



**HAL**  
open science

## Comment l'alimentation des poules influence la qualité des oeufs ?

Isabelle Bouvarel, Yves Y. Nys, M. Panheleux, Philippe Lescoat

► **To cite this version:**

Isabelle Bouvarel, Yves Y. Nys, M. Panheleux, Philippe Lescoat. Comment l'alimentation des poules influence la qualité des oeufs ?. INRA Productions Animales, 2010, 23 (2), pp.167-182. hal-02667258

**HAL Id: hal-02667258**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02667258>**

Submitted on 31 May 2020

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

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

# Comment l'alimentation des poules influence la qualité des œufs ?

I. BOUVAREL<sup>1</sup>, Y. NYS<sup>2</sup>, M. PANHELEUX<sup>3</sup>, P. LESCOAT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ITAVI, Recherches Avicoles, F-37380 Nouzilly, France

<sup>2</sup> INRA, UR83 Recherches Avicoles, F-37380 Nouzilly, France

<sup>3</sup> CCPA, Parc d'activité du bois de Teillay, F-35150 Janzé, France

Courriel : Bouvarel.itavi@tours.inra.fr

Yves.Nys@tours.inra.fr

Une poule produit plus de 300 œufs/an, soit plus de dix fois son poids vif. La transformation avec une grande efficacité de l'aliment constitué majoritairement de matières premières végétales en protéines animales de haute valeur biologique constitue un véritable défi métabolique pour la poule. Son alimentation est cruciale pour optimiser l'excellent potentiel génétique des lignées modernes en termes de performance de production mais aussi de qualité de l'œuf.

L'œuf contient l'ensemble des nutriments indispensables au développement de l'embryon dans un milieu extérieur. Des variations de composition de ses constituants sont observées, liées en premier lieu à la poule elle-même selon son origine génétique et son âge, mais aussi à son alimentation et au système de production. Les macroconstituants de l'œuf comme les teneurs en matière sèche, en lipides, en protéines, et en macroéléments minéraux sont très peu variables. En effet, l'alimentation des poulettes puis des poules influence notablement la masse d'œuf globale *via* le nombre ou le poids des œufs mais ne peut pas affecter la composition des constituants majeurs de l'œuf, en ne modifiant d'ailleurs que très modérément les proportions d'albumen et de jaune. En revanche, certains constituants des aliments influencent directement leur teneur dans l'œuf : c'est le cas des acides gras et des nutriments présents en quantité mineure tels que les vitamines ou les oligo-éléments mais aussi des caroténoïdes du jaune. Enfin, la modification du mode de distribution ou de la composition de l'aliment au cours de la journée peut affecter la production et la qualité de l'œuf, probablement du fait du cycle journalier de formation de l'œuf. Cet article présente différents critères de la qualité de l'œuf susceptibles d'être modifiés par l'alimentation des poules. Il s'agit tout d'abord du poids de l'œuf et la solidité de la coquille, éléments de rémunération de l'éleveur, des proportions d'albumen et de jaune, qui intéressent le transformateur, et enfin de la composi-

tion en acides gras, minéraux, vitamines et couleur du jaune, importants pour les consommateurs.

## 1 / Variation du poids de l'œuf

Le poids de l'œuf dépend principalement de facteurs liés à la poule (origine génétique et surtout âge) mais aussi de son alimentation durant la période de ponte. L'alimentation de la poulette y contribue indirectement en influençant sa maturité sexuelle, son poids vif et sa composition corporelle lors de l'entrée en production.

### 1.1 / Influence de l'alimentation de la poulette

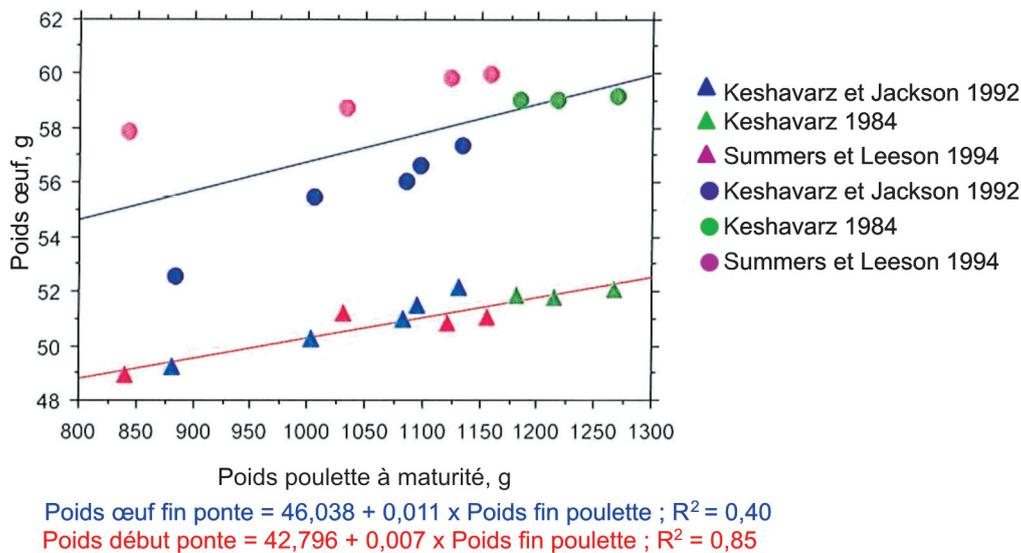
L'alimentation de la poulette influence sa courbe de croissance et donc son poids vif et sa composition corporelle au moment de l'entrée en ponte. Par là même, elle peut modifier les caractéristiques ultérieures de sa production d'œufs.

Plusieurs expérimentations ont étudié l'effet de la teneur en protéines de l'aliment de la poulette sur la production d'œufs. Keshavarz (1984) a mesuré l'effet de différents niveaux protéiques : 18% de 0 à 6 semaines d'âge, puis respectivement de 6 à 14 et 14 à 20 semaines : 15/12, 12/12 ou 12/15%. Keshavarz et Jackson (1992) ont expérimenté d'autres enchaînements, respectivement de 0 à 6, 6 à 12 et 12 à 18 se-

maines : 20, 16 et 14% de protéines, ou 16, 13,5 et 11,5%. Pour cette dernière séquence, l'aliment a été supplémenté ou pas avec de la méthionine, lysine, tryptophane et isoleucine. Summers et Leeson (1994) ont mesuré l'effet de quatre teneurs en protéines, depuis l'éclosion jusqu'à 16 semaines d'âge (20, 17, 14 et 11%). Ces différents traitements alimentaires apportés durant la phase de croissance ont des effets sur le poids de la poule à l'entrée en ponte (+ 32 g par point de protéines supplémentaire) ( $R^2 = 0,94$  ;  $P < 0,05$ ) à 16 semaines. La compilation de ces données souligne la forte relation entre poids de la poule à l'entrée en ponte et poids moyen de l'œuf en début de ponte ( $R^2 = 0,85$ ,  $P < 0,01$ ) (figure 1) sans qu'il soit noté d'effet significatif sur le taux de ponte pour la période entière. Le gain sur le poids d'œuf durant la période d'entrée en ponte est de 0,7 g par 100 g de poids vif supplémentaire de la poulette. L'effet sur le poids de l'œuf durant le reste de la période de ponte est plus variable selon les expériences (figure 1). La composition corporelle des poulettes lors de l'entrée en ponte paraît également importante. Une teneur énergétique plus élevée (+ 215 Kcal/kg de 0 à 6 semaines et + 357 Kcal/kg de 6 à 18 semaines) ne modifie pas le poids vif à 20 semaines mais augmente l'état d'engraissement (+ 7%) et réduit le poids moyen des œufs de 20 à 64 semaines (55,0 vs 56,1 g) (Cheng *et al* 1991).

La gestion des apports calciques entre les stades «poulette» et «ponte» est par ailleurs importante et conditionne aussi

**Figure 1.** Poids moyen de l'œuf du début et de fin de ponte en fonction du poids vif de la poule à la maturité sexuelle (▲ : début ponte ; ● : fin ponte).



le poids de l'œuf *via* leur effet sur l'ingéré alimentaire. La distribution d'un aliment présentant du calcium particulière avant la ponte, comparé à un aliment pauvre en Ca (0,89%), améliorera la consommation future d'aliment de la poule et le poids de l'œuf de 25 à 32 semaines (+ 1,6 g) (Classen et Scott 1982). Un aliment trop pauvre en calcium durant la phase de transition entraîne un engraissement excessif du fait d'une surconsommation de l'aliment (Roland 1986). Il est donc important d'introduire un régime intermédiaire à environ 2,5% de calcium, notamment sous forme particulière, pour permettre aux poules d'adapter

leur ingéré calcique en fonction de leur besoin, et ce, deux à trois semaines avant la période attendue de production du premier œuf.

### 1.2 / Alimentation de la poule pondeuse

#### a) Effet de la concentration énergétique de l'aliment

Les poules tendent à surconsommer les aliments les plus caloriques et à sous-consommer les moins énergétiques, ce qui a des conséquences sur le poids de l'œuf. En effet, lors d'une dilution (sable) ou d'un enrichissement de

l'aliment en énergie sous la forme entre autres de matières grasses, la variation de l'ingéré est une fonction linéaire de la variation de la concentration énergétique de l'aliment (Peguri et Coon 1991, Walker *et al* 1991, Joly et Bougon 1997, Grobas *et al* 1999a, Harms *et al* 2000, Leeson *et al* 2001, Jalal *et al* 2006, 2007, Valkonen *et al* 2008, Van Krimpen *et al* 2008, 2009) (figure 2) :

$$\text{Variation de consommation (\%)} = 1,452 - 0,685 \times \text{Variation d'énergie (\%)} \\ R^2 = 0,875$$

Selon cette régression, la poule adapte sa consommation à la teneur

**Figure 2.** Adaptation de la consommation en fonction de la concentration énergétique de l'aliment (Différence EM < 0 : dilution avec du sable ou > 0 : ajout de matières premières énergétiques dont matières grasses) ; (X : début ponte ; ● : milieu ponte ; ■ : fin ponte).

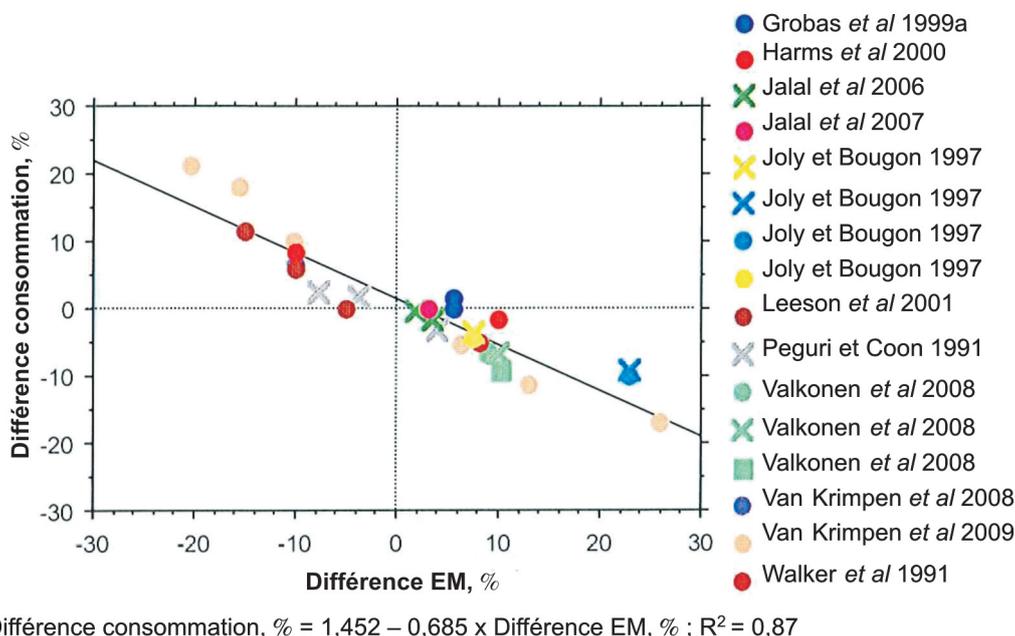
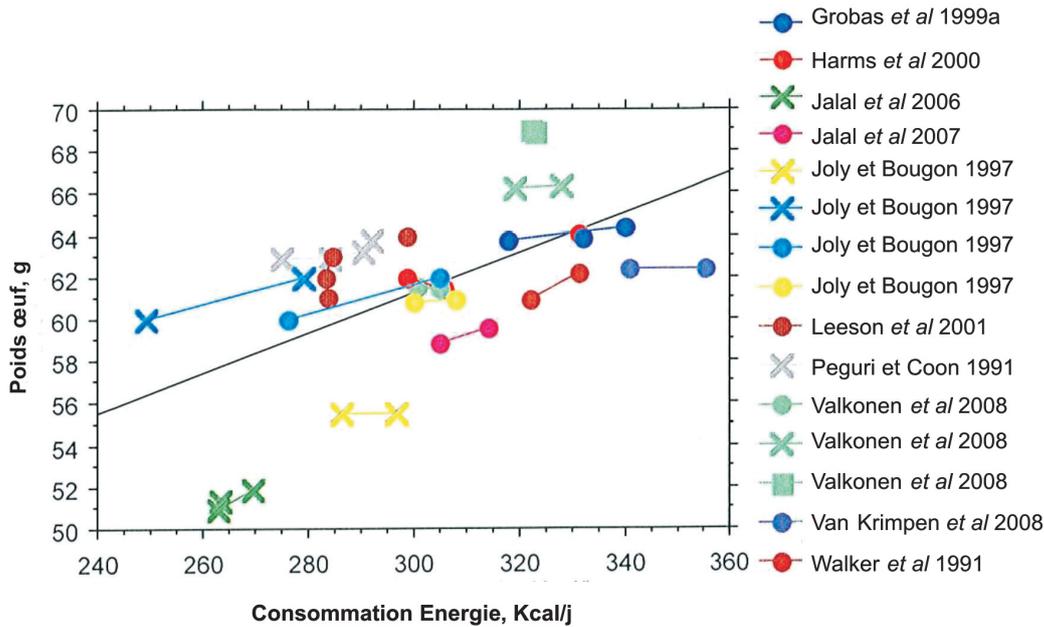


Figure 3. Consommation d'énergie : impact sur le poids de l'œuf (X : début ponte ; ● : milieu ponte ; ■ : fin ponte).



Poids œuf, g = 32,581 + 0,0986 x Consommation Energie, Kcal/lj ; R<sup>2</sup> = 0,33

énergétique de l'aliment. Cependant, la pente de la réponse n'est pas proportionnelle à une substitution quantitativement exacte. Lors d'une dilution énergétique, les poules pondeuses augmentent insuffisamment leur ingestion pour atteindre le même ingéré énergétique. Inversement, dans le cas d'un enrichissement, les poules ne la baissent pas suffisamment pour atteindre ce même ingéré énergétique. Ainsi, la consommation d'énergie est significativement supérieure avec un aliment plus concentré, en moyenne de 1,3% pour 100 Kcal (P < 0,01, figure 3) (Peguri et Coon, 1991, Walker et al 1991, Joly et

Bougon 1997, Grobas et al 1999a, Harms et al 2000, Leeson et al 2001, Jalal et al 2006, 2007, Valkonen et al 2008, Van Krimpen et al 2008, 2009). Le type de substitution (sable ou matières premières) ne modifie pas la fonction d'ajustement.

Le poids moyen de l'œuf augmente légèrement avec l'augmentation de l'ingéré énergétique (R<sup>2</sup> = 0,33) (Peguri et Coon 1991, Walker et al 1991, Joly et Bougon 1997, Grobas et al 1999a, Harms et al 2000, Leeson et al 2001, Jalal et al 2006, 2007, Valkonen et al 2008) (figure 3). La variation est en

moyenne de 0,96 g pour un écart d'ingestion de 10 Kcal. Les points reliés sur la figure confirment cette augmentation pour la majorité des expérimentations, avec un effet moins marqué pour les plus fortes consommations d'énergie journalières.

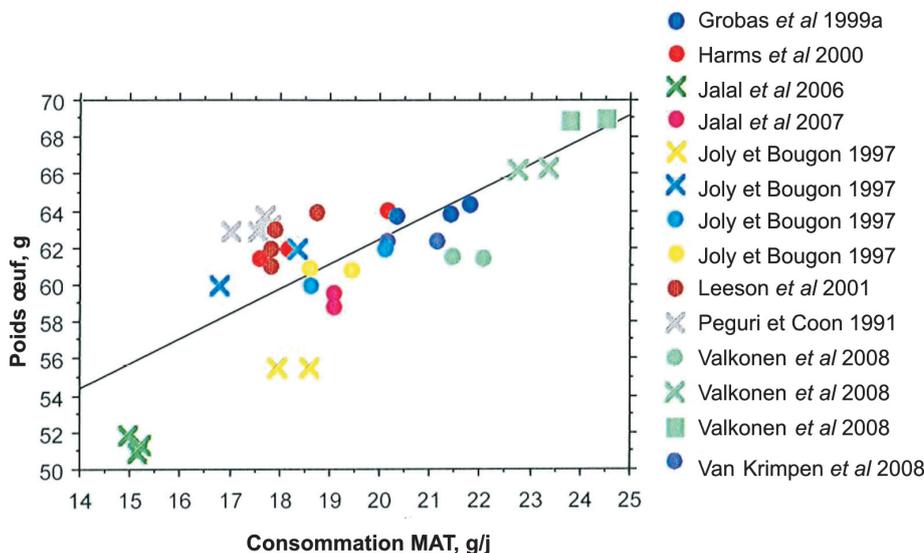
b) Effet de la teneur en protéines et acides aminés de l'aliment

Le poids moyen de l'œuf est fonction de la quantité de protéines ingérées (R<sup>2</sup> = 0,58) (Peguri et Coon 1991, Walker et al 1991, Joly et Bougon 1997, Grobas et al 1999a, Harms et al 2000, Leeson et al 2001, Jalal et al 2006, 2007, Valkonen et al 2008, Van Krimpen et al 2008) (figure 4). L'ingestion d'un gramme de protéines par jour en plus entraîne en moyenne une augmentation du poids de l'œuf de 1,3 g.

La méthionine est le premier acide aminé limitant dans les aliments destinés aux poules pondeuses. Plusieurs publications évaluent l'effet de la teneur en méthionine sur le poids de l'œuf au moment du pic de ponte, par ajout de DL-méthionine (Schütte et al 1994, Bertram et al 1995a, 1995b, Dänner et Bessei 2002, Narvaerz-Solarte et al 2005), la couverture en protéines des aliments étant assurée. Le poids de l'œuf suit une relation curvilinéaire en fonction de la teneur en méthionine, avec une asymptote à 0,36-0,38% de méthionine dans l'aliment (figure 5).

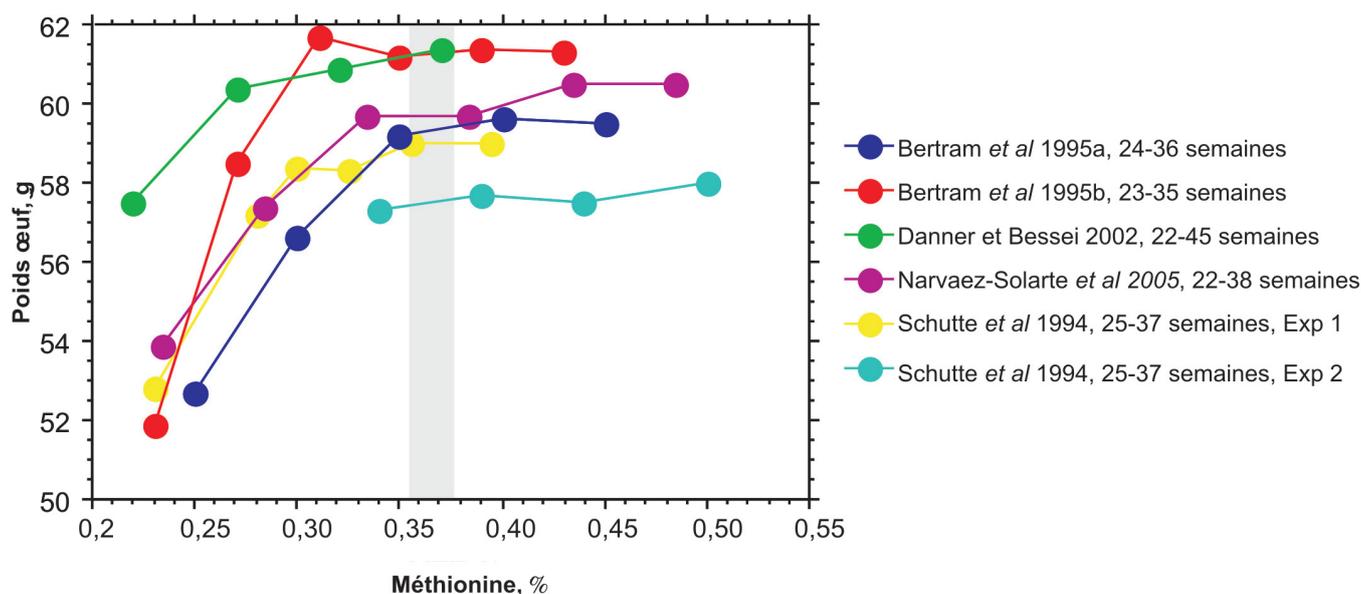
Calderon et Jensen (1990) observent les mêmes résultats, à deux stades de ponte (32-35 semaines et 59-63 semai-

Figure 4. Poids de l'œuf (g) en fonction de l'ingestion de protéines (g/j) ; (X : début ponte ; ● : milieu ponte ; ■ : fin ponte).



Poids œuf, g/j = 35,547 + 1,347 x Consommation MAT, g ; R<sup>2</sup> = 0,58

Figure 5. Poids moyen de l'œuf (g) en fonction de la teneur en méthionine totale de l'aliment (%).



nes), avec des teneurs en protéines de 16 ou de 19%. Toutefois, pour une teneur plus faible en protéines (13%), le poids d'œuf stagne à partir d'une teneur en méthionine plus basse, de l'ordre de 0,30%, indiquant que dans ces conditions, d'autres acides aminés sont limitants.

Bregendahl *et al* (2008) ont récemment mesuré les réponses de poules Hy-Line W-36 âgées de 28 à 34 semaines, à des teneurs variées en acides aminés (lysine, isoleucine, méthionine, thréonine, tryptophane et valine), avec un aliment de base pauvre en protéines (12,3%). L'acide aminé qui présente le plus fort effet sur le poids de l'œuf lorsqu'il est limitant est la méthionine, puis la thréonine, la valine et enfin la lysine. Le tryptophane n'a pas d'effet.

#### c) Effet spécifique des acides gras

Une grande part des lipides alimentaires est utilisée pour la synthèse des lipides du jaune, en agissant à la fois sur l'intensité de la vitellogenèse et la composition des dépôts. Les matières grasses alimentaires influencent le poids de l'œuf. L'effet le plus connu est celui de l'acide linoléique (Balnave et Weatherup 1974). Les apports recommandés en acide linoléique dans l'aliment se situent autour de 1% (Whitehead 1981, Grobas *et al* 1999b). Néanmoins, la réponse est plus importante lorsque l'aliment est enrichi à la fois en acide linoléique mais aussi en acide oléique présent par exemple dans l'huile d'olive (Whitehead 1981) ou l'huile de soja (Dänicke *et al* 2000). Ces acides gras très facilement absorbables augmentent la rétention des autres acides gras (Whitehead 1981). L'effet de l'enrichissement alimentaire en acide linoléique sur le poids de l'œuf

est plus prononcé chez les poules en début de ponte (22-32 semaines) (Whitehead *et al* 1991). Il est nul chez des animaux âgés (94-106 semaines) (Yousefi *et al* 2006).

#### d) Effet de différentes matières premières

Le maïs, le blé et le tourteau de soja sont les principales matières premières utilisées pour l'alimentation des poules pondeuses. L'utilisation des protéagineux dans l'alimentation des poules pondeuses en substitution partielle de ces matières premières peut détériorer le poids de l'œuf. Le pois, incorporé à des taux de 10, 15, 20 et même 30%, ne modifie généralement pas le taux de ponte mais dégrade légèrement le poids de l'œuf (jusqu'à 3,1%), sans effet notable des facteurs antitrypsiques des variétés d'hiver (Lacassagne 1988a). Les effets de la féverole sur le poids de l'œuf sont clairement établis, du fait de la présence de facteurs antinutritionnels, dont la vicine-convicine (Lacassagne 1988a, Castanon *et al* 1990, Grosjean *et al* 2000, Lessire *et al* 2005). La perte relative de poids d'œuf (% du témoin sans féverole) est proportionnelle au taux d'incorporation de la féverole dans l'aliment. Le taux de féverole à partir duquel s'observe une dépression du poids de l'œuf semble se situer aux environs de 7% (Lacassagne 1988a). L'incorporation de 15% de féverole sans vicine ni convicine améliore significativement le poids d'œuf sans toutefois atteindre celui de poules ne recevant pas de féverole (-1,4%) (Grosjean *et al* 2000). Toutefois, Dänner (2003) n'a pas observé de différences de poids d'œuf avec l'utilisation d'une variété à faible teneur en vicine et convicine (Divine) comparée à une variété

conventionnelle (Condor) incorporées à hauteur de 30% dans l'aliment.

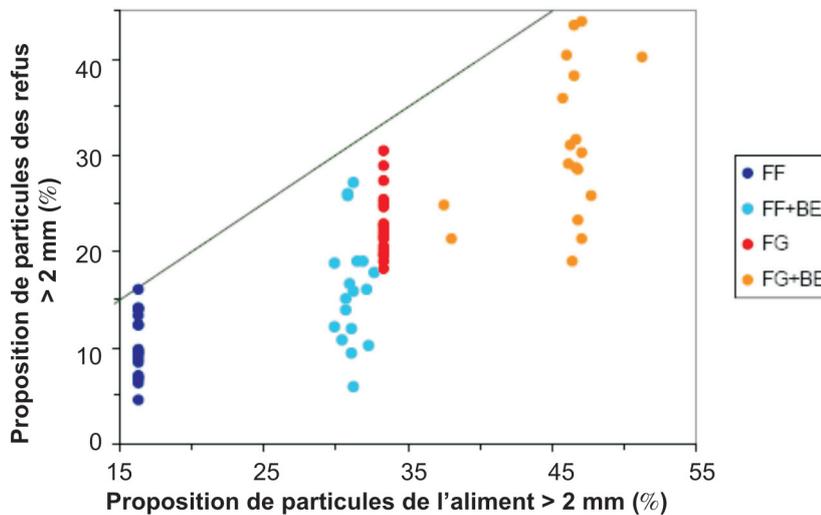
Le colza, d'une manière générale, déprime le poids de l'œuf. D'après Lacassagne (1988b), la perte de poids d'œuf est proportionnelle au taux d'incorporation du tourteau de colza dans l'aliment, avec un effet plus marqué du colza de type ancien, à fort taux en glucosinolates comparé au colza à faible teneur. Le taux de tourteau de colza à partir duquel s'observe une dépression du poids de l'œuf semble se situer aux environs de 8-9% (Lacassagne 1988b). Plus récemment, Ciurescu (2009) a toutefois montré, sur une période courte (40-47 semaines), que le tourteau de colza pouvait être incorporé à raison de 15% sans effet sur le taux de ponte et le poids moyen de l'œuf. Par ailleurs, les œufs issus de poules de souche à œufs bruns pouvaient développer jusqu'à présent un goût de poisson lorsque les poules sont nourries avec du colza. Ainsi, son taux d'incorporation est généralement limité à 5% pour les œufs colorés. Cette anomalie, liée à un polymorphisme simple du gène de l'enzyme responsable de la destruction dans le foie du triméthylamine provenant essentiellement du métabolisme de la sinapine présente dans le colza (Honkatukia *et al* 2005), tend à disparaître du fait d'une sélection sur ce critère.

#### e) Effets de la présentation de l'aliment

La poule pondeuse ingère des aliments afin de répondre à des besoins mais aussi en fonction de ses préférences et de la connaissance qu'elle a de l'aliment. Des interactions entre des préférences alimentaires et des régula-

**Figure 6.** Granulométrie des refus en fonction de la granulométrie de l'aliment distribué sous forme de farine mélangée ou non à du blé entier (Dezat et al 2009).

Chaque point du graphique correspond au refus d'une poule placée en cage individuelle. Les résultats obtenus, positionnés par rapport à la bissectrice ( $y = x$ ), indiquent que les animaux ingèrent préférentiellement les particules les plus grossières



FF : farine fine, FG : farine grossière, FF + BE : farine fine en mélange avec blé entier, FG + BE : farine grossière en mélange avec blé entier (Dezat et al 2009).

tions physiologiques interviennent, conditionnant la prise alimentaire et par voie de conséquence la production et le poids d'œufs.

Les volailles consomment les particules suffisamment grosses pour être saisies efficacement par le bec (Rogers 1995). Ces préférences correspondent à une optimisation énergétique (bénéfice/coût) du comportement alimentaire (Collier et Johnson 2004). Les poules pondeuses sélectionnent ainsi leur prise alimentaire en fonction de la taille relative des particules par rapport au bec. Avec un aliment présenté sous forme de miettes (72% des particules > 1,18 mm), Portella *et al* (1988) ont clairement montré la préférence immédiate des poules pondeuses pour les plus grosses particules. Dans le cas d'un mélange de blé entier et d'un aliment sous forme de farine, les animaux ingèrent préférentiellement les particules dont la taille est supérieure à 2 mm (figure 6) (Dezat *et al* 2009). Par ailleurs, les poules ne montrent pas une forte préférence pour les plus grosses particules quand l'aliment est présenté sous forme de farine relativement homogène et comprenant majoritairement des particules «moyennes» comprises entre 0,60 et 2,36 mm, contenant des quantités appréciables de calcium et de protéines, suggérant un rôle moteur de l'ingestion calcique (Portella *et al* 1988). Aussi quelle que soit la présentation, les petites particules (< 0,60 mm) ont un faible taux de disparition, la poule ayant toujours tendance à les délaissier (Portella *et al* 1988). Ces particules fines, conte-

nant des nutriments comme des vitamines, minéraux et acides aminés, percolent au fond de la mangeoire (Tang *et al* 2006).

Par ailleurs, Joly (2004) indique que la distribution d'une farine fine comparée à une mouture plus grossière (31 vs 9% de particules < 0,5 mm) entraîne une réduction de la consommation d'aliment, du taux de ponte et du poids d'œuf (- 0,9g). L'adjonction de petites quantités de matières grasses ou d'eau peut pallier en partie ce problème en «collant» les particules, facilitant ainsi la prise alimentaire (Tang *et al* 2006).

L'utilisation d'aliment humide est, quant à elle, assez peu documentée chez la poule pondeuse. Elle stimule la consommation en matière sèche (Tadtiyanant *et al* 1991, El Kaseh et Forbes 1995). L'utilisation d'un aliment humide fermenté caractérisé par un pH assez faible (4,5) réduit au contraire l'ingestion de matière sèche (110 vs 125 g/j) de 18 à 37 semaines, tout en améliorant significativement le poids de l'œuf mais seulement à partir de la 30<sup>ème</sup> semaine (Engberg *et al* 2009).

La forme physique de l'aliment interagit avec la capacité de la poule à ajuster son ingéré énergétique à la concentration énergétique de l'aliment. Les poules mangent plus d'un aliment dilué avec des fibres (45% de son de blé) quand il est présenté sous forme granulée qu'en farine (Vilariño *et al* 1996). Une présentation en miettes ou en granulé permet ainsi d'améliorer la

consommation d'énergie de régimes dilués.

De plus, les volailles sont capables d'apprentissage, leur permettant de reconnaître leur aliment et donc de mieux s'adapter à leur environnement, en améliorant leur capacité de choix. Pour exemple, le changement brusque de forme d'aliment, d'une farine à de grosses miettes (> 2,36 mm) entraîne une réduction immédiate et importante de l'ingéré (- 28%) (Portella *et al* 1988) susceptible d'affecter le poids de l'œuf.

#### f) Effets du mode de distribution

##### Dissociation des apports protéiques dans la journée

Les premiers travaux réalisés sur la dissociation des apports protéiques dans la journée datent des années 70. Ils ont été guidés par l'hypothèse qu'à l'instar du calcium, un moment adéquat puisse être déterminé dans la journée pour apporter les acides aminés nécessaires à la formation de l'albumen. En effet, tandis que les lipoprotéines du jaune sont synthétisées en continu par le foie, les protéines de l'albumen seraient synthétisées dans le magnum sur un pas de temps de 24 h et secrétées dans l'oviducte le matin, l'intervalle entre deux ovipositions successives étant en général de 24 h. Leeson et Summers (1978) ont dissocié les apports protéiques et énergétiques (le matin) des apports en calcium (l'après-midi). Reichmann et Connor (1979) ont apporté un aliment énergétique le matin, et protéique et calcique l'après-midi. Dans les deux cas, la consommation et le poids des œufs ont été réduits.

Des travaux plus récents avec des génotypes plus performants indiquent qu'il est possible de dissocier les apports protéiques sans détérioration du poids de l'œuf, en préférant des apports faibles le matin et plus élevés l'après-midi. Un apport en protéines réduit l'après-midi (13 au lieu de 16% de 14 h à 8 h en incluant la nuit) entraîne une réduction du poids de l'œuf (- 1,8 g), quelle que soit la teneur en protéines de l'aliment distribué le matin (13 ou 16%) (Penz et Jensen 1991). En revanche, un apport en protéines réduit le matin et élevé l'après-midi permet de maintenir le poids de l'œuf.

Keshavarz *et al* (1998b) ont procédé également à des alternances d'aliments variant par leur teneur en protéines dans la journée (10 et 16%). Comparé à un aliment témoin protéique (16%) distribué toute la journée, la distribution de l'aliment le plus protéique l'après-midi permet de maintenir le poids moyen de l'œuf, ce qui n'est pas le cas lorsqu'il est distribué le matin (Keshavarz *et al*

1998b). Cette différence, observée entre matin et après-midi, peut s'expliquer par une consommation d'aliment plus faible le matin (40%), pouvant entraîner un déficit en acides aminés.

Ces travaux nécessitent des investigations supplémentaires en préférant des apports protéiques faibles le matin et plus élevés l'après-midi et en évaluant les rejets azotés.

### Utilisation de graines entières

D'autres travaux ont cherché à valoriser des céréales entières dans l'aliment. Ces graines sont apportées avec un aliment complémentaire concentrant l'apport de protéines, minéraux et vitamines en mélange ou par séquence. Blair *et al* (1973) ont apporté par séquence des céréales (blé, orge et maïs) le matin et un aliment complémentaire l'après-midi, sans aucune détérioration du poids de l'œuf. Il en a été de même avec un apport simultané des céréales et du complémentaire. Plus récemment, Umar Faruk *et al* (2010) ont obtenu des résultats similaires avec une distribution de blé entier le matin et d'un aliment complémentaire l'après-midi, ainsi qu'avec un mélange des deux fractions. Il est de plus à souligner que l'efficacité alimentaire est notablement améliorée avec la distribution séquentielle de blé et d'un aliment complémentaire (+ 5%,  $P < 0,01$ ), ce qui n'est pas le cas avec le mélange. Robinson (1985) a observé une dégradation du poids de l'œuf avec la distribution d'un aliment concentré en protéines le matin et de céréales entières l'après-midi. Ceci peut s'expliquer par un ordre de distribution des aliments (protéiques et énergétiques) non adéquats, comme cela a été observé par Keshavarz *et al* (1998b).

L'utilisation à la ferme de céréales entières avec un aliment complémentaire présente plusieurs avantages : réduction du transport des céréales et du coût énergétique lié au broyage, baisse du coût de production du fait de l'amélioration de l'efficacité alimentaire. Toutefois ce système nécessite de disposer de deux silos et d'être capable de contrôler avec précision les niveaux d'apport de l'aliment complémentaire et de la céréale.

## 2 / Variation des proportions d'albumen et de jaune

L'évolution des proportions de jaune et d'albumen est liée principalement à l'âge. Pour exemple, chez la poule ISA Brown, entre les périodes de 20-26 semaines et de 54-60 semaines, la proportion de jaune augmente de 23,1 à 28,1% tandis que la proportion d'albumen décroît de 63,8 à 59,2% (Zita *et al* 2009). Les effets nutritionnels, quant à eux, sont beaucoup plus réduits.

### 2.1 / Effet de la teneur en protéines et en acides aminés

Les proportions des constituants de l'œuf peuvent être légèrement modifiées par la teneur en protéines de l'aliment. Le pourcentage d'albumen est réduit au profit du jaune (0,4 point) avec un aliment moins riche en protéines (13 vs 16%) (Penz et Jensen 1991). Lorsque l'aliment est appauvri en protéines (18,9 vs 14,4% de 20 à 43 semaines, 16,3 vs 13,8% de 44 à 63 semaines), Novak *et al* (2006) observent que le pourcentage d'albumen, les teneurs en protéines du blanc et du jaune sont légèrement réduits (respectivement 61,1 vs 60,6%,

10,37 vs 9,67% et 15,95 vs 15,70%) sans modifier le pourcentage de jaune (26,2%).

L'augmentation des apports en méthionine (0,28 et 0,43%) entraîne une amélioration du poids de l'œuf sans affecter les pourcentages de blanc et de jaune (Shafer *et al* 1996). Il en est de même pour des apports croissants en lysine (0,70 à 1,58%) à partir de la 45<sup>ème</sup> semaine d'âge. Lorsque le poids de l'œuf est augmenté, les proportions de blanc et de jaune ne sont pas affectées (Prochaska *et al* 1996). En revanche, avec des apports croissants de lysine (0,72 à 1,37%) à partir de la 26<sup>ème</sup> semaine d'âge et sous des températures plus élevées, la proportion de blanc tend à diminuer au profit du jaune, avec 0,5 point de différence pour les deux critères entre les régimes extrêmes, alors que le poids d'œuf n'est pas modifié (Prochaska *et al* 1996). Ces résultats suggèrent que dans des situations particulières, des légères compensations sont possibles entre le blanc et le jaune.

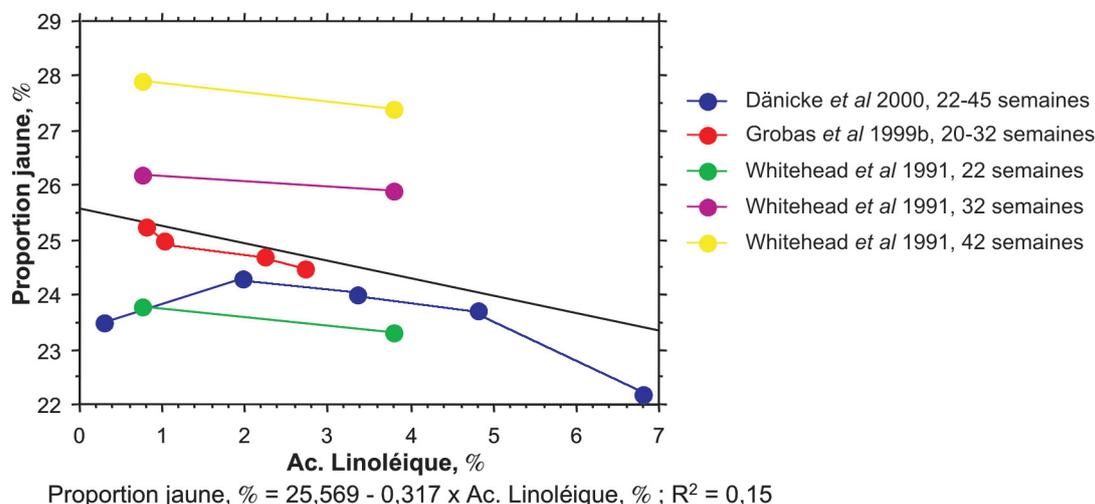
### 2.2 / Effet des acides gras

L'enrichissement de l'aliment en acide linoléique entraîne une légère diminution de la proportion de jaune au profit de l'albumen (Whitehead *et al* 1991, Grobas *et al* 1999b, Dänicke *et al* 2000) (figure 7).

### 2.3 / Effet du mode de distribution

La distribution séquentielle de deux aliments variant par leur teneur en protéines (16 et 13%) entraîne, avec une réduction du poids de l'œuf, une légère réduction du pourcentage d'albumen (-0,6 point) au profit du jaune, lorsque

Figure 7. Proportion de jaune en fonction de la teneur en acide linoléique de l'aliment.



La proportion de jaune dans l'œuf est mesurée pour différents teneurs en acide linoléique dans l'aliment. Chaque point correspond à une mesure moyenne réalisée dans le cadre d'une publication (sur une période ou un âge donnés)

l'aliment le moins protéique est distribué l'après-midi (Penz et Jensen 1991). Par ailleurs, avec des alternances d'aliments variant par leur teneur en protéines dans la journée (10 et 16%) il n'y a ni modification du poids moyen de l'œuf ni des pourcentages d'albumen et de jaune (Keshavarz *et al* 1998b).

D'après l'étude réalisée par Umar-Faruk *et al* (2010), l'utilisation de graines entières de blé en mélange avec un aliment protéique complémentaire ou par séquences (graines entières le matin et complémentaire l'après-midi) de 19 à 46 semaines, ne modifie pas significativement le pourcentage d'albumen. Le pourcentage de jaune est quant à lui réduit sur la période 27-37 semaines avec une distribution séquentielle comparée à une alimentation en mélange des mêmes matières premières. Cet effet est conjoint à une prise de poids plus faible des animaux soumis à l'alimentation séquentielle associée à une amélioration de l'indice de consommation.

### 3 / Variation de la composition en acides gras

Le profil en acides gras de l'œuf, que ce soit dans les triglycérides ou les phospholipides, reflète directement la consommation alimentaire en AG de la poule (Romanoff et Romanoff 1949). De très nombreux travaux démontrent cette dépendance et la faisabilité de modifier la composition en AG de l'œuf pour optimiser sa valeur nutritionnelle. En effet, il est tout aussi facile de modifier la composition en acides gras saturés et insaturés de l'aliment des poules qui est directement dépendante des matières premières riches en huile ou des sources d'huiles incorporées dans l'aliment. En résumé, les acides gras saturés (acides palmitique C16:0 et stéarique C18:0) sont les plus stables dans l'œuf, tandis que les acides gras mono- et polyinsaturés (AGPI) sont les plus variables, par substitution réciproque. Ce processus, connu depuis plus d'un demi-siècle, a fait l'objet de nombreuses revues (Hermier 1997, Nys et Sauveur 2004, Yannakopoulos 2007) et est décrit dans l'article sur la valeur nutritionnelle de l'œuf de ce numéro.

### 4 / Variation de la composition en minéraux et vitamines

#### 4.1 / Minéraux

Les teneurs de l'œuf en macroéléments minéraux (calcium, phosphore,

**Tableau 1.** Effet du niveau et de la durée de supplémentation en cholecalciférol sur la teneur du jaune d'œuf en cholecalciférol et 25-hydroxy-cholecalciférol (Mattila *et al* 1999, 2004).

Durée de la supplémentation (semaine)	Aliment	Jaune d'œuf	
	Cholecalciférol ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )*	Cholecalciférol ( $\mu\text{g}\cdot 100\text{ g}$ )	25(OH)D <sub>3</sub> ( $\mu\text{g}\cdot 100\text{ g}$ )
4 à 6	26,6	1,2-1,5	0,5
	62,4	3,4-3,5	0,8-1
	216	21-23	1,4-1,5
0	43	4,2	1,1
1	280	30,2	1,9
3	280	26,6	1,7

\*  $1\mu\text{g} = 40\text{ ui}$  de vitamine D<sub>3</sub>

sodium et potassium) peuvent être considérées comme invariables. A contrario, celles de nombreux oligoéléments sont fonction de l'ingéré de la poule (Romanoff et Romanoff 1949, Stadelman et Pratt 1989, Nys et Sauveur 2004). Le cas le plus anciennement connu est celui de l'iode dont la concentration dans l'œuf peut être multipliée par un facteur de plusieurs dizaines, dans le blanc, mais aussi et surtout dans le jaune. Le sélénium a été le plus étudié pour des valeurs dans l'aliment variant de 0,1 à 0,6 mg.kg. Sa teneur peut être accrue de 5 à 10 fois (12 fois dans le blanc et 4 fois dans le jaune), à partir de teneurs de base elles-mêmes variables selon les zones de production (de l'ordre de 0,15 mg.kg dans le jaune et 0,05 mg.kg dans le blanc) (Surai et Spark 2001). L'utilisation d'une source organique de sélénium permet d'enrichir l'œuf en Se jusqu'à 30  $\mu\text{g}\cdot\text{œuf}$  (0,5 mg.kg), ce qui représente la moitié du besoin journalier de l'homme (Surai *et al* 2007). A noter toutefois que la législation européenne limite son utilisation à 0,5 mg.kg d'aliment maximum. Par ailleurs, les contenus en manganèse peuvent aussi être facilement modifiés, alors que ceux en fer sont plus stables.

#### 4.2 / Vitamines

La teneur du jaune en vitamines liposolubles est directement dépendante de l'apport alimentaire. Par conséquent, il est possible d'enrichir la teneur des œufs en ces vitamines (Nys et Sauveur 2004, Sirri et Barroeta 2007, Nys 2010).

##### Vitamine E (tocophérol)

Les risques d'oxydation qui résultent de l'enrichissement des œufs en AGPI ont suscité le développement d'études parallèles sur la possibilité d'enrichir le jaune de l'œuf en anti-oxydants. On peut ainsi multiplier par 6, voire par 10, le contenu de l'œuf en vitamine E mais le rendement de dépôt semble variable du fait probablement des autres constituants de l'aliment (lipides,

et/ou de la durée de supplémentation. A titre d'exemple, le taux de transfert dans l'œuf est de 42% avec un apport de 50  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  mais chute à 26% lorsque l'apport est majoré à 200  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Galobart *et al* 2001a et b). L'accumulation de tocophérol dans l'œuf est décelable dès 4 jours après le début de la supplémentation alimentaire, et est maximale après 2 à 3 semaines, ce qui est cohérent avec la durée de formation du jaune. L'enrichissement de l'œuf en vitamine E exerce un effet anti-oxydant incontestable sur les lipides des œufs riches en AGPI, principalement lorsque l'œuf est conservé à température ambiante, ou séché par procédé spray (Galobart *et al* 2001 b et c).

##### Vitamine D<sub>3</sub>

La teneur en vitamine D<sub>3</sub> peut être multipliée par 10 environ, pour atteindre des concentrations de 30 à 40  $\mu\text{g}\cdot 100\text{ g}$  de jaune, une dizaine de jours après le début de la supplémentation. Sur le long terme (plus de 100 jours), elle se stabiliserait à un niveau un peu plus faible, de l'ordre de 20  $\mu\text{g}\cdot 100\text{ g}$  (Mattila *et al* 2004, tableau 1).

##### Vitamine A

La vitamine A est incorporée dans l'œuf avec une efficacité élevée (78%) jusqu'à un apport alimentaire de 8000 UI $\cdot\text{kg}^{-1}$  (Naber et Squires 1993). Le contenu de l'œuf en vitamine A peut ainsi être multiplié par 10 au moins. A noter qu'il existe des antagonismes entre le dépôt de vitamines liposolubles A et E.

##### Vitamine K

La poule contrairement aux mammifères (Will *et al* 1992), est capable de convertir la forme prépondérante de cette vitamine qui est synthétisée par les plantes, en une forme active qui intervient dans le métabolisme osseux, aussi il est possible d'augmenter la teneur en vitamine K des œufs d'un facteur 15 (Suzuki et Okamoto 1997).

## Autres vitamines

Des essais d'enrichissement de l'œuf en d'autres vitamines ont été conduits. Parmi les vitamines hydrosolubles (Squires et Naber 1992), les vitamines B2 (riboflavine) et B12 (cobalamine) sont les plus susceptibles de varier avec le régime de la poule, suivies par la thiamine (B1), la biotine (B8) et les acides folique (B9) et pantothénique (B5). Dans tous les cas, les taux de transfert décroissent avec les apports et des plafonds sont atteints. L'acide folique par exemple, n'augmente pas au-delà de 40 µg.œuf, contre 17 µg.œuf dans les œufs témoins ; ce niveau est atteint avec une supplémentation alimentaire de 4 mg·kg<sup>-1</sup> (House *et al* 2002). Les concentrations en pyridoxine (B6) et en niacine (B3) ne semblent pas pouvoir être augmentées dans l'œuf par voie alimentaire (Sauveur 1994).

Un apport en vitamine C pourrait avoir un effet positif sur la qualité de la coquille de poules soumises à de fortes températures (Njoku and Nwazota 1989).

## 5 / Variation de la couleur du jaune et de sa teneur en caroténoïdes

### 5.1 / Facteurs influençant l'efficacité d'un caroténoïde alimentaire chez la poule

Les animaux ne peuvent pas synthétiser les caroténoïdes, aussi leur pigmentation dépend directement des apports alimentaires. Chez la poule, l'efficacité

de coloration pour le jaune d'œuf est très variable d'un caroténoïde à un autre, car elle est influencée par l'absorption intestinale, le transfert plasmatique, l'efficacité d'exportation dans les tissus et le métabolisme de dégradation des caroténoïdes (Nys 2000, 2010). L'efficacité du dépôt dans le jaune est respectivement de 14% pour l'astaxanthine, 25% pour la zéaxanthine et 30 à 40% pour la canthaxantine (Hencken 1992). Le dépôt de caroténoïde dans le jaune est rapide (< 48h) mais une dizaine de jours sont nécessaires pour obtenir une couleur stable puisque cette durée correspond au temps moyen de formation d'un jaune. (Romanoff et Romanoff 1949, Marusich et Bauernfeind 1981).

Il existe un très grand nombre de caroténoïdes caractérisés par une chaîne de 40 carbones alternant simples et doubles liaisons à l'origine des propriétés chromophores de ces molécules (Britton 1995, figure 8). La grande diversité des caroténoïdes résulte de modification de cette structure de base par cyclisation en extrémité de cette chaîne de carbones, par hydrogénation ou déshydrogénation ou d'oxydation de carbones. Leur utilisation et pouvoir pigmentant varient en fonction des espèces. Les ruminants accumulent préférentiellement le carotène, les oiseaux les oxy-caroténoïdes. Différents paramètres sont à l'origine de la variabilité d'efficacité des caroténoïdes chez l'oiseau. C'est tout d'abord leur aptitude à générer de la vitamine A, par scission de leur molécule (cas des  $\alpha$ - et  $\beta$ -carotènes non pigmentants). Tous les caroténoïdes possédant une extrémité  $\beta$ -carotène ont cette propriété. Le degré de conversion au niveau intestinal

dépend alors des caractéristiques du caroténoïde et des apports alimentaires en vitamine A. Dans les aliments riches en vitamine A, utilisés dans les conditions habituelles, la conversion est mineure à partir de la zéaxanthine et la canthaxantine (Hencken 1992).

L'efficacité d'un caroténoïde dépend aussi beaucoup de son absorption intestinale et de son métabolisme (Hamilton 1992, Hencken 1992). L'absorption de lutéine chez l'oiseau est plus efficace sous forme libre qu'estérifiée ; or, c'est sous cette dernière forme qu'on la trouve dans les extraits de soucis ou autres fleurs riches en lutéine utilisées en aviculture. La conformation de la molécule influence aussi l'efficacité de la pigmentation (Hencken 1992). Les *trans*-caroténoïdes présents à hauteur de 60 à 90% dans les plantes ont une coloration plus rouge que les isomères *cis*, et sont donc plus pigmentant pour l'œuf. Chez l'oiseau, les caroténoïdes les plus efficaces sont ceux contenant un atome d'oxygène (xanthophylles). C'est pourquoi les caroténoïdes d'origine végétale les plus utilisés sont la lutéine, la zéaxanthine et la capsanthine (Nys 2000).

Le jaune d'œuf semble capable d'accumuler préférentiellement les caroténoïdes : 50% de la zéaxanthine et 80% de la canthaxantine sont accumulés dans le jaune. Le dépôt des caroténoïdes efficaces chez la poule se fait dans le jaune globalement en proportion de leurs teneurs initiales dans l'aliment (Hamilton 1992, Hencken 1992).

### 5.2 / Sources alimentaires de caroténoïdes de l'œuf

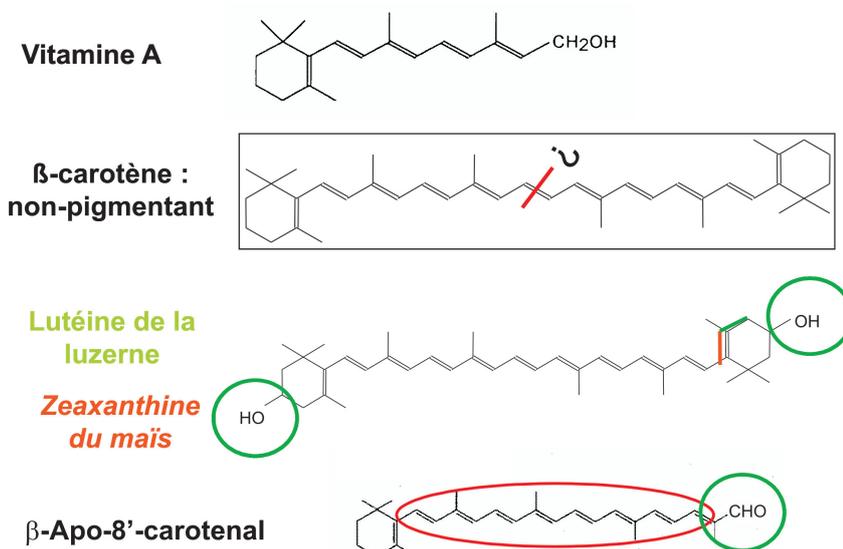
Les principales sources végétales utilisées en Europe sont le maïs, le gluten de maïs, la luzerne, les concentrés de luzerne et des extraits de fleurs (soucis, tagètes) ou de plantes (paprika) (tableaux 2 et 3). La concentration en caroténoïdes est plus élevée quand la teneur en protéines de la source augmente, que ce soit pour le maïs, la luzerne ou les extraits de fleurs. Le blé et le sorgho sont très pauvres en caroténoïdes.

Le maïs et ses dérivés se caractérisent par leur richesse en lutéine et zéaxanthine, mais aussi par la présence de cryptoxanthine (3). La lutéine est le principal caroténoïde de la luzerne qui contient aussi de la violaxanthine, non pigmentante. Les extraits de fleur contiennent principalement de la lutéine.

La teneur en caroténoïdes des matières premières varie en fonction de l'origine génétique de la plante, de la maturité à la récolte, de la durée et des

Figure 8. Structure des caroténoïdes (Britton 1995).

Seuls les caroténoïdes hydroxylés sont efficaces chez la poule. Le carotène peut être scindé en deux molécules de vitamine A et est par conséquent peu efficace pour colorer le jaune d'œuf.



**Tableau 2.** Concentrations en xanthophylles des plantes introduites dans l'aliment de poules pondeuses comme sources de pigments (Nys 2000).

Matières premières d'origine végétale	Concentration en xanthophylles (mg·kg <sup>-1</sup> )	
	Valeur moyenne	Valeurs extrêmes
Maïs jaune	17	10-40
Gluten de maïs (CP 60%)	260	180-400
Luzerne déshydratée (CP 25%)	480	350-540
Concentré de luzerne (CP 59%)	1560	900-2100
Extrait de soucis	9000	4500-14 000
Concentré d'extrait de soucis	50 000	40 000-55 000

CP : teneur en protéines.

**Tableau 3.** Nature et concentration en xanthophylles du gluten de maïs (protéines : 59,2%) et du grain de maïs (n = 11) (Looten et al 2003).

	Gluten de maïs (mg.kg)		Maïs (mg.kg)
	Moyenne	Ecart Max-Min.	
Xanthophylles totaux	361	278-440	31 ± 4
Lutéine	155	117-205	15 ± 2
zéaxanthine	91	60-161	9 ± 2
β-cryptoxanthine	14	7-35	1 ± 1
Autres pigments	84	71-99	5 ± 1
β-carotène	7	3-12	1 ± 0
Autres carotènes	9	6-13	< 1

conditions de stockage. Un maïs peut ainsi perdre jusqu'à 50% de sa teneur initiale en caroténoïdes en fonction des conditions et de la durée de stockage. La teneur en xanthophylles de la luzerne dépend du numéro de coupe et du stade de maturité de la plante. C'est pourquoi des mélanges à grande échelle sont réalisés entre récoltes, tout au long de l'année, pour homogénéiser le produit. Pour les concentrés de luzerne, les conditions de séchage sont également un facteur très important (Nys 2000).

Les extraits de soucis sont riches en lutéine. Ils sont préparés à partir de pétales de fleurs dont les caroténoïdes sont extraits par des solvants, saponifiés et protégés de l'oxydation par des anti-oxydants. Ils sont riches en esters qui doivent donc être hydrolysés pour obtenir la forme libre de la lutéine. Leur efficacité dépend du procédé de préparation, notamment du degré de saponification qui peut augmenter celle-ci de 40%, et de leur stabilité au cours du stockage. Il existe une grande variabilité entre les différentes préparations commerciales. L'efficacité relative de tagètes varie entre 13 et 20% (Grashorn et Seehaver 1999). Ces valeurs des sources commerciales peuvent cependant évoluer notablement car les procédés de préparation sont continuellement améliorés.

Les sources végétales apportent principalement des caroténoïdes jaunes ;

seul le paprika disponible en faible quantité apporte une teinte rouge. Ce caroténoïde est préparé par un processus analogue à celui des tagètes, à partir de piment rouge (*Capsicum annuum* ou *Capsicum frutescens*). La saponification améliore considérablement son efficacité, qui demeure cependant relativement faible (1 à 6%). Il existe toutefois de grandes différences d'efficacité entre préparations, avec des rapports d'efficacité vis-à-vis de la canthaxanthine de 3 à 5 pour le rendement de dépôt et de 1 à 4 pour la capacité pigmentante.

Des caroténoïdes de synthèse correspondant à des caroténoïdes naturels (acide β-apo8'-caroténoïde ethyl ester, canthaxanthine, citranaxanthine) sont également introduits dans l'aliment des pondeuses. Leur efficacité de coloration dépend d'abord de la structure chimique de la molécule, mais également de sa stabilité lors du stockage. Ils ont été choisis pour leur grande efficacité de coloration, 2 à 3 fois supérieure aux caroténoïdes d'origine végétale, et l'absence de conversion en vitamine A. Celle de l'apo-8-ester est de 42 à 50%, (Grashorn et Saahayer 1999). Pour ces caroténoïdes de synthèse, l'enrobage de la molécule active est optimisé pour favoriser leur stabilité. En Europe, la supplémentation en xanthophylles est limitée à 80 mg.kg à l'exception de la canthaxanthine (8 mg.kg). Huit caroténoïdes de synthèse sont autorisés en caroténoïdes rouges : la capsanthine, la

canthaxanthine, la citranaxanthine et la cryptoxanthine, en caroténoïdes jaunes : le β-apo 8' caroténal, l'acide β-apo 8' caroténoïque, la lutéine, la zéaxanthine mais seule la canthaxanthine est utilisée couramment (Breithaupt 2007).

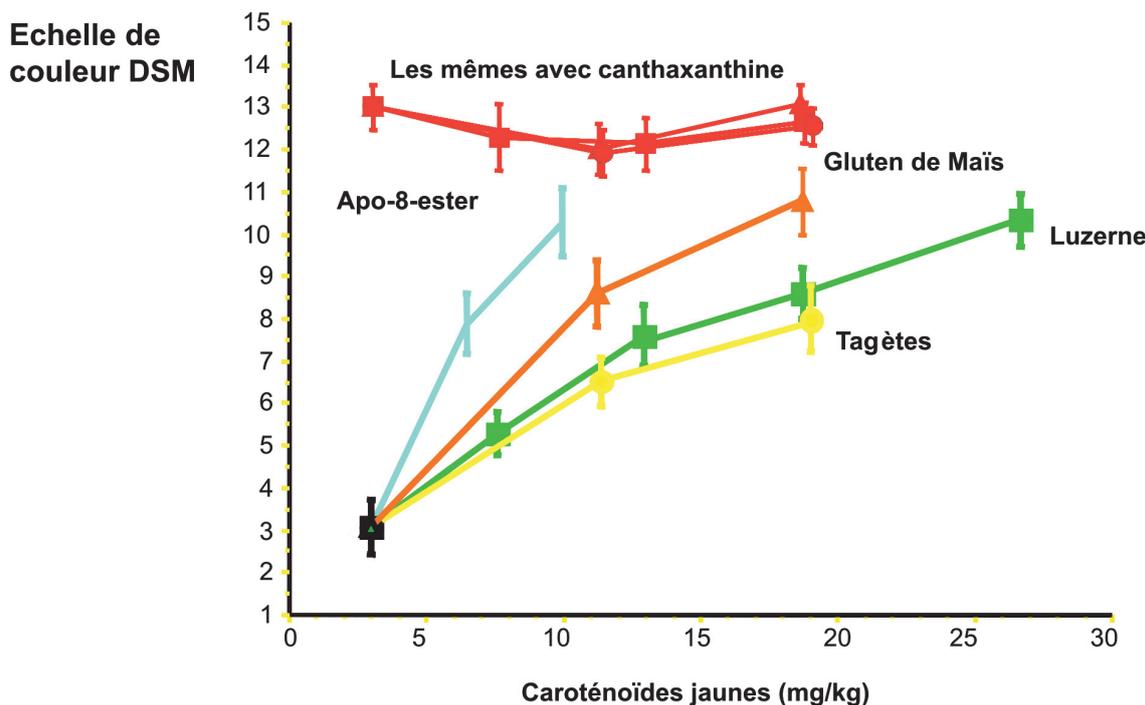
Ainsi, la perception de l'intensité de couleur du jaune d'œuf dépend directement de la quantité de caroténoïde consommée par la poule, de leur efficacité et donc de la proportion et de la composition chimique des sources utilisées (végétale ou synthétique). La figure 9 illustre cette variabilité en fonction de la source et démontre l'existence d'un plateau de réponse de la coloration du jaune au-delà d'une teneur relativement faible de caroténoïdes ingérés.

Dans la pratique, les poules sont nourries avec des matières premières riches en caroténoïdes jaunes et sont supplémentées avec des sources concentrées en caroténoïdes rouges pour répondre au souhait du consommateur français de forte coloration du jaune. Une coloration optimale du jaune d'œuf est obtenue en apportant dans l'aliment un mélange de caroténoïdes jaunes (12 à 20 mg·kg<sup>-1</sup>) et d'une faible quantité de caroténoïdes rouges (1 à 2 mg·kg<sup>-1</sup>). Cet apport de rouge est indispensable si une couleur jaune orangé, supérieure à 10 sur l'échelle «DSM» est souhaitée.

## 6 / Variation de la qualité de la coquille

La structure et la formation de la coquille sont décrites dans un autre article de ce numéro spécial (Nys et al 2010). Le déclassement des œufs lié à la présence de coquilles cassées ou fêlées reste notable (plus de 10%) et a des conséquences économiques importantes (Nys 2001, Nys et al 2008). Ce déclassement relativement stable malgré les nombreux progrès réalisés en génétique et alimentation résulte en partie de l'amélioration importante des techniques non invasives de détection des œufs micro-fêlés. Ces défauts de la coquille augmentent le risque de toxoinfection alimentaire, du fait qu'ils favorisent la pénétration de bactéries pathogènes. L'utilisation de méthodes plus sensibles de détection des micro-fêlures de la coquille, telles que les mesures acoustiques (De Ketelaere et al 2004) améliore le tri des œufs, maintient un taux élevé de déclassement et limite le risque sanitaire. Le taux d'œufs cassés ou micro-fêlés est minimum en début de production, puis augmente considérablement au cours d'un cycle de ponte, pour atteindre à la fin d'une année de production des valeurs de 12 à 20% en fonction des élevages, de leur gestion, de la nutri-

**Figure 9.** Couleur du jaune d'œuf en fonction de l'apport et de la nature source de caroténoïdes alimentaires avec ou sans 2 mg·kg<sup>-1</sup> de canthaxanthine (Nys 2000).



tion et des conditions d'environnement. La solidité de la coquille dépend de la quantité de matériau déposé et de la fabrication de ce matériel protecteur sous la dépendance de la matrice de la coquille (Nys *et al* 1999, 2010). De très nombreux exemples démontrent que l'alimentation des poules influence la quantité de coquille déposée.

### 6.1 / Alimentation calcique de la poule pondeuse et de la poulette

Le calcium est un nutriment-clé de la solidité de la coquille (Nys 2001). Classen et Scott (1982), Sauveur (1987), Hartel (1990) indiquent que les besoins en calcium sont de l'ordre de 0,9 à 1,2% pour la période de croissance durant la phase poulette, de 2-2,5% pour le stockage dans l'os médullaire, environ deux semaines avant la ponte, et de 3,5-4% pour la formation de l'œuf en période de ponte. La transition de la phase «poulette immature» à celle de «poule pondeuse» est une période cruciale. Il est indispensable, 2 semaines avant l'apparition des premiers œufs (14-16 semaines), d'augmenter l'apport de calcium dans l'aliment de 1 à 2,5% pour favoriser la mise en place de l'os médullaire et la formation des coquilles des premiers œufs. Introduire directement l'aliment pondeuse peut provoquer une sous-consommation des poules. Une introduction trop tardive de calcium réduit non seulement la qualité des premiers œufs, mais aussi celle des suivants, même si la poule reçoit alors un aliment riche en calcium (Leeson *et*

*al* 1986, Roland et Bryant 2000). Les poules ont actuellement une maturité sexuelle très précoce, aussi la probabilité que les premiers œufs soient pondus avant le transfert des poules en bâtiment de production est importante. Le risque de sous-consommation d'aliment et de calcium par la poule peut être jugulé en améliorant la forme de présentation de l'aliment (présentation miette, aliment broyé grossièrement, calcium sous forme particulaire).

La poule exporte en moyenne 2,2 g de calcium par œuf et doit donc, compte tenu de la rétention calcique, en consommer 4 g chaque jour. Un apport limitant en calcium (teneur de l'aliment inférieure à 3%) réduit la solidité de la coquille, la production d'œufs et augmente la mortalité des poules (Hartel 1990, Keshavarz 1998a et b). La solidité de la coquille est maximale quand les poules ingèrent 4 à 4,5 g de calcium par jour (Scott *et al* 1999). Pour limiter la baisse de qualité de la coquille avec l'âge de la pondeuse, certains auteurs préconisent d'augmenter progressivement l'apport de calcium au cours de l'année de production (3,5 puis 4,5 puis 5,5% de calcium dans l'aliment), mais les preuves expérimentales d'une amélioration sont peu convaincantes sur la qualité de la coquille, seules les réserves osseuses augmentant (Guinotte et Nys 1993).

Les sources de carbonate de calcium proviennent de carrières (calcaire, marbre) ou sont d'origine marine (coquilles

d'huître et autres espèces bivalves). Elles sont disponibles sous différentes tailles de particules et correspondent à différentes propriétés physico-chimiques (Guinotte et Nys 1991). Les analyses chimiques de ces sources démontrent une grande variabilité de leur composition en calcium mais également en oligoéléments (Reid et Weber 1976, Guinotte et Nys 1993) mais le type cristallographique (calcite, aragonite ou amorphe) n'influence pas cette composition et est sans conséquence sur la qualité de la coquille chez la poule (Brister *et al* 1981). Le paramètre physique prédominant pour la qualité de la coquille est donc la taille de la particule (grossière ou broyée) du fait des particularités physiologiques de la poule pour former chaque jour une coquille (Nys 1993, Bar 2008).

La désynchronisation entre l'ingestion de calcium et son exportation vers l'œuf est corrigée par l'existence de l'appétit calcique développé par la poule, juste avant l'extinction de la lumière. Un apport de calcium particulaire valorise cette capacité de la poule à ingérer préférentiellement du calcium lorsqu'elle initie la fabrication d'une coquille. Les particules doivent avoir une taille supérieure à 0,8 mm pour être retenues sélectivement par le gésier (Rao et Roland 1990). Cet appétit pour le calcium est à l'origine de la dilatation du jabot qui stimule la sécrétion acide du proventricule (Ruoff et Sewing 1971) ; et donc la solubilisation du calcium dans le tractus gastro-intestinal

(Guinotte *et al* 1995). De très nombreuses expériences conduites depuis 1927 (plus de 350 !) démontrent, dans plus de 50% des cas, l'intérêt d'introduire dans l'aliment du calcium particulaire en substitution de calcium broyé (Guinotte et Nys 1993, Nys 2001). Le pourcentage de réponses positives est plus élevé (51 contre 19% des comparaisons) quand la taille de la particule est supérieure à 1 mm par rapport à des particules plus fines (0,2 à 1 mm ou < 0,2 mm). L'effet est d'autant plus marqué que les poules sont soumises à des conditions défavorables à la formation de la coquille : apport alimentaire en calcium limitant, poules soumises à un stress de chaleur (78% des essais positifs en présence de calcium particulaire *vs* 43% à température normale), âge élevé des poules (62% d'essais positifs en fin de cycle de production *vs* 30% en début) (Guinotte et Nys 1993).

## 6.2 / Effet de la teneur en lipides de l'aliment sur l'utilisation du calcium

Les acides gras peuvent s'associer au calcium et au magnésium dans le tractus gastro-intestinal et former des savons insolubles particulièrement lorsque ces acides gras sont saturés. Une augmentation du niveau de calcium alimentaire et l'incorporation de grandes quantités de graisses notamment désaturées (10%) provoquent chez la poule la formation de savon dans l'intestin et une diminution de la rétention calcique (Atteh et Leeson 1985). Cependant, l'absorption de calcium ou celle de lipides et la qualité de la coquille ne sont pas affectées par la formation de savon lorsque le niveau des graisses dans l'aliment est inférieur à 6%. En effet, l'absorption de calcium semble précéder celle des lipides et la formation de savon se ferait plutôt avec la partie non absorbée du calcium dans les parties distales du tractus gastro-intestinal (Guéguen 1992). Le faible effet des lipides sur la calcium pourrait aussi résulter d'une plus forte sécrétion de sels biliaires chez l'animal adulte par rapport au jeune or la bile réduit la formation de savon (Krogdahl 1985). Enfin, la vidange gastrique et le transit intestinal sont ralentis par la présence de graisses (Krogdahl 1985) ce qui pourrait faciliter la solubilisation du calcium et son absorption.

## 6.3 / Alimentation en phosphore de la poule

Il est également bien établi qu'un excès de phosphore dans l'aliment pénalise la qualité de la coquille. C'est pourquoi les recommandations d'apport en phosphore (0,28% de phosphore non phytique) ont été réduites notablement il y a une vingtaine d'années, sous l'in-

fluence du groupe européen d'alimentation minérale de l'association mondiale d'aviculture (Nys 2001). Une alternative proposée par Keshavarz (2000) consiste à réduire progressivement l'apport de phosphore au cours de l'année de production de la poule, par exemple en introduisant 0,25 puis 0,2 puis 0,15% de phosphore, respectivement pour les périodes 30-42, 42-54 et 54-66 semaines d'âge. La généralisation de la supplémentation des aliments avec une phytase microbienne qui libère le phosphore phytique des matières premières végétales, a accentué la réduction des apports de phosphore minéral. Il est généralement admis qu'un apport de phytase de 300 UP (Unité Phytase) est équivalent à 0,8 ou 1 g de phosphore minéral et que l'addition à l'aliment de 1 g de phosphore non phytique suffit à éviter une réduction éventuelle de la production d'œufs en lien avec une déficience en phosphore. Inversement, un apport de 0,11% de phosphore non phytique (NPP) est insuffisant pour assurer des performances normales au contraire d'un apport de 0,21% NPP selon Keshavarz (2003).

## 6.4 / Vitamine D<sub>3</sub> et qualité de la coquille

La vitamine D<sub>3</sub> (seule forme efficace chez l'oiseau) intervient dans le contrôle du métabolisme calcique chez la poule, notamment sur l'absorption intestinale du calcium qui est directement dépendante du métabolite actif, le 1,25 dihydroxy-cholecalciférol (Nys 1993, Bar 2008). Cependant, le transfert de calcium au niveau de l'utérus pour la formation de la coquille ne montre pas une telle dépendance vis-à-vis de la vitamine D<sub>3</sub> et de ses métabolites. La vitamine D<sub>3</sub> est indispensable pour la production de l'œuf et la qualité de la coquille, le besoin étant de 400 UI par jour selon les essais antérieurs à 2000 (Whitehead 1986, 300 UI /kg NRC, 1994) mais pratiquement, les niveaux d'incorporation sont majorés dans les aliments des poules produisant actuellement plus de 300 œufs en une année de production (Weber 2009). Le 25 (OH) D<sub>3</sub> présente une activité biologique supérieure à celle de son précurseur, la vitamine D<sub>3</sub>. Ce métabolite peut être substitué à la vitamine D<sub>3</sub> (Soares *et al* 1995). Un effet positif sur la qualité de la coquille a été observé chez des poules en fin de production (Koreleski et Swiatkiewicz 2005) mais n'a pas été confirmé par d'autres auteurs (Keshavarz 2003). Le 25 (OH) D<sub>3</sub> résulte de l'hydroxylation de la vitamine D<sub>3</sub> dans le foie. Sa teneur reflète l'apport alimentaire de la vitamine D<sub>3</sub>. En cas de trouble du métabolisme hépatique, la production de 25 (OH) D<sub>3</sub> pourrait être réduite et dans ce cas, un apport alimen-

taire du 25 (OH) D<sub>3</sub> présente évidemment un intérêt. Le métabolite actif de la vitamine D<sub>3</sub> (calcitriol ou 1,25 (OH)<sub>2</sub> D<sub>3</sub>) augmente l'absorption intestinale de calcium proportionnellement à l'apport alimentaire mais le coût élevé de ce métabolite, le risque de toxicité en cas d'excès d'apport et l'absence d'un effet direct de ce métabolite sur le transfert de calcium utérin (Nys 1993) prohibe l'usage de ce métabolite en aviculture.

## 6.5 / Equilibre électrolytique de l'aliment

L'équilibre électrolytique de l'aliment influence le métabolisme acido-basique qui est également fortement dépendant de la formation de la coquille (Mongin 1978). Les tentatives initiales pour définir le rapport optimum entre Na, K et Cl chez la poule n'ont pas été cependant concluantes. Des modifications du rapport Na + K/Cl aussi importantes que de 0,4 à 7,7, obtenues en modifiant les apports alimentaires de sodium et de chlore, altèrent considérablement le pH sanguin et les concentrations plasmatiques de bicarbonate mais sans conséquence sur la qualité de coquille (Mongin 1978, Hamilton et Thompson 1980, Kurtoglu et Balev 2007).

Il est clairement établi qu'un excès important de chlore affecte négativement la qualité de la coquille. Des coquilles à faible solidité sont obtenues lors d'apport supérieur à 0,75% de chlore (Austic 1984). Cependant, lorsque le niveau de chlore est inférieure à 0,3%, la qualité de la coquille n'est pas affectée (Hess et Britton 1989). De hauts niveaux de sodium alimentaires (0,35 et 0,45%) associés à de forts (0,47%) ou faibles (0,12%) apports de chlore réduisent également la solidité de coquille (Hughes 1988).

Inversement, une carence en sodium ou en chlore (< 0,1% ; Vogt 1977, Sauveur et Mongin 1978) décroît les performances de production et la qualité de la coquille. C'est un phénomène qui est parfois observé lors d'un oubli de l'apport de sel dans un aliment !

## 6.6 / Alimentation en oligo-éléments

L'importance des oligo-éléments (Cu, Zn, Mn) dans la formation normale des membranes coquillières et de la coquille a été démontrée. Un kg d'aliment standard de poules pondeuses, à base de maïs et de soja, contient 30 mg de Zn, 6 mg de Cu et 20 mg de Mn. Ces niveaux évitent une carence provoquant des anomalies importantes de la coquille. Mais il est d'une pratique courante de supplémenter les poules avec ces trois éléments. La supplémentation en Mn

(50 à 80 mg·kg<sup>-1</sup> d'aliment) est particulièrement intéressante, car elle améliore la solidité de la coquille. Cette supplémentation augmente le poids de coquille, mais aussi ses propriétés mécaniques, indépendamment de l'effet sur la quantité de matériau (Mabe *et al* 2003). Le Mn pourrait modifier la morphologie des cristaux de calcite qui constituent la coquille et accroître ainsi ses propriétés mécaniques.

## 6.7 / Argiles

De nombreuses études ont étudié l'intérêt d'une supplémentation en argile naturelle ou synthétique comme agents favorisant la formation des granulés, pour améliorer l'efficacité alimentaire, contrôler l'humidité des litières ou leur mauvaise odeur. Les aluminosilicates de sodium (zéolites incorporées à 0,75 ou 1,5% dans l'aliment) ont la capacité de complexer le calcium et d'améliorer la qualité de la coquille (gravité spéci-

fique) dans 77% des 35 essais analysés en particulier quand l'apport de calcium est marginal (2,75% ; Roland 1988) ou lorsque les poules sont soumises à un environnement chaud (Ingram et Kling 1988, Keshavarz et McCormick 1991). L'utilisation des zéolites est cependant limitée par le fait que 10 à 20% de l'aluminium et 40% du silicium de cette argile est absorbé chez la poule (Roland *et al* 1993). Les argiles naturelles ne présentent pas ce défaut mais leur incorporation ne reproduit pas l'effet observé avec les zéolites.

## Conclusion

L'analyse de la bibliographie souligne l'importance des facteurs nutritionnels comme déterminants de la qualité de l'œuf. La sélection génétique permet aujourd'hui un haut niveau de producti-

vité et l'alimentation des poules doit être raisonnée de manière à apporter les nutriments nécessaires à son expression. Beaucoup de travaux ont porté par le passé sur la définition de «besoins» nutritionnels et sur les relations entre nutriments et qualités nutritionnelle ou organoleptique (couleur) de l'œuf. Pour l'avenir, les enjeux sont de définir des systèmes d'alimentation durables, c'est-à-dire impactant au minimum l'environnement tout en garantissant un revenu correct aux différents maillons de la filière et une qualité satisfaisant les consommateurs. L'alimentation des poules doit ainsi être revisitée en accordant plus d'importance à la nature des matières premières utilisées, en privilégiant des matières premières locales par exemple, mais aussi en redéfinissant les modalités d'apports. L'alimentation séquentielle avec d'utilisation de céréales entières apparaît notamment comme un système d'alimentation d'avenir.

## Références

- Atteh J.O., Leeson S., 1985. Effects of dietary fat level on laying hens fed various concentrations of calcium. *Poult. Sci.*, 64, 2090-2097.
- Austic R.E., 1984. Excess dietary chloride depresses egg shell quality. *Poult. Sci.*, 63, 1773-1777.
- Balnavé D., Weatherup S.T.C., 1974. The necessity of supplementing laying hen diets with linoleic acid. *Brit. Poult. Sci.*, 15, 325-331.
- Bar A., 2008. Calcium homeostasis and vitamin D metabolism and expression in strongly calcifying birds. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integrative Physiol.*, 151, 477-490.
- Bertram H.L., Dänner E., Jeroch K., Jeroch H., 1995a. Effect of DL-Methionine in a cereal-pea diet on the performance of brown laying hens. *Arch. Geflüg.*, 59, 103-107.
- Bertram H.L., Schutte J.B., De Jong J., 1995b. Influence of DL-Methionine supplements on the performance of laying hens under heat-stress. *Arch. Geflüg.*, 59, 314-318.
- Blair R.W., Dewar W.A., Downie J.N., 1973. Egg production responses of hens given a complete mash or unground grain together with concentrate pellets. *Brit. Poult. Sci.*, 14, 373-377.
- Bregendahl K., Roberts S.A., Kerr B., Hoehler D., 2008. Ideal ratios of isoleucine, methionine, methionine plus cystine, threonine, tryptophan, and valine relative to lysine for white leghorn-type laying hens of twenty-eight to thirty-four weeks of age. *Poult. Sci.*, 87, 744-758.
- Breithaupt D.E., 2007. Modern application of xanthophylls in animal feeding, a review. *Trends Food Sci. Technol.*, 18, 501-506.
- Brister R.D., Linton S.S., Creger C.R., 1981. Effects of dietary calcium sources and particle size on laying hen performance. *Poult. Sci.*, 60, 2648-2654.
- Britton G., 1995. Structure and properties of carotenoids in relation to function. *FASEB J.*, 9, 1551-1558.
- Calderon V.M., Jensen L.S., 1990. The requirement of sulfur amino acid by laying hens as influenced by the protein concentration. *Poult. Sci.*, 69, 934-944.
- Castanon J.I.R., Ortiz V., Perez-Lanzac J., 1990. Effect of high inclusion levels of triticale in diets for laying hens containing 30% field beans. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 31, 349-353.
- Cheng T.K., Peguri A., Hamre M.L., Coon C.N., 1991. Effect of rearing regimens on pullet growth and subsequent laying performance. *Poult. Sci.*, 70, 907-916.
- Ciurescu G., 2009. Efficiency of soybean meal replacement by rapeseed meal and/or canola seeds in commercial layer diets. *Arch. Zootech.*, 12, 27-33.
- Classen H.L., Scott T.A., 1982. Self-selection of calcium during the rearing and early laying periods of White Leghorn pullets. *Poult. Sci.*, 61, 2065-2074.
- Collier G., Johnson D.F., 2004. The paradox of satiation. *Physiol. Behav.*, 82, 149-153.
- Dänicke S., Halle I., Jeroch H., Bottcher W., Ahrens P., Zachmann R., Gotze S., 2000. Effect of soy oil supplementation and protein level in laying hen diets on prececal nutrient digestibility, performance, reproductive performance, fatty acid composition of yolk fat, and on other egg quality parameters. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 102, 218-232.
- Dänner E., 2003. Use of low-vicin/convicin faba beans, *Vicia faba*, in laying hens. *Arch. Geflüg.*, 67, 249-252.
- Dänner E., Bessei W., 2002. Effectiveness of liquid DL-Methionine hydroxylanalogue-free acid, DL-MHA-FA, compared to DL-Methionine on performance of laying hens. *Arch. Geflüg.*, 66, 97-101.
- De Ketelaere B., Bamelis F., Kemps B., Decuyper E., De Baerdemaeker J., 2004. Non destructive measurements of the egg quality. *World Poult. Sci. J.*, 60, 289-302.
- Dezat E., Umar-Faruk M., Lescoat P., Roffidal L., Chagneau A.M., Bouvarel I., 2009. Réaction à court-terme de poules pondeuses face à un mélange de blé et d'aliments de granulométrie différente. 8<sup>èmes</sup> Journ. Rech. Avicole, Saint-Malo, France, 292-296.
- El Kaseh R., Forbes J.M., 1995. Effect of wet food on the performance of laying hens. *Brit. Poult. Sci.*, 36, 839-840.
- Engberg R.M., Hammershøslashj M., Johansen N.F., Abousekken M.S., Steinfeldt S., Jensen B.B., 2009. Fermented feed for laying hens: effects on egg production, egg quality, plumage condition and composition and activity of the intestinal microflora. *Brit. Poult. Sci.*, 50, 228 - 239.
- Galobart J., Barroeta A.C., Baucells M.D., Codony R., Ternes W., 2001a. Effect of dietary supplementation with rosemary extract and alpha-tocopherol acetate on lipid oxidation in eggs enriched with omega 3-fatty acids. *Poult. Sci.*, 80, 460-467.
- Galobart J., Barroeta A.C., Baucells M.D., Cortinas L., Guardiola F., 2001b. Alpha-tocopherol transfer efficiency and lipid oxidation in fresh and spray-dried eggs enriched with omega 3-polyunsaturated fatty acids. *Poult. Sci.*, 80, 1496-1505.
- Galobart J., Barroeta A.C., Baucells M.D., Guardiola F., 2001c. Lipid oxidation in fresh and spray-dried eggs enriched with omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids during storage as affected by dietary vitamin E and canthaxanthin supplementation. *Poult. Sci.*, 80, 327-337.
- Grashorn M.A., Seehaver J.P., 1999. Use of apo-ester and tagetes extracts for yolk pigmentation in fresh and boiled eggs. VIII Symp. Quality of Egg and Egg products, VIII Symp.

- Quality of Egg and Egg products, Bologna, Italie, 203-208.
- Grobas S., Mendez J., De Blas C., Mateos G.G., 1999a. Laying hen productivity as affected by energy, supplemental fat, and linoleic acid concentration of the diet. *Poult. Sci.*, 78, 1542-1551.
- Grobas S., Mendez J., De Blas C., Mateos G.G., 1999b. Influence of dietary energy, supplemental fat and linoleic acid concentration on performance of laying hens at two ages. *Brit. Poult. Sci.*, 40, 681-687.
- Grosjean F., Bourdillon A., Rudeaux F., Bastianelli D., Peyronnet C., Duc G., Lacassagne L., 2000. Feeding value for poultry of isogenic fababeans, *Vicia faba* L. involving zero-tannin and zero-vicine genes. *Sci. Techn. Avicole*, 17-23.
- Guéguen L., 1992. Interactions lipides-calcium alimentaires et biodisponibilité du calcium du fromage. *Cah. Nutr. Diét.*, 27, 311-315.
- Guinotte F., Nys Y., 1991. The effects of particle size and origin of calcium sources on egg shell quality and bone mineralization in egg laying hens. *Poult. Sci.*, 70, 583-592.
- Guinotte F., Nys Y., 1993. Factors affecting the intestinal calcium availability in laying hens: consequences on shell quality. *Proc. Vth Eur. Symp. Quality of egg and eggs products*, Nys Y. (Ed). Tours, France, 149-162.
- Guinotte F., Gautron J., Nys Y., Soumarnon A., 1995. Calcium solubilization and retention in the gastrointestinal tract in chicks (*Gallus domesticus*) as a function of gastric acid secretion inhibition and of calcium carbonate particle size. *Brit. J. Nut.*, 73, 125-139.
- Hamilton P.B., 1992. The use of high-performance liquid chromatography for studying pigmentation. *Brit. Poult. Sci.*, 71, 718-724.
- Hamilton R.M.G., Thompson B.K., 1980. Effects of sodium plus potassium to chloride ratio in practical-type diets on blood gas levels in three strains of white leghorn hens and the relationship between the acid-base balance and eggshell strength. *Poult. Sci.*, 59, 1294-1303.
- Harms R.H., Russell G.B., Sloan D.R., 2000. Performance of four strains of commercial layers with major changes in dietary energy. *J. Appl. Poult. Res.*, 9, 535-541.
- Hartel H., 1990. Evaluation of the dietary interaction of calcium and phosphorus in the high producing laying hens. *Brit. Poult. Sci.*, 31, 473-494.
- Hencken H., 1992. Chemical and physiological behavior of feed carotenoids and their effects on pigmentation. *Poult. Sci.*, 71, 711-717.
- Hermier D., 1997. Influence de l'alimentation sur la qualité des lipides de l'œuf. CRITT Valicentre (Ed), Chambray les Tours, France, 14p.
- Hess J.B., Britton W.M., 1989. The effect of dietary chloride or protein changes on eggshell pipping and shell quality in late-production leghorn hens. *Nutr. Rep. Int.*, 40, 1107-1115.
- Honkatukia M., Reese K., Preisinger R., Tuiskula-Haavisto M., Weigend S., Roito J., Mäki-Tanila A., Vilkki J., 2005. Fishy taint in chicken eggs is associated with a substitution within a conserved motif of the FMO3 gene. *Genomics*, 86, 225-232.
- House J.D., Braun K., Ballance D.M., O'Connor C.P., Guenter W., 2002. The enrichment of eggs with folic acid through supplementation of the laying hen diet. *Poult. Sci.*, 81, 1332-1337.
- Hughes R.J., 1988. Inter-relationships between eggshell quality, blood acid-base balance and dietary electrolytes. *World's Poult. Sci. J.*, 44, 30-40.
- Ingram D.R., Kling C.E., 1988. Influence of ethalcal feed component on production parameters of white leghorn hens during high ambient temperature. *Nutr. Rep. Int.*, 37, 811-817.
- Jalal M.A., Scheideler S.E., Marx D., 2006. Effect of bird cage space and dietary metabolizable energy level on production parameters in laying hens. *Poult. Sci.*, 85, 306-311.
- Jalal M.A., Scheideler S.E., Pierson E.M., 2007. strain response of laying hens to varying dietary energy levels with and without avizyme supplementation. *J. Appl. Poult. Res.*, 16, 289-295.
- Joly P., 2004. Niveaux énergétiques des aliments pour poudeuses : influence sur les performances et l'ingéré. ISA (Ed). June 2004, Bull. Techn., 10, 10p.
- Joly P., Bougon M., 1997. Influence du niveau énergétique sur les performances de la poudeuse à œufs roux et évolution de l'ingéré en fonction de l'âge. 2<sup>èmes</sup> Journ. Rech. Avicole, Tours, France, 115-120.
- Keshavarz K., 1984. The effect of different dietary protein levels in the rearing and laying periods on performance of white Leghorn chickens. *Poult. Sci.*, 63, 2229-2240.
- Keshavarz K., 1998a. Investigation on the possibility of reducing protein, phosphorus and calcium requirements of laying hens by manipulating of time of access to these nutrients. *Poult. Sci.*, 77, 1320-1332.
- Keshavarz K., 1998b. Further investigations on the effect of dietary manipulation of protein, phosphorus and calcium for reducing their daily requirement for laying hens. *Poult. Sci.*, 77, 1333-1346.
- Keshavarz, K., 2000. Non phytate phosphorus requirement of laying hens with and without phytase on a phase feeding program. *Poult. Sci.*, 79, 748-763.
- Keshavarz K., 2003. A comparison between cholecalciferol and 25-OH-cholecalciferol on performance and eggshell quality of hens fed different levels of calcium and phosphorus. *Poult. Sci.*, 82, 1415-1422.
- Keshavarz K., Jackson M., 1992. Performance of growing pullets and laying hens fed low-protein, amino acid-supplemented diets. *Poult. Sci.*, 71, 905-918.
- Keshavarz K., McCormick, 1991. Effect of sodium aluminosilicate, oyster shell and their combination on acid-base balance and egg shell quality. *Poult. Sci.*, 70, 313-325.
- Koreleski J., Swiatkiewicz S., 2005. Efficacy of different levels of a cholecalciferol 25-OH-derivative in diets with two limestone forms in laying hen nutrition. *J. Anim. Feed Sci.*, 14, 305-315.
- Krogdahl A., 1985. Digestion and absorption of lipids in poultry. *J. Nutr.*, 115, 675-685.
- Kurtoglu V., Balev T., 2007. Effects of sodium bicarbonate, potassium chloride and sodium chloride supplementation on some blood biochemical parameters in laying hens. *World Poultry Science Association, Proc. 16th Eur. Symp. Poult. Nutr.*, Strasbourg, France, 26-30 August, 189-192.
- Lacassagne L., 1988a. Alimentation des volailles : substituts au tourteau de soja. 1 - Les protéagineux. *INRA Prod. Anim.*, 1, 47-57.
- Lacassagne L., 1988b. Alimentation des volailles : substituts au tourteau de soja. 2 - Le tourteau de colza. *INRA Prod. Anim.*, 1, 123-128.
- Leeson S., Summers J.D., 1978. Voluntary food restriction by laying hens mediated through dietary self-selection. *Brit. Poult. Sci.*, 19, 417-424.
- Leeson S., Julian R.J., Summers J.D., 1986. Influence of prelay and early-lay dietary calcium concentration on performance and bone integrity of leghorn pullets. *Can. J. Anim. Sci.*, 66, 1087-1095.
- Leeson S., Summers J.D., Caston L.J., 2001. response of layers to low nutrient density diets. *J. Appl. Poult. Res.*, 10, 46-52.
- Lessire M., Hallouis J.M., Chagneau A.M., Besnard J., Travel A., Bouvarel I., Crépon K., Duc G., Dulieu P., 2005. Influence de la teneur en vicine et convicine de la fève sur les performances de production de la poule poudeuse et la qualité de l'œuf. 6<sup>èmes</sup> Journ. Rech. Avicole, Saint-Malo, France, 174-178.
- Looten P.H., Wils D., Saniez M.H., Nys Y., 2003. Xanthophyll profile of corn gluten meal throughout the year and transfer yield into egg yolk. *Proc. 16th Eur. Symp. Quality of Poultry Meat ; 10th Eur. Symp. Quality of Eggs and Egg Products*. Nys Y. (Ed.). WPSA, Branche Française, Nouzilly, France, 3, 186-191. CDROM / 949-954.
- Mabe I., Rapp C., Bain M.M., Nys Y., 2003. Supplementation of a corn soybean meal diet with manganese, copper and zinc from organic or inorganic sources improves eggshell quality in aged laying hens. *Poult. Sci.*, 82, 1903-1913.
- Mattila P., Lehtikainen K., Kiiskinen T., Piironen V., 1999. Cholecalciferol and 25-hydroxycholecalciferol content of chicken egg yolk as affected by the cholecalciferol content of feed. *J. Agric. Food Chem.*, 47, 4089-4092.
- Mattila P., Valaja J., Rossow L., Venalainen E., Tupasela T., 2004. Effect of vitamin D<sub>2</sub>- and D<sub>3</sub>-enriched diets on egg vitamin D content, production, and bird condition during an entire production period. *Brit. Poult. Sci.*, 83, 433-440.
- Marusich W.L., Bauernfeind J.C., 1981. Oxycarotenoids in poultry feeds. In: Carotenoids as colorants and vitamin A precursors. Bauerfeind J.C. (Ed). 320-462.
- Mongin P., 1978. Acid-base balance during eggshell formation. In: Respiratory function of birds, Adult and embryonic. Piiper J. (Ed). Springer Verlag, Berlin, Allemagne, 247-259.
- Naber E.C., Squires M.W., 1993. Vitamin profiles of eggs as indicators of nutritional status in the laying hen: diet transfer and commercial flock survey. *Brit. Poult. Sci.*, 72, 1436-1440.
- Narvaez-Solarte W., Rostagno H.S., Soares P.R., Silva M.A., Uribe Velasquez L.F., 2005. Nutritional requirements in Methionine + Cystine for white-egg laying hens during the first cycle of production. *Int. J. Poult. Sci.*, 4, 965-968.
- NRC, 1994. Nutrient requirement of poultry, 9<sup>th</sup> revised edition. Washington, DC. National Academy Press.
- Novak C., Yakout H.M., Scheideler S.E., 2006. The effect of dietary protein level and

- total sulfur amino acid:lysine ratio on egg production parameters and egg yield in Hy-Line W-98 hens. *Poult. Sci.*, 85, 2195-2206.
- Njoku P.C., Nwazota A.O.U., 1989. Effect of dietary inclusion of ascorbic acid and palm oil on the performance of laying hens in a hot tropical environment. *Brit. Poult. Sci.*, 30, 831-840.
- Nys Y., 1993. Regulation of 1,25 (OH)<sub>2</sub>D<sub>3</sub>, of osteocalcin and of intestinal and uterine calbindin in hens. In: *Avian endocrinology*. Sharp P.J. (Ed). Bristol, UK. *J Endocrinol.*, 345-357.
- Nys Y., 2000. Dietary carotenoids and egg yolk coloration. A review. *Arch. Geflugg.*, 64, 45-54.
- Nys Y. 2001. Recent developments in layer nutrition for optimising shell quality. 13<sup>th</sup> Eur. Symp. Poult. Nutr., Blankenberge, Belgique, 2001/09/30-10/04. WPSA, Belgium Branch, 45-52.
- Nys Y., 2010. Structure et formation de l'œuf. In : *Science et technologie de l'œuf et des ovoproduits*, Nau F., Guérin-Dubiard C., Baron F., Thapon J.L. (Eds). Editions Tec et Doc Lavoisier, Paris, France, 1, chap 5, 161-249.
- Nys Y., Sauveur B., 2004. Valeur nutritionnelle des œufs. *INRA Prod. Anim.*, 17, 385-393.
- Nys Y., Hincke M.T., Arias J.L., Garcia-Ruiz J.M., Solomon S., 1999. Avian eggshell mineralization. *Poult. Avian Biol. Rev.*, 10, 143-166.
- Nys Y., Burlot T., Dunn I.C., 2008. Internal quality of eggs: any better, any worse? XXIII World's Poult. Congr., Brisbane, Australia, June 30-July 4, 2008, World's Poultry Science Association, Australian branch, CD-Rom papers\wpc08Final00034, 10p.
- Nys Y., Hincke M.T., Hernandez-Hernandez A., Rodriguez-Navarro A.B., Gomez-Morales J., Garcia-Ruiz J.M., Gautron J., 2010. Structure, propriétés et minéralisation de la coquille de l'œuf : rôle de la matrice organique dans le contrôle de sa fabrication. In : *Numéro Spécial, Qualité de l'œuf*. Nys Y. (Ed). *Inra Prod. Anim.*, 23,143-154.
- Peguri A., Coon C., 1991. Effect of temperature and dietary energy on layer performance. *Poult. Sci.*, 70, 126-138.
- Penz A.M.Jr., Jensen L.S., 1991. Influence of protein concentration, amino acid supplementation, and daily time of access to high- or low-protein diets on egg weight and components in laying hens. *Poult. Sci.*, 70, 2460-2466.
- Portella F.J., Caston L.J., Leeson S., 1988. Apparent feed particle size preference by laying hens. *Can. J. Anim. Sci.*, 68, 915-922.
- Prochaska J.F., Carey J.B., Shafer D.J., 1996. The effect of L-lysine intake on egg component yield and composition in laying hens. *Poult. Sci.*, 75, 1268-1277.
- Rao K.S., Roland D.A.Sr., 1990. Retention patterns of various sized limestone particles in gizzard of commercial leghorns hens. *Poult. Sci.*, 69, 185
- Reichmann K.G., Connor J.K., 1979. The effects of meal feeding of calcium, protein and energy on production status of laying hens. *Brit. Poult. Sci.*, 20, 445-452.
- Reid B.L., Weber C.W., 1976. Calcium availability and trace mineral composition of feed grade Ca supplements. *Poult. Sci.*, 55, 600-605.
- Robinson D., 1985. Performance of laying hens as affected by split composition dietary regimens using ground and unground cereals. *Brit. Poult. Sci.*, 26, 299-309.
- Rogers P.J., 1995. The development of the brain and behaviour in the chicken. CAB Int., Wallingford, UK, 95-110.
- Roland D.A., 1986. Egg shell quality III: calcium and phosphorus requirements of commercial Leghorns. *World Poult. Sci. J.*, 42, 154-164.
- Roland D.A., 1988. Ethacal: does it have a place in poultry rations. *Feedstuffs*, 1516.
- Roland D.A., Rabon H.W, Rao K.S, Smith R.C, Miller J.R, Barnes D.G, Laurent S.M., 1993. Evidence for absorption of silicon and aluminum by hens fed sodium zeolite A. *Poult. Sci.*, 72, 447-455.
- Roland D.A., Bryant M., 2000. Nutrition and feeding for optimum eggshell quality. 21<sup>th</sup> World's Poultry Science Congress. 2000/08/20-24, CD S3.6.03. WPSA, branche canadienne, Montréal, Canada.
- Romanoff A.L., Romanoff A.J., 1949. *The avian egg*. John Wiley et Sons (Ed). New York, USA, 918p.
- Ruoff H.J., Sewing K.F., 1971. The role of crop in the control of gastric acid secretion in chickens. *Naunyn-Schmiedeberg's Arch. Pharmakol.*, 271, 142-148.
- Sauveur B., 1987. Effect of prelaying dietary calcium and phosphorus levels on growth and subsequent laying performance of pullets. 6<sup>th</sup> Eur. Symp. Poult. Nutr., Königslutter. WPSA, E18-E25.
- Sauveur B., 1994. Variations initiales de la composition de l'œuf. In : *L'œuf et les ovoproduits*. Thapon J.L., Bourgeois C.M. (Eds). Editions Tec et Doc Lavoisier, Paris, France, 69-84.
- Sauveur B., Mongin P., 1978. Interrelationships between dietary concentration of sodium, potassium and chloride in laying hens. *Brit. Poult. Sci.*, 19, 475-485.
- Schutte J.B., De Jong J., Bertram H.L., 1994. Requirement of the laying hen for sulfur amino acids. *Poult. Sci.*, 73, 274-280.
- Scott T.A., Kampen R., Silversides F.G., 1999. The effect of phosphorus, Phytase enzyme and calcium on the performance of layers fed corn-based diets. *Poult. Sci.*, 78, 1742-1749.
- Shafer D.J., Carey J.B., Prochaska J.F., 1996. Effect of dietary methionine intake on egg component yield and composition. *Poult. Sci.*, 75, 1080-1085.
- Sirri F., Barroeta A., 2007. Enrichment in vitamins. In: *Bioactive egg components*. Huopalahati R., Lopez-Fandiño R., Anton M., Schade R. (Eds). Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, Allemagne, 171-182.
- Soares J.H, Kerr J.M, Gray RW, 1995. 25 hydroxycholecalciferol in poultry nutrition. *Poult. Sci.*, 74, 1919-1934.
- Squires M.W., Naber E.C., 1992. Vitamin profiles of eggs as indicators of nutritional status in the laying hen: vitamin B12 study. *Poult. Sci.*, 71, 2075-2082.
- Stadelman W.J., Pratt D.E., 1989. Factors influencing composition of the hens egg. *World Poult. Sci. J.*, 45, 247-266.
- Summers J.D., Leeson S., 1994. Laying hen performance as influenced by protein intake to sixteen weeks of age and body weight at point of lay. *Poult. Sci.*, 73, 495-501.
- Surai P.F., Sparks N.H.C., 2001. Designer eggs: from improvement of egg composition to functional food. *Trends Food Sci. Technol.*, 12, 7-16.
- Surai P.F., Ionov I.A., Kuklenko V., Kostjuk I.A., MacPherson A., Speake B.K., Noble R.C., Sparks N.H.C., 1998. Effects of supplementing the hen's diet with vitamin A on the accumulation of vitamin A and E, ascorbic acid and carotenoids in the eggs yolk and in the embryonic liver. *Brit. Poult. Sci.*, 39, 257-263.
- Surai P.F., Papazian T., Speake B.K., 2007. Enrichment in selenium and other trace elements. In: *Bioactive egg components*. Huopalahati R., Lopez-Fandiño R., Anton M., Schade R. (Eds). Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, Allemagne, 183-190.
- Suzuki Y., Okamoto M., 1997. Production of hen's eggs rich in vitamin K. *Nutr. Res.*, 17, 1607-1615.
- Tadiyanant C., Lyons J.J., Vandepopuliere J.M., 1991. Influence of wet and dry feed on laying hens under heat stress. *Poult. Sci.*, 70, 44-52.
- Tang P., Patterson P.H., Puri V.M., 2006. Effect of feed segregation on the commercial hen and egg quality. *J. Appl. Poult. Res.*, 15, 564-573.
- Umar-Faruk M., Bouvarel I., Mème N., Rideau N., Roffidal L., Tukur H.M., Bastianelli D., Nys Y., Lescoat P., 2010. Sequential feeding using whole wheat and a separate protein-mineral concentrate improved feed efficiency in laying hens. *Poult. Sci.*, sous presse.
- Valkonen E., Venäläinen E., Rossow L., Valaja J., 2008. Effects of dietary energy content on the performance of laying hens in furnished and conventional cages. *Poult. Sci.*, 87, 844-852.
- Van Krimpen M.M., Kwakkel R.P., Van der Peet-Schwering C.M., den Hartog L.A., Verstegen M.W., 2008. Low dietary energy concentration, high nonstarch polysaccharide concentration, and coarse particle sizes of nonstarch polysaccharides affect the behavior of feather-pecking-prone laying hens. *Poult. Sci.*, 87, 485-496.
- Van Krimpen M.M., Kwakkel R.P., Van der Peet-Schwering C.M., den Hartog L.A., Verstegen M.W., 2009. Effects of nutrient dilution and nonstarch polysaccharide concentration in rearing and laying diets on eating behavior and feather damage of rearing and laying hens. *Poult. Sci.*, 88, 759-773.
- Vilariño M., Picard M.L., Melcion J.P., Faure J.M., 1996. Behavioural adaptation of laying hens to dilution of diets under mash and pellet form. *Brit. J. Nutr.*, 37, 895-907.
- Vogt H., 1977. Versuch über den cloridbedarf im legehennenfutter. *Archiv. Geflugg.*, 41, 124-129.
- Walker A.W., Tucker S.A., Lynn N.J., 1991. Effect of nutrient density and fat content on the performance of laying hens. *Brit. Poult. Sci.*, 32, 1138-1139.
- Weber G.M. 2009. Vitamin requirements and economic responses. 17<sup>th</sup> Eur. Symp. Poult. Nutr., 2009/08/23-27, WPSA, UK Branch, Edinburgh. S3.2.

Whitehead C.C., 1981. The response of egg weight to the inclusion of different amounts of vegetable oil and linoleic acid in the diet of laying hens. *Brit. Poult. Sci.*, 22, 525-532.

Whitehead C.C., 1986. Requirements for vitamins. *Proc. Symp. Poult. Sci.*, Butterworth, 19, 173-189.

Whitehead C.C., Bowman A.S., Griffin H.D., 1991. The effects of dietary fat and bird age on the weights of eggs and egg components in the laying hen. *Brit. Poult. Sci.*, 32, 565-574.

Will B.H., Usui Y., Suttie J.W., 1992. Comparative metabolism and requirement of vitamin K in chicks and rats. *J. Nutr.*, 122, 2354-2360.

Yannakopoulos A.L., 2007. Egg enrichment in omega-3 fatty acids. In: *Bioactive egg components*. Huopalahati R., Lopez-Fandiño R., Anton M., Schade R. (Eds). Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, Allemagne, 159-170.

Yousefi M., Shivazad M., Sohrabi-Haghdoust I., 2006. Effects of reducing dietary methionine, linoleic acid, choline and increasing energy on performance and eggshell quality in aged laying hens In *EPC 2006. 12<sup>th</sup> Eur. Poult. Conf.*, Verona, Italy, 10-14 September, World's Poult. Sci. Association, WPSA, paper 3.

Zita L., Tumova E., Stolic L., 2009. Effects of genotype, age and their interaction on egg quality in brown-egg laying hens. *Acta Vet. Brno*, 78, 85-91.

## Résumé

Le producteur est intéressé principalement par le poids de l'œuf et la solidité de la coquille. Le poids de l'œuf est conditionné par l'origine génétique et l'âge de la poule, mais aussi par les apports nutritionnels de la poulette puis de la poule. Le poids de la poulette à l'entrée en ponte, la concentration énergétique de l'aliment, les teneurs en protéines et acides aminés (méthionine notamment) et en acides gras (acides linoléique et oléique) influencent le poids de l'œuf. Moins étudiés, la forme de l'aliment et les modes de distribution sont importants et méritent une attention particulière pour les recherches à venir. La solidité de la coquille est déterminée par l'alimentation calcique tant en termes de quantité de calcium que de taille des particules. Les effets de l'alimentation sur les proportions de l'albumen et du jaune, qui intéressent le transformateur, sont marginaux en regard des effets de l'âge de la poule, néanmoins de légers effets sont observés en modifiant les apports en protéines, acides aminés ou en acide linoléique. Pour les critères intéressant le consommateur, il est clairement établi que la composition en acides gras de l'œuf est le reflet de la composition de l'aliment. Il est ainsi possible d'optimiser la valeur nutritionnelle de l'œuf *via* l'aliment. La composition en macroéléments minéraux est invariable mais de nombreux oligoéléments (iode, sélénium, manganèse) peuvent être modulés par l'apport alimentaire tout comme les vitamines liposolubles (E, D<sub>3</sub>, A et K). La couleur du jaune, quant à elle, est dépendante des apports alimentaires, la poule ne pouvant synthétiser les caroténoïdes. Néanmoins l'efficacité de coloration est variable selon les pigments utilisés.

## Abstract

### *How diet influences the quality of eggs*

Farmers are mainly interested by egg weight and eggshell strength. Egg weight is linked with several factors: breeding lines, hen's age and nutrient supply to pullets and hens. Hen's weight at the laying point, energy and protein densities of the diets, amino acid (primarily methionine) and fatty acids (linoleic and oleic) contents impact egg weight. Feed form and feeding system require future research to evaluate quantitatively their effect, keeping in mind that they are meaningful. Eggshell strength is determined by quantitative Ca supply and Ca particle size. Egg product companies are more interested in yolk and albumen contents. The latter are mainly linked with the hen's age. However marginal changes in proportion are observed through protein, amino acids and linoleic acid supplies. For criteria of consumers' interest, a straight link is observed between the fatty acid contents of the diet and of the egg. It is therefore possible to optimize the egg nutritional value through feeding. Macromineral content is stable. However numerous microminerals (Iode, Selenium, Manganese) and fat-solubles vitamins (E, D<sub>3</sub>, A and K) contents could be modified by the diets. Yolk colour depends on feed supply since hens cannot synthesize carotenoids. However, coloration efficiency is variable depending on the supplied xanthophylls.

BOUVAREL I., NYS Y., PANHELEUX M., LESCOAT P., 2010. Comment l'alimentation des poules influence la qualité des œufs ? In : Numéro Spécial, Qualité de l'œuf. Nys Y. (Ed). *Inra Prod. Anim.*, 23, 167-182.



Photo : ITAVI

