé aucun effet de la température sur la digestibilité de la matière grasse des céréales testées. Cette tendance de résultats corrobore celle de Garcia *et al.* (2004) observée pour le maïs et le gros millet et celle de Puvaldopirod *et al.* (2000).

En revanche, nos résultats sont contradictoires à ceux de Bonnet *et al.* (2007) qui rapportent que la digestibilité de la MG diminue en conditions chaudes.

Par ailleurs, nous avons enregistré des réponses différentes de digestibilité de la MG des céréales sous l'effet de la chaleur : une baisse de celle du maïs et une augmentation de celle du millet perlé.

La forte corrélation établie entre les quantités ingérées de MG (Tableau 40) et la digestibilité de ce nutriment ( $R=80\%$  ;  $R^2=63\%$  ;  $P<0,0001$ ), pourrait expliquer cette observation, quoique Kussaibati (1978) rapporte que la digestibilité des lipides diminue avec l'augmentation de l'ingéré.

Tableau 40 : Quantités moyennes ingérées de MG (g/j/a) des céréales testées sous ambiances thermiques différentes.

Céréales T (° C)	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
23°C	3,89 <sup>a</sup> ± 0,51	4,26 <sup>a</sup> ± 0,96	1,27 <sup>a</sup> ± 0,20	1,50 <sup>a</sup> ± 0,20
33°C	3,28 <sup>b</sup> ± 0,45	4,34 <sup>b</sup> ± 0,90	1,32 <sup>a</sup> ± 0,24	1,22 <sup>b</sup> ± 0,23

Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre minuscule sont statistiquement différentes ( $P<0.05$ )

### III.5. Utilisation d'énergie des céréales testées à 33°C: valeur et rendement

Les valeurs moyennes de l'EMa et l'EMr des céréales mesurées en ambiances thermiques différentes sont consignées dans le tableau 41.

L'utilisation énergétique des céréales testées à 33 °C suit la même tendance que celle observée à 23°C.

Tableau 41 : Effet de la chaleur sur l'EMa (kcal/kgMS) des céréales chez le coq

Céréales T° C	Maïs	Millet perlé	Triticale	Orge
23°C	3744 <sup>a</sup> ± 70,66	3789 <sup>a</sup> ± 123	3316 <sup>a</sup> ± 131	3091 <sup>a</sup> ± 55
33°C	3744 <sup>a</sup> ± 56	3834 <sup>a</sup> ± 64	3324 <sup>a</sup> ± 31	3151 <sup>a</sup> ± 144

Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par une lettre sont statistiquement différentes ( $P<0.05$ )

L'analyse de la variance n'a révélé aucun effet significatif de la température sur l'utilisation de l'énergie. Ce résultat était attendu vu l'absence de modification de la

digestibilité de l'amidon (principale source d'énergie) et à moindre degré celle de la MG sous l'effet de la chaleur.

Le niveau d'ingestion des céréales testées a significativement diminué en passant d'une température ambiante de 23°C à celle de 33°C, ce qui aurait influencé l'utilisation énergétique par les coqs à 33°C, tel rapporté par Kussaibati (1978) qui note que l'énergie sous ses différentes formes est dépendante du niveau d'ingestion : lorsque le niveau alimentaire diminue la valeur EM augmente. Cet auteur, explique cette observation par la digestibilité des lipides qui augmente avec la diminution de l'ingéré, et par conséquent un meilleur potentiel EM. Cette tendance ne concorde pas avec nos résultats qui révèlent que la digestibilité des matières grasses est en corrélation significative ( $R= 44\%$  ;  $P=0,004$ ) avec le niveau d'ingestion des coqs soumis à une température optimale. Par contre à température élevée, aucune corrélation n'est révélée entre le CUD de la MG et l'ingestion alimentaire.

Nos données ne s'alignent pas non plus avec celles de Hochit *et al.* (1970) et Han *et al.* (1976) pour lesquelles la réduction du niveau d'ingestion jusqu'à même 60% de la quantité ingérée *ad li- bitum* n'influence pas la valeur EM.

Pour les 4 céréales étudiées, l'expression de l'EM sous la forme de l'EMr n'a subi aucun effet significatif de la chaleur (Tableau 42), bien que nous ayons enregistré une baisse significative des valeurs moyennes des quantités de fientes excrétées d'origine endogène ( $p<0,05$ ) de 12% (2,41 à 2,12 g/j/a) ainsi que du potentiel EB ( $P< 0,0001$ ) qui subit une réduction de 2,6% ( 3344,91 à 3258,25 Kcal/ Kg MS) d'une ambiance portée à 23°C à celle de 33°C.

Tableau 42 : Effet de la chaleur sur l'EMr (kcal/kgMS) des céréales chez le coq

Céréales T° C	Mais	Millet perlé	Triticale	Orge
23°C	3775 <sup>a</sup> ±70	3813 <sup>a</sup> ±123	3351 <sup>a</sup> ±127	3135 <sup>a</sup> ±65
33°C	3779 <sup>a</sup> ±54	3862 <sup>a</sup> ±65	3354 <sup>a</sup> ±32	3191 <sup>a</sup> ±146

Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre minuscule sont statistiquement différentes ( $P<0.05$ )

Nous observons également une légère tendance à l'augmentation des valeurs EMr sous l'effet de la chaleur ; les données bibliographiques concernant ce point sont assez éparées.

El Husseiny et Creger (1980) notent une augmentation, Geraert *et al.* (1992) ne rapportent pas de différence de l'EMr de l'aliment dans les températures ambiantes élevées, alors que Bonnet *et al.* (1997) et Boudouma *et al.* (2008) rapportent une diminution de la digestibilité des composants de l'aliment et de son EM chez la volaille soumis à la chaleur.

Piestun *et al.* (2011) et Souza *et al.* (2016) rapportent un faible rendement énergétique chez le poulet exposé continuellement à la chaleur, suite à un besoin d'une dépense énergétique plus élevée pour assurer la thermorégulation.

L'utilisation comparable des nutriments par les coqs à 23°C ou à 33°C nous laisserait supposer que la chaleur n'a pas affecté la physiologie digestive des coqs utilisés. Ceci est reflété par leur température corporelle qui en moyenne, est restée relativement stable dans les deux ambiances thermiques :  $41,29 \pm 0,05^\circ\text{C}$  à 23°C et  $41,36 \pm 0,015^\circ\text{C}$  à 33°C.

Cette résistance à la chaleur pourrait être expliquée par la baisse de la consommation alimentaire en conditions chaudes, permettant aux coqs de baisser leur production de chaleur.

#### IV. Discussion générale

Les grains de céréales étant en alimentation animale et notamment avicole recherchés pour leur potentiel énergétique, nous relevons à travers l'étude réalisée de la composition chimique de 3 céréales locales, 2 points :

- Le millet perlé se distingue par une concentration élevée en énergie (4551 kcal/kg MS) par rapport à celle du triticales (+203 kcal/kg MS) et de l'orge (+264 kcal/kg MS). Il surpasse la teneur en EB du maïs de 155 kcal/kg MS bien qu'il renferme une moindre teneur en amidon que ce dernier (64 vs 70%MS). De plus, par rapport à la céréale de référence qu'est le maïs, il se distingue par un taux en matière grasse et en matières protéiques plus élevé : 5,23 vs 4,73MG%MS et 15,13 vs 8,33MAT%MS.
- Les grains de triticales se révèlent également intéressants à introduire en formulation d'aliment pour volaille, de par leur apport énergétique brut appréciable (4350 kcal/kg MS) et de leur teneur protéique non négligeable (14,5%MS). Leur teneur en cellulose brute et l'éventuelle présence de principes antinutritionnels (rapportée par la documentation spécialisée) pourraient toutefois constituer un facteur limitant de leur intérêt nutritionnel chez la volaille. Un traitement approprié de ces graines, devrait pouvoir lever cette contrainte nutritionnelle.

Les valeurs de la composition chimique moyenne des grains de céréales étudiés se situent dans la gamme des valeurs décrites par les tables nutritionnelles de FEEDIPEDIA (2017).

L'analyse de la variance des mesures du niveau d'ingestion réalisées lorsque les coqs étaient dans les 2 ambiances différant par leur température, montre dans les 2 cas de figure, une différence très hautement significative ( $P < 0,001$ ). La consommation du millet perlé est meilleure que celle des autres céréales testées, tandis que celles du maïs, du triticale et de l'orge sont similaires. La teneur relativement élevée du millet perlé en protéines expliquerait cette observation Okwuosa *et al* (1990). La même tendance d'ingestion est notée avec une différence moins marquée à 33°C ( $P < 0,05$ ).

Le niveau d'ingestion du triticale est comparable à ceux de l'orge et du maïs, bien qu'il renferme plus de protéines (14%MS) que l'orge (10 %MS) et le maïs (8%MS). La présence des fibres ou encore des  $\beta$ -glucanes de l'orge serait à l'origine du niveau d'ingestion de cette céréale similaire à celui du triticale, suite à l'augmentation de la vitesse de transit digestif qu'ils entraînent et qui à son tour, déclenche un besoin de consommation alimentaire.

Le niveau d'ingestion moyen du maïs, du millet perlé et de l'orge est significativement réduit ( $P < 0,001$ ) à 33°C, tandis que celui du triticale est inchangé. Cette diminution est en moyenne de 16 ; 18 et 20% (soit 1,6 ; 1,8 et 2% / °C), respectivement pour le maïs, l'orge et le millet perlé. Elle est comparable pour le maïs et l'orge. La réduction de l'ingestion des grains de millet en conditions chaudes est sévère comparée à celle rapportée par Huart (2004) et qui est de 15%, soit 1,5% / °C. Les différences observées pourraient s'expliquer par la digestibilité de l'aliment et la nature de ses composants chimiques.

La diminution de la consommation alimentaire en conditions chaudes permet à l'organisme animal de réduire sa production de chaleur. Howlinder et Rose (1987) précisent que lorsque la température ambiante dépasse 23°C, le premier réflexe de l'oiseau est de limiter ses apports énergétiques. Par ailleurs, Tasaki et Kushima (1979) rapportent que les protéines présentant l'extra chaleur la plus élevée comparativement aux glucides et aux lipides, elles contribuent fortement à la thermogénèse alimentaire. Ces deux considérations expliqueraient l'importante diminution de l'ingéré du millet perlé en conditions chaudes (riche en énergie et protéines comparé au maïs et à l'orge).

Bien que l'on ait signalé que le profil chimique du maïs (céréale de référence), l'appêtait à une bonne utilisation par le coq, nous avons observé que le millet perlé présente un meilleur potentiel nutritionnel même en conditions d'ambiance chaude.

Selon la F.A.O (1995), les grains de millet perlé sont caractérisés par une teneur élevée en fibres alimentaires et une mauvaise digestibilité de ses composants nutritifs. Cependant, dans nos conditions expérimentales, nos résultats révèlent que dans les 2 conditions d'ambiance thermique, les coqs ont consommé plus de grains de millet que de maïs, d'orge et de triticales, et que de plus, les mesures de digestibilité ont montré de meilleurs résultats avec cette céréale.

Confrontée au maïs (84%), le millet est la céréale la mieux digérée (81%), contrairement à l'orge (73%) qui est moins bien utilisée devant le triticales (76%). Ces différences observées par rapport à la céréale référentielle ne pourraient pas être expliquées par le niveau d'ingestion. Ce dernier, avec un  $R=45\%$  ;  $R^2=20\%$  ( $P=0,008$ ), ne paraît pas être un argument plausible pour expliquer cette différence de digestibilité. En revanche, les teneurs en fibres celluloseuses ( $R= -52\%$  ;  $R^2=27\%$  ;  $P=0,0005$ ) que renferme chacune des céréales testées expliquerait cette observation.

La digestibilité de l'amidon des 3 céréales locales est comparable à celle du maïs, alors que cette dernière est dite céréale de référence en alimentation animale et particulièrement avicole en raison entre autres, de sa très faible teneur en FAN. Ce résultat surprenant pourrait s'expliquer non pas par la composition chimique des grains étudiés, mais plutôt par le modèle animal utilisé. En effet, il est rapporté que le coq est moins sensible aux effets dépréciateurs des FAN (Rotter *et al.* 1990) dans le cas des bêta-glucane.

L'utilisation digestive des protéines du millet perlé est comparable à celle du maïs (87,46 vs 86,20%), meilleure que celle du triticales (83,91%) et de l'orge (70,45%). La différence de l'utilisation protéique du maïs et celle du millet perlé comparé aux deux autres céréales testées est expliquée par le niveau d'ingestion de la MG et de sa digestibilité, mais surtout par l'utilisation énergétique de ces grains de céréales. En effet, l'analyse de nos résultats indique que l'utilisation digestive des protéines est déterminée à 77% par le potentiel EM de ces grains et que celle de la MG n'explique que 33% des variations.

Selon, le test de Newman and keuls, la distribution des groupes, en fonction de leur CUD des protéines à 23°C n'est pas symétrique à celle révélée à 33°C. Ce qui révélerait l'effet de l'interaction des deux facteurs température et aliment sur la valeur nutritive des gains de céréales.

Aucun effet significatif de la chaleur inter- céréales sur la digestibilité des protéines brutes n'a été montré. En revanche, l'analyse intra-céréale a révélé une diminution significative ( $P<0,05$ ), de 3 points, chez les coqs consommant l'orge et soumis à une

température élevée. Cette observation concorde avec les résultats de Tesseraud et Temim (1999) qui rapportent que la valeur protéique d'une matière première diminue au chaud d'autant qu'elle est plus faible à une température neutre.

Le triticale est la seconde céréale à teneur MAT relativement élevée (14,46%) après le millet perlé (15,13%). Cependant, la digestibilité de ce principe est faible (83,91%) comparé à celui du maïs (86,20%) renfermant des teneurs moins importantes en MAT (8,33%). La nature des protéines et/ou les FAN et particulièrement les arabinoxylanes que renfermerait le triticale testé, serait responsables de cette moindre digestibilité.

La teneur en CB ingérée explique à 65% la faible digestibilité protéique de l'orge chez les coqs, confirmant ainsi les résultats de Leterme *et al.* (1996), Leterme *et al.* (2000) et Leterme et Thewis (2004) qui observent que les fibres des grains d'orge sont à l'origine de pertes importantes de protéines endogènes. L'effet abrasif des fibres sur les parois intestinales et / ou une synthèse protéique d'origine microbienne élevée, éventuels facteurs explicatifs de la faible digestibilité protéique de l'orge, seraient liés à la cellulose brute fortement présente dans l'orge, comparée au millet perlé, au triticale et au maïs.

Classiquement, le potentiel en termes d'EM est corrélé au niveau alimentaire et à la digestibilité des nutriments de l'aliment. Cependant, malgré la meilleure digestibilité de la MG du maïs comparée à celle du millet perlé et la similitude de leurs digestibilités amylacées et protéiques, leur potentiel énergétique en termes d'EM est comparable. Ceci pourrait être expliqué par l'effet du niveau alimentaire, Celui-ci est corrélé positivement avec l'EM, tel rapporté par Kussaibati (1978), signalant que l'énergie sous ses différentes formes est dépendante du niveau alimentaire.

Malgré une concentration d'EB comparable entre les 4 céréales, (CV= 0,89%) dont la digestibilité de l'amidon est en plus de même ordre de grandeur (CV=0,58), l'utilisation énergétique au niveau métabolique du maïs et celle du millet perlé se sont révélées très hautement différentes de celles du triticale et de l'orge ( $P < 0,001$ ). La faible utilisation énergétique du triticale ou de l'orge par les coqs, serait due à la mauvaise digestibilité de leurs matières grasses et des protéines en rapport avec les FAN qu'ils renferment. Cette relation est vérifiée par l'étroite corrélation de l'utilisation énergétique avec la digestibilité de la MG ( $R = 76\%$ ;  $R^2 = 87\%$ ) et celle des protéines ( $R = 77\%$ ;  $R^2 = 88\%$ ).

L'analyse de la variance n'a révélé aucun effet significatif de la température sur l'utilisation de l'énergie. Ce qui nous paraît logique, du fait que ce facteur n'a impacté ni la digestibilité de l'amidon (principale source d'énergie), ni celle de la MG.

L'utilisation comparable des nutriments par les coqs soumis à une ambiance de 23°C ou de 33°C, nous laisserait supposer que la chaleur n'a pas affecté leur physiologie digestive. En effet, nous n'avons pas observé de modifications de leur température corporelle :  $41,36 \pm 0,015^\circ\text{C}$  à 33°C *vs*  $41,29 \pm 0,05^\circ\text{C}$  à 23°C.

Le maintien de la température corporelle constante est en rapport avec la réduction de la consommation alimentaire (Geraert 1991 ; Padilha *et al* 1995) permettant aux coqs de baisser leur production de chaleur.

Avec un tel ajustement de sa consommation alimentaire, le coq permet d'optimiser la charge thermique associée au métabolisme des nutriments ingérés. Cette observation concorde avec celles de North et Bell (1990) et Koh et Macleod (1999) qui expliquent la tolérance des poulets à la chaleur par une faible production de chaleur métabolique liée à la restriction alimentaire, entraînant ainsi une réduction de la charge calorifique. Les travaux ultérieurs d'Altan *et al.* (2003) ; Ozbey et Ozceilik (2004) et Abu-Dieyeh (2006) appuient cette explication. Dans nos conditions expérimentales, ces observations expliqueraient l'importante diminution de l'ingéré de millet perlé plus riche en énergie et protéines que le maïs et l'orge, lorsque les coqs soumis à la chaleur.

Par ailleurs, la tolérance à la chaleur observée chez les coqs serait également en rapport avec leur plus grande consommation d'eau. En effet, les coqs maintenus à 23°C et recevant respectivement le maïs, le millet perlé, le triticale et l'orge ont eu une consommation moyenne d'eau par jour et par animal équivalente respectivement à 51 ; 112 ; 90 et 79 ml, correspondant à 3 ; 6 ; 4,5 et 4% de leur poids vif. En condition de stress thermique, la consommation d'eau a significativement augmenté ( $P < 0,0001$ ) pour atteindre 5% pour le maïs et 10 % du poids vif pour les 3 autres céréales. Elle est supérieure en conditions thermiques élevées de 71 ; 89 ; 125 et 129% respectivement pour le millet perlé ; maïs ; orge et pour le triticale.

D'après North *et al.* (1990), la consommation d'eau est 4 fois plus élevée entre 21 et 38°C. Pour le National Research Council (1994), la consommation d'eau augmente de 6,5 à 7% à chaque degré de température au-dessus de 21°C. Lors de notre essai, l'augmentation de la consommation d'eau est de 7 ; 9 ; 12 et de 13 % /°C d'élévation de température au-dessus de 23°C, respectivement pour le millet perlé, le maïs, l'orge et le triticale.

Selon Croisieret *al.* (2012), l'eau corporelle perdue doit être compensée par un abreuvement suffisant afin que l'ensemble des activités physiologiques de l'oiseau puissent se poursuivre et assurer le contrôle de la température interne de l'organisme via l'évaporation

par polypnée. En effet, d'après Belay et Teeter(1993), l'évacuation de chaleur par voie évaporatoire et le niveau de consommation d'eau sont étroitement corrélés ( $R>8\%$ ). Par ailleurs, Boillot *et al.* (1999) rapportent que la soif constitue la deuxième boucle de sécurité dans le contrôle de la balance hydrique. Si la déshydratation se poursuit après l'intervention rénale en réabsorbant l'eau, la soif devient perceptible. A cet effet, l'importante augmentation en consommation d'eau chez nos coqs à 33°C, reflète l'importance de l'impact de la température élevée sur le niveau de déshydratation de leur organisme.

L'analyse statistique des données relatives à la mesure de la digestibilité des protéines, de celle de la MG et de l'EM des céréales locales, indiquent que le facteur « aliment » est très hautement significatif ( $P<0,001$ ) tandis que le facteur « température élevée » est sans incidence. (Tableau 43).

Peu d'informations bibliographiques concernent l'utilisation des régimes alimentaires composés que d'une seule matière première. Les rares informations de ce type restent très controversées. Ainsi, concernant l'effet de la température ambiante sur certains indices. Zuprizal *et al.* (1992) et Bonnet *et al.* (1997) utilisant respectivement une matière première et un aliment standard à base de maïs et de TS, rapportent que la digestibilité de la matière sèche a tendance à diminuer sous l'effet de la chaleur, tandis que Garcia *et al.* (2004) rapportent à l'inverse, que le CUD MS des grains de maïs et du sorgho augmente.

Quant à la digestibilité des protéines, elle subit une baisse significative sous l'effet de la chaleur selon Walis et Balnave (1984), Dibner *et al.* (1992) et Zuprizal *et al.* (1992). L'importance de la réduction de la digestibilité varie selon la matière première utilisée, alors que Tesseraud et Temim (1999) rapportent que la valeur protéique d'une matière première diminue à chaud d'autant qu'elle est faible à une température neutre.

Ce qui soutiendrait l'hypothèse de l'effet de la nature des protéines sur la digestibilité de ce même nutriment. A l'opposé, Garcia (2004) signale une augmentation du CUD MAT du maïs sous l'effet de la chaleur, cette dernière étant sans effet sur la digestibilité des MAT du gros millet.

Yamazaki et Zhang (1982) et Bonnet *et al.* (1997) indiquent que la digestibilité de l'amidon diminue chez des poulets de chair exposés à une température élevée. Cependant, bien que nos résultats ne révèlent aucun effet de la température élevée sur la digestibilité de l'amidon, il est à noter que l'expression de cette digestibilité à 23°C est différente de celle révélée à 33°C. L'ingéré de CB ( $R= -44\%$  ;  $R^2= 19\%$  ;  $P<0,01$ ) et d'amidon ( $R= 34\%$  ;  $R^2= 12\%$  ;  $P<0,05$ ) sont partiellement impliqués dans cet écart.

Tableau 43 : Effet de la céréale et de la température élevée ambiante sur les différents paramètres mesurés.

		Maïs	Mil	Triticale	Orge	« P » Effet « Aliment »
Niveau d'ingestion (%)	23°C	54,89 <sup>aA</sup> ±7,22	68,15 <sup>aB</sup> ±12,21	48,07 <sup>aA</sup> ±8,69	51,09 <sup>aA</sup> ±7,02	TS
	33°C	46,34 <sup>bAB</sup> ±6,42	54,41 <sup>bB</sup> ±11,47	50,09 <sup>aAB</sup> ±7,13	41,86 <sup>bA</sup> ±8,06	TS
	« P » E intra-E T°	TS	S	NS	TS	
	« P » E inter- E T°	TS				
Eau bue (g/j)	23°C	51,47 <sup>aA</sup> ±10,71	112,20 <sup>aB</sup> ±22,29	90,33 <sup>aC</sup> ±16,67	79,27 <sup>aC</sup> ±10,88	HS
	33°C	97,30 <sup>b</sup> ±22,32	192 <sup>b</sup> ±47	206,87 <sup>b</sup> ±7,37	178 <sup>b</sup> ±33,37	
	« P » E intra-E T°	HS	TS	TS	TS	
	« P » E inter- E T°	HS				
EAU/MSI	22°C	0,62 <sup>a</sup> ±0,09	1,10 <sup>a</sup> ±0,18	2,98 <sup>a</sup> ±0,73	1,05 <sup>a</sup> ±0,20	HS
	33°C	1,40 <sup>b</sup> ±0,28	2,41 <sup>b</sup> ±0,72	1,21 <sup>b</sup> ±0,18	2,88 <sup>b</sup> ±0,60	HS
	« P » E intra-E T°	HS	TS	TS	TS	
	« P » E inter- E T°	HS				
CUDa MS (%)	23°C	83,71 <sup>aA</sup> ±1,35	80,76 <sup>aB</sup> ±3,05	74,43 <sup>aC</sup> ±3,28	71,48 <sup>aD</sup> ±1,31	
	33°C	83,61 <sup>aA</sup> ±1,41	79,99 <sup>aB</sup> ±3,05	74,82 <sup>aC</sup> ±0,65	73,43 <sup>aC</sup> ±3,31	
	« P » E intra-E T°	NS	NS	NS	NS	
	« P » E inter- E T°	NS				
CUDr MS (%)	23°C	84,64 <sup>aA</sup> ±1,31	82,64 <sup>aB</sup> ±1,49	75,52 <sup>aC</sup> ±3,18	72,71 <sup>aD</sup> ±1,59	HS
	33°C	84,65 <sup>aA</sup> ±1,37	81,77 <sup>aB</sup> ±1,48	75,74 <sup>aC</sup> ±0,71	74,62 <sup>aD</sup> ±3,36	HS
	« P » E intra-E T°	NS	NS	NS	NS	
	« P » E inter- E T°	NS				
CUD Amidon	23°C	99,41 <sup>aA</sup> ±1,07	99,48 <sup>aA</sup> ±0,35	99,73 <sup>aA</sup> ±0,24	99,69 <sup>aA</sup> ±0,16	NS
	33°C	99,80 <sup>aA</sup> ± 0,14	99,72 <sup>aA</sup> ± 0,14	99,78 <sup>aA</sup> ± 0,21	99,41 <sup>aB</sup> ± 0,39	TS

	« P » E intra-E T°	NS	NS	NS	NS	
	« P » E inter-E T°	NS				
CUD MG	23°C	84,02 <sup>aA</sup> ±4,24	73,25 <sup>aB</sup> ±9,16	27,76 <sup>aC</sup> ±0,91	37,75 <sup>aD</sup> ±6,69	HS
	33°C	80,10 <sup>bA</sup> ±3,19	80,73 <sup>bA</sup> ± 4,52	20,89 <sup>aB</sup> ±7,20	38,51 <sup>aC</sup> ± 3,78	HS
	« P » E intra-E T°	S	S	NS	NS	
	« P » E inter-E T°	NS				
CUDa protéines	23°C	86,20 <sup>aA</sup> ±1,47	87,46 <sup>aA</sup> ±2,23	83,91 <sup>aB</sup> ±2,46	70,45 <sup>aC</sup> ±1,49	TS
	33°C	86,43 <sup>aA</sup> ±1,04	89,15 <sup>aB</sup> ±1,34	83,18 <sup>aC</sup> ±0,68	67,09 <sup>bD</sup> ±4,45	HS
	« P » E intra-E T°	NS	NS	NS	S	
	« P E inter-E de la « T° »	NS				
CUDr protéines	23°C	87,42 <sup>aA</sup> ±1,39	88,12 <sup>aA</sup> ±2,20	84,70 <sup>aB</sup> ±2,38	72,04 <sup>aC</sup> ±1,90	TS
	33°C	87,51 <sup>aA</sup> ±0,92	89,81 <sup>aB</sup> ±1,39	83,94 <sup>aC</sup> ±0,62	68,49 <sup>bD</sup> ±4,48	HS
	« P » E intra-E T°	0,876541	0,054800	0,338857	0,032893	
	« P » E inter-E T°	NS				
EMa (kcal/kg)	23°C	3744 <sup>aA</sup> ±70,66	3789 <sup>aA</sup> ±123	3316 <sup>aB</sup> ±131	3091 <sup>aC</sup> ±55	HS
	33°C	3744 <sup>aA</sup> ±56	3834 <sup>aB</sup> ±64	3324 <sup>aC</sup> ±31	3151 <sup>aD</sup> ±144	HS
	« P » E intra-E T°	NS	NS	NS	NS	
	« P » E inter-E T°	NS				
EMr (kcal/kg)	23°C	3775 <sup>aA</sup> ±70	3813 <sup>aA</sup> ±123	3351 <sup>aB</sup> ±127	3135 <sup>aC</sup> ±65	HS
	33°C	3779 <sup>aA</sup> ±54	3862 <sup>aB</sup> ±65	3354 <sup>aC</sup> ±32	3191 <sup>aD</sup> ±146	HS
	« P » E intra-E T°	NS	NS	NS	NS	
	« P » E inter-E T°	NS				
✓ Sur la même ligne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre majuscule sont statistiquement différentes (P<0.05) ✓ Sur la même colonne, les valeurs qui diffèrent entre elles par au moins une lettre minuscule sont statistiquement différentes (P<0.05)						

Par ailleurs, l'analyse des résultats de digestibilité des graines étudiées indique qu'en conditions chaudes, la différence de la digestibilité de l'amidon est hautement significative ( $P < 0,01$ ). Le CUD de l'amidon de l'orge se distingue de celui des autres céréales testées par une valeur significativement faible.

Garcia *et al.* (2004) ne rapportent aucun effet significatif de la chaleur sur la digestibilité de la MG du maïs et du gros millet, alors que Bonnet *et al.* (1997) rapportent que la digestibilité de la MG diminue en conditions chaudes.

El Husseiny et Creger (1980) ; Geraert *et al.* (1992) ne rapportent aucun effet de la température ambiante élevée sur l'EM de l'aliment, alors que Bonnet *et al.* (1997) relèvent la diminution de la digestibilité des composants de l'aliment ainsi que celle de l'utilisation de son potentiel énergétique.

Cette divergence de résultats pourrait s'expliquer par la différence du modèle animal. La différence de sexe et de l'état physiologique, donc des besoins en différents nutriments qui seraient exprimés différemment sous l'effet de la chaleur.

Par ailleurs, l'effet principal de l'aliment à 23°C ne s'aligne pas à celui révélé à 33°C. En effet, l'analyse statistique ne révèle pas d'effet inter-espèces de la température élevée sur la valeur nutritionnelle des grains de céréales testées chez le coq, alors que l'effet intra-espèces se révèle hautement significatif ( $P < 0,001$ ). Cette différence laisse supposer qu'il y aurait une interaction entre les effets principaux de chacun des deux facteurs température et aliment sur l'utilisation digestive des grains de céréales. L'étude préliminaire révèle un effet d'interaction hautement significatif ( $P < 0,01$ ) entre les effets principaux des 2 facteurs qui reste à vérifier par la mise en place d'un dispositif expérimental approprié.

L'effet du type de céréale et de la température sur l'ingestion et leur potentiel nutritionnel seraient liés à la différence de leur profil chimique. En outre, l'utilisation différente du même nutriment de différentes céréales utilisées serait liée à leur composition chimique. Autrement dit celle en rapport avec la teneur et la nature biochimique de leurs constituants ainsi qu'à la présence de facteurs antinutritionnels, telle que la cellulose brute et/ou l'éventuelle présence des principes antinutritionnels caractérisant ces céréales (B-glucanes de l'orge, les arabinoxylanes du triticale et les tannins ou saponines du le millet) qui aurait affecté la digestibilité des éléments nutritifs contenus dans un ingrédient et par conséquent, sa valeur nutritive.

Par ailleurs, l'effet interactif de la teneur d'un nutriment et de sa nature biochimique sur l'utilisation digestive d'un autre nutriment est à considérer, tel est souligné par Kussaibati *et al.* (1983) quant à la teneur et la nature de la MG sur la digestibilité des protéines. Nos résultats révèlent que la digestibilité des protéines est liée à la teneur en MG ( $R=64\%$  ;  $P<0,0001$ ) ainsi qu'à son utilisation digestive ( $R=58\%$  ;  $P<0,0001$ ). L'EM est aussi étroitement liée à la digestibilité des protéines ( $R=88\%$  ;  $P<0,0001$ ) ainsi qu'à celle de la MG ( $R=87\%$   $P<0,0001$ )

L'interférence de l'effet de la teneur et la nature des différents principes nutritifs ajouté à celui des nutriments entre eux sur l'utilisation physiologique font la complexité de l'utilisation digestive de chaque nutriment par la volaille.

97% des variations de l'EM des différentes céréales testées sont expliquées par 3 facteurs : la digestibilité apparente des protéines, ce qui concorde aux conclusions de Métayer *et al.* (2015) et Danel *et al.* (2015), la digestibilité de la MG et le niveau d'ingestion de la MG et celle de la cellulose brute. Quant à la digestibilité de l'amidon elle n'apporte aucune explication aux variations des valeurs de l'EM, alors que Métayer *et al.* (2015) signalent que le CUD de l'amidon constitue la deuxième variable explicative du potentiel EM.

Ainsi, la régression simple révèle que l'utilisation de l'énergie des grains de céréales testées dépend de la digestibilité des protéines ( $R = 88\%$ ;  $R^2= 77\%$  ;  $P<0,0001$ ) et de celle de la matière grasse ( $R = 87\%$ ;  $R^2= 76\%$  ;  $P<0,0001$ ) de façon similaire. La deuxième variable explicative est la teneur en cellulose ingérée, celle-ci est négativement corrélée à l'EM mesurée ( $R = -57\%$ ;  $R^2= 33\%$  ;  $P<0,001$ ).

Quant au niveau de la digestibilité des protéines, la régression multiple en révèle 3 variables explicatives : la teneur en CB, la quantité de la matière grasse ingérée et la digestibilité de la MG.

La forte corrélation établie de la composition chimique et de l'utilisation de chaque principe nutritionnel avec la valeur nutritionnelle, en termes d'EM, a permis l'établissement de plusieurs équations de prédiction de l'EM (Tableau 44).

Tableau 44 : Prédiction de l'EM chez le coq (cas de céréales, température ambiante de 23°C)

Variables dépendantes	Equations	Coefficient de corrélation (R)	Coefficient de détermination (R <sup>2</sup> )
EMa (kcal/kg MS)	$2880,1 + 176,77 \times \text{MG} (\%)$	91	82%
	$4045,7 - 127,5 \times \text{CB} (\% \text{MS})$	-78%	60%
	$340,351 + 38,343 \times \text{CUDaN}$	88	77%
	$2878,858 + 10,877 \times \text{CUDMG}$	88	77%
	$3920,076 - 121,448 \times \text{CBI}$	-0,57	33%

# **CONCLUSION**

Notre étude a visé la caractérisation du profil chimique et nutritionnel du millet, du triticale et de l'orge cultivés en Algérie et celle du maïs grain, classiquement utilisé dans le modèle intensif d'alimentation du poulet de chair. L'effet de la chaleur sur la digestibilité des protéines, de l'amidon, de la matière grasse et l'énergie métabolisable des 4 de céréales grains a été étudié chez le coq.

La culture du millet, du triticale et de l'orge est traditionnelle en Algérie, de plus, selon la bibliographie leurs grains présentent un intérêt en alimentation avicole.

L'ensemble des résultats des mesures effectuées sur les 3 céréales locales est comparé à ceux obtenus pour le maïs grain.

### **Sur le plan chimique,**

La teneur en amidon des grains de maïs, millet, triticale et d'orge testés est respectivement de 70,08 ; 64,63 ; 62,44 et 57,18%MS, celle des protéines est de 8,33 ; 15,13 ; 14,46 et 10,01% MS. La concentration respective en CB des grains est de 3,21 ; 3,97 ; 3,54 et 7,65%MS, tandis que celle de la MG est de l'ordre de 4,73 ; 5,23 ; 1,77 et 1,95%MS. Le potentiel énergétique brut des grains de maïs, millet, triticale et d'orge s'établit respectivement à 4394 ; 4551 ; 4348 et 4287kcal/kg MS.

Comparé au maïs, le millet se distingue par un profil chimique intéressant se caractérisant par des teneurs relativement élevées en protéines, en matière grasse et en énergie brute.

Les grains de triticale présentent quant à eux, une teneur en protéines supérieure à celle du maïs et une concentration en amidon non négligeable les dotant ainsi d'un potentiel en EB comparable à celui du maïs.

Il apparaît par ailleurs que la teneur protéique des céréales grains étudiées s'éloigne de celle des valeurs des tables de composition chimique. Leur valeur relativement élevée serait liée à l'importance de l'amendement azoté apporté.

### **Sur le plan nutritionnel,**

Les mesures de digestibilité de l'amidon réalisées sur les 4 céréales font apparaître des valeurs moyennes de l'ordre de 99%. Si ce résultat est classique pour le maïs, il est en revanche discutable pour les 3 autres céréales, ces dernières renfermant selon la bibliographie des teneurs en facteurs antinutritionnels non négligeables, connus comme facteurs dépréciateur de la digestibilité des nutriments, dont l'amidon.

L'absence d'écart entre la digestibilité de l'amidon du maïs et celle des 3 autres types de céréales pourrait s'expliquer par :

- Un effet moins sévère des facteurs antinutritionnels du millet, du triticale et de l'orge de provenance locale, sur l'inhibition digestive de l'amidon que celui rapporté par la littérature spécialisée.
- Le modèle animal utilisé pour les bilans digestifs représenté par le coq fermier, connu pour être moins sensible aux effets dépréciateurs des facteurs antinutritionnels. Il abriterait une microflore digestive ayant des mécanismes pour limiter l'action inhibitrice des facteurs antinutritionnels sur l'utilisation digestive de l'amidon.
- Une structure de l'amidon des 3 grains de céréales locales qui l'apprêterait à une digestion enzymatique ou microbienne facilitée.

Les mesures de digestibilité des protéines font ressortir que celle du millet (87,46%) est de même grandeur que celle du maïs (86,20%). A l'opposé, les protéines de l'orge sont les moins digestibles (CUD de 70,45%).

La bonne digestibilité protéique du millet local supposerait :

- une moindre concentration en facteurs antinutritionnels de type anti protéase, d'autant plus que le coq est connu pour sa moindre sensibilité à ces substances, comparé au poulet ;
- et/ou une nature ou structure protéique favorable à une protéolyse poussée, comparativement à celle des grains de triticale et de l'orge.

Conformément aux données bibliographiques, nous avons vérifié que le niveau d'ingestion de la CB explique en partie la diminution de la digestibilité apparente et réelle des protéines :  $CUD_{a\ N} (\%) = 96,005 - 3,906CBI$  ( $R = - 80\%$  ;  $R^2 = 65\%$ ) et  $CUD_{r\ N} (\%) = 96,579 - 3,768 CBI$  ( $R = - 81\%$  ;  $R^2 = 65\%$ ).

La digestibilité de la MG diffère considérablement entre les 4 céréales testées. Le maïs se distingue par une meilleure digestibilité (84%), suivie par celle du millet (73%). Celle du triticale, avec seulement 27,76%, se classe en dernier après celle de l'orge (37,75%). La structure de la MG des 4 céréales (longueur des chaînes, degré de saturation et présence d'acides gras libres) pourrait expliquer les écarts observés entre la digestibilité de leur concentration lipidique.

L'interaction de l'effet des facteurs antinutritionnels et celui de la microflore du coq sur la digestibilité des MG pourrait être partiellement à l'origine des résultats observés. Nous avons également établi que le niveau d'ingestion des MG module leur degré d'utilisation digestive :

$$CUD_{MG} (\%) = 21,947 + 11,238MG_I \quad (R=81\% ; R^2=66\% ; P<0,001).$$

## Conclusion

---

Sur le plan énergétique, il apparaît que le millet se positionne en termes d'EMa au même niveau que le maïs (3789 vs 3744 kcal/kgMS). Le triticale et l'orge présentent des valeurs énergétiques nettement plus faibles : 3316 et 3091 kcal/kgMS. Contrairement aux données bibliographiques (Larbier et Leclercq, 1992 ; FAO 1995), le millet utilisé dans nos essais a un potentiel énergétique non négligeable qui mérite d'être exploité.

Le traitement statistique des valeurs EMa calculées montrent que ces dernières sont largement modulées par leur teneur en :

- MG (EMa (kcal/kg MS) = 2880, 1 + 176, 77 MG %MS; R=90%; R<sup>2</sup>=81%;
- CB (EMa (kcal/kg MS) = 4045, 7 - 127, 5 CB % MS; R= -78%; R<sup>2</sup>=60%).

Par ailleurs l'analyse factorielle des résultats de valeurs EMa a révélé que la digestibilité des protéines et celle des matières grasses des céréales étudiées sont corrélées positivement avec leur valeur EMa (a et b) tandis que le niveau d'ingestion de la cellulose brute y est corrélé négativement (c).

$$(a) \text{ EMa (kcal/kg)} = 340,351 + 38,343 \text{ CUD}_{aN}; R=88\%; R^2=77\%;$$

$$(b) \text{ EMa (kcal/kg)} = 2878,858 + 10,877 \text{ CUD}_{MG}; R=88\%; R^2=77\%;$$

$$(c) \text{ EMa (kcal/kg)} = 3920,076 - 121,448 \text{ CB}_I; R=-0,57; R^2=33\%.$$

Cet ensemble de critères nutritionnels (digestibilité et EM), des grains de maïs, de millet, de triticale et d'orge, mesurés chez les coqs de population locale ne sont pas modifiés lorsque les oiseaux sont soumis à une température ambiante élevée (33°C) durant 10 jours.

Cette observation nous amène à supposer que dans nos conditions expérimentales, la chaleur n'affecte pas la physiologie digestive des coqs fermiers utilisés, contrairement à ce qui est rapporté par la majorité des données bibliographiques. En revanche, la température élevée agit sur leur comportement en réduisant leur ingéré alimentaire et en augmentant leur consommation hydrique. Il apparaît alors, que les coqs utilisés dans nos essais s'adaptent correctement à l'élévation de la température ambiante.

A la lumière des résultats de l'étude de la composition chimique et de la valeur nutritionnelle des céréales étudiées, les grains de millet et de triticale, cultivés en Algérie, présentent un meilleur profil chimique et nutritionnel comparé à ceux du maïs et à ceux indiqués par les tables étrangères de composition de matières premières. Le facteur limitant du potentiel nutritionnel du triticale serait sa composition en fibres et/ou une éventuelle présence de substances anti nutritionnelles.

Le secteur des productions avicoles se caractérise en Algérie par la dominance d'une production standard majoritairement représentée par le poulet de chair et la poule pondeuse en première position et par la dinde en deuxième position. L'exploitation du poulet de type fermier n'a pas fait l'objet d'une politique de développement spécifique donnant ainsi lieu à une érosion génétique de ce modèle animal. Compte tenu des premiers résultats de cette étude qui traduisent la rusticité du coq fermier à travers sa capacité à exploiter les céréales locales et à s'adapter à des conditions de chaleur élevée, il s'avère intéressant de développer ce type d'élevage, tant pour préserver la biodiversité animale que pour développer l'économie rurale et assurer un approvisionnement durable en protéines animales.

### **Sur le plan expérimental,**

L'action hypothétique des facteurs antinutritionnels des 3 céréales locales sur l'expression de la majorité des réponses de l'animal lors des bilans digestifs, nous amène à recommander leur identification et quantification afin de préciser leur effet sur la digestibilité des nutriments et leur utilisation énergétique.

Afin de préciser l'utilisation du millet, du triticale et de l'orge par *Gallus-gallus* de population locale, il est opportun de mener les mesures avec des animaux génotypiquement identifiés et soumis à des températures élevées similaires à celles rencontrées sur le terrain (durée et amplitude).

Si nous considérons que le modèle animal utilisé expliquerait la divergence des résultats obtenus de ceux rapportés par d'autres chercheurs concernant l'effet des conditions d'ambiance thermique sur la valorisation de l'aliment, il apparaît alors que l'intégration de cette variable (température) ainsi que les caractéristiques propres à la volaille (type, âge, souche) aux modèles théoriques de calcul de l'EM ou de la valeur protéique des grains de céréales s'impose pour une meilleure précision des valeurs.

Les résultats obtenus lors de nos essais montrent une fois de plus que les données publiées par les tables étrangères de composition chimique et de valeur nutritionnelle des grains de céréales sont à prendre avec réserve, car elles ne considèrent pas le contexte environnemental dans lequel les mesures sont effectuées (conditions de culture et ou de production des matières premières, matériel biologique avicole et conditions d'élevage).

Dans le même esprit, les modèles de prédiction de la valeur nutritionnelle des MP (digestibilité et EM) sont à appliquer avec prudence car ils ne signalent pas systématiquement les caractéristiques du modèle d'oiseau utilisé (âge précis, souche, température et humidité ambiantes).

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- AARDES, 1967. Enquête sur le thème « Consommation et budgets des ménages ». AARDES (Association Algérienne pour la Recherche Démographique, Economique et Sociale).
- Abd-Elrazig, S. M., Elfadil AEIzubeir, E. 1998. Effects of feeding pearl millet on laying hen performance and egg quality. *J.A.F.S.T.76* : 89-94
- Abdelsamie, R.E., Ranaweera, N.P., Nano, W.E.1983. The influence of fiber content and physical texture on the performance of broiler in tropics. *Br. poult. Sci.* 24: 383-390.
- Abudabos, A. 2010. Enzyme supplementation of corn-soybean meal diets improves performance in broiler chicken *Int. J. Poult. Sci.* 9: 292-297.
- Abu-Dieyeh, Z.H.M. 2006. Effect of chronic heat stress and long-term feed restriction on broiler performance. *Int. J. Poult. Sci* 5 (2): 185-190.  
<https://pdfs.semanticscholar.org/055b/12ff5f9b8b6424532e69f10f1055f4a58796.pdf>
- Abu-Dieyeh, Z.H.M. 2006. Effect of high temperature perse on growth performance of broilers.*Int J Polut Sci*, 5: 19-21.
- Adams, C. A. 2001. Interactions of feed enzymes and antibiotic growth promoters on broiler performance. *Cahiers Options Méditerranéennes.* 54: 71-74.  
<http://ressources.ciheam.org/om/pdf/c54/01600013.pdf>
- Adeola, O., Orban, J. I. 1995. Chemical composition and nutrient digestibility of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) fed to growing pigs. *J. Cereal Sci.* 22:177-184.
- Adil, S., Magray, S. N. 2012. Impact and manipulation of gut microflora in poultry: A review. *Journal of Animal and Veterinary Advances.* 11: 873-877.
- Adlercreutz, H., Mazur W. 1997. Phyto-oestrogens and western diseases. *Annals of Medicine.*, 29: 95-120.
- AFNOR, 1985. Association Française de Normalisation, Aliments des animaux. Méthodes d'analyses françaises et communautaires. 2ème édition. Paris. France, 339pp.
- AFNOR, 1997. Aliments des animaux. Dosage de l'amidon – Méthode enzymatique. NF V 18- 121, 9 pp.
- Agnès, N., Marie-Pierre, L.M., Michel, M., Yves, N., Catherine J. 2009. Voies nutritionnelles d'économie de phosphore chez le poulet. Huitièmes Journées de la Recherche Avicole. St Malo. p102-109.
- Ain Baziz, H., Geraert, P. A., Padilha, J. C. F., Guillaumin, S. 1996. Chronic heat exposure enhances fat deposition and modifies muscle and fat partition in broiler carcass. *Poult. Sci.* 75(4):505-513.
- Akli, S. 2016. Economie des ressources en eau en Algérie : Quelle place pour la gestion de la demande et quel impact sur l'économie d'eau ? Application au Bassin côtier Algérois 02A. Thèse de doctorat, ENSA d'El Harrach (Alger).

- Alamargot, J. 1982. Appareil digestif et ses annexes, appareil respiratoire, appareil urinaire, nécropsie d'un oiseau, principales lésions des volailles. Manuel d'anatomie et d'autopsie aviaires, édit. Le point vétérinaire. 15-129.
- Alleman, F., Leclercq, B. 1997. Effect of dietary protein and environmental temperature on growth performance and water consumption of male broiler chickens. *British Poultry Science*. 38 (5):607-610.
- Almirall, M., Francesch, A., Perez-vendrell, A.M., Brufau, J., Esteve-Garcia, E. 1995. The differences in intestinal viscosity produced by barley and  $\beta$ -glucanase alter digesta enzyme-activities and ileal nutrient digestibilities more in broiler chicks than in cocks. *J. Nutr.* 125:947-955.
- Altan, O., Pabuccuoglu, A., Altan, A., Konyalioglu, S., Bayra, k. 2003. Effect of heat stress on oxidative stress, lipid peroxidation and some stress parameters in broilers. *Br. Poult. Sci.*, 44: 545-550.
- Amand, G., Aubert, C., Bourdette, C., Bouvarel, I., Chevalier, D., Dusantier, A., Franck, Y., Guillou, M., Hassouna, M., Le Biavan, R., Mahé, F., Prigent, J.P., Robin, P., 2004. La prévention du coup de chaleur en aviculture. *Sci. Tech. Avic. Hors-série, Mai 2004*, 64p.
- Andersson, A.A.M., Dimberg, L., Aman, P., Landberg, R. 2014. Recent findings on certain bioactive components in whole grain wheat. *Journal of Cereal Science* 59, 294-311.
- Anselme, B.1987. L'alimentation composée pour volaille au Sénégal : Situation actuelle, contribution à son amélioration par une meilleure valorisation des ressources nutritionnelles locales. Thèse: Med.Vet, Toulouse, n° 87, 103p
- Antoine, C., Lullien-Pellerin, V., Abecassis, J., Rouau, X., 2002. Nutritional interest of the wheat seed aleurone layer. *Sciences Des Aliments* 22, 545-556.
- Apajalahti, k., Vienola, J. 2016. Interaction between chicken intestinal microbiota and protein digestion. *Animal Feed Science and Technology* 221: 323–330. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840116301791#!>
- ApajalahtiK,J.,Vienola, K. 2016. Interaction between chicken intestinal microbiota and protein digestion. *Animal Feed Science and Technology*. 221: 323-330. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840116301791>
- Appleby, M.C., Mench, J.A., Hughes, B.O. 2004. *Industry. Poultry Behaviour and Welfare*, CAB International, Wallingford, UK, 176-193.
- Arbouche, HS., Arbouche, Y., Arbouche, F., Arbouche, R. 2008. Valeur nutritive de quelques variétés d'orge algériennes pour l'alimentation des ruminants. *Rev. INRAA*, 22 : 67-72
- Atkinson, F.S., Foster- Powell, K., Brand- Miller, J.C. 2008. International Tables of Glycemic Index and Glycemic Load Values. *Diabetes Care*. 31: 2281- 3000.

- Attia, Y., Hassan, R., Qota, E. 2009. Recovery from adverse effects of heat stress on slow growing chicks in the tropics/ Effect of ascorbic acid and different levels of betaine. *Tropical animal health and production*, 41 (5), 807-818.
- Baik, B.k., Ulrich, S.E. 2008. Barley for food: characteristics, improvement and renewed interest. *Journal of cereal science* 48: 233-242
- Balamane, A., Boudina, H., 2011. Impact technico-économique d'une substitution partielle du maïs par l'orge avec supplémentation enzymatique dans l'alimentation du poulet de chair. ONAB/ITELV.
- Baldwin, P. M. 2001. Starch granule-associated proteins and polypeptides: a review. *Starch*, 53(10): 475-503. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200110\)53:10<475::AID-STAR475>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200110)53:10<475::AID-STAR475>3.0.CO;2-E)
- Balnave, D., Brake, J. 2005. Nutrition and management of heat-stressed pullets and laying hens. *World's Poult. Sci. J.* 61(3):399–406
- Baltensperger, D. 2002. Progress with proso, pearl and other millets. Ed. ASHS Press, Alexandria, VA: p100–103
- Bamouh, H.1999.Technique de production de la culture de pomme de terre, bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA, N° 58 :1-15.
- Barneveld, R. J., Cooper, K. V. 2002. Nutritional quality of triticale for pigs and poultry. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Triticale Symposium, Poland.* 1: 277–282.
- Barrowman, J. A. 1978. Transport of absorbed lipids. *In: Physiology of the Gastrointestinal Lymphatic System*: 165-228. Cambridge University Press, New York.
- Batal, A.B., Parsons, C.M. 2002. Effects of age on development of digestive organs and performance of chicks fed a corn-soybean meal versus a crystalline amino acid diet. *Poult. Sci.* 81: 1338-1341.
- Baurhoo, N. 2011. Canadian pearl millet: a potential alternative grain to corn in broiler production. Master of Animal Science. pp109. Department of Animal Science. McGill University, Montreal, Canada.[http://digitool.library.mcgill.ca/webclient/StreamGate?folder\\_id=0&dvs=1545400106659~342](http://digitool.library.mcgill.ca/webclient/StreamGate?folder_id=0&dvs=1545400106659~342)
- Baurhoo, N., Baurhoo, B., Mustafa, A.F., Zhao, X. 2011. Comparison of corn-based and Canadian pearl millet-based diets on performance, digestibility, villus morphology, and digestive microbial populations in broiler chickens. *Poult. Sci.* 90: 579–586.
- Bedford, M.R., Partridge, G.G. 2010. *Enzymes in Farm Animal Nutrition*. 2nd edition, Cab International. Oxfordshire. UK. pp. 1-313
- Beha, S. 1992. Essai d'intégration de l'orge dans l'alimentation du poulet de chair (phases croissance, finition). Mémoire d'Ingénieur Agronome. INA. Alger, p103.
- Bekoye, B.M. 2011. Caractérisation chimique et minérale des grains de mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] de Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5(5): 2039-2044. <http://ajol.info/index.php/ijbcs>
- Belaid, D. 2016. La culture du maïs en Algérie. Recueil d'articles *in* Collection dossiers agronomiques.

- Belay, T., and R. G. Teeter. 1993. Broiler water balance and thermobalance during thermoneutral and high ambient temperature exposure. *Poult. Sci.* 72:116–124
- Benabdeldjelil, K. 1999. Valorisation des orges en Aviculture / bulletin de liaison et d'information du PNTTA. N° 55.
- Berg, L. R. 1961. Effect of adding enzymes to barley diets at different ages on laying house performance. *Poult. Sci.* 40:34–39.
- Bewa H., Charlet-Lery G., Szylit o. 1979. Rôle de la microflore digestive et de la structure cristalline de l'amidon dans la digestion et l'utilisation des régimes chez le poulet. Etude des tubercules tropicaux. *Ann. Nutr. Alim* 33, 213-231.
- Beyer S., 2014. Utilisation du sorgho grain dans l'alimentation des volailles : stratégies de formulation, conditions de fabrication et valeur nutritionnelle pour poulets de chair, poules pondeuses et dindons.
- Bezançon, G., Renno, J.F, Kumar, K.A. 1997. Le mil .In: Charrier A, Jacquot M, Hamon S, Nicolas D. Eds. L'amélioration des plantes tropicales. Paris CIRAD-ORSTOM: 457-482.
- Biggs, P., Parsons, C.M. 2009. The effects of whole grains on nutrient digestibilities, growth performance and cecal short-chain fatty acid concentrations in young chicks fed ground corn-soybean meal diets. *Poult. Sci.* 88: 1893–1905. <http://ps.fass.org/content/88/9/1893.short>
- Birkett, S., Lange, K. D. 2001. Limitations of conventional models and a conceptual framework for a nutrient flow representation of energy utilization by animals. *Brit. Journal of Nutrition.* 86 (06) : 647-659.
- Black, J.L., 2001. Variation in nutritional value of cereal grains across livestock species. *Proc. Aust. Poult. Sci. Symp.*, 13: 22-29.
- Blair, R. 2008. Nutrition and feeding of organic poultry. Faculty of land and food systems. British University of Colombia. Vancouver, Br. Columbia. Canada. *Br. Poult. Sci.* (51)2, p 309.
- Blesbois, E. 2010. Quelles recherches pour l'aviculture en France. *INRA. Prod. Anim.* 5 : 427-432.
- Blum, J.C., Piton, P., Gauthier, A. 1980. Étude préliminaire sur les constituants responsables de la mauvaise utilisation de l'orge chez le jeune poulet. *Reprod. Nutr. Dev.* 20 : 1717-1722
- Blum, J.C. 1989. L'alimentation des animaux monogastriques : porc, lapin, volailles. 2<sup>ème</sup> édition, INRA, Paris. 282 p.
- Boillot, A., Caps, T., Blasco, G., Grelier, R. 1999. Hyperosmolarité. *Conférences d'actualisation.* (éd) Elsevier, Paris et SFAR: 539-554.
- Boldaji, F., Roush, W. B., Nakaue, H. S., Arscott, G. H. 1981. True metabolizable energy values of corn and different varieties of wheat and barley using normal and dwarf SCWL roosters. *Poult. Sci.* 60:225-227.
- Bolton, W. 1965. Digestion in the crop of the fowl. *Br. Poult. Sci.* 6:97–102

- Boncompagni, E., Orozco-Arroyo, G., Cominelli, E., Gangashet, P.I., Grando, S., KwakuZu, T.T. 2018. Antinutritional factors in pearl millet grains: Phytate and goitrogens content variability and molecular characterization of genes involved in their pathways. 13(6): <https://doi.org/10.1371/journal>.
- Bonnet, S., Geraert, P.A., Lessire, M., Carré, B., Guillaumin, S. 1997. Effect of high ambient temperature on feed digestibility in broilers. *Poult. Sci.* 76: 857-863.
- Borda-Molina, D., Seifert, J., Camarinha-Silva, A. 2018. Current Perspectives of the Chicken Gastrointestinal Tract and Its Microbiome
- Borges, S.A., Fischer DaSilva, A. V., Majorca, A., Hooge, D. M., Cummings, K.R. 2004. Physiological responses of broiler chickens to heat stress and dietary electrolyte balance (sodium plus potassium minus chloride, milliequivalents per kilogram). *Poult. Sci.* 83: 1551-1558. <http://ps.fass.org/cgi/reprint/83/9/1551>
- Borgstrom, B. 1967. Partition of lipids between emulsified oil and micellar phases of glycerides-bile salts dispersion. *J.Lipid Research*,9: 473-481.
- Boros, D. 2002. Physico-chemical quality indicators suitable in selection of triticale for high nutritive value. *Proceedings of the 5th International Triticale Symposium, Poland*. 1. P. 239-244.
- Boros, D., Slominski, B.A., Guenter, W., Campbell, L.D., Jones, O. 2004. Wheat by-products in poultry nutrition. Part II. Nutritive value of wheat screenings, bakery by-products and wheat mill run and their improved utilization by enzyme supplementation. *Can. J. Anim. Sci.* 84:429-435.
- Boudouma, D. 2008. Valorisation du son de blé en alimentation des volailles. Thèse de doctorat d'état. Institut National Agronomique. Alger. 163p.
- Boudouma, D., Iabassen, D., Kazi-aoual, S. 2013. Impact de la chaleur sur la digestibilité chez le poulet de chair, des protéines, de l'amidon et de la matière grasse du maïs. 10<sup>èmes</sup> Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras. La Rochelle. France
- Boudries-Kaci, N., 2017. Caractérisation des amidons de sorgho et de mil perlé cultivés dans le Sahara algérien. Thèse de doctorat (SAB), Université de Liège (Belgique) 208p. <http://hdl.handle.net/2268/210187>
- Bounaga N, Brac De La Perrière, R. A. 1988. Les ressources phytogénétiques du Sahara. *Annales de l'Inst. Nat. Agro. El-Harrach*, 12 : 79-94.
- Bourdillon, A., Carre, B., Conan, L., Francesch, M., Fuentes, M., Huyghebaert, G., Janssen, W.M.M.A., Leclercq, B., Lessire, M., McNab, J., Rigoni, M., Wiseman, J. 1990. European reference method of in vivo determination of metabolisable energy in poultry: reproductibility, effect of age, comparison with predicted values. *Brit. Poult. Sci.* 31: 567-576.
- Boyd, F.M., Edwards, H.M. 1967. Fat absorption by germ-free chicks. *Poult. Sci.* 46 : 1481- 1483.
- Bragg, D., Sharby, T. 1970. Nutritive Value of Triticale for Broiler Chick Diets. *Poultry Science*. 49: 1022-1027.

- Bray, G.A., York, D. A. 1979. Hypothalamic and genetic obesity in experimental animals: an autonomic and endocrine hypothesis. *Physiol. Rev.* 59, 719-809.
- Brenes, A., Guenter, W., Marquardt, R. R., Rotter, B. A. 1993. Effect of  $\beta$ -glucanase/pentosanase enzyme supplementation on the performance of chickens and laying hens fed wheat, barley, naked oats and rye diets. *Can. J. Anim. Sci.* 73:941-951.
- Britzman, D. 1994. Le tourteau de soja- une excellente source de protéines pour l'alimentation des volailles. American Soybean Association. Nutrient Requirements of Poultry. Neuvième édition révisée.
- Broekaert, Courtin W. F., C. M., Verbeke K., Van de wiele, T., Verstraete, W., Delcour, J.A. 2011. Prebiotic and other health-related effects of cereal-derived arabinoxylans, arabinoxylan-oligosaccharides and xylooligosaccharides. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 51:178-194.
- Brouk, M.J., Bean, B. 2011. Sorghum in dairy cattle production feeding guide. United Sorghum Check off Program. Lubbock, TX, USA.
- Brufau, J. 1990. Utilisation de l'orge dans l'alimentation des volailles en Espagne. Generalitat de Catalunya, IRTA, Tarragone (Espagne).option méditerranéenne, sér. A. n° 7. L'aviculture en méditerranée.
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., Ball, S. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. *International journal of biological macromolecules.* 23:85-112.
- Butcher, G.D., Miles, R. 2011. Heat stress management in broiler. <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/VM/VM01900.PDF>
- Butler, L.G., Rield, D.J., Lebryk, D.G., Blytt, H.J. 1984. Interaction of proteins with sorghum tannin: mechanism, specificity and significance. *J.M. Oil chem. Soc.* 61: 916-920.
- Butler, L.G., Rogler, J.C., Mehansho, H., Carlson, D.M. 1986. Dietary effects of tannins: in V. Cody S.E. Middleton. (Ed) Plant flavonoids in biology and medicine: biochemical, pharmacological and structure activity relationship. pp141- 157. New York. Wiley.
- Buyse, J., Michel, H., Vloeberghs, J., Saevels, P., Aerts, J.M., Ducro, B., Berckmans, D., Decuypere, E. 1998. Energy and protein metabolism between 3 and 6 weeks of age of male broiler chickens selected for growth rate or for improved food efficiency. *Brit. Poult. Sci.* 39: 264-272.
- Cahaner, A., Deeb, N., Settar, P. 1996. The association between broiler potential growth rate and sensitivity to heat stress. Factory-fifth Annual National Breeders roundtable proceedings St. Louis, Missouri, USA: 29-41.
- Cahaner, A., Leenstra, F. 1992. Effects of high temperature on growth and efficiency of male and female broilers from lines selected for high weight gain, favourable feed conversion and high or low fat content. *Poultry Science*, 71: 1237-1250.
- Cahaner, A., Pinchasov, Y., Nir zafrira Nitsan, I. 1995. Effect of dietary protein under high ambient temperature on body weight. Breast meat yield and abdominal fat deposition of broiler stocks differing in growth rate and fatness. *Poult. Sci.* 74: 968-975.

- Calet, C. 1976. Évaluation de divers traitements technologiques des céréales.V. Effet du nocomage et de l'expansion sur l'efficacité du blé et du maïs pour le poulet. *Ann. Zootech.* 25: 53-6.
- Calislar, S. 2018. Effet des tannins sur la nutrition de la volaille. *J. Agric Nat* 21(4):615-623,21(4): 615-623. <https://doi.org/10.18016/ksudobil.359982>.
- Calislar, Suleyman. 2017. Tannins and Their Effects on Poultry Nutrition.
- Camiruaga, M., Garcia, F., Elera, R., Simonetti, C. 2001. Productive Response of Broiler Chickens to the Addition of Exogenous Enzymes to Corn or Triticale Based Diets. 28 (1):1-59.
- Campbell, G.L., Classen, H.L., Salmon, R.E.1984. Enzyme supplementation of barley diets of broilers. *Feedstuffs.* 56 (20): 26-27.
- Carré, B. 2000. Effets de la taille des particules alimentaires sur les processus digestifs chez les oiseaux d'élevage. *INRA. Prod. Anim.* 13: 131-136.
- Carré, B. 2004. Causes for variation in digestibility of starch among feedstuffs. Paris Institut National de la Recherche Agronomique, *World's Poult Sci Journal*, Vol. 60
- Carré, B., Beaufils, E., Melcion, J.P. 1991. Evaluation of protein and starch digestibility and energy value of pelleted or unpelleted pea seed from winter or spring cultivars in adult and young chickens. *J. Agric. Food Chem.* 39: 468-472.
- Carré, B., Conan, L. 1989. Relationship between trypsin-inhibitor content of pea seeds and pea protein digestibility in poultry. In. J. Huisman, A.F.B. Van der Poel, Liener, I.E. (eds), *Proc. 1<sup>st</sup> International Workshop on Antinutritional Factors in Legume Seeds.* 103-106.
- Carré, B., Flores, M.P., Gomez, J. 1995. Effects of pelleting, lactose level, polyethylene glycol 4000, and guar gum compared to pectin on growth performances, energy values, and losses of lactose, lactic acid, and water in chickens. *Poult. Sci.* 74: 1810-1819.
- Carré, B., Gomez, J., Chagneau, A.M. 1995. Contribution of oligosaccharide and polysaccharide digestion, and excreta losses of lactic acid and short chain fatty acids, to dietary metabolisable energy values in broiler chickens and adult cockerels. *British Poultry Science* 36, 611-29.
- Carré, B., Idi, A., Maisonnier, S., Melcion J-P., Oury F-X, Gomez, J., Pluchard, P. 2002. Relationships between digestibilities of food components and characteristics of 138 wheats (*Triticum aestivum*) introduced as the only cereal source in a broiler chicken diet. *Brit. Poult. Sci.* 43: 404-415.
- Carré, B., Rozo, E. 1990. La prédiction de la valeur énergétique des matières premières destinées à l'aviculture. *INRA. Prod. Anim.* 3 : 163-169.
- Castello, JA. 1990. Optimisation de l'environnement de poulet de chair dans les conditions climatiques de l'Espagne. Option méditerranéenne. *Sér.A.n°7.*
- Champ, M., Szylił, O., Raibaud, P., Aïut-Abdelkader, N. 1983. Amylase production by three *Lactobacillus* strains isolated from chicken crop. *Journal of applied bacteriology*, 55, 487-493.

- Chapman B., Salmon D., Dyson C., Blacklery K. 2005. Triticale production and utilization manual spring and winter triticale for grain, forage and value-added. [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/fcd5464/\\$FILE/2005triticalemanual.pdf](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/fcd5464/$FILE/2005triticalemanual.pdf)
- Charalambous, K.V., Dagher, N.J. 1976. Factors affecting the metabolizable energy values of four different poultry feedstuffs, *Poult. Sci.*55 (5):1657-1662. <https://doi.org/10.3382/ps.0551657>
- Charles, D.R., Groom, C.M., Bray, T.S.1981.The effects of temperature on broilers: interactions Between temperature and feeding regimen. *Br. Poult. Sci.* 22: 475-481.
- Cheheb, N. 1981. Essai de substitution du tourteau de soja par la fève autoclavée et le tourteau de colza dans l'alimentation du poulet de chair. Mémoire d'ingénieur agronome, INA Alger 98p.
- Choct, M. 2006. Enzymes for the feed industry: past, present and future. *World's Poultry Science Journal.* (62): 5-15.
- Choct, M., Annison, G. 1992. Anti-nutritive effect of wheat pentosans in broiler chickens: Roles of viscosity and gut microflora. *Br. Poult. Sci.*33: 821– 834.
- Choct, M., Hughes, R.J., Bedford, M.R. 1999. Effects of a xylanase on individual bird variation, starch digestion throughout the intestine, and ileal and caecal volatile fatty acid production in chickens fed wheat. *Br. Poult. Sci.* 40: 419-422.
- Choct, M., R. Hughes, R. J. Wang, J. Bedford, M. R. Morgan., A. J. Annison. 1996. Increased small intestinal fermentation is partly responsible for the anti-nutritive activity of non-starch polysaccharides in chickens. *Br. Poult. Sci.* 37:609-621.
- Chwalibog, A., Lind, J., ThorbeK, G. 1978. Description of a respiration unit for quantitative measurements of gas exchange in small animals applied for indirect calorimetry. *J.Anim.P and Anim.Nut.* 41: 154-162.
- Cisse, R.S., Hamburg, J. D. Freeman, M. E. Davis, A. J. 2017. Using locally produced millet as a feed ingredient for poultry production in Sub-Saharan Africa. *The Journal of Applied Poultry Research*, 26: 9–22. <https://doi.org/10.3382/japr/pfw042>
- Classen, H., Apajalahti, J., Svihus, B., Choct, M. 2016. The role of the crop in poultry production. *World's Poultry Science Journal.* (72):459-472. <https://doi.org/10.1017/S004393391600026X>
- Classen, H.L., Bedford, M.R. 1991.The use of enzymes to improve the nutritive value of poultry feeds. In: *Recent Advances in Animal Nutrition, 1991* (Heresign, W. and Cole, D.J.A., Eds), Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 95-116
- Clement, I. M., I. D., Kwari, J., Igwebuiké, I., Nkama, I. D. Mohammed., B, Hamaker. 2010. Performance and economics of production of broiler chickens fed sorghum or millet as replacement for maize in the semi-arid zone of Nigeria. *Agri. and Biol. J. N. Amer.* (1): 321-325.
- Clench, M. H., Mathias, J. R. 1995. The avian cecum: A review. *Wilson Bull.* 107:93–121.
- CNIS, 2017 : Produits alimentaires : La facture des importations sur les 5 premiers mois de 2017.Statistiques et bilan douaniers
- CNIS, 2018. Produits alimentaires : La facture des importations sur les 5 premiers mois de 2018.Statistiques et bilan douaniers.

- Coates, B.J., Slinger, S.J., Summers, J.D., Bayley, H.S. 1977. Metabolism energy values and chemical and physical characteristics of wheat, and barley. *Can. J. Anim. Sci.* 57: 195-207.
- Coates, M. E. 1973. Gnotobiotic animals in nutrition research. *Proc.Nutr.Soc.* 32: 53-58.
- Coates, M. E. 1980. The Gut Microflora and Growth. Pages 175-227 in *Growth in Animals*. Lawrence, T. I. J., ed. Butterworths, Boston.
- Coates, M.E. 1980. The gut microflora and growth. In: *Growth in animals*. (Ed) T.L.J. Lawrence. Butterworths. London, UK: 175-188.
- Collins, V. P., A. H., Cantor, A. J., Pescatore, M. L., Straw., Ford, M. J. 1997. Pearl millet in layer diets enhances egg yolk n-3 fatty acids. *Poult. Sci.* 76:326-330.
- Colonna, P., Buléon, A. 1992. New insights on starch structure and properties. In: *Cereal chemistry and technology: a long past and a bright future*. In: *Proceedings of the 9th international cereal and bread congress*. Institut de Recherche Technologique Agroalimentaire des Céréales (IRTAC), Paris, France. pp 25-42.
- Conan, L., Barrier-Guillot, B., Widiez, J.L. 1992. Teneur en énergie métabolisable des céréales français pour les volailles. *Synthèse d'enquêtes annuelles*. INRA. *Prod. Anim.* (5) : 329-338.
- Cothenet, G., Bastianelli, D. 1999. Les matières premières disponibles pour l'alimentation des volailles en zone chaude. In *production de poulets de chair en climat chaud*. Paris : Edition ITAVI. pp60-70.
- Coutard, J.P, 2010. Valeur nutritive des associations céréales – protéagineux cultivées en agriculture biologique et utilisées pour la complémentation des ruminants. *Renc. Rech. Ruminants*, 2010, 17. Page 285-288.
- Cowieson, A. J. 2005. Factors that affect the nutritional value of maize for broilers. *Animal Feed Science and Technology*. 119: 293-305.
- Cowieson, A. J., Vieira, S. L., Stefanello, C. 2018. Exogenous Microbial Amylase in the Diets of Poultry: What do We Know? *J. Appl. Poult.Res.* 0:1-10. <http://dx.doi.org/10.3382/japr/pfy044>. <http://www.ufrgs.br/aviario/site/Artigos/Cowieson%20et%20al.%202018.pdf>
- Cozannet, P. ; Lessire, M. ; Métayer, J. P. ; Gady, C. ; Primot, Y. ; Geraert, P. A. ; Le Tutour, L. ; Skiba, F. ; Noblet, J., 2010. Nutritive value of wheat and maize distillers dried grains with solubles for poultry. *Inra Prod. Anim.* 23 (5): 405-414
- Cozannet, P., 2010. Valeur nutritionnelle des drêches de bioéthanol de blé pour les animaux monogastriques. Thèse, Agrocampus Ouest, 1er juillet 2010. 228p.
- Créview, I., Carré, B., Guéguen, J., Melcion, J.P., Chagneau, A.M. 1997b. 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.
- Créview-Gabriel, I. 1999. Digestion des protéines végétales chez les monogastriques. Exemple des protéines de pois. *INRA. Prod. Anim.* 12 (2) : 147-161
- Croisier, M., Croisier, Y. 2012. Alimentation animale : Besoin, aliments et mécanismes de la digestion des animaux d'élevage. (ed) Educagri: pp18-20.
- Da Silva, L.S., Taylor, J.R.N. 2005. Physical, mechanical, and barrier properties of kafirin films from red and white sorghum milling fractions. *Cereal Chemistry*. 82:9-14

- Daghir, N. J. 2009. Nutritional strategies to reduce heat stress in broilers and broiler breeders. *Lohmann information*. 44: 6-15.
- Daghir, N.J. 2008. *Poultry Production in Hot Climates*, 2<sup>nd</sup> Edition, Published by CAB International, Wallingford, Oxfordshire, uk. p387.
- Daghir, N.J. 2009. Nutritional strategies to reduce heat stress in broilers and broiler breeders. *Lohmann information*.44: 6-15.
- Dahlberg, J., Berenji, J., Sikora, V., Latkovic, D. 2011. Assessing sorghum (sorghum bicolor (L.) Moench germplasm for new traits: Food, fuel and unique uses. *Maydica*. 56 : 85-92.
- Dai, S.F., Gao, F., Xu, X.L., Zhang, W.H., Song, S.X., Zhou, G.H. 2012. Effects of dietary glutamine and gamma-aminobutyric acid on meat colour, pH, composition, and water-holding characteristic in broilers under cyclic heat stress. *Br. Poult. Sci.*, 53: 471–481.
- Dale, N. M., Fuller, H. L. 1980. Effect of diet composition on feed intake and growth of chicks under heat stress. II. Constant vs. cycling temperatures. *Poult. Sci.* 59:1434–1441.
- Danel, J., Métayer, J.P., Vilariño, M. 2015. Variabilité de la digestibilité de l'amidon d'aliments à base de blé chez les poulets de chair : Effet de l'âge et du comportement alimentaire. 11èmes Journ. Rech. Avicole. pp. 509-513
- Danicke, S., Simon, O., Jeroch, H., Bedford. M. 1997b. Interactions between dietary fat type and xylanase supplementation when rye-based diets are fed to broiler chickens. 2. Performance, nutrient digestibility and the fat-soluble vitamin status of livers. *Br. Poult. Sci.*, 38:5, 537-545.
- Daniel Borda-Molina Jana Seifert Amélia Camarinha-Silva. 2018. Current perspectives of the chicken gastrointestinal tract and its microbiome. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 16 : 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2018.03.002>
- Darcy, B., Laplace, J.P., Villiers, P.A. 1981. Digestion dans l'intestin grêle chez le porc. 4. Cinétique de passage des digesta au niveau de la jonction iléo-caeco-colique et bilans de la digestion selon la nature de l'amidon et la source de protéines alimentaires. *Ann. Zootech.* 30 : 31-62.
- Dargo, F. 2017. Breeding of Sorghum for High Lysine in the Seed. *International Journal of Agriculture Sciences*. 9(43): 4702-4707.
- Davis A.J., Dale, N.M., Ferreira, F.J. 2003. Pearl millet as an alternative feed ingredient in broiler diets. *Journal of Applied Poultry Research*. 12: 137-144.
- Davison, T., Misson, B., Freeman, B. 1980. Some effects of thyroidectomy on growth, heat production and the thermoregulatory ability of the immature fowl (*Gallus domesticus*). *Biol. Term. J.* 5 (4) : 197-202.
- Dawson, W.R. 1982. Evaporative losses of water by birds. *Comp. Biochem. Physiol.*71(4) : 495-509.
- De Basilio, V., Picard, M. 2002. La capacité de survie des poulets à un coup de chaleur est augmentée par une exposition précoce à une température élevée. *INRA. Prod. Anim.* 15 : 235–245.
- De Brum, P.A.R., Zannoto, D.L., Gvidoni, A.L., Rosa, P.S., De Lima, G.J.M.M., Viola E.S. 2000. Triticale in diets for broilers. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*. 35 (2): 229-239.

- De Vries, S. 2015. Fiber In Poultry Nutrition: Bonus Or Burden? 20th European Symposium on Poultry Nutrition
- De Vries, S., Pustjens, A. M., Kabel, M. A., Kwakkel, R. P., Gerrits, W. J. J. 2014. Effects of processing technologies and pectolytic enzymes on degradability of non-starch polysaccharides from rapeseed meal in broilers. *Poultry Science* 93: 589-598.
- De Vries, S., Pustjens, A. M., Schols, H. A., Hendriks, W. H., Gerrits, W. J. J. 2012. Improving digestive utilization of fiber-rich feedstuffs in pigs and poultry by processing and enzyme technologies: A review. *Animal Feed Science and Technology* 178: 123-138.
- Debb, N., Cahaner, A. 2002. Genotype-by-environment interaction with broiler genotypes differing in growth rate. Growth rate and water consumption of broiler from weight-selected versus nonselected parents under normal and high ambient temperatures. *Poult. Sci.* 81: 293-301.
- Dekic, V., Milovanovic, M., Staletic, M., Perisic, V. 2012. Triticale implementation in nonruminant animal's nutrition. Proceedings of IV International Symposium of Livestock Production. Macedonian Journal of Animal Science. 2(1) : 41-48
- Dekic, V., Mitrovic, S. Milovanovic, M. Djuric, N Kresovic, B., Tapanarova, A., Djermanovic, V., Mitrovic, M. 2011. Implementation of triticale in nutrition of non- ruminant animals. *African Journal of Biotechnology*. 10 (30). P. 5697–5704.
- Delcour, J.A., Hosoney, R.C. 2010. Principles of cereal science and technology, 3<sup>rd</sup> edn. AACC International, Inc, St. Paul, pp 40–85
- Denbow, D.M.2000. Gastrointestinal Anatomy and Physiology. In: Whittow, G.C. (Ed.), *Sturkie's Avian Physiology*, fifth ed. Academic Press, San Diego, pp299–325
- Dendy, D.A.V. 1995. Sorghum and Millets: Production and importance. In: Dendy, D.A.V., Ed., *Sorghum and Millets: Chemistry and Technology*, American Association of Cereal Chemists. 406 pp. USA, Minnesota, St. Paul, pp11-26.
- Deprem, T., Tasci, S.K., Bingol, S.A., Sari, E.K., Aslan, S., Ilhan, S. 2015. Histological and histochemical studies on the structure of pancreatic ducts of goose. *Turk J. Vet. Anim.Sci.* 39, 62–68.
- Deshpande S.S., Damodaran S.1989a. Structure-Digestibility relationship of legume 7S proteins. *J. Food Sci.*, 54, 108-113.
- Deshpande S.S., Damodaran S.1989b. Effect of phytates on solubility, activity and conformation of trypsin and chymotrypsin. *J. Food Sci.*, 54, 695-699.
- DeVerdal H., Mignon-Grasteau S., Jeulin C., LeBihan-Duval E., Leconte M, Mallet S., Martin C., A. Narcy A. 2010. Digestive tract measurements and histological adaptation in broiler lines divergently selected for digestive efficiency. *PoultSci.*89 (9):1955–61. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-813PMID:2070998>
- Devi, P.B., Vijayabharathi, R., Sathyabama, S., Malleshi, N.G., Priyadarisini, V.B. 2014. Health benefits of finger millet (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and dietary fiber. A review. *J. Food Sci. Technol.* (51)1021-1040. DOI: 10.1007/s13197-011-0584-9

- Devos, D., Dokudovskaya, S., Williams, R., Alber, F., Eswar, N., Chait, B.T., Rout, M.P., Sali, A. 2006. Simple fold composition and modular architecture of the nuclear pore complex. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 103:2172–2177.
- Dhital, S., Warren, F. J., Butterworth, P. J., Ellis, P. R. & Gidley, M. J. 2017. Mechanisms of starch digestion by  $\alpha$ -amylase—Structural basis for kinetic properties. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57, 875-892.
- Dibner, J. J., Atwell, C. A., Ivey, F. J. 1992. Effect of heat stress on 2-hydroxy-4- methylthio) butanoic acid and DL-methionine absorption measured in vitro. *Poult. Sci.*71:1900–1910.
- Dieng, A. 1998. Optimisation de la formulation des aliments pour volailles au Sénégal. Premières journées avicoles sénégalaises - Dakar.
- Diereck, N.A. 1989. Biotechnology aids to improve feed and feed digestion: Enzyme and fermentation. *Archives of Animal Nutrition, Berlin* 39, 241-261.
- Diop, A. 1982. Le poulet de chair au Sénégal production, commercialisation, perspectives de développement. Thèse Med. Vet. Dakar. 213p.
- Djabali, D., Boudries, N., Lemgharbi, M., Mokrane, H., Nadjemi, B., Belhaneche, N.2005. Les céréales locales du sorgho et mil. Séminaire International sur les productions végétales. Centenaire de l'INA : 193-196.
- Djekic, V., Pandurevic, T., Mitrovic, S., Radovic, V., Milivojevic, J., Jermanovic, V. 2012. Nutritional value of triticale (TRIJUMF) for broiler diets. Third International Scientific Symposium "Agrosym Jahorina 2012". 548-553.
- Djermoun, A., 2011. Effet de l'adhésion de l'Algérie à l'OMC et à la zone de libre échange Union Européenne/ Pays tiers Méditerranéens sur la filière lait. Thèse de doctorat, ENSA d'El Harrach (Alger).
- Doeschate, R. T., Scheele, C. W., Schreurs, V. V. A. M., Van Der klis, J.D. 1993. Digestibility studies in broiler chickens: Influence of genotype, age, sex and method of determination. *Brit. Poult. Sci.* 34 : 131-146. <https://doi.org/10.1080/00071669308417569>
- Dona, A. C., Pages, G., Gilbert, R. G., Kuchel, P. W. 2010. Digestion of starch: In vivo and in vitro kinetic models used to characterise oligosaccharide or glucose release. *Carbohydrate Polymers*, 80: 599-617.
- Donkoh, A. 1989. Ambient temperature: a factor affecting performance and physiological response of broiler chickens. *Int. J. of Biometeorology.* 33 (4) : 259-265.
- Dormont, D., André, F., Aumaitre, L., Bontoux, J. 2000. Rapport du groupe de travail « alimentation animale et sécurité sanitaire des aliments ». Agence Française de la Sécurité des Aliments.
- Drogoul, C., Raymond, G., Joseph, M.M., Jussiau, R. 2004 b. Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Volume 1 : les bases théoriques de l'alimentation et les principes de raisonnement de l'alimentation. Educagri Edition, 2ème édition, Paris. 287p.

- Drogoul, C., Raymond, G., Joseph, M.M., Jussiau, R., Mangeol, B., Montméas, L., Tarrit, A. 2004 a. Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Volume 2 : l'alimentation des monogastriques et des polygastriques. Educagri Edition, 2ème édition, paris. 308p.
- Dronne, Y. 2018. Les matières premières agricoles pour l'alimentation humaine et animale : le monde. In : Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage. Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 31, 165-180.
- Duke, G.E. 1986a. Alimentary canal: Anatomy, regulation of feeding, and motility. In Avian Physiology, ed. Sturkie PD, pp. 269-287. Springer-Verlag, New York.
- Duke, G.E. 1986b. Alimentary canal: Secretion and digestion, special digestive functions, and absorption. In Avian Physiology, ed. Sturkie PD, pp289-302. Springer-Verlag, New York.
- El Boushy, A.R., Van Marle, A.L.1978. The effect of climate on poultry physiology in tropics and their improvement. World's Poult. Sci. J, 34 : 155-171.
- El Hussein, O., C. R. Creger. 1980. The effect of ambient temperature on carcass energy gain in chickens. Poult. Sci. 59:2307–2311.
- Etches, R.J., John, T.M., Verrinder Gibbins, A.M.2008. Behavioural, physiological, neuroendocrine and molecular responses to heat stress. In: N.J.Daghir (ed.), Poultry production in hot climates, 2<sup>nd</sup> edition, pp.48-79.
- Fahmy, A.A., Youssef, K.M., El Shaer, H.M. 2010. Intake and nutritive value of some salt-tolerant fodder grasses for sheep under saline conditions of South Sinai, Egypt. Small Ruminant Research 91:110–115. DOI: 10.1016/j.smallrumres.
- FAO, 1995. Facteurs antinutritionnels endogènes présents dans les aliments d'origine végétale. <http://www.fao.org/3/T0700F/T0700F06.htm>
- FAO, 1995. Le sorgho et les mils dans la nutrition humaine. Rome, FAO/OMS.33p. <http://www.fao.org/3/t0818f/T0818F01>.
- FAO, 2011. L'élevage dans le monde en 2011 – Contribution de l'élevage à la sécurité alimentaire.Rome.150 p.
- FAO, 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nation. FAOSTAT Database. Available from: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/>.
- Farrel, D. J., Rose, C. J., Warren, B. E., Hume, I. D. 1983. Agricultural waste- and by-products for non-ruminants in Australia: some preliminary observations. RAAN. *Conference Proceedings*
- Favier, J.C. 1989. Valeur nutritive et comportement des céréales au cours de leurs transformations. In : Céréales en régions chaudes. Paris : J. Libbey Eurotext : 285-297. Colloque International de Technologie, N'Gaoundéré (CMR).
- Fedida, D. 1996. Santé animale de l'aviculture tropicale. Guide Sanofi. France. P117.
- FEEDIPEDIA, 2017. Animal feed resources information system. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. FAO. <http://www.feedipedia.org/node/1661>.

- Feedstuffs Ingredient Analysis Table. 2011. Edition, by Amy Batal and Nick Dale, University of Georgia.
- Fenardji, F. 1990. Organisation, performances et avenir de la production avicole en Algérie<sup>2</sup>. In, L'aviculture en méditerranée, N° 7, Options méditerranéennes, CIHEAM, 1990.
- Fernandes, E.A., Pereira, W.J.S., Hackenhaar, L., Rodrigues, R.M., Terra, R. 2013. The use of whole grain sorghum in broiler feeds. Rev. Bras. Cienc. vic. 15 (3). Campinas Juy/Sept. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-635X2013000300008>
- Fernandez, V., Ruiz, M. 2003. Técnico en ganadería, Volume1. Editeur : Culural, 2. 556 p.
- Ferrah, A. 1993. Essai d'approche des performances zootechniques des ateliers de poulet de chair en Algérie (1987-1992). ITPE, Septembre 1993, 15 P.
- Filardi, R.S., Junqueira, O.M., Casartelli, E.M., Laurentiz, A.C., Duarte, K.F., Assuena, V. 2005. Pearl millet utilization in commercial laying hen diets formulated on a total or digestible amino acid basis. Braz. Poult. Sci. 7(2).
- Fonolla, J., Prieto, C., Sanz, R. 1981. Influence of age on the nutrient utilization of diets for broilers. Anim. Feed Sci. Technol. 6: 405-411.
- Francesch, M., Perez-Vedrell, A., Esteve-Garcia, E., Brufau, J. 1995. Enzyme supplementation of barley and sunflower-based diet on laying hen performance. J. Appl. Poult. Res. 4:32-40.
- Frandson, R.D., Wilke, W.L., Fails, A.D. 2009. Anatomy and Physiology of Farm Animals, seventh ed. Wiley-Blackwell Publishing Ch. 20: 356-359.
- Fuller, R., Cole, C.B., Coates, M.E. 1984. The role of Streptococcus faecium in antibiotic relieved growth depression of chickens. In Antibiotics in Agriculture: Benefits and Malefits ed. Woodbine, M. pp 395-403. London: Butterworths.
- Furlan, R., De Faria Filho, D., Rosa, P., Macari, M. 2004. Does low-protein diet improve broiler performance under heat stress conditions? Revista Brasileira de Ciencia Avicola. 6 (2): 71-79.
- Furuse, M., and H. Yokota. 1984. Protein and energy-utilization in germ-free and conventional chicks given diets containing different levels of dietary-protein. British Journal of Nutrition. 51: 255-264.
- Furuse, M., Okumura, J. 1994. Nutritional and physiological characteristics in germ-free chickens. Comp. Biochem. Physiol. 109 (4): 547-556.
- Gabriel, I., Lessire, M., Juin, H. J., Burstin, J., Gerard, D., Quillien, L., Thibault, J.N., Ganier, P., Meziere, N., Laconte, M., Hallois, J.M., Cassecuelle, F., Marget, P., Seve, B. 2007. Origine de la variation de la digestion des protéines de pois (PISUM sativum L.) chez le poulet. Septième Journées de Recherche Avicole, Tours. pp 233-237.
- Gabriel, I., Lessire, M., Mallet, S., Guillot, J.F. 2006. Microflora of the digestive tract: critical factors and consequences for poultry. World's Poult. Sci. Journal. 62: 499-511.
- 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. Brit. Poult. Sci. 44 : 283-290.

- Gabriel, I., Mallet, S., Sibille, P. 2005. La microflore digestive des volailles : facteurs de variation et conséquences pour l'animal. INRA. Prod. Anim. 18 (5) : 309-322.
- Gadoud, R., Joseph, M.M., Jussiau, R., Lisberney, M. J., Mangeol, B., Montmeas, L., Tarrit, A. 1992. Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Les Editions Foucher ed. Foucher-INRA, Paris, France.
- Gamage, N.W. 2015. Microbial influence on intestinal development and mode of action of mannan oligosaccharides in broiler chicken. Thèse de magister. Université de Saskatchewan. Canada.pp 158.
- Garcia, R.G., Mendes, AA., Sartori, J.R., Takahashi, S.E., Pelícia, K., Komiyama, C.M., Quinteiro, R.R. 2004. Digestibility of feeds containing sorghum, with and without tannin, for broiler chickens submitted to three room temperatures. Rev Bras Cienc Avic. 6: 55-60.
- García, V., Gomez, J., Mignon-Grasteau, S., Sellier, N., Carré, B. 2007. Effects of xylanase and antibiotic supplementations on the nutritional utilisation of a wheat diet in growing chicks from genetic D+ and D- lines selected for divergent digestion efficiency. Animal.1: 1435-1442.
- Gatel, F., Lavorel, O., Fekete, J., Grosjean, F., Castaing, J.1985. Feeding value of triticale for monogastrics: weaned piglets, growing-finishing pigs and broilers. Pages 659–670 in Genetics and Breeding of Triticale. M. Bernard and S. Bernard, (ed) INRA, Versailles, France.
- Geraert, P. A., Guillaumin, S., Zuprizal.1992. Effect of high ambient temperature on dietary ME value in genetically lean and fat chickens. Poult. Sci. 71 : 2113-2116.
- Geraert, P.A, Padilha, J.C.F., Guillaumin, S. 1996 b. Metabolic and endocrine changes induced by chronic heat exposure in broiler chickens: biological and endocrinological variables. Brit. J. Nut.75:205-216.
- Geraert, P.A., Guillaumin, S., Leclercq, B. 1993. Are genetically lean broilers more resistant to hot climate? British Poultry Science. 34: 643-653.
- Geraert, P.A., Padilha, J.C.F., Guillaumin, S. 1996 a. Metabolic and endocrine changes induced by chronic heat exposure in broiler chickens: Growth performance, body composition and energy retention. Brit. J. Nut. 75:195-204.
- Geraert, P.A.1991. Energy metabolism of broiler under hot environmental conditions. INRA Prod. Anim.4 (3): 257-267.
- Gillespie, J. R. and Flanders F. B.2009. Modern Livestock and Poultry Production. Texas science series, illustrated. Delmar cengage learning, 8<sup>th</sup> Edition, USA. 1060p.
- Gonzalez-Alvarado, J. M., Jiménez-Moreno, E., Valencia, D. G., Lázaro, R.G., Mateos, G.2008. Effects of Fiber Source and Heat Processing of the Cereal on the Development and pH of the Gastrointestinal Tract of Broilers Fed Diets Based on Corn or Rice. Poult. Sc. 87(9) : 1779–1795. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00070>
- Gous, R., Morris, T. 2005. Nutritional interventions in alleviating the effects of high temperatures in broiler production. World's Poult. Sci. J. 61 (03) : 463-475.

- Govindaraj, M., Selvi, B., Rajarathinam, S., Sumathi, P. 2011. Genetic variability and heritability of grain yield components and grain mineral concentration in india's pearl millet (*pennisetum glaucum* (l) r. br.) accessions. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*. 11(3).
- Gracia, M. I., M. A. Latorre, M. Garcia, R. Lazaro, and G. G. Mateos. 2003. Heat processing of barley and enzyme supplementation of diets for broilers. *Poult. Sci.*82:1281–1291.
- Griffey, C., Brooks, W., Kurantz, M., Thomason, W., Taylor, F., Obert, D., Moreau, R., Flores, R., Sohn, M. and Hicks, K. Grain composition of Virginia winter barley and implications for use in feed, food, and biofuels production. *J. Cereal Sci.* 2010. 51: 41–49.
- Gruhn, K., R., Zander, R. 1989. Investigations on the influence of graded levels of soybean oil meal on the apparent digestibility of crude nutrients and amino acids in colostomized laying hens. *Archives Anim. Nutr.* 39:123-130.
- Guardia, S.2011. Effets de phytobiotiques sur les performances de croissance et l'équilibre du microbiote digestif du poulet de chair.
- Guéguen, J., Walrand, S., Bourgeois, O. 2016 .Les protéines végétales: contexte et potentiels en alimentation humaine. *Cahiers de nutrition et de diététique*. 51(4) : 177-185. <http://www.improve-innov.com/wpcontent/uploads/dx.doi.org/10.1016/j.cnd.2016.02.001>
- Guillaume, J. 1978.Nouvelles acquisitions sur l'utilisation de la féverole (*vicia faba* I) et du pois (*pisum sativum*) dans l'alimentation de la volaille. *Proc. X VI Wld. Poult.Cong.*, II2
- Guillaume, J. 1980. Digestibilité de la protéine brute de quelques matières premières chez le coq. II Résultats sur 14 produits. Moyenne et variabilité. *Archive fur Geflügelkund.* 44: 45-56.
- Guo, L. S. S., Summers, J. D. 1970.Influence of thiamine deficiency on basal metabolic rate, specific dynamic effect and the efficiency of energy utilization. *Poult. Sci.* 49:1225-1231.
- Hafez, H., Attia, F. M., Ibrahim, K., Shaaban, S. 2011. Physiological responses of broiler chickens to dietary different forms and levels of *Nigella Sativa* L., during Egyptian summer season. *Journal of aquacultural and veterinary sciences*. 4(1)
- Haftu, K., Mengistu, U., Kefelegn, K. 2015. Effect of Replacing Maize with Malted Barley Grain on Egg Quality and Laying Hen's Performance of White Leghorn. *Global Journal of Science Frontier Research: Agriculture and Veterinary*. 15 (7). *Version 1.0*.
- Hahn, D., Ishibashi, T., Turner, C. 1966. Alteration of thyroid hormone secretion rate fowls changed from a cold to a warm environment. *Poult. Sci.* 45 (1) : 31-33.
- Hai, L., Rong, D., Zhang, Z.Y. 2000. The effect of thermal environment on the digestion of broilers. *J.Anim.Physio.Ani.Nutr.* 83:57-64.
- Haitook, T. 2006. Study on chicken meat production for small scale farms in north-east Thailand (87). Kassel university press GmbH.
- Hakansson, J., Eriksson, S.1974. Digestibility, nitrogen retention and consumption of metabolizable energy by chickens on feeds of low and high concentration. *Swedish J. Agric. Res.* 4: 195-207.

- Han, I. K., Hochstetler, H. W., Scott, M. L. 1976. Metabolizable energy values of some poultry feeds determined by various methods and their estimation using metabolizability of the dry matter. *Poult. Sci.* 55 (4): 1335-1342.
- Harbi, R., 1997. « L'aviculture algérienne, dynamique de transformation et comportement des acteurs ». Thèse de master, IAMM. 1997.
- Harbi, R., 1997. L'aviculture algérienne, dynamique de transformation et comportement des acteurs. Thèse de master, IAMM. 1997.
- Harland BF., Morris, E.R. 1995. Phytate: A good or bad food component. *Nutr Res*, 15: 733-754.
- Hassan, A. S., Delpech, P. 1986. Énergie métabolisable et digestibilité azotée chez les poulets en croissance: influence du génotype, de l'âge et du régime. *Génétique sélection évolution*.18 : 225-236.
- Hedge, S.N., Rolls, B.A., Coates, M.E. 1982. The effects of the gut microflora and dietary fibre on energy utilization by the chick. *Brit. J. Nutr.* 48: 73-80.
- Herbert, K. Dei.2017. Assessment of Maize (*Zea mays*) as Feed Resource for Poultry, *Poultry Science*, Milad Manafi, IntechOpen, DOI: 10.5772/65363.
- Hermes, J. C., Johnson, R. C. 2004. Effects of feeding various levels of triticale in the diet of broiler and layer chickens. *The Journal of Applied Poultry Research*. 13(4): 667–672
- Hesselman, K., Aman, P. 1986. The effect of  $\beta$ -glucanase on the utilization of starch and nitrogen by broiler chickens fed on barley of low or high viscosity. *Anim. Feed Sci. Technol.* 15:83-93.
- Hetland, H., and B. Svihus. 2001. Effect of oat hulls on performance, gut capacity and feed passage time in broiler chickens. *Brit. Poult. Science* .42, 354 - 361.
- Heuzé V., Tran G., 2015. Mil chandelle (*Pennisetum glaucum*), grain. Feedipedia, un programme de l'INRAE, du Cirad, de l'AFZ et de la FAO. <https://www.feedipedia.org/node/724>
- Heuzé V., Tran G., Lebas F., 2017. Maïs grain. Feedipedia, un programme de l'INRAE, du Cirad, de l'AFZ et de la FAO. <https://www.feedipedia.org/node/556>
- Heuzé V., Tran G., Nozière P., Noblet J., Renaudeau D., Lessire M., Lebas F., 2016. Grain d'orge. Feedipedia, un programme de l'INRAE, du Cirad, de l'AFZ et de la FAO. <https://www.feedipedia.org/node/227>.
- Heuzé, V., Tran, G., Lebas, F. 2012. Sorghum grain. Feedipedia.org. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. <http://www.feedipedia.org/node/224>.
- Hidalgo, M. A., Davis, A. J., Dale, N. M., Dozier, W. A. 2004 Use of whole pearl millet in broiler diets. *J. Appl. Poult. Res.*13: 229–234.
- Hillman, P. E., Scott, N. R., van Tienhoven, A. 1985. Physiological responses and adaptations to hot and cold environments. Pages 27–71 in *Stress Physiology in Livestock*. Vol. 3. Poultry. M. K. Yousef, ed. CRC Press, Boca Raton, FL.

- Hilmi, H. T. A., Surakka, A., Apajalahti, J. & Saris, P. E. 2007. Identification of the most abundant Lactobacillus species in the crop of 1-and 5-week-old broiler chickens. *Applied and environmental microbiology*. 73: 7867-7873. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2168157/pdf/1128-07.pdf>
- Hocine, H. 1988. Utilisation de quelques matières locales chez le poulet de chair. Mémoire d'ingénieur agronome. INA.Alger. 96p.
- House, L.R., Osmanzai, M., Gomez, M.I., Monyo, E.S., Gupta, S.C. 1995. Agronomic principles. In D. D.A.V. ed. Sorghum and millets chemistry and technology. AACC, Minnesota, USA. pp 27-64.
- Howliger M.A.R., Rose S.P., 1987. Temperature and the growth of broilers. *World's Poult. Sci. J.*, 43, 228-237.
- Hu, P., Fan, X., Lin, L., Wang, J., Zhang, L., Wei, C. 2018. Effects of surface proteins and lipids on molecular structure, thermal properties, and enzymatic hydrolysis of rice starch. *Food Sci. Technol, Campinas*. 38(1): 84-90. <http://www.scielo.br/pdf/cta/v38n1/0101-2061-cta-1678-457X35016.pdf>
- Huisman, J., Jansman, A.J.M. 1991. Dietary effects and some analytical aspects of antinutritional factors in peas (*Pisum Sativum*), common beans (*Pisoul vulgaris*) and soybeans (*Glycine max L.*) in monogastric farm animals. A literature review. *Natu. Abstr. Rev. Ser. B*. 61 :901.
- Hulse, J.H., Laing, E.M., Pearson, O.E. 1980. Sorghum and Millet. Their Composition and Nutritive Value. Academic Press: New York; 997 pp.
- Hurwitz, S., A. Bar, M. Katz, D. Sklan, and P. Budowski. 1973. Absorption and secretion of fatty acids and bile acids in the intestine of the laying fowl. *J. Nutr.* 103:543–547.
- Imik, H., Atasever, M.A., Urcar, S., Ozlu, H., Gumus, R., Atasever, M. 2012. Meat quality of heat stress exposed broilers and effect of protein and vitamin E. *Brit. Poult. Sci.* 53 (5) : 689-698.
- INRA, AFZ, 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. 2ème édition. Sauvant D., Perez J.M., Tran G., éditeurs. 301p.
- INRAA. 2006. Organisation Des Nations Unies Pour L'alimentation et l'agriculture. Deuxième rapport national de l'état des ressources phylogénétiques. 92p
- INRA-AFZ, 2004. Tables of composition and nutritional value of feed materials. In: Sauvant, D., Pérez, J.M., Tran, G. (Eds.), Institute National de la Recherche Agronomique. Association Française de Zootechnie, Paris, France. 304 pp
- ITAVI, 1997. Sciences et techniques avicoles: Les exigences bioclimatiques des volailles. ITAVI Paris, 61p.
- ITAVI, 2009. Guide d'élevage aviculture fermière, éditions. ITAVI, Paris, 31p.
- Izydorczyk, M., Biliaderis, C. 1995. Cereal arabinoxylans: Advances in structure and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*. 28. 33-48. 10.1016/0144-8617(95)00077-1.

- Jacob, J. P., Mitaru, B. N., Mbugua, P. M., Blair, R. 1996a. The effect of substituting Kenyan Serena sorghum for maize in broiler starter diets with different dietary crude protein and methionine levels. *Anim. Feed. Sci. Technol.* 61 (19): 27-39. <http://erepository.uonbi.ac.ke:8080/xmlui/handle/123456789/10605>
- Jacob, J. P., Mitaru, B. N., Mbugua, P. M., Blair, R. 1996b. The feeding value of Kenyan sorghum, sunflower, seed cake and sesame seed cake for broilers and layers. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 61: 41-56.
- Jacob, J. P. 2015a. Feeding pearl millet to poultry. USDA National Institute of Food and Agriculture, New Technologies for Agriculture. <https://articles.extension.org:443/pages/68861/feeding-pearl-millet-to-poultry>.
- Jacob, J.P. 2015 b. Including Barley in organic poultry diets. USDA National Institute of Food and Agriculture, New Technologies for Agriculture. <https://articles.extension.org/pages/70149/including-barley-in-organic-poultry-diets>.
- Jacob, J.P., Pescator, A.J. 2012. Using barley in poultry diets. *The Journal of Applied Poultry Research*. 21 (4): 915–940. <https://doi.org/10.3382/japr.2012-00557>
- Jacobs, C., Parsons, C.M. 2013. The effects of coarse ground corn, whole sorghum, and a prebiotic on growth performance, nutrient digestibility, and cecal microbial populations in broilers fed diets with and without corn distillers dried grains with solubles. *Poult Sci* 92: 2347–2357.
- Jaiswal, P., Kumar, K. J. 2015. Physicochemical properties and release characteristics of starches from seeds of Indian Shahi Litchi. *International Journal of Biological Macromolecules*. 79: 256-261. <http://europepmc.org/abstract/med/25936503>.
- Jambunathan, R., Subramanian, V. 1988. Grain quality and utilization of sorghum and pearl millet. In *Biotechnology in tropical crop improvement. Proceedings of the International Biotechnology Workshop, Patancheru, India*. pp 133-139. Patancheru, ICRISAT.
- Jansman, A.J.M., Verstegen, M.W., Huisman J.1993. Effects of dietary inclusion of hulls of faba beans (*Vicia faba* L.) with a low and high content of condensed tannins on digestion and some physiological parameters in piglets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 43: 239-257.
- Jaybhaye, R.V., Pardeshi, I.L., Vengaiah, P.C., Srivastav, P.P. 2014. Processing and Technology for Millet Based Food Products. *Journal of Ready to Eat Food*.1 (2): 32-48.
- Jean-Blain, C. 2002. *Introduction à la nutrition des animaux domestiques*. Editions Tec and Doc, Paris. 424 p.
- Jeroch, H., Danicke, S.1995. Barley in poultry feeding a review. *World Poult. Sci. J.*, 51 (3) : 271-291.
- Jin, L.Z., Ho, Y.W., Abdullah, N., Jalaludin, S. 1998. Growth performance, intestinal microbial populations and serum cholesterol of broilers fed diets containing *Lactobacillus* cultures. *Poult. Sci.* 77:1259-1265.

- Jondreville C., Schlegel, P., Hillion, S., Nys, y. 2007. Effects of additional zinc and phytase on zinc availability in piglets and chicks fed diets containing different amounts of phytates. *Livestock Science* 109(1):60-62.
- Jondreville, C., Grosjean, F., Buron, G., Peyronnet, C., Beneytout, J.L. 1992. Comparaison of four pea varieties in pig feeding through digestibility and growth performance results. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 68:113-122.
- Jones, G.P.D., Taylor, R.D. 2001. The incorporation of whole grain into pelleted broiler chicken diets: production and physiological responses. *Brit. Poult. Sci.* 42(4):477-483.
- Jonnala, R.S., Irmak, S. MacRitchie, F., Scott R. Bean, SB. 2010. Phenolics in the bran of waxy wheat and triticale lines. *Journal of Cereal Science* 52 (2010) 509-515.
- Jorgensen, H., Sorensen, P., Eggum, B. O.1990. Protein and energy metabolism in broiler chickens selected for either body weight gain or feed efficiency. *Br. Poult. Sci.* 31:517–524.
- Jouanneau, F.1974. Anatomie comparée de l'estomac, du foie: du pancréas et de la rate chez la poule (*Gallus Gallus L.*) et de la pintade (*Numida meleagris L.*) thèse doct. Vet.71p.
- Jozefiak, D., A. Rutkowski, and S. A. Martin. 2004. Carbohydrate fermentation in the avian ceca: A review. *Animal Feed Science and Technology.* 113: 1-15.
- Jozefiak, D., Rutkowski, A., Jensen, B. B., Engberg, R. M. 2007. Effects of dietary inclusion of triticale, rye and wheat and xylanase supplementation on growth performance of broiler chickens and fermentation in the gastrointestinal tract. *Animal Feed Science and Technology.* 132(1-2): 79–93.
- Jozefiak, D., Rutkowski, A., Jensen, B.B., Engberg, R.M.2006.The effect of  $\beta$ -glucanase supplementation of barley- and oat-based diets on growth performance and fermentation in broiler chicken gastrointestinal tract. *Br. Poult. Sci.* 47:57–64.
- Juan Wang, J., Ke Guo, K.E., Xiaoxu Fan., Gongneng Feng., Cunxu, Wei. 2018. Physicochemical Properties of C-Type Starch from Root Tuber of *Apios fortunei* in Comparison with Maize, Potato, and Pea Starches. 23 (9) : 2132. <https://doi.org/10.3390/molecules23092132>
- Juin, H., Roinsard, A. 2015. Alimentation des volailles en agriculture biologique : l'apport énergétique. (ITAB) et (INRA EASM).  
[http://pae.gencat.cat/web/.content/al\\_alimentacio/al01\\_pae/05\\_publicacions\\_material\\_referencia/arxius/ITAB\\_cahier\\_alim\\_volaille.pdf](http://pae.gencat.cat/web/.content/al_alimentacio/al01_pae/05_publicacions_material_referencia/arxius/ITAB_cahier_alim_volaille.pdf)
- Juliano, B.O. 1993. Rice in human Nutrition. FAO. Food. Nut. Ser.No.26. International Rice Research Institute: Manila, Philippines.
- Kaci A. et Cheriet F., 2013. Analyse de la compétitivité de la filière de viande de volailles en Algérie : tentatives d'explication d'une déstructuration chronique. *Revue New Medit*, Vol.XII, N° 2, BARI, Juin, 2013

- Kaci, A., 2014. Les déterminants de la compétitivité des entreprises avicoles algériennes. Thèse de doctorat, ENSA d'El Harrach (Alger).
- Karaalp, M., Ozsoy, M. K. Etlik piliç rasyonlarında tritikalenin kullanım olanakları. 2. Effets du triticale sur les poulets de chair en ajoutant un enzyme et un facteur de croissance. Journal de recherche avicole.2001. 3(2): 36–41.
- Kessraoui, N. 1992. Composition chimique, digestibilité et temps de transit de quelques matières premières locales chez Gallus-gallus : Relation avec la valeur énergétique. Mémoire d'ingénieur agronome. INA.Alger. 96p.
- Khan, S. H., Sardar, R., Siddique, B. 2006. Influence of enzymes in performance of broilers fed sunflower-corn based diets. Pakistan Vet. J. 26: 109-114.
- Klasing, K. 1998a. Nutritional modulation of resistance to infectious diseases. Poultry Sci. 77:1119–1125.
- Klasing, K. C. 1999. Avian gastrointestinal anatomy and physiology. Semin. Avian Exotic. Pet. Med. 8:42-50.
- Klasing, K. C. 2005. Poultry nutrition: A comparative approach. J.Appl. Poultry Res. 14:426–436.
- Klasing, K. C., Johnstone, B. J. & Benson, B.N. 1999. Implications of an immune response on growth and nutrient requirement of chicks. In J. Wiseman & P.C. Garnsworthy, eds. *Recent developments in poultry nutrition*. (2): 35–47. Nottingham, UK, Nottingham University Press.
- Klasing, K.C., Johnstone, B.K., Benson, B.N. 1999. Développements récents dans le secteur de la nutrition de la volaille. Dans: Garnsworthy, P. C., Wiseman, J. (éd.), Nottingham University Press, Nottingham.
- Koehler, P., Wieser, H. 2013. Chemistry of Cereal Grains. <http://www.springer.com/978-1-4614-5424-3>
- Koh, K., Macleod, MG. 1999. Effects of ambient temperature on heat increment of feeding and energy retention in growing broilers maintained at different food intakes. Br. Poultry Sci. 40:511-516.
- Korane, U. N., Sarag, A. N., Sadekar, R. D., Sirothia, A. R., Jahagirdar, S. W. 1991. Studies on replacement of maize with prosomillet (*Panicum miliaceum*) in layer ration. Poultry Adviser, 24 (4): 37-40
- Korver, D. R., Zuidhof, M. J., Lawes, K. R. 2004. Performance Characteristics and Economic Comparison of Broiler Chickens Fed Wheat and Triticale-Based Diets. Poultry Science. 83(5): 716–725.
- Kouache, B.M. 1988. Utilisation azotée de quelques matières premières chez le poulet de chair. Mémoire d'ingénieur agronome. INA.Alger. 96p.
- Kowieska, A., Lubowicki, R., Jaskowska, I. 2011. Chemical composition and nutritional characteristics of several cereal grain. Acta Sci. Pol., Zootechnica 10 (2): 37–50.
- Krogdahl, A., and J. L. Sell. 1989. Influence of age on lipase, amylase, and protease activities in pancreatic tissue and intestinal contents of young turkeys. Poultry Sci. 68:1561–1568.

- Kumar, A. M., Reddy, V. R., Reddy, P. V. V. S. N., Reddy, P. S. 1991. Utilization of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) for egg production. Br. Poult. Sci. 32:463–469.
- Kumar, G. 2015. Effect of replacing Maize with Bajra grain (pearl millet) on the performance of poultry broilers. <http://krishikosh.egranth.ac.in/handle/1/5810026604>
- Kurnick, A.A. 1967. Application of energy concepts in poultry Feedstuffs, 39 (13) : 18-24. 74
- Kussaibati R., Leclercq B., Guillaume J. 1983. Effets du calcium, du magnésium et des sels biliaries sur l'énergie métabolisable apparente et la digestibilité des lipides, de l'amidon et des protéines chez le poulet en croissance. Ann. Zootech., INRA/EDP. Sci. 32 (1) : 7-20.
- Kussaibati, R., Guillaume, J., Leclercq, B. 1982 a. The effects of age, dietary fat and bile salts, and feeding rate on apparent and true metabolisable energy values in chickens. Br. Poult. Sci. 23(5):393-403.
- Kussaibati, R. 1978. Effect of level of intake on the metabolizable energy value of diets in Gallus gallus. Role of dietary lipids [chickens, animal feeding, nutrients].
- Kussaibati, R. 1979. Influence of dietary intake level on the metabolizable energy and the digestibility of lipids in the growing chicks and the adult cockerel. Pp.14-18 In C.A. Kay and P.C.M. Simons eds. Proc. 2nd Eur. Symp. Poult. Nutr. Beekbergen, Netherlands.
- Kussaibati, R., J. Guillaume, and B. Leclercq. 1982 b. The effects of the gut microflora on the digestibility of starch and proteins in young chicks. Annales De Zootechnie. 31: 483-488.
- Lacassagne, L., Francesch, M., Carré, B., Melcion, J.P. 1988. Utilization of tannin-containing and tannin-free faba beans (*Vicia faba*) by young chicks: effects of pelleting feeds on energy, protein and starch digestibility. Anim. Feed Sci. Technol. 20: 59-68.
- Lacassagne, L., Melcion, J.P., De Monredon, F., Carré B. 1991. The nutritional values of faba bean flours varying in their mean particle size in young chickens. Anim. Feed Sci. Technol., 34: 11-19.
- Ladu, M.M. 2000. Some Compositional Changes and Nutritive Value of Malted Millet Grains. M.Sc. Thesis. University of Khartoum – Sudan.
- Lan, Y., M.W. Verstegen, S. Tamminga., B.A. Williams, 2005. The role of the commensal gut microbial community in broiler chickens. World Poultry Sci. J., 61: 95-104.
- Lara, L.J., Rostagno, M.H. 2013. Impact of heat stress on poultry production. Animals, 3 (2): 356-369.
- Larbier, M., Leclercq, B. 1992. Nutrition et alimentation des volailles. INRA Editions, Versailles (France) : 352 p.
- Laroche, G. 1981. Le triticale valeur agronomique et fourragère. In revue Perspectives agricoles. 51 : 20-29.
- Lasztity, R. 1984. The chemistry of cereal proteins (chimie des protéines végétales). C.R.C. Press, Boca Ration, Florida, U.S.A. 216 p.

- Laurin, D.E., Touchburn, S.P., Chavez, E.R., Chan, W. 1985. Methods of measuring energy utilization in broilers: effect of genetic line and presence of supplemental dietary fat. *Poult. Sci.* 64, 969-978.
- Lawrence, B. V., Adeola, O., Rogler, J. C. 1995. Nutrient digestibility and growth performance of pigs fed pearl millet as a replacement for corn. *J. Anim. Sci.* 73:2026-2032.
- Leader, I. 2004. Sorghum and Millet, in *Cultivated Plants, Primarily as Food Sources*, [Ed. György Füleky], in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford ,UK, [http://www.eolss.net]
- Leclercq B., 1985. Mesure et prédiction de la valeur énergétique : Intérêt, signification, limites. Conférence Avicole WPSA-SIMAVIP, Villepinte (FRA) ; 1985/10/18. In : Valeur énergétique et qualité des aliments. Cahier n° 1, 4-12.
- Leclercq, B. 1989. Possibilités d'obtention et des génotypes maigres en aviculture. *INRA Prod. Anim.* 2 : 275- 286.
- Leenstra, E.R., PIT, R.1988. Consequences of selection for feed conversion in broiler chickens. In « *Advances in animal breeding* ». pp.160-163.
- Leeson, S., Atteh, J. O., Summers, J. D. 1987. The replacement value of canola meal for soybean meal in poultry diets. *Can. J. Anim. Sci.* 67(1): 151-158
- Leeson, S., Summers, J.D. 1997. Feeding Programs for Broilers. In: *Commercial Poultry Nutrition*, Leeson, S. and J.D. Summers, (Eds.). University Books. Guelph. UK. Pp: 207-254.
- Leibtag. 2008. Corn prices near record high, but what about food costs? *AmberWaves* 6: 10–15.
- Lekhal, D. 1986. Substitution du tourteau de soja par une légumineuse (pois fourrager, pois potager et fèverole) dans l'alimentation du poulet de chair. Mémoire d'ingénieur agronome, INA Alger 78p.
- Lepkovsky, S., Wagner, M., Furuta, F., Ozine, K., Koike, T. 1964. The proteases, amylase and lipase of the pancreas and intestinal contents of germfree and conventional chicken. *Poult. Sci.* 43 : 722-726.
- Lessire M., 2003. Effet de l'amidon et des lipides sur l'utilisation de l'énergie.
- Lessire, M. 1995. Qualité des viandes de volaille : le rôle des matières grasses alimentaires. *INRA. Prod. Anim.* 8 (5) : 335-340.
- Lessire, M., Leclercq, B., Conan, L., Hallouis, J.M. 1985. A methodological study of the relationship between the metabolizable energy values of two meat meals and their level of inclusion in the diet. *Poult. Sci.* 64 : 1721-1728.
- Lessire, M., Travel, A., Le Bellego, L., Bouvarel, I., Buttin, P., Hallouis, J.M., Juin, H. 2007. Digestibilité des acides aminés chez le dindon en finition, influence de l'âge et du taux azoté de l'aliment. In: *Septièmes Journées de la Recherche Avicole* (p. 169-173). 7<sup>ème</sup>. Journées de la Recherche Avicole, Tours; FRA. Paris, FRA : ITAVI - Institut Technique de l'Aviculture. <https://prodinra.inra.fr/record/13813>

- Leterme, P., Théwis A., Leeuwen, PV., Monmart ,T., Huisman J. 1996. Chemical composition of pea fibre isolates and their effect on the endogenous amino acid flow at the ileum of the pig. *J. Sci. Food Agric.*, 72, 127- 134.
- Leterme, P., Souffrant, W.B., Théwis, A. 2000. Effect of barley fibres and barley intake on the ileal endogenous N losses in piglets. *Journal of Cereal Science*. 31 (3) : 229-239
- Leterme, P., Thewis, A. 2004. Effect of pig bodyweight on ileal amino acid endogenous losses after ingestion of a protein-free diet enriched in pea inner fibre isolates. *Reprod. Nutr. Dev.*, 44 : 407-417
- Levy. L., Reichmann, P. 2011. Viscosité du triticale. *Agroscope Changins wädenswil*.
- Li, J. H., Vasanthan, T., Hoover, R. and Rossnagel, B. G. 2004. Starch from hull-less barley: V. In-vitro susceptibility of waxy, normal, and high-amylose starches towards hydrolysis by alpha-amylases and amyloglucosidase. *Food Chem*. 84: 621–632
- Li, J. H., Vasanthan, T., Rossnagel, B. and Hoover, R. 2001. Starch from hull-less barley: II. Thermal, rheological and acidhydrolysis characteristics. *Food Chem*. 74: 407–415.
- Liener, I.E. 1975. Endogenous toxic factors in oilseed residues. *Proceedings of Conference on Animal Feeds of Tropical and Subtropical Origin*, London School of Pharmacy. Tropical. Products. Institute, Londres. pp. 179–188.
- Lin, H., Jiao, H.C., Buyse, J., Decuypere, E. 2006. Strategies for preventing heat stress in poultry. *World's Poult. Sci. J.* 62 (1): 71-85.
- Lin, H.C., Zhao, X.T., Chu, A.W., Lin, Y.P., Wang, L. 1997. Fibre-supplemented enteral formula slows intestinal transit by intensifying inhibitory feedback from the distal gut. *American Journal of Clinical Nutrition*. 65: 1840-1844.
- Liu X., Ogawa, H., Ando, R., Nakakuki, T., Kishida, T., Fbihara, K.. 2007. Heat-moisture treatment of high-amylose orn starch increases dietary fiber content and lowers plasma cholesterol in ovariectomized rats. *J. Food. Sci.*, 72 (9), 652-658.
- Lji, P. 1999. The impact of cereal non-starch polysaccharides on intestinal development and function in broiler chickens. *World's Poultry Science Journal* 55(4):375-387. <https://www.researchgate.net/publication/224930714>
- Longe O. G., Oluyemi J. A., 1980. Feed value of heated and unheated cassava starch for chicks. *Zb/. Vet. Med.*, A 27, 819-823.
- Longstaf, M., McNab, J.M. 1991. The inhibitory effects of hull polysaccharides and tannins of field beans (*Vicia faba L.*) on the digestion of amino acids, starch and lipid and on digestive enzyme activities in young chicks. *Br. J. Nutr.* 65: 199-216.
- Lu, Q., Wen, J., Zhang, H. 2007. Effect of chronic heat exposure on fat deposition and meat quality in two genetic types of chicken. *Poult. Sci*, 86 (6) : 1059-1064.
- Lullien, P. 2014. Phytomiconutriments des grains de céréales : un aperçu de la génétique au consommateur en passant par la transformation. 42: 139-152.
- Mac Isaac, J.L; Anderson, D.M; Budgell K.L., Jacobs R., 2008. Évaluation du triticale pour les poulets à griller. Institut de recherche avicole de l'Atlantique, fiche de renseignements n° 32.

- Mac Leon, M.G., Geraert, P.A. 1988. Energy metabolism in genetically fat and lean birds and mammals. *In: Leanness in Domestic birds*. Leclercq B. & Whitehead C.C. Eds Butterworths, Sevenoaks. 109-120.
- Macheix, J.J., Fleuriet, A. et Jay-Allemand, C. 2005. Les composés phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Ed Presses polytechniques et universitaires romandes, 4-5.
- Macheix, J.J., Fleuriet, A., Manchado, P.S. 2006. Composés phénoliques dans la plante- structure, biosynthèse, répartition et rôles ; in : « Les Polyphénols En Agroalimentaire ». Editions Tec et Doc., Lavoisier., Paris. 3-26.
- Macheix, J.J., Fleurit, A., et Billot, U. 1990. Fruits phenolics. CRC Inc Boca a ton Florida. 378.
- Macisaac J.L; Anderson D.M; Budgell K.L; Jacobs R., 2008. Évaluation du triticale pour les poulets à griller. Institut de recherche avicole de l'Atlantique, fiche de renseignements n° 32.
- Mack, L.A., Felver-Grant J.N., Dennis, R.L., Cheng, H.W., 2013. Genetic variation aiterproduction and behavioral responses following heat stress in 2 strains of laying hens. *Poult. Sci.*, 92: 285-294.
- MADRP, 2018 : Statistiques agricoles-Ministère de l'agriculture et de développement rural et de la pêche.
- Magdelaine, P., 2014. Panorama mondial de l'aviculture chair et enjeux de compétitivité pour la France. In *Quelle place en France pour une filière intensive de volailles de chair*, Académie d'Agriculture de France, 2014.
- Mahagna, M., Nir, I., Larbier, M., Nitsan, Z. 1995. Effect of age and exogenous amylase and protease on development of the digestive tract, pancreatic enzyme activities and digestibility of nutrients in young meat-type chicks. *Reproduction Nutrition Development* 35, 201-212.
- Mahamat-Silaye, O., 1981. Etude de la composition chimique et de la valeur nutritive de quelques aliments du Sénégal. Rapport de stage. pp.27-29
- Maisonnier S, Gomez J et Carré B., 2001a. Nutrient digestibility and intestinal viscosities in broiler chickens fed on wheat diets, as compared to maize diets with added guar gum. *British Poultry Science* 42, 102-110.
- Maisonnier, S., Gomez J, Chagneau, A.M., Carré, b. 2001b. Analysis of variability in nutrient digestibilities in broiler chickens. *British Poultry Science* 42, 70-76.
- Maliboungou J.C. Lessire M. Hallouis J.M 1998. Composition chimique et teneur en énergie métabolisable des matières premières produite en République centre-africaine et utilisables chez les volailles. *Revue Élev. Méd. vét. Pays trop.* 1998, 51 (1) : 55-61.
- Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Remesy, C., Jimenez, L. 2004. Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition.*, 79: 727-747.
- Manwar, S. J., and A. B. Mandal. 2009. Effect of high moisture storage of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) with or without feed enzymes on growth and nutrient utilization in broiler chickens. *Anim. Sci. J.* 80:438-445.

- Marder, J. 1973. Temperature regulation in the Bedouin fowl (*Gallus domesticus*). *Physiological Zoology*. 208-217.
- Mariscal-Landin, G., Séve, B., Colléaux, Y., Lebreton, Y. 1995. Endogenous amino nitrogen collected from pigs with end-to-end ileorectal anastomosis is affected by the method of estimation and altered by dietary fibre. *Journal of Nutrition* , 125, 136–146.
- Marquardt, R. R., Boros, D., Guenter, W., Crow, G. 1994. The nutritive-value of barley, rye, wheat and corn for young chicks as affected by use of a *Trichoderma-Reesei* enzyme preparation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 45:363-378.
- Martinez, V., Jimenez, M., Gonalons, E., Vergara, P. 1995. Intraluminal lipids modulate avian gastro intestinal motility. *Am. J. Physiol.*, 269, R445-R452.
- Mashaly, M., Hendricks, G., Kalama, M., Gehad, A., Abbas, A., Patterson, P. 2004. Effect of heat stress on production parameters and immune responses of commercial laying hens. *Poult. Sci.* 83 (6) : 889-894.
- Mason, V.C., 1984. Metabolism of nitrogenous compounds in the large gut. *Proc. Nutr. Soc.*, 43, 45-53.
- Mateos, G. G., Jiménez-Moreno, E., Serrano, M. P., Lázaro, R. P. 2012. Poultry response to high levels of dietary fiber sources varying in physical and chemical characteristics. *The Journal of Applied Poultry Research* 21: 156-174.
- Mather, F.B., Barnas, G.M., Burger, R.E. 1980. The influence of alkalosis on panting. *Comp. Biochem. Physiol.* 67: 265-268.
- Mathlouthi N., Mallet S., Saulnier L., Quemener B., Larbier M. 2002 b. Effects of xylanase and beta -glucanase addition on performance, nutrient digestibility, and physico-chemical conditions in the small intestine contents and caecal microflora of broiler chickens fed a wheat and barley-based diet. *Anim. Res.* 51(05):395–406
- Mathlouthi, N., Lallès, J. P., Lepercq, P., Juste, C., Larbier, M. 2002 a. Xylanase and  $\beta$ -glucanase supplementation improve conjugated bile acid fraction in intestinal contents and increase villus size of small intestine wall in broiler chickens fed a rye-based diet. *J. Anim. Sci.*, 80 (11): 2773-2779.
- Mathlouthi, N., Saulnier, L., Quemener, B., Larbier, M. 2002b. Xylanase, beta-glucanase, and other side enzymatic activities have greater effects on the viscosity of several feedstuffs than xylanase and beta-glucanase used alone or in combination. *J. Agric. Food Chem.* 50:5121-5127.
- Mc Cartney, L., Susan, E.M., Paul Knox, J. 2005. Monoclonal Antibodies to Plant Cell Wall Xylans and Arabinoxylans. *Journal of Histochemistry et Cytochemistry.* 53(4): 543–546.
- Mc Intosh, J. I. Slinger, S. J. Sibbald, I. R. Ashton, G. C. 1962. The effects of three physical forms of wheat on the weight gains and feed efficiencies of pullets from hatching to fifteen weeks of age. *Poultry Science*, 41(2). <https://doi.org/10.3382/ps.0410438>.
- McEntee, G.M., Rance, K.A., McDevitt, R.M. 2003. Form and function in the broiler chicken: the relationship between gastrointestinal morphological parameters and digestive functional physiology. *British Poultry Science.* 44: 35-36

- McIntosh, J. I., Slinger, S. J., Sibbald, R., Ashton, G. C. 1962. The effects of three physical forms of wheat on the weight gains and feed efficiencies of pullets from hatching to fifteen weeks of age. *Poultry Science*.41: 438–445. <https://doi.org/10.3382/ps.0410438>
- McKinley, M., Johnson, Alan. (2004). The Physiological Regulation of Thirst and Fluid Intake. News in physiological sciences: Int. Union Physiol. Sci./Am. Physiol. Sci and the American Physiol Soc. (19) : 1-6.
- McNab, J.M., Boorman, K.N. 2002. Poultry Feedstuffs supply, Composition and Nutritive Value: CABI Publishing. Wallingford, 427p.
- Mehri, M., Pourreza, J. & Sadeghi, G., 2010. Replacing maize with pearl millet in laying hens' diets. *Trop Anim Health Prod*.42 (3):439-444. <https://doi.org/10.1007/s11250-009-9440-6>
- Melesse, A., Maak, S., Lengerken von, G. 2005. The performance of naked neck and their F1 crosses with Lohmann White and New Hampshire chicken breeds under long-term heat stress conditions. *Ethiopian Journal of Animal Production*, 5: 91-107.
- Meltzer, A. 1983. Thermoneutral zone and resting metabolic rate of broilers. *Br. Poult. Sci.* 24(4):471-6
- Meng, X., Slominski, B. A. 2005. Nutritive values of corn, soybean meal, canola meal, and peas for broiler chickens as affected by a multicarbohydrase preparation of cell wall degrading enzymes. *Poultry Science*. 84: 1242-1251.
- Merck, 2003. In : Le manuel vétérinaire Merck 2eme édition française Edition : Susan E Aiello B.S, D.V.MELS 1983-2013.
- Messia, M.C., Candigliota, T., De Arcangelis, E., Marconi, E. 2017. Arabinoxylan and B-glucans assessment in cereal. *J CEREAL SC.* 29 : 112-122.
- Métayer, J.-P, Skiba, F., Vilarino, M. 2011. Valeur énergétique du triticale chez le poulet label. Neuvièmes Journées de la Recherche Avicole, Tours, 29 et 30 mars 2011.
- Métayer, J.P., Grosjean, F., Castaing, J., 1993. Study of variability in French cereals. *anim. Feed Sci. Technol.*, 43, 87-108.
- Métayer, J.P., Lescoa, T.P., Bastianelli, D, Bouvarel, I., Fournis, Y., Vilarino, M. 2015. Facteurs de variation de la digestibilité des nutriments chez le poulet : synthèse des résultats du projet DIGSPIR. *11<sup>èmes</sup> Journ. Rech. Avicole et Palmipedes à Foie Gras. Tours, 25 et 26 mars* : 504-508.
- Meziane, F.Z. 1983. Etude de légumineuse Algériennes en vue de leur substitution dans l'alimentation du poulet de chair. Thèse de magister, INA Alger, 169 p
- Meziane, F.Z., Longo-Hammouda, F.H., D. Boudouma.D et Kaci, K. 2013. Quelles alternatives au couple « Tourteau De Soja - Maïs » de l'aliment poulet de chair en Algérie ? Colloque International Sur : L'école Nationale Supérieure Agronomique : 50 ans De Formation et De Recherche. ENSA 22 – 24 Avril 2013.
- Mignon-Grasteau, S, Muley, N., Bastianelli, D., Gomez, J., Péron, A., Sellier, N., Millet, N., Besnard, J., Hallouis, J.M., Carré, B. 2004. Heritability of digestibilities and divergent selection for digestion ability in growing chicks fed a wheat diet. *Poultry Science* 83, 860-867.

- Mitchei, I. M.A., Goddard C., 1990. Some endocrine responses during heat stress induced depression of growth in young domestic fowls. Proc. Nutr. Soc. 49: 129A.
- Mitchell, M.A., Carlisle, A.J. 1992. The effects of chronic exposure to elevated environmental temperature on intestinal morphology and nutrient absorption in the domestic fowl (*Gallus Domesticus*). Comp. Biochem. Physiol. 101 A: 137-142.
- Mobini, B., 2013. Histochemical and histological studies on the pancreas in mature pigeon (*Columba Livia*). Eur. J. Exp. Biol. 3 (2) : 148–152
- Mohamed, A.A., Rayas-Duarte, P. 1995. Non-starchy polysaccharide analysis of cotyledon and hull of *Lupinus albus*. *Cereal Chemistry* 72:648-65. Computational and Structural Biotechnology Journal. (16):131–139.
- Mohan ravi kumar, V. Reddy, V.R., Reddy, P.V.V.V.S.N. et Sudhakara, R. 1991. Utilisation of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) for egg production. *Br. Poult. Sci.*, 32(3), 463-469.
- Moharrery, A., Asadi, E., Rezaei, R. Performance. 2015. Characteristics and Nutritional Comparison of Broiler Chickens Fed with Barley and Triticale Based Diets. Iranian Journal of Applied Animal Science. 2015. 5(2). P. 369–376. 22. NRC. Nutrient.
- Moran, E. 1982. Starch digestion in fowl. *Poultry Science*.61 :1257-1267
- Moran, E. T., Jr., and J. McGinnis, 1965. The effect of cereal grain and energy level on the diet on the response of turkey poults to enzyme and antibiotic supplement. *Poultry Sci.* 44:1253–1261.
- Mossab, A., 1995. Valorisation des issues de meunerie par addition de matières grasses animales ou végétales: digestibilité chez le poulet et le dindonneau d'âges différents et effet sur la croissance du poulet. Inst. Nat. Agro., El-Harrach, Alger, 80p.
- Mossab, A., Achouri, A. 1995. Intérêt de l'utilisation des matières grasses animales dans l'alimentation avicole. Bull. Tech. ITPE. 7.
- Mossab, A., Kaci, A., Zimerline, 1997. « Impact de l'incorporation du triticale dans l'alimentation de la volaille de groupe sur les performances zootechniques ». Doc Roméo, ITPE, 1997.
- Mossab, M. 2007. Contribution à l'étude de l'exploitation à double fin de l'orge *Hordeum vulgare* L. en zones semi-arides d'altitude. Mém. Magister, Inst. Nat. Agro., El-Harrach, Alger, 126 p.
- Muhammad kashif, N., Faqir, M.A., Rai, M.A., Moazzam, R.K. 2010. An overview of anti-nutritional factors in cereal grains with special reference to wheat-A review. *PAK. J. FOOD SCI.*, 20(1-4):54-61.
- Mujahid, A. 2011. Nutritional strategies to maintain efficiency and production of chickens under high environmental temperature. *Poult. Sci. J.* 48 (3) : 145-154.
- Muramatsu, T., S. Nakajima., J. Okumura. 1994. Modification of energy metabolism by the presence of gut microflora in the chicken. *Br. J. Nutr.*, 71: 709-717.

- Murta, G.P.O., Fernandes, E.A, Olegário, M.M.M., Silva, C.B., Pereira, P.C. 2001. Effect of milling sorghum on the performance of broilers. *Brazilian Journal of Poultry Science and Llamas Awards*.(6):32.
- Musharaf, N.A., Latshaw, J.D. 1999. Heat increment as affected by protein and amino acid nutrition. *World's Poult. Sci. J.* (55): 233- 240.
- Muztar, A. J. and Slinger, S. J. (1979). Effect of length of excreta collection period and feed input level on the true metabolizable energy value of rapeseed meal. *Nutrition Reports International* 19(5): 689
- Mvondo, N. 1986. Etude des principales caractéristiques de l'association culturale maïs (*Zea mays* L.) - soja (*Glycine max. L. MerriLL*) dans les conditions écologiques de Dschang Dschang : IRA, 68 p. Mémoire de fin d'études : Agronomie. Option Productions végétales : INRA.
- Myer, R. O. 2002. Triticale grain in young pig diets. *Proceedings of the 5 th International Triticale Symposium, Poland.* 1: 271–276.
- Nadeem, M., Anjum, F. M., Amir, R. M., Khan, M. R., Hussain, S., & Javed, M. S. 2010. An overview of anti-nutritional factors in cereal grains with special reference to wheat-A review. *Pakistan Journal of Food Sciences*, 20(1–4), 54–61.
- Nahashon, S.N., Nakaue, H.S., MIrosh, L.W.1994a. Production variables and nutrient retention in Single Comb White Leghorn laying pullets fed diets supplemented with direct-fed microbials. *Poultry Science* 73: 1699-1711.
- National Research Council. 1994. *Nutrient Requirements of Poultry.* 9th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington,DC.*In* [http://digitool.library.mcgill.ca/webclient/StreamGate?folder\\_id=0&dvs=1545400106659~342](http://digitool.library.mcgill.ca/webclient/StreamGate?folder_id=0&dvs=1545400106659~342)
- National Research Council (NRC). 1981. *Effect of environment on nutrient requirements of domestic animals.* Committee on Animal Nutrition. Subcommittee on Environmental Stress. National Academy Press, Washington DC.
- National Research Council (NRC). 1994. *Nutrient requirement of poultry.* 9th. revised. Edition. NAS-NCR, Washington in district of Colombia.177pp.
- Nga, O.S.N. 2009. Effet de la nature des céréales et de la taille particulière sur les performances zootechniques des poulets de chair. Thèse vétérinaire, Dakar. (18) 90p.
- Nichelmann, M., Tzschentke, B. 2002. Ontogeny of thermoregulation in precocial birds. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.*, 131(4) : 751-63.
- Nijimbere, A., 2003. Variabilité de la composition chimique et de la valeur alimentaire des matières premières et aliment utilisés et potentiellement utilisables en aviculture dans la zone des Niayes au Sénégal. Mémoire d'ingénieur; ENSA Thèse 67 p.
- **Nir I., Nitsan Z., Mahagna M. 1993.** Comparative growth and development of the digestive organs and of some enzymes in broiler and egg type chicks after hatching. *Br. Poult.Sci.*, 34, 523-532. 39.

- Nir, 2003. Cours international sur la production avicole intensive. Alimentation et nutrition des volailles, 124 p.
- Niradha Withana, G. 2015. Microbial influence on intestinal development and mode of action of mannan oligosaccharides in broiler chicken. Thèse de magister. Université de Saskatchewan. Canada. pp158. <https://harvest.usask.ca/bitstream/handle/10388/ETD-2015-10-2035/WITHANA-GAMAGE THESIS.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- 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
- North, M.O and Bell, D.D.1990. Comercial chicken production manual. 4ed. Chapman and Hall, N.Y.
- North, M.O. and Bell, 1990. Commercial chicken production, 3<sup>rd</sup>edition. West Part, Connecticut. U.S.A.
- Noy, Y., and D. Sklan. 1995. Digestion and absorption in the young chick. Poult. Sci. 74:366–373.
- Obilana, A. B. and E. Manyasa. 2002. Millets. In: P. S. Belton and J. R. N. Taylor (Eds.). pp. 177–217. Pseudo cereals and less common
- O'Dell, B. L., C. E. Burpo, and J. E. Savage. 1972. Evaluation of zinc availability of foodstuffs of plant and animal origin. J. Nutr. 102:653—660.
- Okumura, J., K. Yamaguchi, and M. Yanaka, 1980. Growth and utilization of dietary nitrogen and energy in chicks fed excess phenylalanine and tyrosine diets. Japanese Poultry Sci. 17:256—264.
- Okwuosa, B., Agbakoba, A., Bnokwuosa, A. 1990. Performance of different genotype of broiler chicks fed varying protein levels in their starter and finisher diets. Bull. Animal. Hilt Prod., Afr 38 : pp. 69-76.
- Onderci, N., N. Sahin, G. Cikim, A. Aydin, I. Ozercan, E. Ozkose, S. Ekinici, A. Hayirli, and K. Sahin. 2008.  $\beta$ -Glucanase-producing bacterial culture improves performance and nutrient utilization and alters gut morphology of broilers fed a barley-based diet. Anim. Feed Sci. Technol. 146:87–97.
- Oria, M.P., Hamaker, B.R., Shull, J.M., 1995a. In vitro protein digestibility of developing and mature sorghum grain in relation to a-, b- and g-kafirin disulfide crosslinking. Journal of Cereal Science 22, 85–93.
- Oskan, S., Akbas, Y., Altan, O. Altan, O., Ayhan, V., Ozkan, K. 2003. The effect of short-term fasting on performance traits and rectal temperature of broilers during the summer season. Br. Poult. Sci., 44: 88-95.
- Oswald, M. 1999. Contribution a la mise au point d'un référentiel sur la qualité des matières premières utilisées en aviculture au Sénégal. application à la formulation des rations alimentaires. Thèse de Doc Vet, Dakar.p107.
- Ozbey, O., Ozcelik, M. 2004. The effect of high environmental temperature on growth performance of Japanese quails with different body weight. Int. J.Poult. Sci., 3: 468-470.

- Ozbey, O., Ozcelik, M. 2004. The effect of high environmental temperature on growth performance of Japanese quails with different body weight. *Int. J. Poultry Sci.*, 3: 468-470. In <https://pdfs.semanticscholar.org/055b/12ff5f9b8b6424532e69f10f1055f4a58796.pdf>
- Padilha, J. C. F., Geraert, P. A., Rideau, N., AinBaziz, H., Guillaumin, S. 1995. L'exposition chronique à la chaleur perturbe l'équilibre glucose-insuline chez le poulet de chair. 1ère Journée de la recherche avicole. *Angers France 28 -30 mars* .pp 90-92.
- Parsons, C.M., Potter, L.M., Brown, R.D. 1983. Effects of dietary carbohydrate and of intestinal microflora on excretion of endogenous amino acids by poultry. *Poult. Sci.* 62: 483-489.
- Parsons, C.M., Zhang Y., Araba M., 1998. Availability of amino acids in high-oil corn. *Poult. Sci.* 77 : 1016-1019.
- Péron, A., Gomez, J., Mignon-Grasteau, S., Sellier, N., Besnard, J., Derouet, M., Juin, H., Carré, B. 2006. Effects of wheat quality on digestion differ between the D+ and D- chicken lines selected for divergent digestion capacity. *Poultry Science*. 85 : 462-469.
- Perrot, C. 1995. Les protéines de pois : de leur fonction dans la graine à leur utilisation en alimentation animale. *INRA Prod. Anim.* 8 (3) : 151-164.
- Pesti G.M., 1994. Description d'un modèle de formulation permettant un profit maximum. Conférence avicole WPSA - SIMAVIP, Villepinte (FRA). In : *Nutrition et Alimentation Avicoles : vers une démarche intégrée. Cahier du SIMAVI.* (9) : 25-46.
- Picard, M., Sauveur, B., Fenardji, F., Angulo, I., Mongin, P. 1993. Ajustements technico-économiques possibles de l'alimentation des volailles dans les pays chauds. *INRA Prod. Anim.*, 6(2) : 87-103.
- Piestun, Y., Halevy, O; Shinder, M ; Ruzal, M; Druyan,S; Yahav,S. 2011. Thermal manipulations during broiler embryogenesis improves post-hatch performance under hot conditions. *J. therm. Biol.* 36 : 469-474.
- Piton, P.S., Guillaumin, Leclercq, B., Blum, J.C. 1979. Valeur alimentaire de différentes variétés d'orge pour le poulet en croissance. Rôle possible des  $\beta$ -glucanes. *Matières Premières et Alimentation des Volailles*. INRA. pp 135-146.
- Pointillart, A., Guéguen, L. 1992. Influence des fibres alimentaires sur la biodisponibilité des minéraux. *Cahiers ENSBANA*. 18 : 157-182.
- Proudfoot, F.G., Hulan, H.W. 1988. Nutritive value of triticale as a feed ingredient for broiler chickens. *Poult. Sci.*, 67 (1988), pp. 1743-1749.
- Puvadolpirod, S., Thaxton, J. P. 2000. Model of Physiological Stress in Chickens. *Digestion and Metabolism*. *Poult. Sci.* 79:383-390
- Raboy, V. 2001. Seeds for a better future: "Low phytate" grains help to overcome malnutrition and reduce pollution. *Trends Plant Sci.* 6: 458-462.
- Raboy, V. 2009. Approaches and challenges to engineering seed phytate and total phosphorus. *Plant Sci.* 177: 281-296.
- Rahal-Bouziane, H. 2006. Caractérisation agro morphologique des orges (*Hordeum vulgare* L.) cultivées dans les oasis de la région d'Adrar (Algérie). Thèse de magister, INA (Alger), 90p.

- Rahal-Bouziane, H. 2016. Quelques cultures stratégiques pour l'Algérie face aux changements climatiques : l'orge (*Hordeum vulgare* L.) et le mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br]. *Algerian journal of arid environment*. 6(1) :15-31.
- Rahal-Bouziane, H., Kharsi, M. 2004. Les mils penicillaires de la région d'Adrar (Algérie): quelques caractéristiques en présence d'un témoin importé. Séminaire International Aridoculture et cultures oasiennes, Revue des zones arides, Tunisie, Tome 2: 450-454.
- Rahal-Bouziane, H., Mossab, K., Hamdi, S. Kharsi, M., 2003. Situation des fourrages cultivés dans la région d'Adrar. INRAA. (12). pp37-49.
- Rama Rao, S. V., Raju, M. V. L. N., Reddy, M. R., Panda, A. K. 2004. Replacement of Yellow Maize with Pearl Millet (*Pennisetum typhoides*), Foxtail Millet (*Setaria italica*) or Finger Millet (*Eleusine coracana*) in Broiler Chicken Diets Containing Supplemental Enzymes. *Asian-Aust.J. Animal. Sci.* 17:836-842.
- Ranjan, A., Ranjana, S., Devi, I., Rahim, A., Tiwari, S. 2019. Effect of Heat Stress on Poultry Production and their Managemental Approaches. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* 8 (2) : 1548-1555
- Rao, P. V., Clandinin, D. R., 1970. Effect of method of determination on the metabolizable energy of rapeseed meal. *Poultry Sci.* 49:1069-1074.
- Rao, R. S. V., Nagalakshimi Reddy, V. R. 2002. Feeding to minimize heat stress. *Poultry Science*, 4(6): 396-398.
- Ravidran, V. 2013a. Main ingredients used in poultry feed formulations. In: FAO (éd.), *Poultry development review*. Rome: FAO, 127 p. [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications).
- Ravidran, V. 2013b. Alternative feedstuffs for use in poultry feed formulations. In: FAO (éd.), *Poultry development review*. Rome : FAO, 127 p. [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)
- Ravindran, V., W.H. Hendriks, B.J. Camden, D.V. Thomas, P.C.H. Morel and C.A. Butts, 2002. Amino acid digestibility of meat and bone meals for broiler chickens. *Aust. J. Agri. Res.*, 53: 1257-1264. *The role of poultry in human nutrition*, 60.
- Renaudeau, D., Collin, A., Yahava, S., De Basilio, V., Gourdière, J.L., Collier, R.J. 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal*, 6:707-728.
- Rideau N., 1997, 2<sup>èmes</sup> Journées de la Recherche Avicole; Tours (FRA). 1 :107-110. ITAVI, Paris (FRA).
- Rideau, N., Métayer-Coustard, S. 2012. Utilisation périphérique du glucose chez le poulet et le canard : implications pour la croissance et la qualité de la viande. *INRA Prod. Anim.* 25 (4) :337-350
- Rideau, N. 1998. Peculiarities of insulin secretion in chickens. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 839, 162-165.
- Rinttilä, T., Apajalahti, J. 2013. Intestinal microbiota and metabolites-implications for broiler chicken health and performance. *J. Appl. Poultry Res.* 22: 647-658.
- Rodgers, N. J., M., Choct. 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.

- Rogel, A.M., Annison, E.F., Bryden, W.L., Balnave, D. 1987. The digestion of wheat starch in broiler chickens. *Australian Journal of Agricultural Research*. 38: 639-649.
- Rooney, L.W. 1978. Sorghum and pearl millet lipids. *Cereal Chemistry*. 55:584-590.
- Rooney, L.W., Miller, F.R., 1982: Variation in the structure and kernel characteristics of sorghum. *Proceedings of the international symposium on sorghum grain quality*.pp143-162, ICRISAT, Patancheru, India.
- Rosa, P., Faria Filho, D., Dahike, F., Vieira, B., Macari, M., Furlan, R. 2007. Performance and carcass characteristics of broiler chickens with different growth potential and submitted to heat stress. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*. 9 (3): 181-186.
- Rostango, H.S.1973. Nutritive evaluation of sorghum grains in chicks. PhD thesis: Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- Rotter, B.A., Friesen, O.D., Guenter, W., Marquardt, R.R. 1990. Influence of enzyme supplementation on the bioavailable energy of barley. *Poult Sci*. 69: 1174-1181
- Rougiere, N. 2010. Etude comparée des paramètres digestifs des poulets issus des lignées génétiques d+ et d- sélectionnées pour une efficacité digestive divergente. Thèse Doctorat. Université François – Rabelais. Tours. 128p.
- Rutherford, S. M., T. K. Chung, and P. J. Moughan. 2007. The effect of a commercial enzyme preparation on apparent metabolisable energy, the true ileal amino acid digestibility and endogenous ileal lysine losses in broiler chickens. *Poult. Sci*. 86: 665–672.
- Sadoud, M. 2014. Effets de l'adhésion de l'Algérie à l'OMC et à la zone de libre échange Euro-méditerranéenne sur la filière viande bovine. Thèse de doctorat, ENSA, Alger. 2014.
- Saito, K., ITO, T., Kuribayashi, T., Mochida, K., Nakakuki, T., Shibata, M. 2001. Effect of raw and heat-moisture treated high-amylose corn starch on fermentation by the rat cecal bacteria. *Starch*. 53: 424-430.
- Sajilata, M. G., Singhal, R. S., Kulkarni, P. R. 2006. Resistant starch—a review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 5:1-17.
- Saki, A.A., S. Mirzayi, Sh. Ghazi, M.M. Moini, R. N. Harsini, M. Haghghat, and R. Mahdavi. 2010. Effect of various level of treated barley on small intestinal content viscosity, litter moisture, uric acid and broiler chicken performance. *J. Anim. Vet. Adv*. 9:2627–2632.
- Saleh, E. A., S. E. Watkins, A. L. Waldroup and P. W. Waldroup. 2004. Effects of dietary nutrient density on performance and carcass quality of male broilers grown for further processing. *Internat. J. of Poult. Science*. 3(1):1-10.
- Saliou, N. 2004. Ebauche d'un référentiel sur la composition chimique et valeur nutritive des matières premières utilisables en alimentation des volailles au Sénégal. *Doc. 3<sup>eme</sup> cycle de chimie et biochimie des produits naturels*. université cheikh anta diop de Dakar. Fac.sci et tech. *Département de chimie*. 134 p. [www.sist.sn/gsd/collect/butravau/index/assoc/HASH7004.../THS-7029.pdf](http://www.sist.sn/gsd/collect/butravau/index/assoc/HASH7004.../THS-7029.pdf)

- Salter, D.N. 1973. The influence of gut microorganisms on utilization of dietary protein. Proc. Nutr. Soc., 32, 65-71.
- Salter, D.N., Fulford, R.J., 1974. The influence of the gut microflora on the digestion of dietary and endogenous proteins: studies of the amino acid composition of the excreta of germ-free and conventional chicks. Br. J. Nutr.32: 625-637.
- Salunkhe, D.K., Chavan, J.K., Kadam, S.S. 1990. Dietary tannins: Consequences and remedies. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press.
- Salunkhe, D.K., Jadhav, S.J., Kadam S.S., Chavan, J.K.1982. Chemical, biochemical and biological significance of polyphenols in cereals and legumes. CRC Crit. Rev.Food Sci. Nutr., 17 :277-305.
- Sanchez, A.C., Subudhi, P.K., Rosenow, D.T., Jguyen, H.T. 2002. Mapping QTLs associated with drought resistance in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). Plant Molecular Biology 48:713–726.
- Sandhu, K.S., Singh, N., Malhi, N.S. 2005. Physicochemical and thermal properties of starches separated from corn produced from crosses of two germ pools. *Food Chem.*89: 541-548.
- Sankar, S.M., Satyavathi, C.T., Singh, S.P., Singh, M.P., Barthakur, B.S., 2014. Genetic diversity analysis for high temperature stress tolerance in pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br]. Ind J Plant Physiology. 19 (4): 234-329.
- Santos, F. B. O., Sheldon, B. W., Santos, A. A. J., Ferket, P. R. 2008. Influence of housing system, grain type, and particle size on Salmonella colonization and shedding of broilers fed triticale or corn-soybean meal diets. Poultry Science Journal. 87(3): 405–420.
- Sarwar, G., Wu Xiao, C, Cockell, K.A. 2012. Impact of antinutritional factors in food proteins on the digestibility of protein and the bioavailability of amino acids and on protein quality. Br. J. Nutr.108 (2) :315-32.
- Saulius, A., Gintautas JS, Romas, G., Agila, D., Vilma, S., Asta, R.S., Vilma, K. 2016. The application of triticale in nutrition of broiler chickens. ISSN 1392-2130. Vet Med Zoot. T. 73 (95).
- Saulnier, L., 2012. Les grains de céréales : diversité et compositions nutritionnelles. INRA Edition, *Cahiers de nutrition et diététique*. (47): 4-15.
- Saunders, R.M., Walker, H.G., Kohler, G.O. 1969. Aleurone cells and the digestibility of wheat mill feeds. Poul. Sci. 48 : 1497-1503.
- Scott, T.A, Silversides, F.G, Classen, H.L, Swift, M.L., Bedford, M.R. 1998. Comparison of sample source (excreta or ileal digesta) and age of broiler chick on measurement of apparent digestible energy of wheat and barley. *Poultry Science*.77: 456-463.
- Sebastian, S., Touchburn, S.P., Chavez, E.R. 1998. Implications of phytic acid and supplemental microbial phytase in poultry nutrition: a review. World Poul. Sci. J. 54: 27-47.
- Sell, D.R., Reed, W.M., Chrisman, C.L., Rogler, J.C. 1985. Mucin excretion and morphology of the intestinal tract as influenced by sorghum tannins. Nutr. Report Intern. 31:1369-1374.

- Sell, J.L., Hodgson, G.C., Shebeski, L.H. 1962. Triticale as a potential component of chick rations. *Can. J. Anim. Sci.*, 42 (1962), pp. 158-166.
- Selle, P.H., Cadogan, D.J., Li, X., Bryden, W.L. 2010. Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Anim. Feed Sci. Tech.* 156: 57-74.
- Serna-Saldivar, S.D., Mcdonough, C.M., Rooney, L.W. 1991. The millets. In K.J. Lorenz et K.Kulp (éd). *Handbook of cereal science and technology*.pp.271-300. *New York, Marcel Dekker*.
- Seroux, M. 1988. Spring peas as a source of protein for doe rabbits. 4<sup>th</sup> World Rabbit Congress, Budapest. 2:141–147.
- Sharma, B. D., V. R. Sadagopan, and V. R. Reddy. 1979. Utilization of different cereals in broiler diets. *Br.Poult. Sci.* 20:371–378.
- Sharma, B.D., V.R. Sadagopan., V.R., Reddy, M.R. 1979. Utilization of different cereals in broilers diets. *Br. Poult. Sci.*, 20:371-378.
- Shires, A., A. R., Robblee, R. T., Hardin., D. R., Clandinin. 1980. Effect of the Age of Chickens on the True Metabolizable Energy Values of Feed Ingredients. *Poultry Science* 59(2):396-403.
- Sibbald I. R., K. Price.1980. Variability in metabolic plus endogenous energy losses of adult cockerels and in the true metabolizable energy values and rates of passage of dehydrated alfalfa. *Poultry Science*. 59 (6): 1275–1279. <https://doi.org/10.3382/ps.0591275>
- Sibbald I.R., 1976. The true metabolizable energy values of several feedingstuffs measured with roosters, laying hens, turkeys and broiler hens. *Poult. Sci.*55: 1459-1463.
- Sibbald R. , R., Slinger, S.J. 1962. The Metabolizable Energy of Materials Fed to Growing Chicks. *Poultry Science*. 41(5):1612–1613. <https://doi.org/10.3382/ps.0411612>
- Sibbald, R., Morse, P. M. 1983 b. Effects of the Nitrogen Correction and of Feed Intake on True Metabolizable Energy Values, *Poultry Science*, Volume 62, Issue 1, 1 January, Pages 138–142, <https://doi.org/10.3382/ps.0620138>
- Sibbald, I. R. (1977). A test of the additivity of true metabolizable energy values of feedingstuffs. *Poultry Science* 56(1): 363.
- Sibbald, I. R. 1978a. Scientists study metabolizable energy variations in swine and poultry diets. *Feedstuffs* 50(48): 20. <https://doi.org/10.3382/ps.0570455>
- Sibbald, I. R. 1978b. The effect of the duration of the time interval between assays on true metabolizable energy values measured with adult roosters. *Poultry Science* 57(2): 455–460, <https://doi.org/10.3382/ps.0570455>.
- Sibbald, I. R. 1979. Bioavailable Amino Acids and True Metabolizable Energy of Cereal Grains, *Poultry Science*. 58 (4): 934–939, <https://doi.org/10.3382/ps.0580934>

- Sibbald, I. R. 1982 a. Measurement of bioavailable energy in poultry feedingstuffs: a review. *Canadian Journal of Animal Science* 62(4): 983-1048.
- Sibbald, I. R. Wolynetz, M. S. 1984. A Longitudinal Study of Energy and Nitrogen Excretion by Fasted Cockerels, *Poultry Science*. 63(4): 691–702, <https://doi.org/10.3382/ps.0630691>
- Sibbald, I. R., Morse, P. M. 1983 d. Recent developments in the bioassay for true metabolizable energy in poultry feedingstuffs. Pages 239–242 in *Feed Information and Animal Production*. Robards, G. E. and Packham, R. G. eds. CAB. U.K.
- Sibbald, I. R., Morse. P. M. 1982 b. Pooling Excreta Prior to Calorimetry in the Bioassay for True Metabolizable Energy: The Effect on Estimates of Variance, *Poultry Science*. 61 (9):1853–1858. <https://doi.org/10.3382/ps.0611853>
- Sibbald, I. R., Summers, J. D., Slinger, S. J. 1960. Factors affecting the metabolizable energy content of poultry feed. *Poult. Sci.* 39(3): 544–556. <https://doi.org/10.3382/ps.0390544>
- Sibbald, I.R. 1975. The effect of level of feed intake on metabolizable energy values measured with adult roosters. *Poult Sci.* 54(6):1990-7.
- Sibbald, I.R. 1979 b. A bioassay for available amino acids and true metabolizable energy in feedingstuffs. *Poultry Science* 58(3): 1668.
- Sibbald, I.R. 1979. Passage of feed through the adult rooster. *Poultry Science* 58, 446-459.
- Sibbald, I.R., Slinger, S.J. 1963. The effects of breed, sex, an arsenical and nutrient density on the utilization of dietary energy. *Poultry Science*. 42: 1325-1332.
- Sibbald, I.R., Slinger, S.J. 1962. The metabolizable energy of materials fed to growing chicks. *Research notes. Poult. Sci.* 41: 1612-1614.
- Sibbald, I.R. 1979 a. The Effect of the Duration of the Excreta Collection Period on the True Metabolizable Energy Values of Feedingstuffs with Slow Rates of Passage, *Poultry Science*. 58(4):896-899, <https://doi.org/10.3382/ps.0580896>
- Sibbald, R Slinger, S. J. 1962. The Metabolizable Energy of Materials Fed to Growing Chicks. *Poultry Science*. 41 (5): 1612–1613. <https://doi.org/10.3382/ps.0411612>
- Sibbald, R. 1982. Measurement of bioavailable energy in poultry feedingstuffs: a review. *Canadian Journal of Animal Science* 62(4): 983-1048.
- Sibbald, R., Morse, P. M. 1983 a. The Effects of Feed Input and Excreta Collection Time on Estimates of Metabolic Plus Endogenous Energy Losses in the Bioassay for True Metabolizable Energy., *Poultry Science*. 62 (1): 68–76, <https://doi.org/10.3382/ps.0620068>
- Sibbald, R., Morse, P. M. 1983 C. Provision of Supplemental Feed and the Application of a Nitrogen Correction in Bioassays for True Metabolizable Energy, *Poultry Science*. 62(8): 1587–1605. <https://doi.org/10.3382/ps.0621587>

- Sibbald, R., Morse, P. M. 1983d. Recent developments in the bioassay for true metabolizable energy in poultry feedingstuffs. pp.239-242. in Feed Information and Animal Production. Robards, G. E. and Packham, R. G. eds. CAB. U.K.
- Sibbald, R., Morse, P. M.1983e. Provision of Supplemental Feed and the Application of a Nitrogen Correction in Bioassays for True Metabolizable Energy, *Poultry Science*, Volume 62, Issue 8, 1 August, Pages 1587–1605, <https://doi.org/10.3382/ps.0621587>
- Sibbald, I.R., Slinger, J., Ashton, G.C. 1961. Factors affecting the metabolizable energy content of poultry feeds. 4. The influence of calcium, phosphorus, antibiotic and pantothenic acid. *Poult. Sci.* 40: 945-951.
- Sibbald, I.R. 1975. The effect of level of feed intake on metabolizable energy values measured with adult roosters. *Poult Sci.* 54(6):1990-997. <https://doi.org/10.3382/ps.0541990>
- Siddons, R. C., Coates, M. E., 1972. The influence of the intestinal microflora on disaccharidase activities in the chick. *Br. J. Nutr.* 27:101-112.
- Simon, J., Rideau, N., Taouis, M., Dupont, J. 2011. Plasma insulin levels are rather similar in chicken and rat. *Gen. Comp. Endocrinol.* 171:267-268.
- Singh, D. N., Perez-Maldonado, R. 1999. Nutritional value of pearl millet as poultry feed. “Nutritional value of pearl millet for poultry” Project no. DAQ 243J. Ed. Rural Industries Research and Development Corporation.
- Singh, D.N. 2004. Evaluation of new millet varieties as a poultry feed ingredient. A report for the Rural Industries Research and Development Corporation. 04/173
- Singh, D.N., P.C. Trappett, T.A. Nagle and R. Perez-Maldonado, 2004. Digestibility of pearl millet in broiler diets. *Asia pac. J. Clin. Nutr.*, 13 (suppl): S90.
- Singh, S.D., Barsaul, C.S. 1976. Replacement of maize by coarse grains for growth production in White Leghorn and Rhode Island Red birds. *Indian J. Anim. Sci.*, 46(2): 96-99.
- Sinha, R., Lone, S.A., Ranjan, A., Rahim, A., Devi, I and Tiwari, S. 2017. The impact of climate change on livestock production and reproduction: ameliorative management. *International Journal of Livestock Research.*, 7(6): 1-8.
- Sinurat, A. P., Balnave, D., McDowell, G. H. 1987. Growth performance and concentrations of thyroid hormones and growth hormone in plasma of broilers at high temperatures. *Australian Journal of Biological Science.* 40: 443-450.
- Siriwan, P., Bryden, W.L., Anisson, E.F. 1989. Effect of dietary fiber and protein levels in endogenous protein secretions in chickens. *Proc. Nutr. Soc. Aust.* 14:143.
- Skiba, M., Wouessidjewe, D., Puisieux, F., Duchêne, D., A.Gulik, A. 1996. Characterization of amphiphilic  $\beta$ -cyclodextrin nanospheres. 142 (1):121-124. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(96\)04653-4](https://doi.org/10.1016/0378-5173(96)04653-4)

- Sklan, D., Hurwitz, S. 1980. Protein digestion and absorption in young chicks and turkeys. *J. Nutr.*110:139–144.
- Sklan, D., S. Hurwitz, P. Budowski, and I. Ascarelli. 1975. Fat digestion and absorption in chicks fed raw or heated soybean meal. *J. Nutr.* 105:57–63.
- Slominski, B. A., Campbell, L. D., Guenter, W. 1994. Oligosaccharides in canola meal and their effect on nonstarch polysaccharide digestibility and true metabolizable energy in poultry. *Poultry Science.* 73p.
- Smith A.J. 1992. L'élevage de la volaille. *ACCT. Ed. Paris : Maison neuve et la rose ; Wageningen : C.I.A. Vol. 1, 123p.*
- SMITH A.J., 1990. *The Poultry tropical agriculturalist.* CTA. - 218 p.
- Smith, A. J. 1997. *L'élevage de la volaille.* Paris: ACCT. éd. Maison neuve et Larousse; Wageningen: CTA.2 : 347p
- Smith, A.J. 1973. Some effects of high environmental temperatures on the productivity of laying hens (A review). *Trop Anim Health Prod.* 5(4): 259–271. <https://doi.org/10.1007/BF02240427>
- Smith, R. O., Teeter, R. G. 1987. Influence of feed intake and ambient temperature stress on the relative yield of broiler parts. *Nutrition Reports International* 35, 299-306.
- Smits, C. H., Veldman, A., Verstegen, M. W., Beynen, A. C. 1997. Dietary carboxymethylcellulose with high instead of low viscosity reduces macronutrient digestion in broiler chickens. *J. Nutr.* 127 (3):483-7. doi: 10.1093/jn/127.3.483. PMID: 9082034.
- Smits, C.H.M., Annison, G. 1996. Nons-starch plant polysaccharides in broiler nutrition-towards a physiologically valid approach to their determination. *World's Poultry Science Journal*, 52: 2013-222.
- Sohail, M.U., Hume, M.E., Byrd, J.A., Nisbet, D.J., Ijaz, A., Sohail, A., Shabbir, M.Z., Rehman, H. 2012. Effect of supplementation of prebiotic mannan-oligosaccharides and probiotic mixture on growth performance of broilers subjected to chronic heat stress. *Poult. Sci.*91: 2235–2240.
- Soleimani, A., Ksim, A., Alimon, A., Meimandipour, A., Zulkifi, I., 2010. Ileal endogenous amino acid flow of broiler chickens under high ambient temperature. *Journal of animal physiology and animal nutrition.* 94 (5) : 641-647.
- Sorensen, P., Chwalibog, A., Eggum, B.O.1983. Protein and energy metabolism in two lines chickens selected for growth on high or low protein diets. *Brit. Poult. Sci.* 24 : 237-250.
- Souci, S.W, Fachmann, W, Kraut, H. 2008. *Tables de composition et de nutrition des aliments.* In: Centre de recherche allemand sur la chimie des aliments (ed).Station de recherche allemande en chimie alimentaire. MedPharm Scienti. éditeurs, Stuttgart.
- Souilem. O., Gogny, M. 1994. Particularités de la physiologie digestive des volailles.7 : 525-537.- *Revue de la médecine vétérinaire. T. 145.*
- Souza, L., Espinha, L., Alves, E., Lunedo, R., Furlan, R., Macari, M. 2016. How heat stress (continuous or cyclical) interferes with nutrient digestibility, energy and nitrogen balances and performance in broilers. *Livestock Science.* 192. 39-43. [10.1016/j.livsci.2016.08.014](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.08.014).

- Stanley, D., M.S. Geier, S.E. Denman, V.R. Haring, T.M. Crowley, R.J. Hughes and R.J. Moore, 2013. Identification of chicken intestinal microbiota correlated with the efficiency of energy extraction from feed. *Vet. Microbiol.* 164: 85-92.
- Stevnebo, A., Sahlström, S., Svihus, B. 2006. Starch structure and degree of starch hydrolysis of small and large starch granules from barley varieties with varying amylose content. *Anim. Feed Sci. Technol.* 130: 23–38.
- Storey, M. L., Allen, N. K. 1982. Apparent and true metabolizable energy of feedstuffs for mature, nonlaying female Embden geese. *Poult. Sci.*, 61: 739-745. <http://dx.doi.org/10.3382/ps.0610739>
- Svihus, B. 2011. The gizzard: Function, influence of diet structure and effects on nutrient availability. *World's Poult. Sci. J.* 67:207–223.
- Svihus, B. 2014a. Function of the digestive system. *The Journal of Applied Poultry Research*, 23, 306-314.
- Svihus, B. 2014b. Starch digestion capacity of poultry. *Poult. Sci.* 93 (9):2394-2399. <https://doi.org/10.3382/ps.2014-03905>
- 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., Hetland, H., Choct, M., Sundby, F. 2002. Passage rate through the anterior digestive tract of growing broiler chickens fed diets with ground and whole wheat. *Br. Poult. Sci.* 43:662–668.
- Svihus, B., R. K. Newman, and C. W. Newman. 1997. Effect of soaking, germination, and enzyme treatment of whole barley on nutritional value and digestive tract parameters of broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 38: 390-396.
- Svihus, B., Uhlen, A. K., Harstad, O. M. 2005. Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch: A review. *Animal Feed Science and Technology*. 122: 303-320. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.02.025>.
- Tadele, Y., Negesse, T., Amha, N and K.R., Yadav K.R. 2018. Effect of Dietary Replacement of Maize with Finger Millet (*Eleusine coracana*) Grain on Production Performance and Egg Quality of White Leghorn Hens. *International Journal of Poultry Science*, 17: 40-50. <https://scialert.net/abstract/?doi=ijps.2018.40.50>
- Tahir, R., Ellis, P. R., Butterworth, P. J. 2010. The relation of physical properties of native starch granules to the kinetics of amylolysis catalysed by porcine pancreatic  $\alpha$ -amylase. *Carbohydrate Polymers*, 81, 57-62.
- Tanchoenrat, P., Ravindran, V., Zaefarian, F., Ravindran, G. 2014. Digestion of fat and fatty acids along the gastro intestinal tract of broiler chickens. *Poult. Sci.*, 93, 371-379. *Poultry Science*, Volume 93: 371–379. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03344>
- Tankson, J., Vizzier-Thaxton, J., May, J., Cameron, J. 2001. Stress and nutritional quality of broiler. *Poult. Sci.* 80 (9): 1384-1389. <http://www.innerbody.com/image/lympoy.html>

- Tasaki, I., Kushima, M. 1979. Heat production when single nutrients are given to fasted cockerels. Proc.8<sup>th</sup> EAAP. Symp. Energy metabolism. 25-256.
- Taylor, J.R.N, 2016. Pearl Millet: Overview. Encyclopedia of food grains. (*Second Edition*) (1)190-198.
- Taylor, J.R.N. 2016. Millet: Pearl. In Science direct. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.00011-1>
- Temim, S., A. Chagneau, M. R. Peresson, J. Michel, S. Guillaumin, and S. Tesseraud. 1998. Muscle protein turnover in broiler chickens: Effects of high ambient temperatures and dietary protein intake. *Reprod. Nutr. Dev.* 38:190.
- Temim, S., Bedrani, L., Aïn Baziz, H, Ghaoui, H., Kaddour, R., Boudina, H., Adjou, K., Collin, A., Tesseraud, S. 2009. Effet de l'acclimatation précoce sur les performances de croissance et la morphométrie intestinale des poulets de chair élevés en conditions estivales méditerranéennes. *European Journal of Scientific Research*, 38(1), 110-118.
- Temim, S., Chagneau, A. M., Guillaumin, S., Michel, J., Peresson, R, Geraert, P. A ., Tesseraud, S. 1999. Effects of chronic heat exposure and protein intake on growth performance, nitrogen retention and muscle development in broiler chickens. *Reproduction Nutrition Development* 39: 145-156.
- Ten Doeschate, R.A.H.M., Scheele, C.W., Schreurs VVAM & Van der Klis JD. (1993). Digestibility studies in broiler chickens: influence of genotype, age, sex and method of determination. *British Poultry Science* 34, 131-146.
- Terpstra, K., De Hart, N., 1974. The estimation of urinary nitrogen and faecal nitrogen in poultry excreta. *Z. Tierphysiol. Tierernaehr. Futtermittel.* 32 : 306-320.
- Tesseraud, S., Temim, S. 1999. Modifications métaboliques chez le poulet de chair en climat chaud : conséquences nutritionnelles. *INRA Productions Animales* 12 (5) : 353-363
- Tester, R. F., Karkalas, J., Qi, X. 2004. Starch—composition, fine structure and architecture. *J. Cereal Sci.*39:151–165.
- Thankson, J., Vizzier-Thaxton, Y., Thaxton, J., May, J., Cameron, J. 2001. Stress and nutritional quality of broilers. *Poult.Sci.* 80 (9): 1384-1389.
- Thomas, D.V., Ravindran, V., Ravindran, G. 2008. Nutrient digestibility and energy utilization of diets based on wheat, sorghum or maize by the newly hatched broiler chick. *Brit. Poultry Sci.* 49: 429-435.<https://doi.org/10.1080/00071660802213467>
- Titus, H.W., Fritz, J.C. 1971. Percentage multipliers for computing metabolizable energy values, for chickens, of some feedstuffs used in the feeding of poultry. In: *The scientific feeding of chickens*. 5<sup>th</sup> ed. Danville: Interstate: 295- 298.
- Torki, M., Mirzaee, M., Habibian, M. 2016. Effects of barley cultivar and dietary supplemental enzyme on performance, egg quality traits, and selected blood parameters of laying hens. *Poult. Sci.*4(1):1-12
- Tornekar, A. P., Munde, V. K and Kokane. S. S. 2009. Effect of replacing maize with Bajra (Pearl Millet) on the performance of broilers. *Vet. World.* (2) 8: 310-312.
- Toutain, P.L., Bousquet-Melou, A., Gayrard, V. 2006. La physiologie digestive chez les animaux domestiques. *Ecole Nationale Vétérinaire Toulouse*.184p.

- Tran G., 2015. Coques de mil. Feedipedia, un programme de l'INRAE, du Cirad, de l'AFZ et de la FAO. <https://www.feedipedia.org/node/15695>.
- Ushakumari, S.R., Shrikantan, L., Malleshi, N.G. 2004. The functional properties of popped, flaked, extruded and roller dried foxtail millet (*Setaria italica*). *International Journal of Food Science and Technology*. 39: 907-915.
- Vaculova, K., Balounova. M., Kvasnicka. F., Sedlackova. I., Ehrenbergerová. J., Václavíková. E., Pouch. M. 2012. Variability in Phytic Acid Content in Barley Grain. *KVASNY PRUM*.58 (4): 100-108
- Valancony, H.1997. Les mouens de lute contre le coup de chaleur. 2<sup>ème</sup> Journée de la recherche Avicole.153-160.
- Van Hung, P., Maeda, T., Morita, N. 2006. Waxy and high-amylose wheat starches and flours-characteristics, functionality and application. *Trends Food Sci Tech*. 17:448–456
- Vander Wielen, P.W.J.J., Biesterveld, S., Notermans, S., Hofstra, H., Urlings, B.A.P., Van Knapen, F 2000. Role of volatile fatty acids in development of the caecal microflora in broiler chickens during growth. *Appl. Environ. Microbiol*. 66: 2536-2540.
- Vermorel, M., 1978. Utilisation énergétique des produits terminaux de la digestion, chapitre 2, in « L'Alimentation des Ruminants », (Ed. R. Jarrige), 47-88, INRA publications, 78000 Versailles, (France). 621 p.
- Vermorel, M., Bernard, M. 1979. Intérêt agronomique et nutritionnel du Triticale. *Bull. Techn. C.R.Z. V. Theix –I.N.R.A.*, 36: 31-42.
- Veum, TL, Ledoux, DR, Shannon, MC, Raboy, V. 2009. Effect of graded levels of iron, zinc and copper supplementation in diets with low-phytate or normal barley on growth performance, bone characteristics, hematocrit volume, and zinc and copper balance of young swine1. *J. Ani. Sci*. 87: 2625-2634.
- Vieira, S.L., A.M. Penz, A.M. Kessler and E.V. Jr. Catellan, 1995. A nutritional evaluation of triticale in broiler diets. *J. Applied Poult. Res*. 4: 352-355.
- Vilarino, M, Cabon. G, Metayer, J.P, Skiba, F. 2010. Alimentation animale. Le sorgho grain français a des atouts. Perspectives agricoles - N°364. Pôle valeurs nutritionnelles — ARVALIS-Institut du végétale
- Vilarino, M, Skiba, F, Métayer, J-P, Gaüzere, J.M. 2005. Valeur nutritionnelle du triticale en comparaison au blé et performances de croissance en conditions d'élevage chez le poulet de chair. Sixièmes Journées de la Recherche Avicole, St Malo.168-172.
- Vilarino, M., J.-P, Skiba, F. 2011. Effet de la finesse de mouture du sorgho grain sur sa valeur nutritionnelle chez les volailles. Neuvièmes Journées de la Recherche Avicole, Tours, 29 et 30 mars 2011.

- Vilarino, M., Rudeaux, F., Leon, A., Picard M. 1996. Teneur en énergie métabolisable et digestibilité des acides aminés chez le coq de deux sous-produits de l'extraction de l'huile : tourteau de palmiste pressé (*Elaeis guineensis*) et germe et son de maïs extrait (*Zea mays*). *Revue Élev. Méd. vét. Pays trop.* 1996, 49 (3) : 229-234.
- Villate, D. 2001. L'appareil digestif. In : *Les maladies des volailles.*- Edition : INRA. pp 27-38.
- Vohra, P, Bersch. S, Qualset, C.O., Becker, R. 1991. Triticale: an alternative cereal grain in broiler starter diets. *California Agriculture*, September-October 1991.
- Wallis, I. R., Balnave, D. 1984. The influence of environmental temperature, age and sex on the digestibility of amino acids in growing broiler chickens. *British poultry science.*(25)401-407.
- Waniska, R.D., Rooney, L.W. 2000. Sorghum food and industrial utilization. In: Smith, C.W., Frederiksen RA, editors. *Sorghum: Origin, history, technology, and production.* Canada: John Wiley & Sons, Inc. p 689-729
- Wilson, E. K., F. W. Pierson, P. Y. Hester, R. L. Adams, and W. J. Stadelman, 1980. The effects of high environmental temperature on feed passage time and performance traits of White Peking ducks. *Poultry Sci.* 59:2322-2330.
- Wilson, K. J., Bayer, R. S. 2000. *Poultry Nutrition Information for Small Flocks.* <http://www.oznet.ksu.edu/library/lvstk2/ep80.pdf>
- Wilson., B.J., McNab, J.M. 1975. The nutritive value of triticale and rye in broiler diets containing field beans (*vicia Faba L.*).*Br. Poult. Sci.*, 16 (1975), pp. 17-22
- Wiseman, J. 2006. High energy diets for poultry – effects of diet composition on performance and carcass quality. In J. Wiseman & P.C. Garnsworthy, eds. *Recent developments in non-ruminant nutrition.* pp. 193-212. Nottingham, UK, Nottingham University Press
- Wiseman, J., 1984. Assessment of the digestible and metabolizable energy of fats for non-ruminants. *In: Wiseman J. (ed), Fats in Animal Nutrition: 277-297.* Butterworth, Nottingham (UK).
- Wiseman. J., and Salvador, F. 1991. The influence of free fatty acid content and degree of saturation on the apparent metabolizable energy value of fats fed to broilers. *Poult. Sci.* 70:573-582.
- Wu, Y. B., Ravindran V. Hendriks, W.H. 2002. Influence of sex on nutrient utilization in broilers fed diets with low or adequate dietary phosphorus levels. *Pro.Aust. Poult. Sci. Sym.*14. 2002.
- Xia, X. J., Li, G. N., Liao, F. R., Zhang, F. S., Zheng, J., & Kan, J. Q. 2015. Granular structure and physicochemical properties of starches from amaranth grain. *International Journal of Food Properties*, 18(5), 1029- 1037. <http://dx.doi.org/10.1080/10942912.2013.860168>.
- Yadav, O.P., Rai, KN., Yadav, H.P. 2016. Assessment of Diversity in Commercial Hybrids of Pearl Millet in India. *Indian Journal of Plant Genetic Resources* 29(2) :130
- Yaici, D. 1992 : Etude de la valeur nutritionnelle de 3 farines de sous-produits de volaille : Energie métabolisable et digestibilité des protéines. Mémoire d'ingénieur agronome, INA Alger 83p

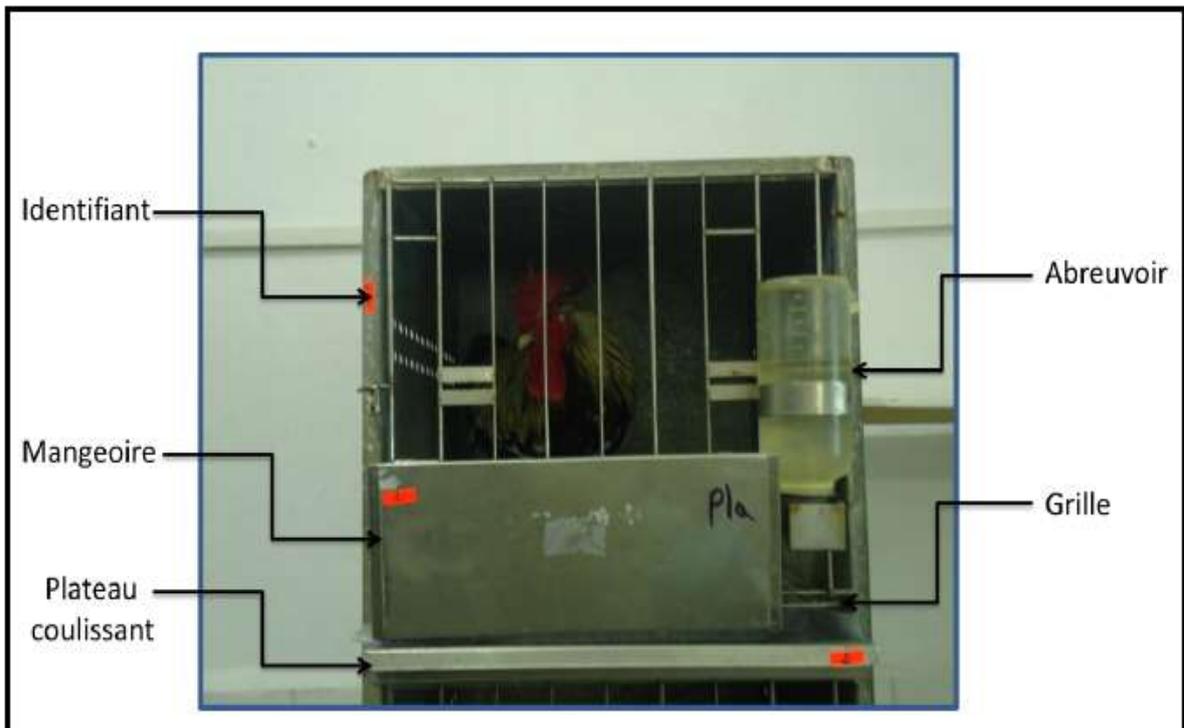
- Yalcin, S., Ozkan, S., Turkmuy, L., Siegel, P. 2001. Responses to heat stress in commercial and local broiler stocks.1. Performance traits. *Brit. Poult. Sci.* 42 (2): 149-152.
- Yamazaki, M., Zhanc, Z.I-Y.I. 1982 A note on the effect of temperature on true and apparent metabolizable energy values of a laver diet. *British Poultry Science* 23: 447-450.
- Yasothai, R. 2017. Importance of gut microflora in poultry. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 6(1): 549 – 552.
- Yokota, H., Coates, M.E. 1982. The uptake of nutrients from the small intestine of notobiotic and conventional chicks. *Br. J. Nutr.* 47 : 349-356.
- Yunis, R., Cahaner, A. 1999. The effects of the naked neck (Na) and frizzle (F) genes on growth and meat yield of broilers and their interactions with ambient temperatures and potential growth rate. *Poult; Sci.* 78 (10): 1347-1352.
- Zaefarian, F., Abdollahiv, M., Ravindran, R. 2015. Starch digestion in broiler chickens fed cereal diets. Institute of Veterinary, Animal and Biomedical Sciences, Massey University, Private Bag 11 222, Palmerston North 4442, New Zealand. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.07.020>
- Zelenka, J. 1968. Influence of the age of chicken on the metabolizable energy values of poultry diets. *Br. Poult. Sci.* 9: 135-142.
- Zelenka1, J., Cersnakova, Z. 2005. Effect of age on digestibility of starch in chickens with different growth rate. *Czech J. Anim. Sci.*, 50, (9): 411–415.
- Zerbo, L.H. 2012. Effets du maïs grain entier ou broyé en alimentation séquentielle ou mélangée sur les performances de croissance des poulets de chair au Sénégal (période chaude). Thèse d'état. Med Vet. pp93.
- Zetrouni, A. 2012. Analyse de la situation de l'élevage du poulet en conditions chaudes : cas de la commune de Bordj Menaiel. Thèse de master en Sciences techniques des productions animales ENSA Alger (Algérie) 91p.
- Zhang, B., Dhital, S. & Gidley, M. J. 2013. Synergistic and antagonistic effects of  $\alpha$ -amylase and amyloglucosidase on starch digestion. *Biomacromolecules*. 14: 1945-1954.
- Zhang, B., Dhital, S., Gidley, M. J. 2013. Synergistic and antagonistic effects of  $\alpha$ -amylase and amyloglucosidase on starch digestion. *Biomacromolecules*, 14, 1945-1954.
- Zhang, B., Dhital, S., Gidley, M. J. 2015. Densely packed matrices as rate determining features in starch hydrolysis. *Trends in Food Science & Technology*. 43: 18-31.
- Zhang, J., Luo, K., Zhang, G. 2017. Impact of native form oat  $\beta$ -glucan on starch digestion and postprandial glycemia. 73: 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.11.013>
- Zitari, S. 2008. Etude des valeurs nutritives de certaines ressources alimentaires locales-utilisées dans l'alimentation des animaux. Mémoire en ligne. Université de sousse-Master 2008.
- Zuprizal, M., M. Larbier, A.M. Chagneau, 1992: Effect of age and sex on true digestibility of amino acids of rapeseed and soybean meals in growing broilers. *Poult. Sci.* 71, 1486-1492.

# **ANNEXES**

## Annexe 1 : Vue d'ensemble des cages à métabolisme



## Annexe 2 : Cage à métabolisme individuelle



### Annexe 3 : Composition du prémix minéral et vitaminique

Vitamines	Teneur	Oligo-éléments (mg/kg)	Teneur (mg/kg)
A (UI)	1018000	Fer	760
D3 (UI)	202920	Cuivre	760
E (mg/kg)	1520	Zinc	450
B1 (mg/kg)	205	Manganèse	7290
K3 (mg/kg)	300	Iode	98
B2 (mg/kg)	418	Cobalt	91
Pantothénate de calcium (mg/kg)	805	Sélénium	5,70
B6 (mg/kg)	98	Magnésium	1210
B12 (mg/kg)	2	Nacl	25,6
Vitamine PP (mg/kg)	2530	/	
Acide folique (mg/kg)	53		
Chlorure choline (mg/kg)	50000		

Le prémix renferme également 150 000UI de DL Méthionine et 40 000 mg/kg d'Anti coccidien sacox.

### Annexe 4 : La méthode SPIR

#### ➤ Définition

La spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) est une technique analytique basée sur le principe d'absorption des rayonnements (infrarouges) par la matière organique. L'absorption de la composition chimique de l'échantillon. Ce dernier est estimé à partir du degré d'absorption de lumière par l'échantillon.

Cette mesure se fait avec un spectromètre soit en « transmission » (on mesure la lumière traversant un échantillon fin), soit en « réflexion » (on mesure la lumière réfléchiée par un échantillon épais).

L'étalonnage basé sur des mesures de référence obtenues au laboratoire (composition chimique, valeur alimentaire, etc.) et l'établissement de modèles mathématiques sont nécessaires.

#### ➤ Principe

L'infrarouge est défini comme étant le rayonnement correspondant aux longueurs d'onde directement supérieures à celles du spectre de la lumière visible, conventionnellement les limites du proche infrarouge se situent entre 800 et 2500 nm.

L'absorption des rayonnements par les échantillons dépend de la composition de la matière organique. En effet les liaisons chimiques sont capables d'absorber les rayonnements correspondant à certaines fréquences particulières. Cette propriété est à la base établie entre l'absorption de la lumière et la composition de l'échantillon.

L'échantillon est soumis à différentes fréquences (ou longueurs d'onde), il en résulte différents niveaux d'absorption qui permettent d'établir un spectre (Figure 1 en exemple). L'absorption de la lumière à chacune de ces longueurs d'onde constitue le « spectre » de l'échantillon.

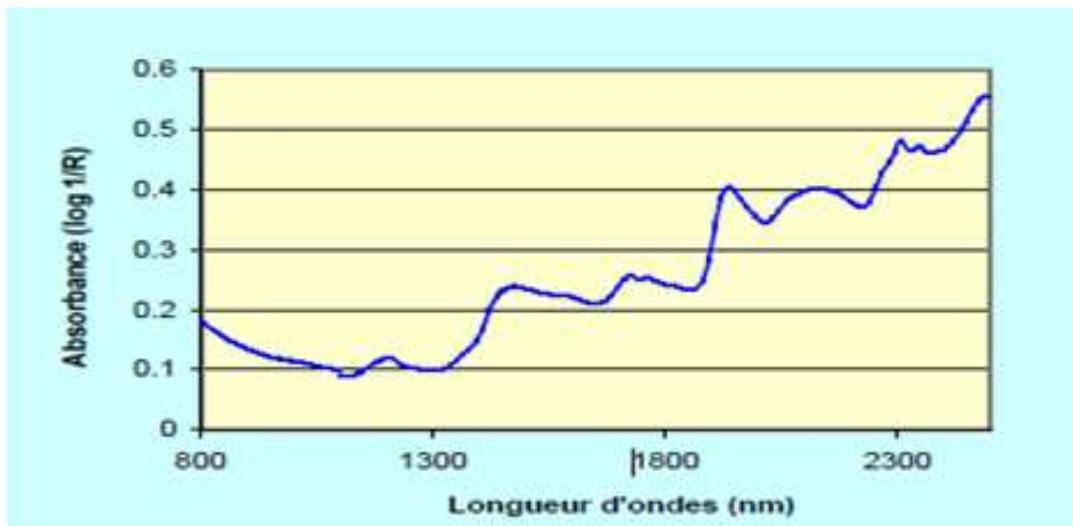


Figure 1 : Exemple de spectre d'absorption (aliment pour volaille)

## Annexe 5 : Analyse de l'amidon par voie enzymatique

(Méthode de l'amyloglucosidase/DMSO/G6PDH)

### Réactifs et produits

- 1.1. Hydroxyde de potassium (KOH), en pastilles
- 1.2. Acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) 96 % minimum
- 1.3. Kit de dosage du glucose avec hexokinase prêt à l'emploi contenant :
  - 3 flacons de NADP
  - 3 flacons d'enzyme
  - 1 flacon de D-Glucose de concentration 0.5g /L
- 1.4. Amyloglucosidase d'*Aspergillus niger* SIGMA 10115

L'activité de l'enzyme Amyloglucosidase est mesurée comme indiqué dans annexe 5.1 à réception du lot.

## **Solutions**

1.5. Hydroxyde de potassium à 1 mol/L

1.6. Solution aqueuse d'amyloglucosidase (Titration :  $1500 \pm 100$  Unités/mL)

1.7. Solution de NADP

Ajouter dans le flacon 45 ml d'eau désionisée puis agiter et laisser reposer environ 1h avant utilisation (La solution se conserve 1 mois au réfrigérateur).

## **Appareillage**

1.8. Agitateur magnétique multi-postes

1.9. Balance analytique de sensibilité  $10^{-4}$

1.10. Bain-marie à agitation magnétique, réglé sur  $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$

1.11. Bêchers forme haute 150 ml avec bec

1.12. Bêchers forme haute 150 ml sans bec

1.13. Broyeur muni d'une grille à 0,5 mm

1.14. Spectrophotomètre UV/visible réglé à 340 nm

1.15. pH-mètre

1.16. Pipettes automatiques : PIP 70 (1000  $\mu\text{L}$ ), PIP37 (20 $\mu\text{L}$ ), PIP17 (100  $\mu\text{L}$ ), PIP2 (5000  $\mu\text{L}$ )

1.17. Cuves PMMA de dimensions 12.5x12.5x45mm

1.18. Entonnoirs

1.19. Colliers de plomb

1.20. Barreaux aimantés

1.21. Chronomètre

1.22. Bac à glace

1.23. Filtres plissés

1.24. Fioles jaugées de 250 ml

## **Mode opératoire**

### **1.25. Préparation de l'échantillon**

Les échantillons doivent être broyés à 0,5 mm. Un dégraissage préalable est recommandé pour les produits dont la teneur en matières grasses est supérieure à 5 %.

### **1.26. Prise d'essai**

La prise d'essai (Pe) est calculée de façon à contenir  $100 \pm 20$  mg d'amidon et ne doit pas dépasser 2,5 g pour assurer une bonne dispersion de l'échantillon.

Dans le cas des fientes, un premier essai permettra d'ajuster la prise d'essai.

- Peser la prise d'essai à 1 mg près dans des béchers.

### **4.3. Dispersion et hydrolyse**

Dans chaque série, on inclura un blanc échantillon afin de prendre en compte le glucose issu de la solution d'enzyme.

Dans tous les béchers, (y compris le blanc échantillon)

- Mettre un barreau aimanté ;
- Ajouter 25 ml d'eau désionisée ;
- Ajouter 25 ml de KO ;
- Agiter 20 min à température ambiante (plus si nécessaire) ;
- Placer au bain-marie à 60°C, sous agitation constante pendant 30 min ;
- Refroidir dans un bain d'eau froide ;
- Ajuster le pH à 4.6 – 4.8 avec de l'acide acétique en contrôlant à l'aide du pH-mètre.
- Replacer les béchers au bain-marie à 60°C et y ajouter 1 ml de préparation enzymatique (2.2)
- Laisser sous agitation constante pendant 30 min ;
- Refroidir dans un bain d'eau froide ;
- Transvaser en fioles de 250 ml et compléter au trait de jauge avec de l'eau désionisée ;
- Bien agiter et filtrer sur des béchers.

## 1.27. Dosage du glucose

Tous les réactifs utilisés pour le dosage doivent être à température ambiante.

Un contrôle de la concentration de la solution de glucose du kit est effectué lors de chaque dosage. La lecture au spectrophotomètre se fait contre l'eau.

	Validation du kit		Dosage des échantillons	
	Glucose	Blanc Glucose	Echantillon	Blanc Echantillon
<b>NADP</b>	1 mL	1 mL	1 mL	1 mL
<b>H<sub>2</sub>O</b>	1.90 mL	2 mL	1.90 mL	1.90 mL
<b>Glucose</b>	100 µL			
<b>Echantillon</b>			100 µL	100µ
	<u>Boucher, agiter, et attendre environ 3 min avant la lecture au spectrophotomètre (A1)</u>			
<b>Lecture A1</b>	A1 Glucose	A1 blanc Glucose	A1 Echant.	A1 Blanc Echantillon
<b>Enzyme</b>	20 µL	20 µL	20 µL	20µL
	<u>Boucher, agiter, et attendre environ 15 min avant la lecture au spectrophotomètre (A2)</u>			
<b>Lecture A2</b>	A2 Glucose	A2 blanc- Glucose	A2 Echant.	A2 Blanc Echantillon

## 5. Calculs

### 5.1. Teneur en glucose de la solution de glucose du kit en g/L: $G_{\text{glucose}}$

$$\square A_{\text{glucose}} = (A2_{\text{glucose}} - A1_{\text{glucose}})$$

$$\square A_{\text{blanc glucose}} = (A2_{\text{blanc glucose}} - A1_{\text{blanc glucose}})$$

$$\square A = (\square \square A_{\text{glucose}} - \square \square A_{\text{blanc glucose}})$$

$$G_{\text{glucose}} = V \times M \times \square A / d \times \varepsilon \times v \times 1000$$

$$G_{\text{glucose}} = 0,863 \times \square A$$

**Remarque :** La concentration de la solution de glucose mesurée doit être égale à  $0,5\text{g/l} \pm 0,05$  afin de valider l'utilisation du kit.

### 5.2. Teneur en glucose de l'échantillon en g/L : $G_{\text{échantillon}}$

$$\square A_{\text{éch}} = (A2_{\text{éch}} - A1_{\text{éch}})$$

$$\square A_{\text{blanc éch}} = (A2_{\text{blanc éch}} - A1_{\text{blanc éch}})$$

$$\square A = (\square A \text{ éch} - \square A \text{ blanc éch})$$

$$G_{\text{échantillon}} = V \times M \times \square A / d \times \varepsilon \times v \times 1000$$

$$G_{\text{échantillon}} = 0,863 \times \square A$$

### 5.3. Teneur en amidon de l'échantillon en % de MS

$$\text{Amidon en \% MS} = (G_{\text{échantillon}} \times 250 \times D \times 0,9) / (10 \times Pe) = 0,863 \times \square A \times 250 \times 0,9 \times D / (10 \times Pe)$$

$$\text{Amidon en \% MS} = \Delta A \times 19,42 \times D / Pe \times 100 / MS$$

Où :

$$\Delta A = \Delta A_{\text{échantillon}} - \Delta A_{\text{blanc échantillon}}$$

**0,9** : Facteur de conversion du glucose en amidon

**D** : Facteur de dilution éventuel à appliquer

**Pe** : Prise d'essai (échantillon), en gramme

**G<sub>échant</sub>** : Teneur en glucose de l'échantillon en g/L

**MS** : Matière sèche en %

**V** : Volume final du test : 3,02

Dont :

- Volume de NADP/ATP = 1 ml

- Volume d'eau = 1,90mL

- Volume d'échantillon : 0,1 ml

- Volume d'enzyme : 0,02 ml

**M** : Masse molaire du Glucose 180,16

**ε** : Coefficient d'absorption du NADP à 340 nm : 6, 3

**d** : Longueur du trajet optique dans la cuve 1cm

**v** : Volume de l'échantillon 0,1 ml.

#### 5.4. Expression des résultats

Lorsque la détermination de la teneur en amidon est effectuée en double, la moyenne arithmétique des 2 résultats est calculée si les conditions de fidélités sont remplies. Exprimer le résultat en 0.1%.

#### 5.5. Fidélité

La différence entre les résultats de deux déterminations parallèles effectuées sur un même échantillon ne doit pas dépasser la limite de répétabilité qui est fonction de la teneur en amidon.

Limite de répétabilité =  $(0,0106 x + 0,0613) \times 2,77$

Où x : Teneur en amidon

#### Annexe 5.1 : Mesure de l'activité de l'amyloglucosidase

La mesure de l'activité de l'amyloglucosidase est nécessaire à la préparation de la solution aqueuse. Elle est réalisée à chaque réception d'un nouveau lot d'enzyme.

##### ➤ Produits complémentaires et spécifiques à cette annexe

- Acétate de sodium trihydraté ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ , 3  $\text{H}_2\text{O}$ ).
- Amidon soluble ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ ) n.
- Hydroxyde de sodium (NaOH à 0,1N).

Préparation des réactifs

Solution Tampon pH 4,6 - 4,8

Dissoudre 8,8 g d'acétate de sodium trihydraté dans environ 80 ml d'eau désionisée.

Ajuster le pH à 4,6 - 4,8 avec de l'acide acétique.

Transvaser dans une fiole de 100 ml et ajuster au trait de jauge.

Remarque : Cette solution peut être conservée une semaine au réfrigérateur.

Solution d'amidon

Peser 1,6 g d'amidon dans un bécher de 25 ml. Mettre en suspension à l'aide de 10 ml d'eau désionisée ;

Transférer, à l'aide d'eau désionisée dans un bécher de 250 ml contenant déjà 50 ml d'eau bouillante ;

Porter à ébullition exactement 2 min (comptées à partir du moment où de grosses bulles apparaissent à la surface du liquide). On pourra couvrir d'un verre de montre pour faciliter l'ébullition ;

Refroidir rapidement sous l'eau froide ;

Ajouter 2 ml de tampon 4,6 - 4,8 ;

Transférer dans une fiole jaugée de 100 ml et compléter avec de l'eau désionisée ;

Mélanger.

Remarque : Solution à préparer à chaque mesure de l'activité de l'enzyme

✓ **Solution enzymatique**

- Peser 0,18 g d'enzyme à 0,1 mg près dans un sabot de pesée ;
- Transvaser dans une fiole jaugée de 100 ml et ajuster à 100 ml avec de l'eau désionisée ;
- Effectuer une dilution au 1/250<sup>ème</sup> de cette solution ;

✓ **Solution d'hydroxyde de sodium 0,005 N**

On pourra utiliser une solution titrée à 0,1 N diluée 20 fois.

Remarque : Solution à préparer à chaque mesure de l'activité de l'enzyme.

➤ **Déroulement des essais**

- Mettre le bain-marie sous agitation ;

	Tubes de l'enzyme à tester		Tube des blancs	
	Tube A	Tube B	Tub	Tube B'
<b>Solution d'amidon</b>	2 ml	2ml	2 ml	2 ml
	Placer 5 min au bain-marie (pour amener la solution à 60°C)		Ne pas mettre au Bain Marie	
<b>Solution enzymatique</b> (à rajouter sans sortir les tubes du bain-marie)	2 ml	2ml/minute après le tube A	2 ml	2ml/minute après le tube A'
	Laisser agir chaque tube <b>exactement</b> 15 min - Sortir le tube du bain-marie		Ajouter la solution de NaOH immédiatement	
<b>Solution d'hydroxyde de sodium</b>	20 ml	20 ml/minute après	20	20 ml
	Agiter et laisser refroidir		Agiter	

-Réaliser la mesure de l'activité en double en préparant les essais et un blanc comme suit :

- Effectuer le dosage du glucose dans l'heure en utilisant la méthode décrite en 4. 4
- Calculer les concentrations comme indiqué en 5.2

➤ **Calcul de l'activité et expression des résultats**

- Activité en  $\mu\text{mol}$  de glucose / min / g d'enzyme ou unités / g d'enzyme :

$$\frac{(G - G') \times 1000 \times 100 \times d \times 24}{Pe \times 1 \times 2 \times 15 \times 180 \times 10^6 \times 10^6}$$

$$\frac{(G - G') \times 444.4 \times d}{Pe \times 1000}$$

Activité en U/mg :

Activité enzymatique  $\frac{(G - G') \times 444,4 \times d}{Pe \times 1000}$

Remarque: Dans le cas où la valeur trouvée est au-delà de la limite supérieure de spécification communiquée par le fournisseur sur le certificat d'analyse, procéder à une nouvelle mesure de l'activité comme décrit précédemment, afin de s'assurer que la quantité d'enzyme à apporter pour constituer la solution aqueuse ne sera pas insuffisante.

Conditionnement de l'enzyme :

Après mesure de l'activité, le contenu du flacon d'enzyme est divisé en "sous lot" dans des tubes bouchés et conservé au réfrigérateur. La valeur de l'activité est indiquée sur chacun des tubes.

**Annexe 6 : Méthode d'analyse de l'acide urique (Marquardt *et al.*, 1983)**

**1. Réactifs**

- 1.1 Glycine (  $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH}$ )
- 1.2 Acide urique (  $\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$ )
- 1.4 Acide perchlorique 70%
- 1.4 Hydroxyde de sodium (NaOH 10 N)
- 1.5 Hydroxyde de sodium (NaOH 0,1N)

## **2. Préparation des solutions**

### **2.1 Acide perchlorique (PCA 70 %)**

### **2.2 Tampon glycine 0,1M, pH 9,3**

Peser 7,507 g de glycine (1.1) et les dissoudre avec environ 800 ml dans un bécher de 1L. Amener le pH de la solution vers 9 avec de la soude 10 N (1.4), puis ajuster précisément à pH 9,3 avec de la soude 0,1 N (1.5). Transvaser alors la solution dans une fiole jaugée de 1L, rincer le bécher et compléter au trait de jauge.

### **2.3 Solution standard d'acide urique 3 mM**

Peser 25,2 mg d'acide urique (1.2) directement dans une fiole jaugée de 50 ml. Dissoudre complètement avec du tampon glycine (2.2) et compléter au trait de jauge. Cette solution est stable 7 jours.

### **2.4 Acide perchlorique (PCA 5,35 %)**

Introduire 19 ml de PCA 70 % (2.1) mesurés avec une pipette graduée, dans une fiole jaugée de 250 ml. Compléter avec de l'eau au trait de jauge.

## **3. Appareillage**

- 3.1 Fiole jaugée de 20 ml
- 3.2 Dispensette 50 ml
- 3.3 Bêchers 150 ml sans bec
- 3.3 Barreaux aimantés
- 3.4 Pipettes jaugées de 3, 6 et 9 ml
- 3.5 Plaque agitateur 15 postes submersible
- 3.6 Bain marie à 40 °C
- 3.7 Spectrophotomètre UV
- 3.8 Tubes à hémolyse 10 ml
- 3.9 Cuves de spectrophotométrie en PMMA

## **4. Mode opératoire**

### **4.1 Préparation de la gamme étalon**

A partir de la solution mère d'acide urique 3 mM (2.3), préparer dans des fioles jaugées de 20 ml différentes solutions diluées suivant le tableau ci-dessous. Recalculer en fonction de la quantité d'acide urique réellement pesée la concentration obtenue.

Volume solution mère (ml)	0	3	6	9	12
Eau (ml)	20	17	14	11	8
Concentration acide urique (mg/ml)	0	0,076	0,151	0,227	0,302

#### 4.2 Mise en solution

- Préchauffer le bain-marie à 40 °C, et y introduire la plaque agitateur 15 postes immersible.
- Peser 100 mg de fèces broyés à 0,5 mm directement dans un erlen ou un bécher sans bec de 150 ml. Introduire un barreau aimanté.
- A l'aide d'une dispensette ajouter 100 ml (volume d'extraction) de tampon glycine (2.2). Recouvrir d'un parafilm.
- Lester les erlens avec un collier de plomb et les mettre au bain-marie à 40 °C pendant une heure, sous agitation.
- Sortir les erlens, après refroidissement, centrifuger un aliquote dans un tube de 5 ou 10 ml à 2000 trs/min, pendant 5 minutes.

#### 4.3 Réaction

- Dans un tube de 10 ml, introduire 0,3 ml de surnageant ou de solution d'acide urique diluée, et ajouter 4,2 ml de PCA 5,35 % (2.4). Agiter et centrifuger à 2000 trs/min pendant 15 minutes.
- Lire la DO à 285 nm dans des cuves PMMA, contre le blanc (mélange 0,3 ml d'eau – 4,2 ml PCA 5,35%).

## **Annexe 7 : Détermination de la valeur calorifique brute par combustion en la bombe calorimétrique**

### **1 Objet et domaine d'application**

Le protocole suivant décrit la méthode de la détermination de la valeur calorifique brute ou énergie brute pour les aliments pour animaux et les excréments.

### **2 Principe**

Elle est basée sur la combustion d'une prise d'essai de l'échantillon sous oxygène dans une bombe calorimétrique. La valeur calorifique brute est calculée à partir de l'augmentation de la température de l'eau contenue dans le calorimètre et de la capacité calorifique réelle moyenne du calorimètre.

### **3 Réactifs**

- 3.1 Oxygène chimique 3.5: La bouteille doit être à une pression capable de remplir la bombe jusqu'à 30 bar.
- 3.2 Fil en coton
- 3.3 Acide benzoïque en pastilles (0.5 g / pastille)

### **4 Appareillage**

- 4.1 Calorimètre IKA C2000 (Figure 1)
- 4.2 Bombe calorimétrique (Figure 2)
- 4.3 Presse à pastiller
- 4.4 Creuset en nickel-chrome (Figure 3)

### **5 Mode opératoire**

#### **5.1. Détermination de la capacité calorifique réelle moyenne du calorimètre**

La capacité calorifique réelle moyenne du calorimètre est déterminée par la combustion sous oxygène d'une masse connue d'acide benzoïque (3.3) ayant une valeur calorifique certifiée.

Réaliser au moins 5 déterminations comme décrit au paragraphe 5.2, en remplaçant la prise d'essai de l'échantillon, par 2 pastilles d'acide benzoïque (3.3), soit environ 1 g (peser au mg près).

Faire la moyenne des résultats des essais à condition que la variation entre les essais ne dépasse pas 55 J / °K.

## 5.2. Prise d'essai

- Pastiller environ 1 à 2 g de l'échantillon broyé à 0,5 mm. Peser au mg près la pastille dans le creuset. La prise d'essai doit correspondre à une augmentation de température, lors de la combustion, comprise entre 2 et 3 °K.
- Disposer le creuset sur le porte-creuset de la bombe.
- Fixer au centre du fil d'ignition, un fil de coton en faisant une boucle (Figure 4) et faire en sorte que les extrémités du fil de coton soient en contact avec l'échantillon.
- Mettre le calorimètre sous tension, penser à ouvrir l'alimentation en eau.
- Fermer la bombe et la mettre en place dans le calorimètre.



Figure 1 : Calorimètre



Figure 2 : Bombe calorimètre



Figure 3 : Creuset en nickel-chrome

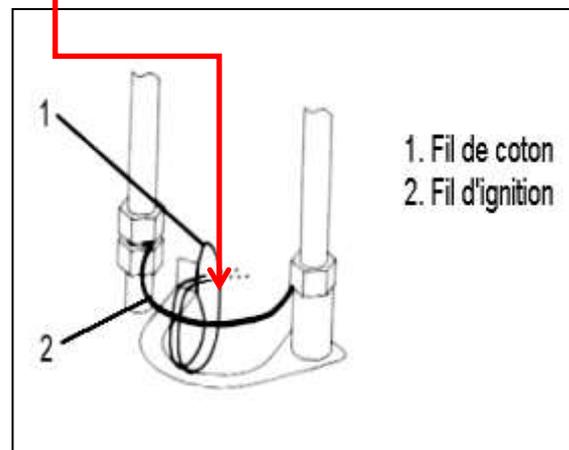


Figure 4 : Mise en place du fil de coton sur le support porte-creuset

Lors de la mise en route, le système démarre par une série d'autotest et vérifie que la température du circuit d'eau soit conforme au mode de fonctionnement choisi. A la fin des tests le système se met en attente (Figure 5).

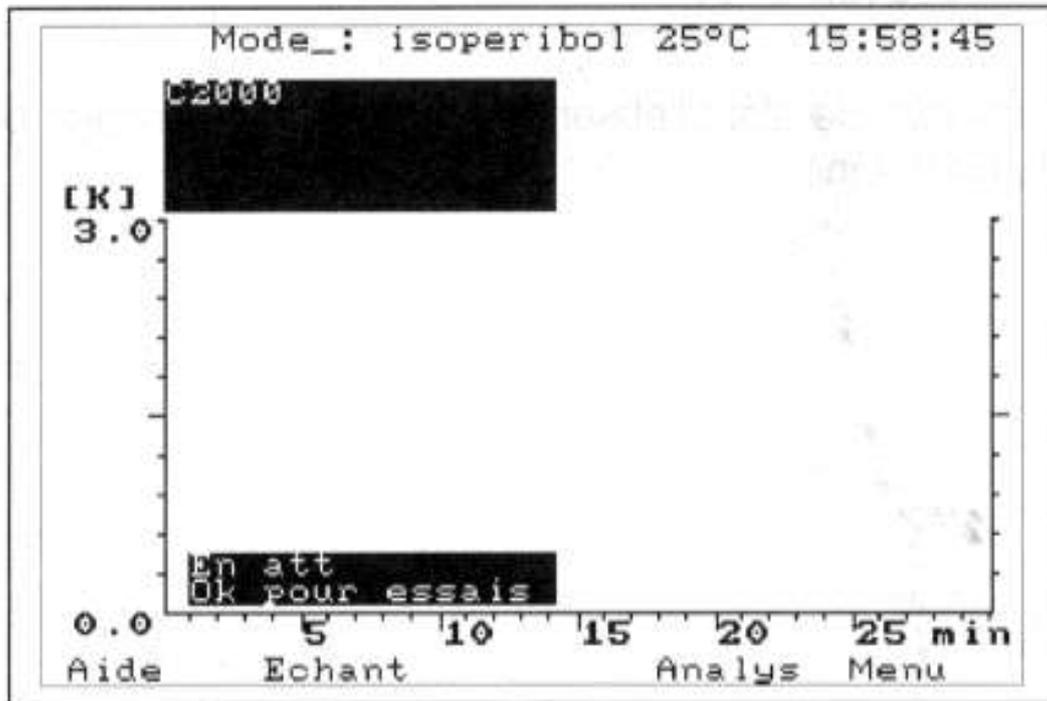


Figure 5 : Ecran d'attente pour essai.

- Ouvrir la fenêtre de dialogue «Echant » pour accéder aux champs de saisie des paramètres de l'analyse (Figure 6) ;
- Taper la touche Tab pour changer de champs ;
- Entrer dans le champ Pesée le poids de l'échantillon en gramme ;
- Mettre dans le champ Caract. éch. Le numéro EMVT de l'échantillon ;
- Taper les initiales de l'opérateur dans le champ « Opérateur » ;
- Valider la case Etalonnage dans le cas d'une détermination de la capacité réelle du calorimètre à l'acide benzoïque ;
- Valider la saisie en appuyant sur la touche OK. Appuyer sur la touche Start pour démarrer l'essai ;
- Une fois le tir terminé, retirer la bombe, libérer la pression et la démonter ;
- Examiner l'intérieur, vérifier que tout l'échantillon soit brûlé et qu'il n'y ait pas de présence de suie ;

- Nettoyer et sécher avec du papier absorbant avant un nouvel essai.

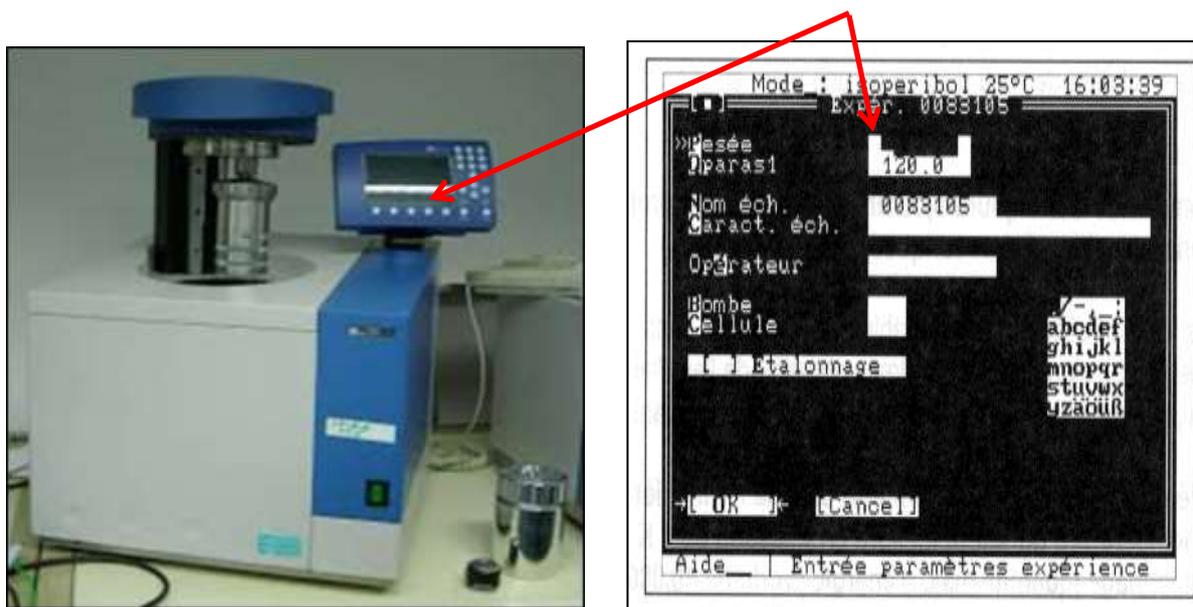


Figure 6 : Fenêtre de dialogue Echantillon.

## Annexe 8 : Estimation de l'azote fécal par la méthode – TERPSTRA *et al.* (1976)

### 1 Principe

Cette procédure décrit le dosage et l'estimation de l'azote fécal indigestible. Elle s'applique aux fientes de volailles.

L'acide urique provenant de l'urine est dissout dans une solution de formaldéhyde à pH 4,7. Les protéines indigestibles sont précipitées à l'acétate de plomb et à l'éthanol. L'azote du précipité est dosé.

L'azote fécal est estimé en tenant compte du fait que la totalité des protéines n'est pas précipité et du fait qu'une partie de l'azote du précipité provient de l'azote urinaire.

### 2 Réactifs

- 2.1 Acétate de sodium ( $C_2H_3NaO_2, 3H_2O$ )
- 2.2 Acétate de plomb II ( $C_4H_6O_4Pb, 3H_2O$ )
- 2.3 Acide acétique glacial ( $C_2H_4O_2$ )
- 2.4 Ethanol 95 °( $C_2H_6O$ )
- 2.5 Formaldéhyde 40% ( $CH_2O$ ).

### **3 Préparation des solutions**

#### **3.1 Solution 1 : Formol à pH = 4,7**

Dans un bécher de 2 l, dissoudre complètement 27,2 g d'acétate de sodium (2.1) avec 1,5 l d'eau. Ajuster le pH de la solution à 4,7 avec de l'acide acétique (2.3) (environ 11,5 ml). Ajouter 88 ml de formol à 40 % (2.5) (produit toxique, opérer sous hotte). Transvaser dans une fiole jaugée de 2 litres et compléter avec de l'eau.

#### **3.2 Solution 2 : Solution d'acétate de plomb**

Dans un bécher d'1 litre, dissoudre 100 g d'acétate de plomb (2.2) avec environ 0,5 l d'eau. Ajuster le pH de la solution à 4,7 avec de l'acide acétique (2.3) (environ 4 ml). Ajouter 44 ml de formol 40 % (2.5) (produit toxique, opérer sous hotte). Transvaser dans une fiole jaugée de 1 litre et compléter avec de l'eau.

#### **3.3 Solution 3 : Solution éthanolique**

Verser 88 ml de formol à 40 % (2.5) dans une fiole de 2 l. Compléter avec de l'éthanol à 95° (2.4).

#### **3.4 Solution 4**

Verser dans un erlen 500 ml de solution 1 (3.1), 100 ml de solution 2 (3.2) et 500 ml de solution 3 (3.3).

### **4 Appareillage**

- 4.1 Matras de 250 ml, Ø 40 mm, munis d'un bouchon laissant passer l'air <sup>1</sup>
- 4.2 Filtres papier Whatman 41, Ø 12,5 cm
- 4.3 Fiole de filtration placée sous hotte
- 4.4 Büchner en porcelaine
- 4.5 Billes de verre (pour réguler l'ébullition)
- 4.6 Dispensette 50 ml et 25 ml
- 4.7 Béchers 50 ml
- 4.8 Pipette graduée 20 ml, munie d'une poire
- 4.9 Bloc chauffant de 12 places
- 4.10 Vortex
- 4.11 Etuve réglée à 60 °C
- 4.12 L'appareillage nécessaire pour le dosage des protéines totales (voir protocole MAT)

### **5 Mode opératoire**

---

<sup>1</sup> Bouchon en caoutchouc traversé par un cône : le cône permet de faire un appel d'air et évite ainsi que le bouchon ne soit propulsé ; de plus il permet aux vapeurs de se condenser et de retomber ensuite dans le matras.

- Peser à 0,1 mg près, environ 0,5 g de fientes broyées à 1 mm ou 0,5 mm. Introduire la prise d'essai dans un matras de 250 ml contenant 3 billes de verre. Ajouter quelques millilitres d'eau et, à l'aide du vortex, obtenir une bouillie.
- Ajouter 50 ml de solution 1 (3.1) mesurés à la dispensette. Couvrir le matras d'un bouchon. Mettre dans le bloc chauffant préalablement réglé sur 150 °C et maintenir pendant 30 min.
- Sortir les matras, ajouter 12,5 ml de Solution 2 (3.2) à l'aide d'une dispensette. Remettre dans le bloc chauffant pendant 15 min.
- Retirer les matras et laisser refroidir sous hotte.
- Ajouter 50 ml de solution 3 (3.3) mesurés à la dispensette et laisser reposer 1 nuit.
- Filtrer sous vide sur un Buchner muni d'un papier filtre préalablement humidifié avec la solution 4 (3.4).
- Rincer le matras et le filtre avec 100 ml de Solution 4 (3.4). Récupérer toutes les particules au fond du matras à l'aide d'une pissette remplie de solution 4 (3.4).
- Plier le filtre contenant le précipité et les billes de verre pour pouvoir l'introduire dans un bécher de 50 ml.
- Le laisser sécher à l'air sous une hotte puis dans une étuve à 60 °C.
- Introduire le filtre dans un matras Kjeldahl et doser l'azote.
- Doser également l'azote d'un papier filtre seul.

## 6 Expression des résultats

$$N.F.T = 1,29 N.P.E - 0,02 N.T.E$$

Où

N.F.T : Azote fécal total (TERPSTRA) ;

N.P.E : Azote des protéines précipitées à l'acétate de Plomb et à l'éthanol ;

N.T.E : Azote total des excréta ;

N.F.T, N.P.E, N.T.E sont exprimés en g de protéines par kg d'excréta.

Le résultat final est exprimé en g/kg de MS en tenant compte de la matière sèche des fientes.

**Evaluation préliminaire de l'ingestion et de la digestibilité du maïs ou du tourteau de soja et de la consommation d'eau chez le coq local soumis à température ambiante élevée**

**N Allouche, Z Dorbane, S Kazi-Aoual et D Boudouma**

**École Nationale Supérieure Agronomique, département des productions animales  
Hassan Badi 16 200, Alger, Algérie  
[n.allouche@ensa.dz](mailto:n.allouche@ensa.dz)**

**Résumé**

L'ingéré de 2 aliments simples (CE), leurs digestibilité (CUD), la consommation d'eau (CE) et la température corporelle du coq local soumis à un stress thermique ont été évalués. Quarante coqs de population locale âgés de 2 ans, ont été répartis en 4 groupes de 10 sujets de poids moyen homogène ( $1\ 070 \pm 109$  g). Deux groupes ont été soumis à une température ambiante optimale ( $23 \pm 0,47$  ° C) et deux groupes à une température élevée ( $33 \pm 0,60$ ° C) pendant 9 jours. Chaque groupe a reçu soit du maïs, soit du tourteau de soja à volonté.

L'effet de la température sur l'ingestion ( $p < 0,001$ ) ainsi que sur la consommation d'eau ( $p < 0,0001$ ) a été très significatif. La digestibilité de l'aliment a été différente entre le maïs et le tourteau de soja sous l'effet de la température. Mais aucun effet notable n'a été constaté sur la température corporelle des coqs. La consommation des 2 aliments a diminué de 16% ( $p < 0,001$ ) ( $1,6\% / ^\circ\text{C}$  d'élévation entre  $23^\circ\text{C}$  et  $33^\circ\text{C}$ ). Celle de l'eau a augmenté (de 3% et 9% respectivement pour le maïs ou le tourteau de soja pour atteindre 5% ou 17% du poids vif ;  $p < 0,0001$ ). Les valeurs moyennes de la digestibilité du maïs à  $23^\circ\text{C}$  sont restées inchangées à une température élevée (84%), mais celles du tourteau de soja ont été supérieures à chaud ( $p < 0,05$ ) (51% vs 57%). Ainsi, le coq local soumis à une température élevée a tendance à diminuer son ingéré alimentaire et à augmenter sa consommation en eau sans effet notable défavorable sur l'utilisation digestive de l'aliment.

*Mots-clés: acide urique, Algérie, soif, osmolarité, stress thermique, température corporelle*

**A preliminary assessment of the intake and digestibility of maize or soybean meal and water consumption in the local cock subjected to high ambient temperature**

**Abstract**

The ingesting of two simple foods, their digestibility (CUD), water consumption (WC) and body temperature of the local rooster subjected to heat stress were evaluated. Forty cocks of local population aged 2 years, were divided into 4 groups of 10 homogeneous medium weight subjects ( $1070 \pm 109$  g). Two groups were subjected to optimum ambient temperature ( $23 \pm$

0.47 ° C) and two groups at an elevated temperature (33 ° C ± 0.60) during 9 days. Each group received either maize or soybean meal at will.

The effect of temperature on intake ( $p < 0.001$ ) as well as the water consumption ( $p < 0.0001$ ) was very significant. The digestibility of the food was different between maize and soybean meal under the effect of temperature. But no significant effects were observed on body temperature roosters. The consumption of both food declined by 16% ( $p < 0.001$ ) (1.6% / ° C in elevation between 23 ° C and 33 ° C). The water has increased (from 3% and 9% respectively for maize or soybean meal to 5% or 17% of body weight;  $p < 0.0001$ ). The average values of the digestibility of maize at 23 ° C were unchanged at high temperature (84%), but those of the soybean meal was superior to hot ( $p < 0.05$ ) (51% vs. 57%). Thus, the local rooster subjected to high temperature tends to reduce its food intake and to increase its water consumption without adverse significant effect on digestibility of the food.

**Keywords:** *Algeria, body temperature, heat stress, osmolarity, thirst, uric acid*

## **Introduction**

Chez les oiseaux, comme chez tous les animaux, l'eau est le constituant le plus abondant de l'organisme, (62% du poids corporel du poulet et 65% de l'œuf). Une perte de 10% de cette eau peut entraîner la mort. En tant que solvant, l'eau revêt un caractère essentiel pour les processus biologiques et physiologiques de l'animal.

Chez la volaille, l'eau de boisson représente une part importante d'environ 73% (Larbier et Leclercq 1992) de celle dont dispose l'oiseau pour satisfaire ses différents besoins. Elle constitue le premier aliment des volailles, qui boivent 1,8 fois plus qu'elles ne mangent en production animale.

Une faible restriction en eau, même de 10%, peut compromettre les performances chez la volaille (Van Eekeren 2006). Plusieurs auteurs (May et al 1998 ; May et Lott 2000) rapportent une dégradation de l'indice de consommation et du croît, alors que Van Eekeren (2006) signale chez la poule pondeuse que de courtes périodes de manque d'eau peuvent entraîner la chute des plumes et l'arrêt de la production d'œufs.

Par ailleurs, Dennery et al (2012) rapportent que 98% de la consommation d'aliment est liée à la consommation d'eau. Une baisse de l'ingestion alimentaire entraînée par la restriction d'eau serait, donc en partie, à l'origine des régressions des performances zootechniques de la volaille.

Dans de nombreuses régions chaudes, l'élevage avicole se heurte à un problème majeur : la chaleur, qui devient complexe à gérer avec la rareté de l'eau. La disponibilité réduite de l'eau serait responsable en partie des performances obtenues. Tel est le cas algérien où plusieurs enquêtes révèlent cette situation, qui en conditions estivales, se traduit par des taux de mortalité élevés ( Zetrouni 2012). Une telle situation conduit à une inadaptation des normes à l'environnement climatique de ces pays.

En dépit des pertes engendrées suite aux problèmes posés par la mauvaise gestion de l'eau (quantité et qualité), peu de données sont rapportées par la bibliographie concernant cette question. Un changement de consommation d'eau à des températures élevées est signalé dans

plusieurs travaux de recherche (Smith 1992; Valanconi 1997); mais cela reste sans aucun appui référentiel. Néanmoins, la connaissance de ce changement a un intérêt pratique lorsqu'il faut prévoir l'abreuvement dans des conditions d'approvisionnement en eau limitées.

Afin de contribuer à la connaissance des modifications comportementales notamment de la consommation hydrique mais aussi alimentaire induite par la chaleur et ses répercussions sur l'utilisation de l'aliment, nous avons mesuré la consommation d'eau ainsi que l'ingéré alimentaire et sa digestibilité par le coq local exposé à la chaleur et recevant du maïs ou du tourteau de soja.

## **Matériels et méthodes**

### **Lieu et durée de l'essai**

L'essai s'est déroulé au laboratoire d'aviculture de l'école Nationale Supérieure Agronomique d'Alger (ENSA). La durée de l'essai a été de 9 jours, précédés d'une période d'adaptation de 4 jours, durant laquelle les animaux se sont accoutumés progressivement aux conditions expérimentales fixées.

### **Matières premières utilisées**

Deux matières premières commerciales ont été utilisées : le maïs ou le tourteau de soja. Elles ont été distribuées sous forme de farine (0,5 mm de diamètre).

### **Animaux et dispositif expérimental**

Quarante coqs de population locale (*Gallus gallus*), âgés de 2 ans, ont été placés individuellement dans des cages à métabolisme. Les coqs ont été répartis en 2 groupes de 20 sujets chacun. Le premier groupe a été soumis à une température ambiante optimale ( $23 \pm 0,47$  ° C et  $68 \pm 03\%$  d'humidité relative), et le second groupe est soumis quant à lui à une température élevée ( $33$  ° C  $\pm 0,60$  et  $62,30 \pm 2,75\%$  d'humidité relative). L'éclairage est assuré en continu pour les 2 groupes.

Les 2 groupes ont été répartis à leur tour en deux lots de 10 oiseaux chacun, de poids moyen homogène ( $1070 \pm 109$  g). Les deux lots ainsi formés dans chaque groupe ont reçu chacun, respectivement du maïs ou du tourteau de soja ainsi que de l'eau de boisson à température ambiante dans des biberons en plastique gradués (Figure 1).

Sur les 5 derniers jours de l'essai, un bilan digestif a été réalisé, dont 3 jours de bilan alimentaire précédés et suivies de 24 heures de jeûne (abstinence d'aliment seulement), selon la méthode de Bourdillon et al (1990). La distribution, *ad libitum*, d'eau (700 ml/jour/animal) et des matières premières (150 g/jour/animal), ont été effectuées de façon simultanée au quotidien, pendant le bilan alimentaire et elle s'est étalée sur 2 jours après le deuxième nyctémère de jeûne.

Les excréta de chaque coq ont été récupérés au quotidien sur les trois jours de bilan, afin de mesurer l'acide urique excrété total ainsi que pour la détermination de la digestibilité de la matière sèche des matières premières expérimentales.



**Figure 1** : Photo d'un coq local dans une cage à métabolisme

### **Mesures et calculs**

La prise de la température ambiante et du taux d'humidité relative de laboratoire a été effectuée 3 fois par jour (8h, 12h, et à 16h), afin de les contrôler et les maintenir relativement constantes.

Le rejet alimentaire et hydrique a été mesuré quotidiennement pour chaque sujet.

Les fientes de chaque coq ont été conservées à -20°C immédiatement après les avoir récoltées individuellement au quotidien, nettoyées (des plumes et desquamations) et pesées puis cumulées. Avant analyses chimiques, elles ont été décongelées à température ambiante, puis séchées à l'étuve à 62°C jusqu'à dessiccation complète puis pesées, broyées à 0,5 mm et conservées en vue d'analyses.

L'ingéré alimentaire et la consommation d'eau par les coqs ont été calculés, par différence entre la quantité distribuée et celle rejetée, La proportion de la consommation d'eau (CE) par rapport à la consommation d'aliment (CA) est un rapport des deux (CE/CA). Ces calculs sont effectués par jour et pour chaque individu.

La valeur de la digestibilité de la matière sèche du maïs et du tourteau de soja a été calculée par le rapport de la différence entre les quantités cumulées, durant le bilan digestif, de la matière sèche ingérée et celles de la matière sèche excrétée sur la quantité de matière sèche ingérée totale. La température rectale ( $\pm 1\%$ ) a été prise chaque jour à la même heure (entre 16h et 17h) sur chaque sujet, à l'aide d'un thermomètre à sonde, introduit d'environ 5 centimètres dans le cloaque du coq.

### **Analyses chimiques**

La matière sèche (MS) du maïs et du tourteau de soja ont été déterminées par séchage à 130°C pendant 3 heures, selon la méthode recommandée par AFNOR (1985). Celle des excréta a été déterminée par séchage à 62°C jusqu'à dessiccation complète. La matière azotée totale (MAT) a été déterminée selon la méthode KJEDHAL et l'acide urique (AU) selon la méthode décrite par Marquardt et al (1983).

### **Analyse statistique**

Le traitement statistique des résultats a été effectué avec le logiciel « STATISTICA ». Les résultats ont été soumis à une analyse de variance à un facteur « ANOVA » puis une comparaison de moyennes par le test de Newman et Keuls ; un test de corrélation a été effectué aussi. Le seuil de signification choisi est de 5%.

### **Résultats et discussion**

Le tableau 1 rapporte les valeurs moyennes, déterminées à 23°C et à 33°C, de l'ingéré alimentaire, de l'eau consommée (CE), du ratio CE / CA, de la digestibilité des matières premières, ainsi que des matières azotées totales ingérées (MATI), de l'acide urique (AU) excrété et de la température rectale des coqs.

**Tableau 1 :** Valeurs moyennes de l'ingéré alimentaire et hydrique, de la digestibilité de la matière sèche, des quantités de matière azotée ingérée, de l'acide urique excrété, chez des coqs soumis à une température ambiante de 23°C et de 33°C et recevant du maïs ou du tourteau de soja (moyenne± écart type).

<b>Tourteau de soja</b>							
T°C	CA (g/a/j)	CE (ml/a/j)	Ratio CE/CA	CUD MS (%)	MAIT (g/a)	AU (g/g MSET /a)	T° rectale (°C)
23°C	109 ±16	272 ± 44	2,6±0,6	51 ±1,6	46±7	86±8,06	41,3±0,1
33°C	91,6±15	306 ± 83	3,3±0,6	57 ±5	35±5	42 ± 9,8	41, 4±0,1
ANOVA (P)	0,00047	<0,0001	<0,0001	0,006	< 0,0001	< 0,0001	0,17
<b>Maïs</b>							
T°C	CA (g/a/j)	CE (ml/a/j)	Ratio CE/CA	CUD MS (%)	MAIT (g/a)	AU (g/g MSET /a)	T° rectale (°C)
23°C	82±11	51±11	0,6±0,0	83,8±1	6,9±1	5,7±0,8	41,2±0,2
33°C	69±10	97±22	1,4±0,3	83,6±1,41	5,6±1	5,39±1,07	41,4±0,08
ANOVA (P)	0,00047	<0,0001	<0,0001	0,11	0,004	0,45	0,4

*Les valeurs moyennes ±SE pour un même paramètre et pour la même matière première, sont statistiquement comparables (P>0,05)*

*AU : Acide Urique ; CA : Consommation d'aliment ; CE/ consommation d'eau ; MAIT : matière azotée ingérée totale; MSIT : matière sèche ingérée totale ; MSET : matière sèche excrétée totale ; NS : non significatif ; T° : température.*

## Consommation d'eau

Les coqs maintenus à 23°C, et recevant respectivement le maïs et le tourteau de soja, ont eu une consommation d'eau équivalente à 3% et 9% de leur poids vif. En condition de stress thermique, cette consommation a significativement augmenté ( $p < 0,0001$ ) pour atteindre 5% et 17% du poids vif.

D'après le National Research Council (1994), la consommation d'eau augmente de 6,5 à 7% à chaque degré de température au-dessus de 21°C. Cette augmentation est dans notre cas de 9% /°C et de 1,25% /°C d'élévation de température au-dessus de 23°C, respectivement avec le maïs ou le tourteau de soja.

L'augmentation de la consommation d'eau est une réponse des animaux à l'élévation de la température, afin de restituer les pertes d'eau liées à la thermorégulation. Le poulet étant dépourvu de glandes sudoripares, il contrôle les pertes d'eau provoquées par la chaleur par évaporation au niveau des poumons (Mather et al 1980), la polypnée. Qui, selon Croisier et al (2012), engendre une forte perte en eau mais pas en minéraux. L'eau corporelle perdue doit être alors compensée par un abreuvement suffisant, afin que l'ensemble des activités physiologiques de l'oiseau puissent se poursuivre et assurer le contrôle de la température interne de l'organisme via l'évaporation dans les poumons et les sacs aériens. En effet, d'après Belay et Teeter (1993), l'évacuation de chaleur par voie évaporatoire et le niveau de consommation d'eau sont étroitement corrélés ( $R^2 > 8$ ).

Ce départ d'eau crée une déshydratation corporelle provoquant une hyperosmolarité. Cette dernière est détectée par des récepteurs osmotiques qui déclenchent des mécanismes neuronaux entraînant ainsi, dans un premier temps la sécrétion d'ADH (l'hormone antidiurétique) pour faire varier l'excrétion rénale d'eau puis vont également faire varier la sensation de soif par conséquent l'ingestion d'eau. Cependant, selon Boillot et al (1999) la soif constitue la deuxième boucle de sécurité dans le contrôle de la balance hydrique. Si la déshydratation se poursuit après l'intervention rénale en réabsorbant l'eau, la soif devient perceptible.

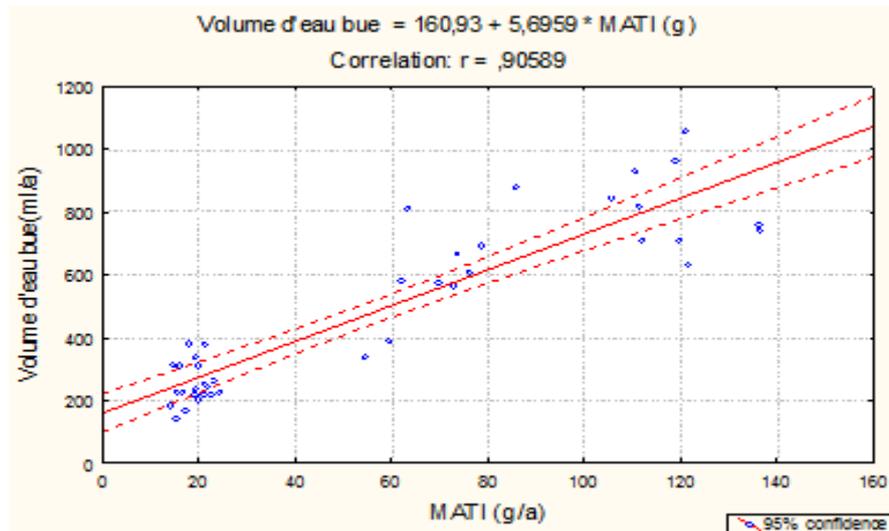
En effet, la soif est stimulée par une augmentation de l'osmolalité plasmatique qui est plus élevée que celle perçue lors de l'intervention rénale (McKinley et Johnson 2004). A ce moment là, l'angiotensine excite les osmorécepteurs, en déterminant une polydipsie qui provoque l'abreuvement chez les animaux. L'importante augmentation en consommation d'eau chez les coqs à 33°C, reflète l'importance de l'impact de la température élevée sur le niveau de déshydratation de leurs organismes.

La consommation d'eau à 23°C ou à 33°C, est supérieure chez les coqs recevant du tourteau de soja à celle de ceux recevant le maïs (Tableau 1). Elle est 5 fois et 3 fois plus grande avec le tourteau de soja qu'avec le maïs, respectivement à 23°C et 33°C. Ce qui est expliqué, en partie, par la quantité plus élevée de matière sèche consommée par les coqs recevant le tourteau de soja que celle consommée par les coqs recevant du maïs ( $r = 0,6$  ;  $r^2 = 0,33$  ;  $p < 0,0001$ ). La consommation d'eau est étroitement corrélée à la consommation d'aliment, tel rapporté par Leclercq et Larbier (1992).

Selon nos résultats, indépendamment des quantités ingérées, les valeurs des quantités d'eau bues par gramme de maïs ou de tourteau de soja ingérée (le ratio CE/CA) maintiennent cette

tendance, ce qui traduirait que la nature des matières premières influe aussi sur la consommation d'eau (tableau 1).

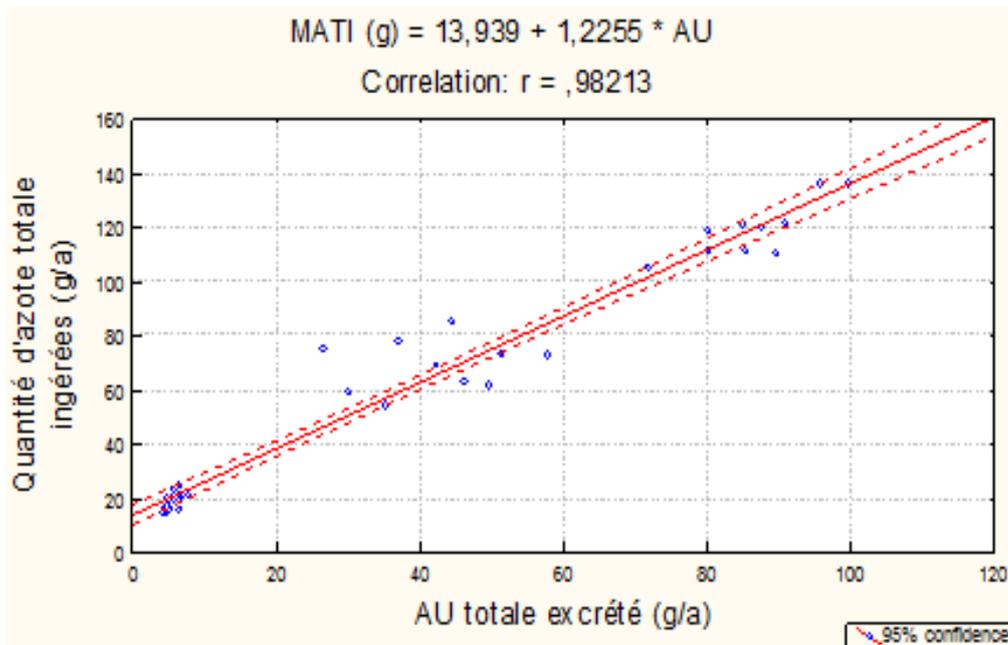
L'importante consommation d'eau enregistrée chez les coqs alimentés à base du tourteau de soja est une compensation d'une importante quantité d'eau corporelle perdue, qui serait liée à une élimination excessive des déchets métaboliques de l'organisme dans les urines ainsi qu'à l'élimination des fèces.



**Figure 2** : Corrélation entre les quantités d'azote ingérées et l'eau consommées

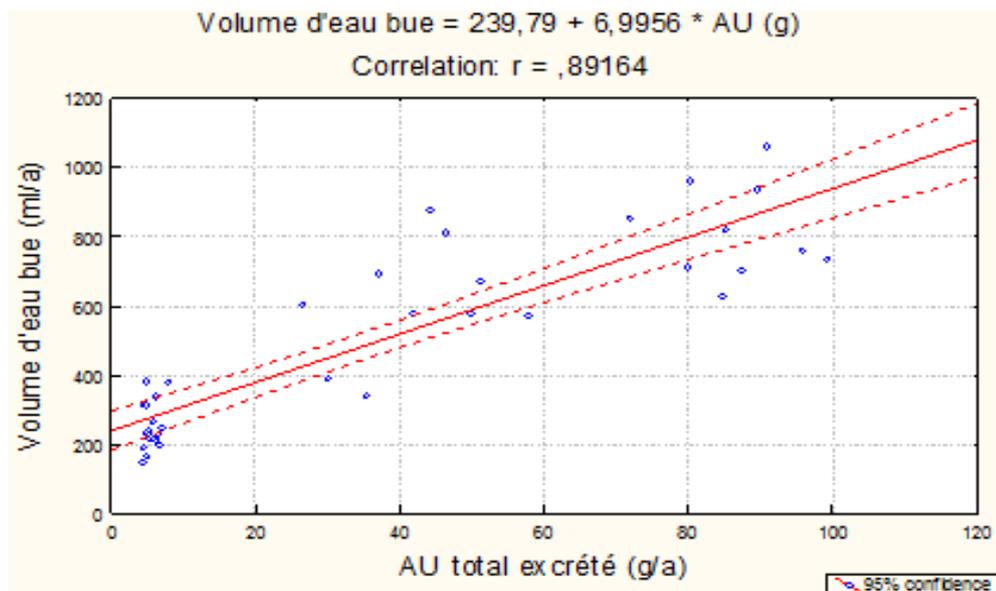
Selon Larbier et Leclercq (1992) la consommation d'eau est liée à la concentration en protéines de l'aliment. Ainsi, les valeurs des quantités d'eau ingérées par gramme d'aliment qui sont en moyenne de 1,8 (Larbier et Leclercq 1992, Huart 2004) peuvent dépasser 2 selon Larbier et Leclercq (1992), lors de l'ingestion de régime hyperprotéique. En effet, avec le tourteau de soja renfermant des teneurs plus élevées en protéines comparé au maïs (43%MS vs 8%MS), le ratio CE/CA est significativement ( $p < 0,0001$ ) supérieur à celui enregistré chez les coqs consommant du maïs (Tableau 1). Cette observation est confirmée par un coefficient de corrélation hautement significatif ( $r = 0,90$  ;  $p < 0,000$ ) entre l'azote ingéré et l'eau consommée avec un coefficient de détermination  $r^2 = 0,82$  (Figure 2).

L'apport azoté en excès serait catabolisé et excrété sous forme d'acide urique ( $r = 0,98$  ;  $r^2 = 0,70$  ;  $P < 0,000$ ) (Figure 3).



**Figure 3:** Corrélation entre les quantités d'acide urique excrété et celles d'azote ingéré

Cette excrétion est accompagnée d'un départ d'eau que l'oiseau comble à nouveau par l'eau d'abreuvement. Une forte corrélation ( $r = 0,89$  ;  $r^2 = 0,79$  ;  $P < 0,000$ ) qui est établie entre l'excrétion d'acide urique et la consommation d'eau (Figure 4) illustre cette relation.



**Figure 4 :** Corrélation entre le volume d'eau bue et l'acide urique excrété

La teneur relativement élevée en minéraux du tourteau de soja comparée à la teneur du maïs (7%MS vs 1%MS) entraînerait également une augmentation de la consommation d'eau chez les oiseaux recevant du tourteau de soja.

Quant aux pertes d'eau par les fèces, qui représentent 30% des sorties d'eau totales (Larbier et Leclerc 1992), elles sont en rapport essentiellement avec des quantités des substances indigestibles (Jean-Blain 2002). En effet, 50% de l'ingéré du tourteau de soja est excrété sous forme de fèces, ce qui aurait contribué à l'augmentation des pertes d'eau corporelle chez les coqs recevant cette matière première, contre seulement 16% de l'ingéré du maïs qui est excrété.

L'accroissement en pertes d'eau corporelle engendre un déficit hydrique entraînant une hyperosmolarité du milieu interne de l'organisme. Celle-ci serait accentuée chez les coqs puisque ces derniers dissipent leur chaleur par polypnée, faisant perdre à l'animal de l'eau sans accompagnement de minéraux, notamment chez ceux recevant le tourteau de soja ; cette dernière étant une matière première plus riche en minéraux que le maïs. Cet état déficitaire en eau de l'organisme des coqs, provoque chez eux la soif qui les incite à boire.

Le moindre besoin d'abreuvement des coqs alimentés avec du maïs explique en partie l'écart des quantités d'eau consommées par les coqs recevant du maïs et ceux recevant du tourteau de soja. Ce moindre besoin à l'abreuvement serait lié au fait que ces animaux couvrent déjà une partie de leur besoin hydrique par l'eau endogène. Maynars et al (1979) estiment que 10 % des besoins hydriques de l'animal sont fournis par l'eau métabolique produite par l'oxydation des nutriments, tenant compte du fait que le maïs renferme plus de glucides, fournissant à l'oxydation plus d'eau métabolique (55 ml/100g) que celle des protéines (40 ml/100g) (Jean-Blain 2002). Selon ce même auteur, cette eau n'est pas négligeable et pourrait être très importante dans certains cas de restriction hydrique drastique.

### **Consommation de maïs et de tourteau de soja**

A 23°C la consommation moyenne de tourteau de soja est supérieure à celle du maïs (109 g vs 82 g). La même observation est notée à 33°C (92 g vs 69 g). La consommation du tourteau de soja est supérieure de 32% à celle du maïs à 23°C et à 33°C.

Dans les 2 ambiances thermiques, la consommation de tourteau de soja est meilleure que celle du maïs. Ce résultat serait lié au phénomène d'appétence lié aux protéines que contient le tourteau de soja ; selon Okwuosa et al (1990) l'élévation des apports protéiques dans la ration s'accompagne d'une augmentation de la consommation journalière d'aliment.

Le maïs étant caractérisé par un taux très élevé en amidon, sa digestion enzymatique génère un taux élevé de glucose circulant dans le sang comparé au tourteau de soja. Cette élévation de la glycémie aurait provoqué une inappétence chez ces animaux. En effet, selon Larbier et Lecclerc (1992), l'hyperglycémie est un signal métabolique essentiel qui cause la satiété selon la théorie « glucostatique », en stimulant le centre nerveux de la satiété des oiseaux, ce qui les incite à diminuer leur consommation alimentaire.

L'ingéré moyen du maïs et du tourteau de soja a significativement diminué en passant de 23°C à 33°C ( $p \leq 0,001$ ). Il a baissé en moyenne de 16% avec les deux matières premières, soit 1,6% / °C entre 23°C et 33°C. Cette valeur de la baisse de l'ingéré moyen de maïs et de tourteau de soja chez le coq local est similaire à celle rapportée par Huart (2004) (15% ; 1,5% par °C) et nettement inférieure à la valeur trouvée par Bonnet et al (1997) (34% ; 3% / °C) chez le poulet de chair avec un régime standard (maïs et tourteau de soja), dans les mêmes conditions climatiques (température et humidité). Cet écart des résultats pourrait être expliqué par le poids des animaux et /ou par la digestibilité de l'aliment.

La baisse de la consommation alimentaire en conditions chaudes permet aux coqs de baisser leur production de chaleur. Selon Padilha et al (1995) c'est une forme d'adaptation de l'animal de leur ingestion thermogénique de façon à ce qu'ils réduisent leur production de chaleur, ayant selon Geraert (1991) un effet thermogénique accru par températures élevées.

Howlider et Rose (1987) précisent que lorsque la température ambiante dépasse 23°C, le premier réflexe de l'animal est de limiter ses apports énergétiques. Par ailleurs, Tasaki et Kushima (1979) rapportent que les protéines ayant l'extra chaleur la plus élevée des nutriments, elles représentent la plus forte contribution à la thermogénèse alimentaire par rapport aux glucides ou aux lipides. Le rapport de Howlider et Rose (1987) nous laisserait escompter par conséquent, à ce que la diminution de l'ingéré soit plus importante avec le maïs, qui est une matière première plus énergétiquement que le tourteau de soja. Tandis que, avec le rapport de Tasaki et Kushima (1979) on comprendrait que c'est avec un aliment protéique, tel le tourteau de soja, qu'il y aurait une baisse plus importante en consommation alimentaire en passant de 23°C à 33°C.

Toutefois, la supposition que la consommation d'une matière première protéique baisserait plus qu'une matière première énergétique ou inversement, en passant d'une ambiance thermique neutre à une ambiance chaude, n'est pas maintenue. Cette baisse de l'ingéré alimentaire, en passant de 23°C à 33°C, est du même niveau (16%) avec le maïs et avec le tourteau de soja. En effet, Noblet et al (2007) rapportent que l'augmentation de la teneur en protéines en substitution de l'amidon ne modifie pas la production de chaleur induite par l'aliment.

La dépréciation de la consommation alimentaire en conditions chaudes serait liée, aussi, à une baisse de l'appétit chez les coqs provoquée par l'élévation de la glycémie. En effet, chez le poulet de chair, le métabolisme glucidique augmente dans les conditions chaudes, tel rapporté par Tesseraud et Temim (1999). Cette modification du métabolisme glucidique, à chaud, engendre une glycémie plus élevée (Padilha et al 1995), qui aurait provoqué une diminution de l'appétit chez les coqs et les a incité à diminuer leur ingestion alimentaire.

### **Digestibilité de la matière sèche du maïs et du tourteau de soja**

La valeur de la digestibilité de la matière sèche du maïs est supérieure à celle du tourteau de soja, respectivement, à 23°C (84% vs 51%) et à 33°C (84% vs 57%)

Les valeurs moyennes de la digestibilité du maïs, mesurées à 23°C et à 33°C, sont similaires entre elles (84%). En revanche celles du tourteau de soja sont significativement supérieures à chaud qu'à température optimale ( $p < 0,05$ ) (51% vs 57%).

Geraert (1991) rapporte que la digestion comme l'ingestion ont un effet thermogénique. Cela suppose que la lutte des coqs contre la chaleur ambiante serait au détriment de l'assimilation des nutriments et de l'énergie ingérés, par conséquent une diminution de la digestibilité. Tesseraud et Temim (1999), rapportent que la digestibilité des constituants de l'aliment diminue à chaud, d'autant plus qu'elle est plus faible au départ.

L'augmentation de la consommation d'eau à 33°C, en modifiant le processus digestif et en facilitant le transit digestif, aurait diminué la digestibilité, tel évoqué par Bonnet et al (1997). Mais cela controversé avec nos résultats.

Malgré une nette diminution de l'ingéré alimentaire, de même tendance entre le maïs et le tourteau de soja (16%) et une augmentation des quantités d'eau bues à haute température, leur digestibilité n'est en revanche pas affectée de la même façon sous l'effet de la chaleur. La valeur de la digestibilité du maïs (84%) reste inchangée significativement, par contre celle du tourteau de soja a augmenté de 6 points, en passant d'une température optimale (23°C) à une température élevée (33°C).

La diminution des quantités de l'ingéré alimentaire à chaud conjuguée à un allongement du temps de transit digestif à chaud, tel rapportés par Wilson et al (1980) chez le canard, auraient compensé la baisse de certaines activités enzymatiques à chaud (Yamazaki et Zhang 1982), en permettant une meilleure attaque enzymatique en terme de facilitation d'accessibilité au bol alimentaire et en terme de prolongement de temps d'action, par conséquent une meilleure digestibilité. Cette forme de compensation par les animaux aurait permis une meilleure optimisation de l'utilisation des 2 matières premières par les coqs sous l'effet de la chaleur. Toutefois, cette compensation a aboutit au maintien de la valeur de la digestibilité de maïs inchangée devant une augmentation de celle du tourteau de soja. Ce qui pourrait être expliqué par une plus grande sensibilité de l'activité des enzymes amylasiques, responsables de la dégradation de l'amidon contenu majoritairement dans le maïs, comparé aux enzymes protéasiques sous l'effet de la chaleur. En effet, l'activité de maltase et de la sucrase diminuent à chaud ( Yamazaki et Zhang 1982).

L'absence d'un effet dépréciateur de la chaleur ambiante sur la digestibilité du maïs et celle du tourteau de soja chez les coqs en comparaison avec la diminution de la digestibilité d'un aliment composé de ces 2 matières premières signalée par Bonnet et al (1997) à chaud ; serait lié à la simplicité de l'aliment, au fait que les coqs ont consommé qu'un seul ingrédient (du maïs ou du tourteau de soja). Un aliment constitué de plusieurs matières premières, de composition chimique différente, dont la digestion exigerait l'action de plusieurs types d'enzymes simultanément activant dans des milieux à « pH » différents, abaisserait le potentiel digestif intrinsèque des constituants de l'aliment et donc sa matière sèche via le phénomène de compétitivité entre différents enzymes. Ce phénomène pourrait accentuer la baisse de l'activité de certaines enzymes à température ambiante chaudes (Yamazaki et Zhang 1982), par conséquent un potentiel digestif de l'aliment amoindri. Ceci nous laisserait supposer que le mode de distribution séparé dans les conditions climatiques chaudes contribuerait à l'amortissement de l'effet négatif de la chaleur sur l'utilisation de l'aliment par les oiseaux.

### **Effet de la température élevée sur la température corporelle des coqs**

Les températures internes moyennes des coqs alimentés semblent normales. Elles ont été, respectivement avec le maïs et le tourteau de soja, de l'ordre de  $41,2 \pm 0,2^\circ\text{C}$  et de  $41,3 \pm 0,1^\circ\text{C}$  à  $23^\circ\text{C}$  contre  $41,4 \pm 0,08^\circ\text{C}$  et  $41,4 \pm 0,1^\circ\text{C}$  à  $33^\circ\text{C}$ . Les coqs ont parfaitement résisté à la chaleur.

### **Conclusion**

Quelle que soit la matière première considérée, le coq local soumis à une température élevée a tendance à diminuer son ingéré alimentaire et à augmenter sa consommation en eau sans effet défavorable notable sur l'utilisation digestive de l'aliment. L'importante augmentation de la

consommation d'eau à température élevée, reflète le degré de l'impact de la chaleur sur le niveau du stress hydrique des coqs.

La tendance des animaux à diminuer leur ingéré alimentaire ne les expose pas au danger d'une sous alimentation, surtout que le coq local (une volaille rustique) aurait une capacité d'adaptation comportementale et physiologique qui permettrait de tirer le maximum du potentiel de l'aliment en fonction de ses besoins. En revanche, l'augmentation de leur besoin en eau d'abreuvement les expose au risque d'une restriction hydrique et ses répercussions, notamment sur l'ingestion alimentaire et la thermorégulation.

En plus du contrôle des paramètres physiques (température, humidité) du bâtiment d'élevage, la consommation d'eau pourrait être maîtrisée aussi par une adaptation d'une formule alimentaire qui répond aux besoins des animaux élevés dans des conditions chaudes ; en tenant compte des modifications comportementales qui accompagnent les modifications métaboliques sans qu'il y ait du gaspillage ni en eau ni en matière de protéines ou d'énergie.

## Références

**National Research Council (NRC) 1994** Nutrient requirement of poultry. 9th. revised. Edition. NAS-NCR, Washington in district of Colombia.177pp.

**AFNOR (Association Française de Normalisation ) 1985** Aliments des animaux. Méthodes d'analyses françaises et communautaires. 2ème édition. Paris. France, 339pp.

**Belay T and Teeter R G 1993** Broiler water balance and thermobalance during thermoneutral and high ambient temperature exposure. Poultry Science 72 (1):116-124. [http://www.urgences-serveur.fr/IMG/pdf/hyperosmolarite\\_sfar99.pdf](http://www.urgences-serveur.fr/IMG/pdf/hyperosmolarite_sfar99.pdf)

**Boillot A, Caps T, Blasco G et Grelier R 1999** Hyperosmolarité. Conférences d'actualisation. (éd) Elsevier, Paris et SFAR: 539-554.

**Bonnet S, Geraert P A, Lessire M, Carré B and Guillaumin S 1997** Effect of high ambient temperature on feed digestibility in broilers. Poultry Science 76: 857-863.

**Bourdillon A, Carré B, Conan L, Francesch M, Fuentes M, Huyghebaert G, Wiseman J, Leclercq B, Lessire M, Duperray J and McNab J 1990** European reference method for the *in vivo* determination of metabolisable energy with adult cockerels: Reproducibility, effect of food intake and comparison with individual laboratory methods. British Poultry Science 31: 567-576.

**Croisier M et Croisier Y 2012** Alimentation animale : Besoin, aliments et mécanismes de la digestion des animaux d'élevage. (Éd) Educagri: 18-20 p.

**Dennery G, Dezat E et Aubert C 2012** L'eau en élevage avicole, une consommation maîtrisée. ITAVI, Recueil de données. [http://www.itavi.asso.fr/elevage/batiment/plaquette\\_maitrise\\_eau.pdf](http://www.itavi.asso.fr/elevage/batiment/plaquette_maitrise_eau.pdf)

**Geraert P A 1991** Métabolisme énergétique du poulet de chair en conditions chaudes. INRA Production Animale 4 (3): 257-267.

**Howlider M A R and Rose S P 1987** Temperature and the growth of broilers. World's Poultry Science Journal 4 : 228-237.

**Huart A 2004** Les besoins du poulet de chair : La consommation d'aliment conditionne la production du poulet et son coût détermine son rendement. (éd) eco congo Agriculture : 5p. <http://www.ecocongo.cd/fr/document/alimentation-les-besoins-du-poulet-de-chair> .

**Jean-Blain C 2002** Introduction à la nutrition des animaux domestique : Eau et minéraux. (éd) Technique et Documentation - Lavoisier : 237-240.

**Larbier M et Leclercq B 1992** Nutrition et alimentation des volailles. INRA, Paris. 355 p.

**Maisonnier-Grenier S, Dalibard P et Geraert PA 2005** Intérêt d'une préparation multienzymatique sur des régimes à base de maïs-soja chez le poulet. 6èmes Journées de la Recherche Avicole, S<sup>t</sup> Malo 30-31 mars 2005, 221-225.

**Marquardt R R, 1983** A Simple spectrophotometric methods for the direct determination of uric acid in avian excreta. Poultry Science 62: 2106-2108.

**Mather F B, Barnas G M and Burger RE 1980** The influence of alkalosis on panting. Comparative Biochemistry physiology 67A: 265-268.

**May J D , Lott B D and Simmons J D 1998** The effect of environmental temperature and body weight on growth rate and feed: gain of male broilers. Poultry Science: 499-501.

**May J.D and Lott B.D 2000** The effect of environmental temperature on growth and feed conversion of broilers to 21 days of age. Poultry Science: 669-671.

**Maynars L A, Loosli JK, Hintz, H F and Warner R G 1979** Animal Nutrition. Seventh Edition. McGraw Hill Publications in the Agricultural Sciences: 602 p.

**McKinley M G and Johnson AK 2004** The physiological regulation of thirst and fluid intake. [News in Physiological Sciences](#) 19: 1-6.

**Noblet J, Dubois S, Van Milgen J, Warpechowski M, Bellego L and Carré B 2007** Influence de la teneur en protéines de l'aliment sur l'utilisation métabolique de l'énergie chez le poulet. 7èmes Journées de la Recherche Avicole, Tours France mars 2007, 141-144.

**Okwuosa BN, Agbakora A M, Bnokwuosa, Anugwa A and Awaegbute 1990** Performance of different genotype of broiler chicks fed varying protein levels in their starter and finisher diets. Bulletin of Animal Health and Production in Africa: 69-76.

**Padilha J C F, Geraert P A, Rideau N, AinBaziz H et Guillaumin S 1995** L'exposition chronique à la chaleur perturbe l'équilibre glucose-insuline chez le poulet de chair. 1ère Journée de la recherche avicole. Angers France 28 -30 mars 1995, 90-92.

**Smith A J 1992** L'élevage de la volaille. Le Technicien d'Agriculture Tropicale (vol 1) Paris A.c.c.T. (Ed) Maison neuve et la rose, CTA ; 183p.

**Tasaki I and Kushima M 1979** Heat production when single nutrients are given to fasted cockerels. Proceedings 8<sup>th</sup> Energy metabolism symposium, sept 1979. Cambridge (cb) Mount T E (Ed) EAAP Publication. N° 26: 253-256.

**Temim S, Chagneau A M, Guillaumin S, Michel J, Peresson R, Geraert P A and Tesseraud S 1999** Effects of chronic heat exposure and protein intake on growth performance, nitrogen retention and muscle development in broiler chickens. *Reproduction Nutrition Development* 39: 145-156.

**Tesseraud S et Temim S 1999** Modifications métaboliques chez le poulet de chair en climat chaud : conséquences nutritionnelles. *INRA Productions Animales* 12 (5) : 353-363 <http://www6.inra.fr/productions-animales/1999-volume-12/Numero-5-1999/Modifications-metaboliques-chez-le-poulet-de-chair-en-climat-chaud-consequences-nutritionnelles>

**Valancony H 1997** Les moyens de lutte contre le coup de chaleur. 2<sup>èmes</sup> Journées de la Recherche Avicole. Tours France 8-10 avril 1997, 153-160.

**Van Eekeren N, Maas A, Saatkamp H W et Verschuur M 2006** L'élevage des poules à petite échelle. [http://anancy.net/documents/file\\_fr/04-f-2006-screen.pdf](http://anancy.net/documents/file_fr/04-f-2006-screen.pdf)

**Wilson E K, Pierson F W, Hester P V, Adams R.L and Stadelman W J 1980** The effects of high environmental temperature on feed passage time and performance traits of White Pekin ducks. *Poultry Science* 59: 2322- 2330.

**Yamazaki M and Zhanc ZI-YI 1982** A note on the effect of temperature on true and apparent metabolizable energy values of a layer diet. *British Poultry Science* 23: 447-450.

**Zetrouni A 2012** Analyse de la situation de l'élevage du poulet en conditions chaudes : cas de la commune de Bordj Menaiel. Thèse de master en Sciences techniques des productions animales ENSA Alger (Algérie) 91p

*Received 27 March 2015; Accepted 9 May 2015; Published 2 July 2015*