

Module: nutrition avicole

La nutrition est, en fait, la résultante de plusieurs disciplines de base, telles que la biochimie et la physiologie, permettant la définition et la compréhension des besoins alimentaires des espèces animales.

Le besoin est compris ici au sens très large, comme étant la quantité nécessaire de nutriments à apporter dans l'alimentation pour assurer la croissance du jeune ou l'équilibre physiologique et sanitaire de l'adulte.

Consommation d'aliment et d'eau

Introduction :

La consommation d'aliment est un paramètre important en nutrition avicole, non seulement pour ses implications économiques, mais également à cause du rôle primordial joué par la consommation comme variable explicative des effets nutritionnels.

Le déterminisme de la consommation est un ensemble de phénomènes complexes. La connaissance d'un certain nombre d'entre eux est primordiale pour l'aviculture, car très souvent la consommation détermine l'intensité de production, mais aussi son rendement économique.

En outre la formulation de l'aliment est conditionnée en grande partie par l'objectif du niveau d'ingestion.

Il est nécessaire de connaître avec précision les causes de variation de la consommation et de les maîtriser. Cette quantité est la résultante de trois éléments. L'aliment, l'animal et l'environnement.

I. Consommation de l'aliment

1/ Composition de l'aliment

Tous les aliments sont constitués des mêmes composantes: eau, matière minérale, glucides, lipides, matières azotées (MB = Eau + M.S)

M.S = MO+MM

MO = Glucides + Lipides + matières azotées

	Eau		H ₂ O	
Matière sèche	Matières Minérales	Macroéléments	Chlore, phosphore, soufre, calcium, sodium, potassium	
		Oligo-éléments	Fer, cuivre, zinc, cobalts, iode, manganèse, sélénium,	
	Matière organique	Glucides	Glucides Cytoplasmiques	Pentoses, hexoses (glucose, fructose) saccharose, maltose, lactose, mélibiose, fructoses, amidon,.....
			Glucides pariétaux des végétaux	Celluloses, hémicelluloses, substances pectiques (lignine)
		Lipides	Lipides	Glycérides, stérides,....
	Matières azotées	Matières azotées protidiques	Acides animés libres, combinaisons d'acides aminés (peptides, polypeptides protéines)	
Matières azotées non protidiques		Amides (urée...), amines, ammoniaque bases azotées.		

2/ Régulation de l'appétit:

Les animaux consomment pour couvrir leurs besoins nutritionnels principalement énergétiques. Le comportement alimentaire de l'animal c'est-à-dire sa réaction face à un aliment résulte de plusieurs faits :

- La faim: la sensation éprouvée sur un animal qui se trouve en état de déficit nutritionnel
- La satiété: l'état de non faim de l'animal dont les besoins nutritionnels de l'animal sont couverts
- L'appétit: stimulation à satisfaire la faim, désire de nourriture.

Plusieurs mécanismes différents, sont impliqués dans le contrôle de l'appétit.

1. Mécanismes liés à l'aliment

- Les oiseaux sont sensibles aux formes : un poulet nourri avec granulés exige quelques jours pour ingérer normalement le même aliment présenté en farine.
- Sont peu sensible à l'odeur et la couleur de l'aliment.

2. Des mécanismes originaires du tube digestif

- Le premier est lié au gout de l'aliment. On admet que l'oiseau est moins sensible au gout de l'aliment que les mammifères
- Des signaux physiques : transmis pour des récepteurs nerveux du jabot et, dans une moindre mesure, du reste du tube digestif. Ces récepteurs sont sensibles à la pression qu'ils subissent Leur stimulation transmise au cerveau est intégré dans le signal conduisant à la satiété.

3. Le mécanisme métabolique : le plus connu est le glucose qui a donné lieu à la théorie glucostatique de l'appétit. L'hypoglycémie stimule le centre nerveux de l'appétit. L'hyperglycémie au contraire stimule le centre de la satiété. Ces centres sont classiquement localisés dans l'hypothalamus, celui de l'appétit dans la partie latérale tandis que celui de la satiété dans la partie ventro-médiane.

3/ Facteurs déterminant l'appétit (ingestion)

L'appétit des oiseaux est d'abord lié à leur besoins énergétiques. Ceci s'explique par le rôle prépondérant joué pour les informations d'origines métabolique (la glycémie). Tout les facteurs qui diminuent ou augmentent la dépense énergétique retentissent sur l'appétit. C'est ainsi la température ambiante, le niveau de production, la taille de l'animal sont des facteurs majeurs de détermination de l'ingéré alimentaire.

3.1/Facteurs liés à l'aliment

a. Concentration énergétique

L'une des principales caractéristiques de l'aliment qui modifie le plus souvent sa consommation est sa concentration énergétique. L'animal cherche en priorité à ingérer, la quantité d'aliment lui permettant de couvrir ses besoins énergétiques. Un aliment pauvre en énergie métabolisable augmente donc la l'ingestion de l'aliment. La réaction inverse est observée lorsque la concentration énergétique de l'aliment est élevée

Toute fois cette régulation homéostatique de l'ingéré énergétique rarement parfaite. La capacité de tube digestif devienne facteur limitant de l'ingéré énergétique.

b. Taux azoté et équilibre en acides aminés

La teneur en protéines de l'aliment exerce un effet nettement moins prononcé sur l'ingestion d'aliment. Il faut de ce point de vue distinguer les animaux de production (jeunes en croissance, femelles en ponte) des adultes à l'entretien. En effet un changement d'apport de protéines peut modifier la production et en conséquence influencé le besoin énergétique donc la consommation. Il s'agit alors d'un effet indirect. Chez l'adulte à l'entretien, la teneur en protéines de l'aliment n'influence pratiquement pas l'appétit.

c. Minéraux et vitamines

Les minéraux peuvent également influencer l'appétit. Les carences comme les excès en le sodium, chlore et calcium, réduisent en général notablement l'appétit. Entre ces 2 situations ces éléments ne semblent pas intervenir.

La plupart des carences vitaminiques réduisent l'ingestion d'aliment des oiseaux en croissance, alors qu'elles ne semblent guère influencer semble les adultes tant que les autres effets de la carence ne sont pas perceptibles au risque d'effets désastreux sur le développement embryonnaire dans le cas des reproductrices.

d. la forme de présentation

La forme de présentation de l'aliment peut aussi influencer la consommation. La granulation accroît le niveau d'ingestion chez le poulet.

Enfin, il faut évoquer les facteurs antinutritionnels qui peuvent, eux aussi, modifier l'ingestion d'aliment.

3.2/Facteurs liés à l'environnement

a. Température ambiante :

Au dessus de la zone de neutralité thermique l'appétit décroît rapidement et l'animal se trouve en déficit alimentaire. C'est une des causes de baisse des performances en climat chaud pour y remédier en partie en augmentant la concentration énergétique de l'aliment. Lorsque la température ambiante est au dessous de la zone de neutralité thermique l'ingestion augmente pour récupérer l'énergie dépensée pour lutter contre le froid.

b. Le photopériodisme

L'obscurité limite l'activité physique réduisant les besoins d'entretien donc des quantités consommées.

c. Le stress

Le stress influence considérablement l'ingestion

3.3/Facteurs liés à l'animal

Chez la poule pondeuse, on constate un pic de consommation en fin de journée qui est particulièrement prononcée si la poule va entrer en phase de calcification de l'œuf qui sera pondue le lendemain. Il s'agit d'un appétit spécifique pour le calcium.

II. Régulation de la consommation d'eau

Il existe des liaisons étroites entre abreuvement et ingestion d'aliment. La restriction de l'eau entraîne une baisse de l'ingestion de l'aliment. Toutefois cette restriction ne peut être utilisée pour le rationnement alimentaire du fait de l'hétérogénéité qu'elle occasionne entre animaux et des risques d'altération de la fonction rénale. A l'inverse, la restriction alimentaire conduit souvent, après quelques jours d'adaptation, à une surconsommation d'eau qui peut provoquer la détérioration des conditions d'élevage (litière humide..). On peut donc être amené à restreindre la consommation d'eau quand on procède au rationnement.

Les volailles possèdent la particularité physiologique de réabsorber l'eau des urines ; celle-ci remonte le long du colon, siège d'une réabsorption d'eau provoquant de l'acide urique sous forme d'urates, pellicule blanchâtre recouvrant les fèces.

1/ Rôle

Chez les oiseaux, comme les autres espèces, l'eau est le constituant le plus abondant :

- Poulet de chair → 620g/kg de P.V
- Poule adulte → 530g/kg de P.V

Elle remplit plusieurs rôles :

- Le transport des nutriments.
- Le transport des gaz en particulier l'O₂
- L'élimination des déchets sous forme d'urine
- Le transport des hormones

2/ Facteurs de variation de la consommation d'eau

La consommation d'eau peut être influencée par la nature de l'aliment distribué aux animaux. Des concentrations élevées de l'aliment en sodium ou en potassium entraînent une surconsommation d'eau.

La teneur en protéines de l'aliment modifie également la consommation d'eau ; les aliments riches en protéines conduisent à une légère surconsommation d'eau qui peut s'expliquer par les mécanismes d'excrétion rénale d'acide urique.

La température d'élevage influence, elle aussi, notablement la consommation d'eau. Il s'agit de la mise en œuvre des mécanismes de la thermorégulation.

3/ Les apports en eau

Il est conseillé de laisser de l'eau en permanence à la disposition des animaux. En effet, toute restriction limite la consommation de la ration de l'aliment et donc les performances réalisées.

En outre la qualité de l'eau est un point très important ; une eau de mauvaise qualité peut être mal consommée ou dangereuse pour la santé des animaux.

Deux aspects sont à envisager:

- **La qualité physicochimique** de l'eau : Il faut respecter le pH et la dureté (teneur en calcium et magnésium). Éviter les eaux troubles ou à odeur. Les teneurs en sels ne doivent pas dépasser 10g/l pour le Na Cl, 1g/l pour les sulfates et 50 à 100 ppm par les nitrates.
- **La qualité microbiologique**: la contamination par des virus ou des bactéries est souvent d'origine fécale. La présence de salmonelle, pasteurella ou clostridie est à surveiller particulièrement

Des analyses régulières d'eau sont conseillées. En absence de données spécifique, on peut se référer aux normes de potabilité humaine pour contrôler la qualité de l'eau.

Digestion et utilisation digestive Particularité de la digestion chez la poule

L'aliment destiné aux volailles est généralement un mélange de matières premières de diverses origines et de compositions chimiques complexes. Il doit subir une série d'actions physiques et chimiques préalables permettant d'obtenir des constituants simples, absorbables, appelés nutriments (molécules simples, ions,...).

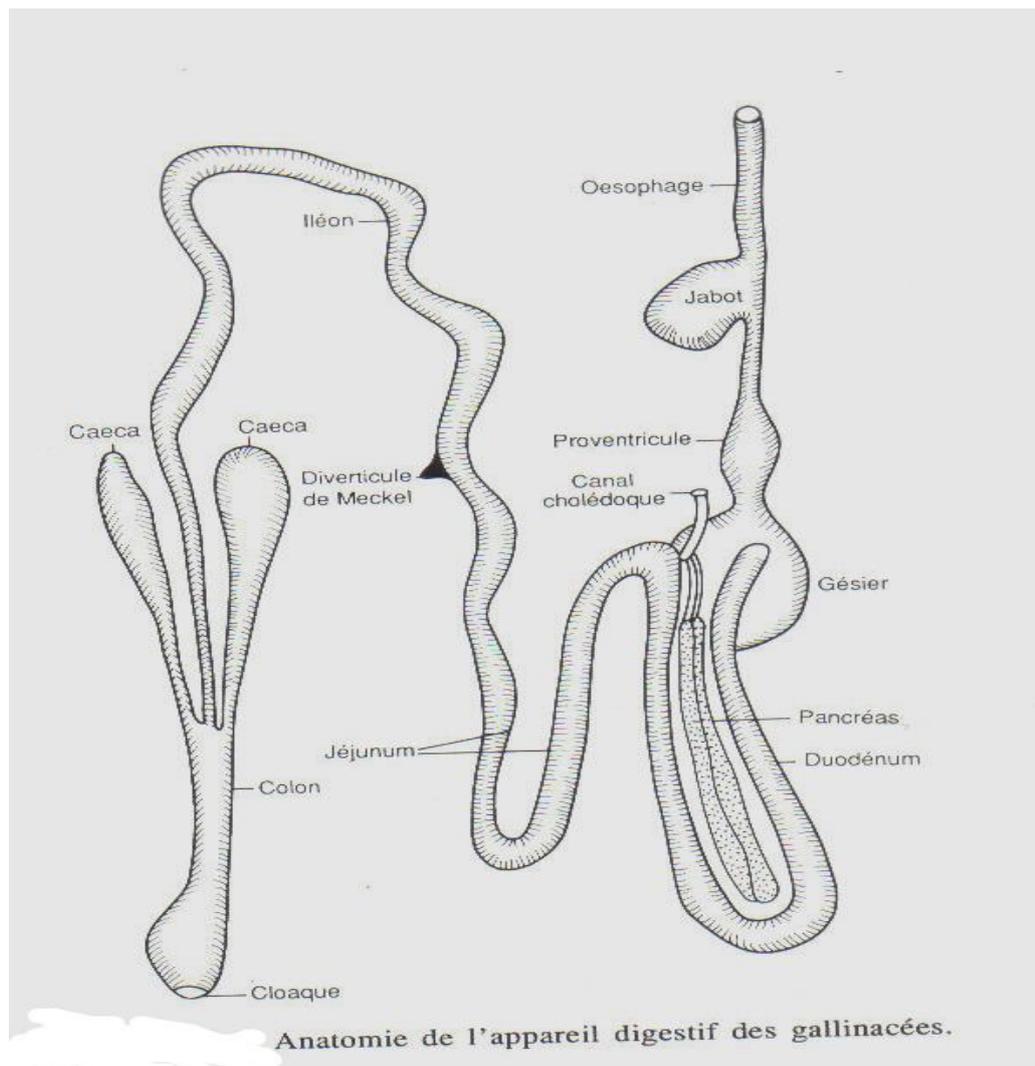
La physiologie digestive comprend l'ensemble des processus de digestion et d'absorption.

Pour un ingrédient donné d'un aliment de composition connue, la quantité de nutriments disponible pour le métabolisme sera plus ou moins grande en fonction de l'efficacité des processus digestifs.

Dans la pratique, la digestibilité traduit l'efficacité de l'ensemble des processus digestifs.

I. Physiologie de la digestion

1/ Anatomie de l'appareil digestif



L'appareil digestif du poulet est composée de :

- La cavité buccale ne comprend ni lèvres ni dents, mais un bec buccale corné qui permet la préhension et une certaine fragmentation des aliments. Les glandes salivaires, peu développées, sécrètent de la ptyaline. Il n'y a ni voiles de palais ni épiglotte, si bien que la déglutination est un phénomène uniquement mécanique par un simple redressement de la tête.
- L'œsophage contient un renflement dont l'épithélium est riche en glandes à mucus : le jabot. Cet organe peut stocker des aliments qui s'y humectent et s'y ramollissent.
- L'estomac comprend deux parties :

-Un estomac chimique, le ventricule succenturié, dont la muqueuse est riche en glandes sécrétant à la fois l'acide chlorhydrique et la pepsine

-Un estomac mécanique, le gésier, peu sécréteur, caractérisé par une couche superficielle très dure entourée de muscles puissants. Il règne un pH très bas (2 à 3,5).

- L'intestin grêle est un tube d'environ 1,2 m de longueur dont la paroi est bien équipée en glandes sécrétrices, il reçoit à son début les sécrétions du pancréas et du foie.
- Le gros intestin est un peu développé et se réduit pratiquement à deux caecums où ont lieu des fermentations bactériennes. Après un court rectum, on trouve le cloaque, carrefour des voies génitales, urinaires et intestinales.

2/ Particularité de la digestion

Le transit des aliments est relativement rapide, il dure en moyenne 24 heures.

Dans le bec, les aliments sont peu fragmentés et grossièrement insalivés : l'action de la ptyaline sur l'amidon y débute et se poursuit dans le jabot.

Le jabot assure le stockage et le ramollissement des aliments grâce au mucus qui y sécrété.

Le ventricule succenturié ou proventricule sécrète en abondance l'acide chlorhydrique mais le pH qui y règne n'est pas très bas (3 à 4), si bien que la transformation de la pepsinogène en pepsine n'est pas complète et que la protéolyse ne fait qu'y débiter.

Le gésier présente un pH bas (2 à 3,5), c'est donc là que se produit véritablement la protéolyse sous l'action de la pepsine.

L'intestin grêle est le lieu préférentiel de la digestion chimique sous l'action des enzymes intestinales et pancréatiques et de la bile.

Le caecum est le siège de fermentations bactériennes, sans doute d'importance secondaire, qui permettrait une utilisation partielle des glucides des enveloppes des graines. Il s'y produit aussi une synthèse de vitamines B qui pourraient profiter à l'oiseau.

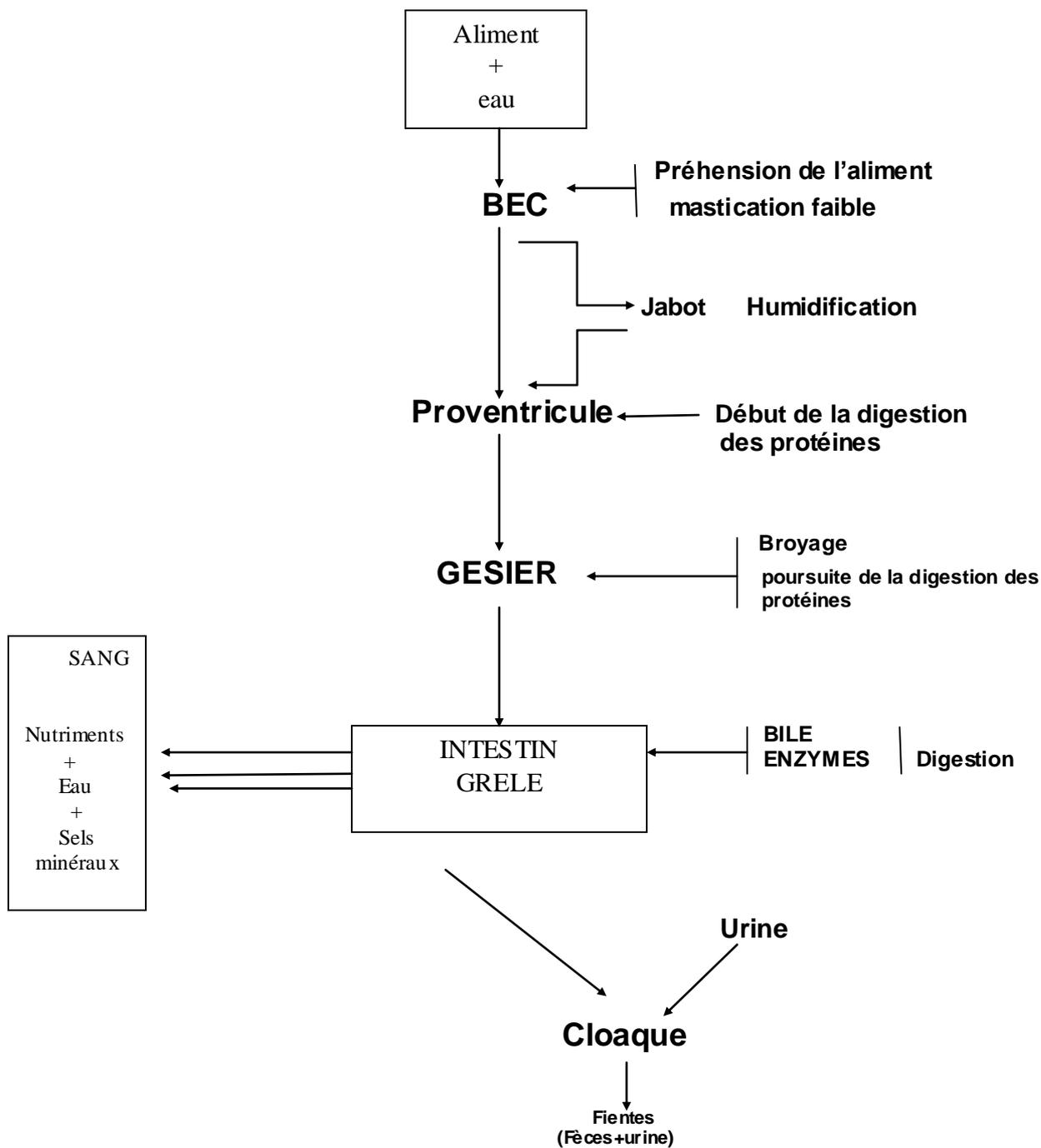


Schéma de la digestion chez la poule

II. Notion de la digestibilité

1/Définition

Les mesures de digestibilité consistent à faire la somme des phénomènes qui se déroulent dans le tube digestif : activité des enzymes, absorption, transit, activité de la flore. Ces mesures sont indispensables pour définir la biodisponibilité des nutriments que les matières premières apportent. D'une part, elles permettent, dans une certaine mesure, de classer ces dernières en fonction de leur efficacité nutritionnelle, mais, en se limitant toutefois à l'utilisation digestive, c'est-à-dire en excluant l'utilisation métabolique ultérieure. D'autre part, elles sont nécessaires pour formuler des aliments équilibrés, sans carence ni excès.

On distingue la digestibilité apparente et la digestibilité vraie :

- La première est le rapport entre ce qui disparaît dans l'intestin et ce que contenait la ration.

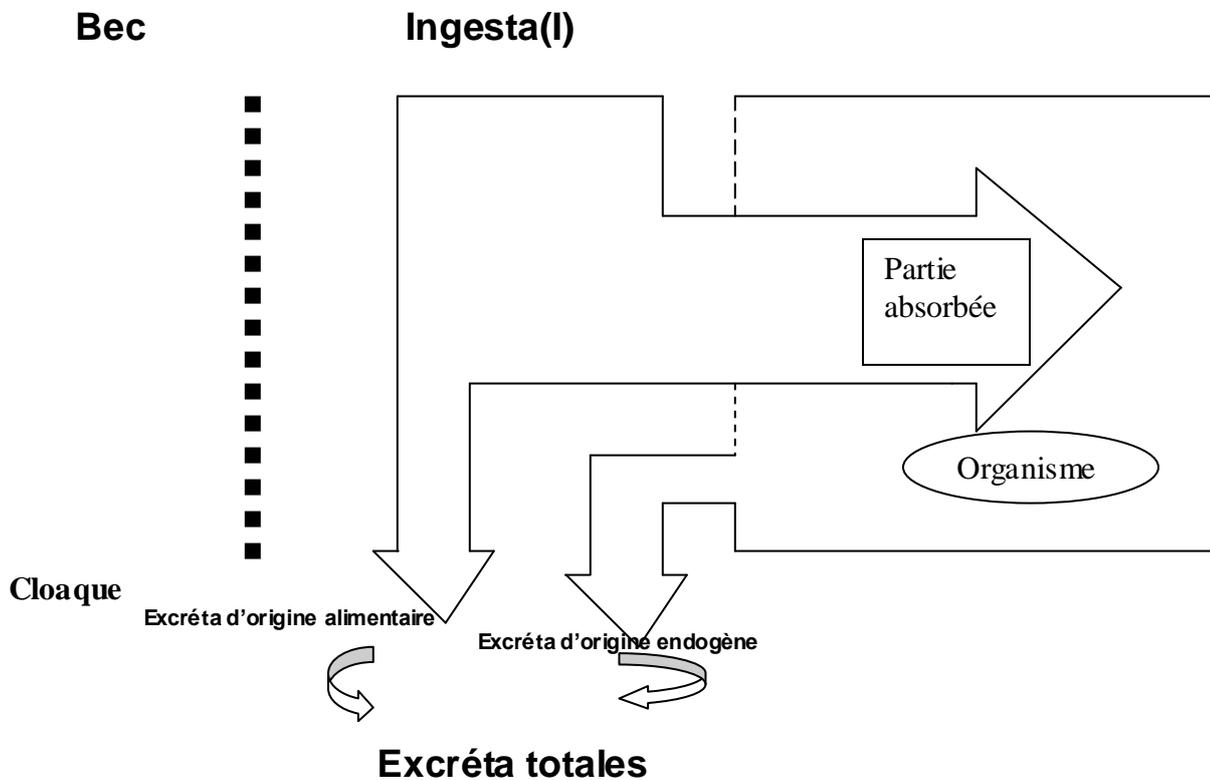
$$d_{app} = ((\text{Ingesta} - \text{Excréta}) / \text{Ingesta}) \times 100$$

- La seconde, donnant des valeurs plus élevées, consiste à retrancher des excréments la part d'origine endogène, c'est-à-dire ne provenant pas directement de l'aliment.

La digestibilité réelle qui égale à $d_{réelle} = (I - (E_a - E_{en})) / I \times 100$

E_a = Excréta d'origine alimentaire

E_e = Excréta d'origine endogène



Schémas de l'utilisation digestive de l'aliment

2/ Les facteurs de variation de la digestibilité

Pour une matière première donnée, la digestibilité de ses nutriments dépend de nombreux facteurs, les uns liés à la composition de la matière première elle-même et aux traitements technologiques, les autres à l'animal. A titre d'exemples, le dépelliculage de la graine de colza améliore significativement la digestibilité moyenne des acides aminés d'environ 6%. De façon globale, la granulation de l'aliment composé augmente sa valeur énergétique de 50 à 60 kilocalories par kg.

Chez une même espèce aviaire, la digestibilité varie en fonction de l'âge des animaux. Dans le cas des acides gras saturés, elle est plus faible en période de démarrage qu'en finition. La relation semble inverse pour les acides aminés dont la digestibilité diminuerait au fur et à mesure que l'animal vieillit.

Le métabolisme énergétique

Les dépenses énergétiques sont couvertes grâce à l'apport d'énergie chimique contenue dans la matière organique des aliments ingérés.

Cependant, la totalité de l'énergie contenue dans les aliments n'est pas disponible pour faire face aux différentes dépenses énergétiques de l'animal

I. les dépenses énergétiques

Traditionnellement, on distingue deux parts dans les dépenses énergétiques des animaux : celle qui concerne leur entretien et celle qu'exige leur production.

- **La dépense d'entretien** est définie, en principe, comme ce qui est nécessaire au strict maintien de l'homéostasie de l'animal (glycémie, température, pression osmotique, ph, etc...) et de l'équilibre énergétique de l'animal, c'est-à-dire sans perte ni gain de réserves énergétiques.
- **La dépense de production** est constituée à la fois du contenu énergétique de ce qui est produit et des pertes caloriques liées aux synthèses du fait que les rendements ne sont jamais de 100%, toute réaction biochimique de synthèse entraînant en effet une perte plus ou moins importante d'énergie sous forme de chaleur.

La partition des besoins énergétiques d'un animal peut être résumée selon le schéma suivant :

Besoin d'entretien	Besoin de production
- Le métabolisme de base - Thermogenèse adaptative - Thermogenèse alimentaire - Activité physique	- Energie des produits - Thermogenèse liée à la synthèse des produits

L'entretien comprend le métabolisme de base, la thermogenèse d'adaptation au froid et la thermorégulation en hyperthermie, la thermogenèse induite de façon inéluctable par l'ingestion de l'aliment (ce qu'on appelle aussi l'extra chaleur d'entretien) et par l'activité physique.

Le métabolisme de base est la quantité d'énergie pour un animal à jeun, au repos et dans une zone de neutralité thermique.

Cette partition du besoin en entretien et en production est dans la plupart des cas une simplification des phénomènes. C'est en particulier le cas de l'animal en croissance. La notion d'entretien, issue à l'origine, de l'animal adulte non productif ne s'applique en toute rigueur qu'à cette situation.

Lorsqu'on intègre à ce schéma du besoin énergétique celui des apports, on aboutit au schéma classique de partition de l'énergie illustré par la figure suivante.

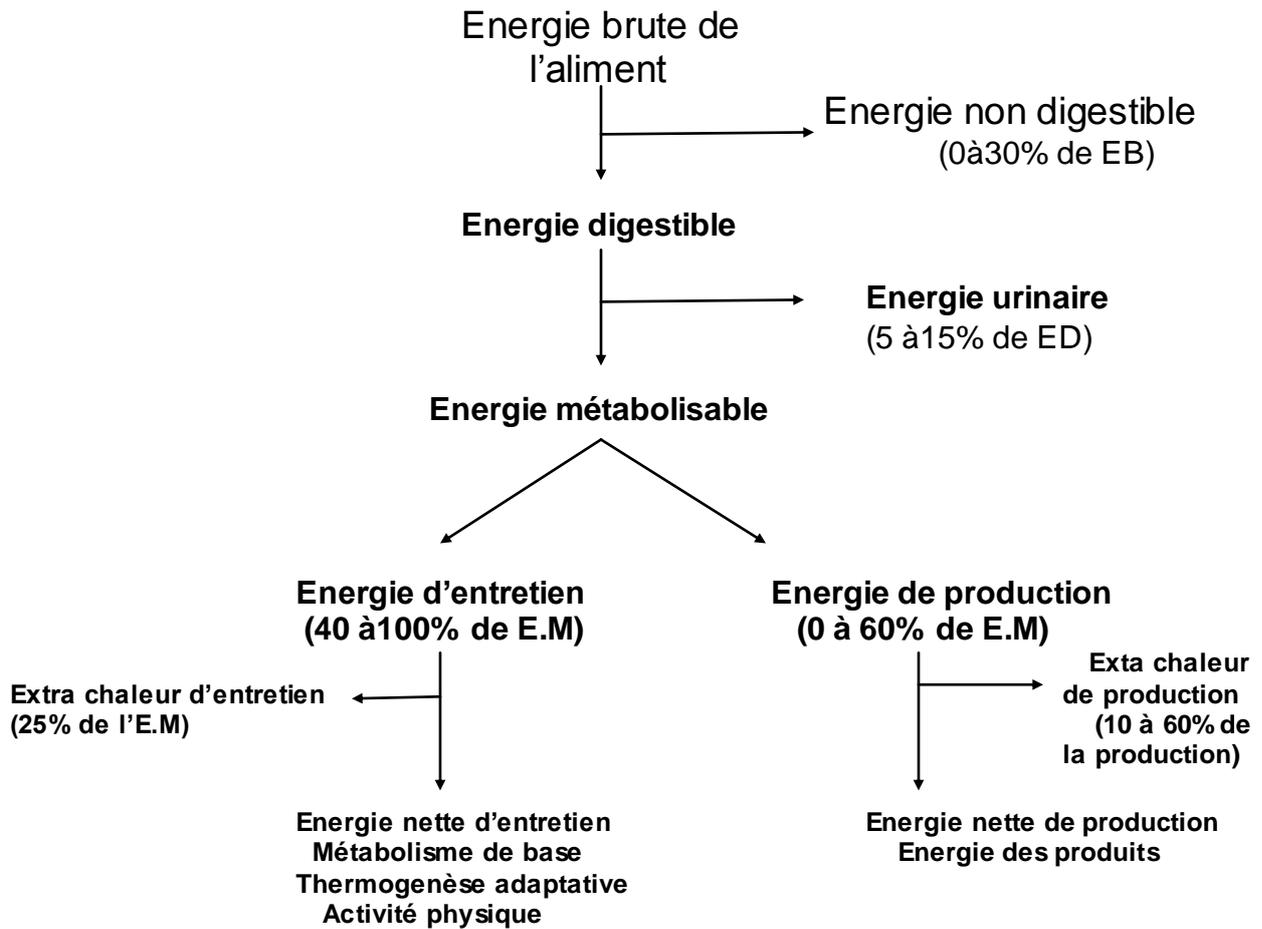


Schéma de partition des flux énergétiques chez l'oiseau

II. Prévisions des besoins énergétiques

1/ Besoins d'entretien

Le besoin énergétiques d'entretien correspond à la quantité d'énergie métabolisable à fournir à l'animal chaque jour pour qu'il maintienne son homéostasie énergétique c'est-à-dire qu'il ne gagne ni ne perde de l'énergie. Chez le jeunes en croissance élevé généralement à une température en régulière diminution, il est impossible de définir une quantité d'énergie permettant à l'animal de maintenir constant ses divers compartiments corporels. La notion de besoin d'entretien ne peut être appliquée qu'à l'adulte non productif.

2/ Besoin de production

Comme cela a été défini précédemment, le besoin de production comporte d'une part l'énergie contenue dans les productions et d'autre part les pertes caloriques liées à la synthèse biochimique du fait que les rendements thermiques de ces réactions sont inférieurs à 100%. Deux types principaux de synthèse sont réalisés par les oiseaux domestiques: la croissance tissulaire (muscle, os, plumes..) et l'œuf.

2.1 . Besoins de croissance

L'approche expérimentale retenue par de nombreux chercheurs ne prend en considération que la synthèse des protéines et celles des lipides. La synthèse de glycogène est trop faible pour être comptabilisée.

L'énergie brute contenue dans les protéines est en moyen de 5,66 kcal/g. Celle des lipides est de 9,20 kcal/g. Le coût énergétique de gain de poids peut être estimé par l'équation suivante :

$$EM_i = E_e + k.\Delta P$$

E_i est l'énergie métabolisable ingérée

E_e est le besoin énergétique d'entretien

ΔP est le gain de poids

K est le coût énergétique du gain de poids (kcal/g).

Le besoin de croissance peut être estimé selon la formule :

$$E_p = 14,1 \times \Delta p + 10,22 \text{ ou } 12,27 \times \Delta l$$

E_p s'exprime en kcal; Δp est le gain de protéines et Δl le gain de lipides en grammes.

Le tableau suivant contient à titre d'exemple, le cout énergétique du gain de poids du poulet et dindonneau selon ce modèle.

Le besoin énergétique de croissance du poulet et du dindonneau en kcal/g de gain de poids

Age (jours)	Poulet		Dindonneau	
	Mâle	Femelle	Mâle	Femelle
0 – 7	3.65	3.60	3.00	2.95
7 – 14	3.74	3.73	3.15	3.20
14 – 21	4.06	4.31	3.15	3.20
21 – 28	4.44	4.52	3.15	3.20
28 - 35	4.53	4.55	3.25	3.40
35 – 42	4.56	4.72	3.95	3.40
42 – 49	4.68	4.82	3.85	4.20
49 – 70			4.35	5.00
70 – 84			4.40	6.10
84 – 98			4.50	6.75
98 – 112			5.05	5.80

Diverses équations ont été proposées pour prédire le besoin énergétique du poulet en croissance élevé dans des conditions classiques, c'est à-dire dans la zone de neutralité thermique :

$$E = 1,62P^{0,653} \cdot (1 + 0,0125(21-T)) + 3,13\Delta P$$

Le besoin énergétique E est exprimé en kcal d'énergie métabolisable par jour, P est le poids vif en grammes, T la température en degrés centigrades et ΔP le gain de poids en grammes.

2.2. Besoins énergétiques de ponte

Outre son besoin d'entretien, la poule en ponte doit satisfaire son besoin énergétique de production qui se décompose en production de l'œuf et croissance tissulaire. Ce dernier répond aux mêmes lois que celles des volailles en croissance décrites précédemment. Le besoin énergétique correspondant à la production de l'œuf, évolue avec l'intensité de ponte, la taille de l'œuf et la composition de cet œuf. En moyenne 1g d'œuf renferme 1,53kcal :

$$\begin{aligned} \text{Vitellus:} & \quad 18g \times 0.33 \times 9.2 \text{ kcal/g} = 54,6 \text{ kcal} \quad (\text{lipides}) \\ & \quad 18g \times 0.174 \times 5.66 \text{ kcal/g} = 17,7 \text{ kcal} \quad (\text{protéines}) \\ \text{Albumen:} & \quad 37,5g \times 0,105 \times 5,66 \text{ kcal/g} = 22,3 \text{ kcal} : (\text{protéines}) \end{aligned}$$

Total : 94.6 kcal pour un œuf de 62g soit 1,53 kcal/g.

Plusieurs équations ont été proposées pour estimer le besoin énergétique journalier de la poule en ponte:

$$\begin{aligned} EM_i &= P(170-2,2T) + 2e + 5\Delta P && (\text{Leghorns}) \\ EM_i &= P(140-2T) + 2e + 5\Delta P && (\text{Rhodes Island Red}) \quad (\text{Emmans, 1974}) \end{aligned}$$

EM_i est l'énergie métabolisable (kcal) ingérée par jour

P est le poids vif en gramme

ΔP est le gain de poids vif en gramme

E est le poids d'œuf exporté par jour en gramme

T est la température en degrés fahrenheit.

Chez les poules reproductrices de type « chair », les équations de prédiction suivantes sont proposées :

$$EM_i = 1,424 P^{0,653}(1+(21-T) \times 0,0125) + 3,13 \Delta P + 3,15e \quad (\text{Connor, 1980})$$

Où P est le poids vif en grammes et T la température en degrés centigrades.

$$EM_i = 75,8P + 5,49 \Delta P + 2,35 e \quad (\text{à } 20^\circ\text{C}) \quad (\text{Leclercq, 1985}).$$

III. Valeur énergétique des aliments

Dans les productions avicoles, deux mesures de l'énergie de l'aliment sont le plus couramment utilisées : l'énergie brute qui peut servir de critère analytique de base et l'énergie métabolisable qui constitue la fraction utilisable pour le métabolisme de l'animal. L'énergie digestible est très rarement mesurée chez les oiseaux.

1/ Energie brute

C'est la quantité d'énergie contenue dans l'aliment, elle se mesure grâce à un calorimètre renfermant une bombe calorimétrique.

On peut estimer l'énergie brute d'un aliment à partir de paramètres chimiques.

$$\bullet \quad EB = 57,2 PB + 95,0 MG + 47,9 CB + 41,7 ENA + \Delta i \quad (\text{Schieman et al, 1971})$$

Où

EB est l'énergie brute en kcal/kg

BP sont les protéines brutes (en %)

ENA est l'extractif non azoté (en %)

M.G sont les matières grasses brutes (en %)

C.B est la cellulose brute de weende (en%)

Δi est un facteur de correction pour certaines matières premières

$$\bullet \text{ EB} = 1552 + 76,2 \text{ MG} + 39 \text{ PB} + 25,4 (\text{CB} + \text{ENA}) \quad (\text{Fisher, 1982})$$

2/ Energie digestible.

Elle est obtenue par différence entre l'E.B et l'énergie non digestible. Elle est très rarement mesurée chez les volailles. Elle nécessite en effet la mise en place d'un anus artificiel afin de séparer les fèces de l'urine.

3/ Energie métabolisable

Chez les volailles, l'énergie métabolisable est la valeur énergétique la plus facile à mesurer et de ce fait la plus couramment employée pour estimer les besoins des volailles. L'E.M correspond à la quantité d'énergie alimentaire utilisable pour les tissus de l'organisme. Elle sert à faire face aux dépenses énergétiques liées à l'entretien et à la production. Elle est définie par l'équation :

$$\text{EM} = (\text{E}_i - \text{E}_e) / i$$

où E_i est l'énergie brute ingérée et E_e est l'énergie excrétée (fèces + urine) et i la quantité d'aliment ingérée.

Métabolisme protéique

Introduction

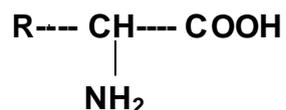
Les produits de la digestion des protéines d'origine alimentaire ou endogène sont absorbés essentiellement sous forme d'acides aminés libres mais aussi d'oligopeptides qui sont rapidement hydrolysés dans les antérocytes.

Dans le sang comme dans tous les tissus, il existe une quantité appréciable d'acides aminés dits libres parce que non engagés dans des liaisons peptidiques. Ils sont utilisés à des fins anaboliques ou cataboliques : synthèse protéique, interconversion entre acides aminés, néoglucogénèse, céto-génèse, oxydation..., l'ensemble de ces réactions constituant le métabolisme protéique.

Les matières protéiques sont des constituants essentiels de la matière vivante. Elles existent dans la quasi-totalité des tissus animaux. Elles représentent 15 à 20% des constituants des organismes des animaux domestiques (50% de la M.S du poulet). De plus, l'azote joue un rôle important dans le fonctionnement de l'organisme : elle existe dans la composition de nombreux effecteurs : hormones, enzymes,.... Elles exercent aussi une action protectrice (on le trouve au niveau des anticorps, agents de toxication).

I / Notion d'acide aminé

La digestion des matières protéiques d'origine alimentaire ou endogène donne un produit qui va être absorbé essentiellement sous forme d'acide aminé. Les protéines encore appelées matières azotées comprennent les acides aminés, les peptides, protides, protéines. L'élément de base de ces composées est des acides aminés. Ils sont des molécules organiques possédant à la fois un groupement carboxyle et un groupement aminé lié à un même carbone, lui-même attaché à un radical (R) , variable d'un acide aminé à l'autre.



Actuellement, on dénombre 20 acides aminés : Glycine – Alanine – Valine – Leucine – Isoleucine – sérine – Thréonine – Tyrosine – Cystéine – Méthionine – Acide aspartique – Asparagine – Acide glutamique – Glutamine – Arginine – lysine – Histidine – phénylalanine – Tryptophane – Proline.

II / Classification nutritionnelle des acides aminés

Contrairement aux végétaux et à de nombreuses espèces bactériennes, les volailles, tout comme tous les animaux supérieurs, sont incapables de synthétiser certains acides aminés, dits indispensables, dont ils ont besoin pour leur synthèse protéique et leur renouvellement tissulaire. Ils doivent les consommer dans leur alimentation. Au regard de la synthèse, tous les acides aminés sont également indispensables dans la mesure où l'absence de l'un d'entre eux empêchera le processus anabolique. Mais du point de vue de la biochimique et par voie de conséquence de la nutrition, les acides aminés sont classés en trois groupes.

1/ Acides aminés indispensables ou essentiels

Ils doivent être apportés dans l'aliment. Ils sont au nombre de dix dans la plupart des cas. On les répartit en trois catégories :

- Ceux qui sont strictement indispensables parce qu'ils doivent être obligatoirement présents dans la ration, car l'animal est absolument incapable de les synthétiser. Ce sont la lysine et la thréonine.

- Ceux qui sont essentiels au sens large car leur synthèse à partir d'autres acides aminés est possible, mais trop faible pour assurer les besoins de l'animal. Ce sont le plus souvent :

L'arginine, l'histidine, l'isoleucine, la leucine, la méthionine, la phénylalanine, le tryptophane et la valine.

2/ Acides aminés semi-indispensables

Ils peuvent être synthétisés à partir d'acides aminés indispensables. Il s'agit de la cystéine et de la tyrosine formés respectivement à partir de la méthionine et de la phénylalanine.

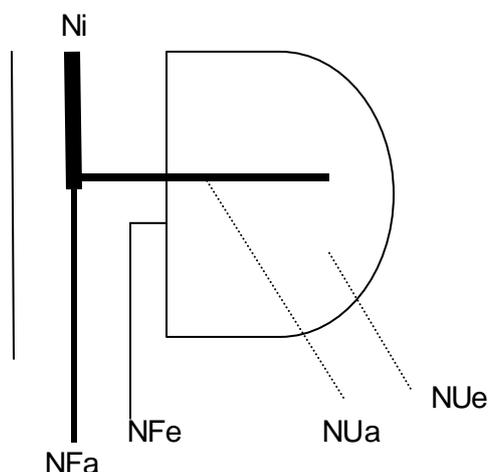
3/ les acides aminés non indispensables ou non essentiels ou banals

L'organisme animal est capable de les fabriquer à partir d'autres acides aminés grâce à la réaction de la transamination. Leur absence dans la ration n'a pas de répercussion défavorable car ils sont synthétisés en quantité et vitesse suffisante, cependant leur apport alimentaire ne doit pas être négligé car ils économisent les acides aminés essentiels. Les aliments en sont tous largement pourvus, qu'ils soient d'origine végétale ou animale; il suffit d'un taux minimal de matières azotées totales pour les apporter en quantité suffisante.

III / Les flux d'azote dans l'organisme et les critères d'efficacité

Les matières azotées alimentaires ne sont que partiellement utilisées pour l'animal. Les rejets azotés contenus dans les déjections correspondent à la fraction de l'azote alimentaire non utilisé pour l'animal.

Pour raisonner à partir de concepts comparables, l'efficacité de la transformation de matières azotées ingérées par les animaux, il a été nécessaire de définir les flux essentiels. (Voir figure)



Les flux d'azote dans l'organisme

N_i : azote ingéré
 N_{Fa} : azote fécal d'origine alimentaire
 N_{Fe} : azote fécal d'origine endogène
 N_{Ft} : azote fécal total = $N_{Fa} + N_{Fe}$
 N_{Ua} : azote urinaire d'origine alimentaire
 N_{Ue} : azote urinaire d'origine endogène
 N_{Ut} : azote urinaire total = $N_{Ua} + N_{Ue}$

La mesure de ces flux permet de calculer les rendements des processus digestifs et métaboliques :

- Au niveau digestif

L'utilisation digestive de l'azote des aliments conduits à l'élimination au niveau fécal de la fraction azotée non digérée; l'importance relative de cette fraction par rapport à l'azote ingéré dépend à la fois de l'animal et des rations. L'importance de cette fraction est mesurée par :

- le coefficient d'utilisation digestive = rendement de l'utilisation digestive.

Le coefficient d'utilisation digestive apparent $CUD_A = (N_i - N_{Ft}) / N_i$
 Le coefficient d'utilisation digestive réel $CUD_R = (N_i - (N_{Ft} - N_{Fe})) / N_i$

- Au niveau métabolique

L'utilisation métabolique des acides aminés sanguins pour la synthèse protéique se traduit par une excrétion d'azote au niveau urinaire sous forme d'acide urique issu de l'oxydation des acides aminés sanguins non utilisés pour la synthèse protéique. L'importance de cette fraction dépend de l'adéquation quantitative (des protéines brutes totales) et qualitative (apport d'acides aminés) de l'apport azoté aux besoins de l'animal. L'importance de cette fraction est mesurée par :

- le coefficient d'utilisation métabolique

$CUM_{apparent} = N \text{ fixé apparemment} / N \text{ absorbé apparemment} = (N_i - (N_{Ft} + N_{Ut})) / (N_i - N_{Ft})$

- le coefficient d'utilisation métabolique réel, appelé encore valeur biologique (VB)

$VB = N \text{ fixé réellement} / N \text{ absorbé réellement} = (N_i - (N_{Fa} + N_{Ua})) / (N_i - N_{Fa})$

$= (N_i - ((N_{Ft} - N_{Fe}) + (N_{Ut} - N_{Ue}))) / (N_i - (N_{Ft} - N_{Fe}))$

- efficacité azotée globale par le coefficient d'utilisation pratique de l'azote alimentaire

$CUP = N \text{ fixé} / N \text{ ingéré} = (N \text{ absorbé} / N \text{ ingéré}) \times (N \text{ fixé} / N \text{ absorbé})$
 $(CUD_R) \times (VB)$

D'une manière générale, pour améliorer l'efficacité alimentaire des matières azotées, il faut :

- Réduire la fraction de l'azote indigestible rejetée dans les fèces ce qui suppose une bonne connaissance de l'utilisation digestive des matières azotées alimentaires

- Réduire la fraction de l'azote excrété dans l'urine ce qui suppose :

- Un bon ajustement quantitatif des apports aux besoins des animaux
- Un équilibre optimal des protéines de régime en acides aminés en particulier les acides aminés essentiels

IV / Facteurs d'efficacité protidique

1/ Equilibre des acides aminés

Pour que les potentialités génétiques puissent s'exprimer et permettre à l'animal de réaliser les meilleures performances zootechniques par une synthèse protéique maximum, les acides aminés doivent être apportés en quantités nécessaires, évitant à la fois les excès et les carences. La notion d'équilibre conduit sur le plan pratique à définir pour chaque production, les besoins quantitatifs en acides aminés. Sa mise en évidence ne peut cependant se faire qu'indirectement, en définissant les situations d'excès et de carence et en envisageant leurs conséquences.

1.1. La carence en un acide aminé essentiel

La situation de déficit s'explique en faisant appel à la notion de facteur limitant. Lorsqu'un animal en production (croissance ou ponte) reçoit par son alimentation une certaine quantité de chacun des acides aminés, il exprime, en général une certaine performance de production correspondant à l'apport de l'acide aminé le plus limitant pour son besoin.

Si on supplémente l'aliment avec l'acide aminé (facteur limitant primaire) de façon à couvrir le besoin, la performance va s'améliorer et s'ajuster au niveau d'un autre acide aminé dont l'apport devient, maintenant, le facteur limitant secondaire et ainsi de suite jusqu'à ce que les besoins en tous acides aminés soient satisfaites. On peut ainsi trouver un mélange de maïs et tourteaux de soja destinés aux poules pondeuses où le 1^{er} acide aminé facteur limitant est la méthionine. Après supplémentation de l'aliment par la méthionine, la lysine peut devenir le second facteur limitant, puis le tryptophane, etc.

L'une des responsabilités du nutritionniste est de connaître les besoins pour repérer les facteurs limitants dans les aliments. Ensuite il lui revient d'associer des matières premières à profils complémentaires en acides aminés de façon à assurer les besoins en tous les acides aminés indispensables.

En principe si on parvient à couvrir exactement (sans excès) les besoins en acides aminés on aboutit à ce qu'on appelle la protéine idéale.

1.2. L'excès en un acide aminé

L'apport excessif d'un acide aminé se traduit par une baisse du niveau de protéosynthèse (croissance ou ponte...) d'un organisme.

La situation d'excès en acides aminés proprement dite est celle où certains acides aminés deviennent toxiques. C'est surtout le cas de la méthionine, chez le poulet comme chez la poule, les signes de toxicité apparaissent quand l'apport est supérieur à deux ou trois fois le besoin. La tyrosine, le tryptophane, la phénylalanine et l'histidine sont également toxiques mais à des doses nettement supérieures, 10 à 20 fois le besoin.

2/ Le concept de protéine idéale

Pour un organisme donné, la protéine idéale est celle qui entraîne le minimum de pertes azotées, c'est-à-dire qui possède la meilleure valeur biologique. En principe, si on arrive à couvrir exactement (sans aucun excès) les besoins en chacun des acides aminés, on aboutit à ce qu'on appelle la protéine idéale. En pratique, cette protéine idéale doit présenter un profil des apports en acides aminés essentiels qui soit superposables à celui des besoins. L'intérêt de la production industrielle d'acides aminés destinés à l'alimentation animale est de se rapprocher de cette protéine idéale. Leur utilisation permet d'améliorer l'efficacité métabolique des protéines alimentaires et de réduire les pertes azotées (acide urique).

3/ Le niveau d'apport d'énergie

Le processus de protéosynthèse est consommateur d'énergie sous forme d'ATP. Ce phénomène se répercute au niveau du régime par le fait qu'il est nécessaire d'y respecter un juste équilibre entre les acides aminés et l'énergie. Concrètement, cela revient à exprimer les besoins en acides aminés en les rapportant à l'unité d'énergie. Cela veut dire également, par voie de conséquence, que l'apport azoté global doit être rapporté à l'énergie

VI. Alimentation azotée des volailles

1/ Mode d'expression des apports et des besoins :

Tout système d'expression de la valeur azotée des aliments et des besoins azotés des animaux doit vérifier simultanément deux conditions :

- Permettre d'exprimer dans une même unité apports et besoins
- Retenir un même niveau d'expression pour la valeur azotée des aliments et pour les besoins des animaux

Pour les volailles, l'unité d'expression des apports et des besoins c'est les protéines brutes totales et la quantité d'acides aminés.

2/ Le principe de la supplémentation

Pour couvrir les besoins azotés des volailles, on associe différentes matières qui doivent apporter à l'animal les acides aminés et une quantité suffisante de protéine garantissant l'apport d'une quantité globale minimale de l'ensemble des acides aminés indispensables.

Dans la pratique, on associe des céréales et des matières premières riches en matières azotées totales (les tourteaux, les protéagineux, ...) pour couvrir les besoins en acides aminés essentiels qui risquent d'être facteur limitant pour la protéosynthèse. En même temps, on vérifie que le taux azoté de l'aliment n'est pas excessif ce qui entraînerait un gaspillage inutile et des risques pathologiques.

De tels objectifs sont difficilement conciliables si on utilise exclusivement les protéines alimentaires habituelles. Par exemple l'association céréales + tourteaux permet de couvrir les besoins en acides aminés mais avec des taux azotés élevés.

La recherche d'une réduction du taux azoté conduit à utiliser :

- **Des matières premières riches en acides aminés essentiels**

Ce sont les aliments d'origine animale (farine de poisson).

- Des acides aminés de synthèse**

Plusieurs acides aminés sont actuellement fabriqués à l'échelle industrielle, principalement méthionine, lysine, thréonine, tryptophane.

Métabolisme des minéraux

Introduction

Les éléments minéraux sont présents dans l'organisme soit sous forme de sels (les chlorures, carbonate, phosphate, sulfates,...) soit inclus dans les molécules organiques (hormones, enzymes, acides nucléiques,...).

L'organisme des animaux renferme 3 à 5% des éléments minéraux. Le squelette à lui seul contient au moins 80% des matières minérales de l'organisme.

Les produits animaux contiennent des quantités très variables des matières minérales. A titre d'exemple, la coquille d'un œuf qui représente 10% de son poids, contient à elle seule 95% des matières minérales, on a 0,5 % dans le blanc et 1,1 % dans le jaune.

Les éléments minéraux jouant un rôle dans le métabolisme, peuvent se classer en deux groupes selon leur concentration dans l'organisme :

- **Les éléments majeurs ou macroéléments** : présents en quantités relativement importantes et pour lesquels l'unité de mesure est le gramme, ce sont calcium, phosphore, magnésium (Mg), potassium (K), sodium (Na), chlore (Cl), soufre (S). ils représentent 99% des minéraux de l'organisme.
- **Les éléments traces ou oligo-éléments** : présents en quantités très faible ou à l'état de traces et pour lesquels l'unité de mesure est le mg leur teneur est souvent exprimée en partie par million (ppm). Les principaux sont : le fer (Fe), le cuivre (CU), manganèse (Mn), zinc (Zn), cobalt (Co), Iode (I), Molybdène (Mo), Sélénium (Se)

I. Les macroéléments

1/ - le sodium, potassium et le chlore

Ces éléments existent surtout à l'état ionisé (Na^+ , K^+ , Cl^-) dans l'organisme. Leur répartition est très inégale entre liquides intracellulaires et liquides extracellulaires. Comme on peut l'observer dans le tableau les liquides extra-cellulaires contiennent essentiellement le sodium, le chlore le calcium et les ions bicarbonatés. Au contraire, le potassium, le magnésium, les ions sulfates et phosphates sont surtout présents à l'intérieur des cellules.

	Plasma	Cytosol
Na^+	150	10
K^+	4.5	160
Ca^{++}	5	Trace
Mg^{++}	3	35
Cl^-	120	2

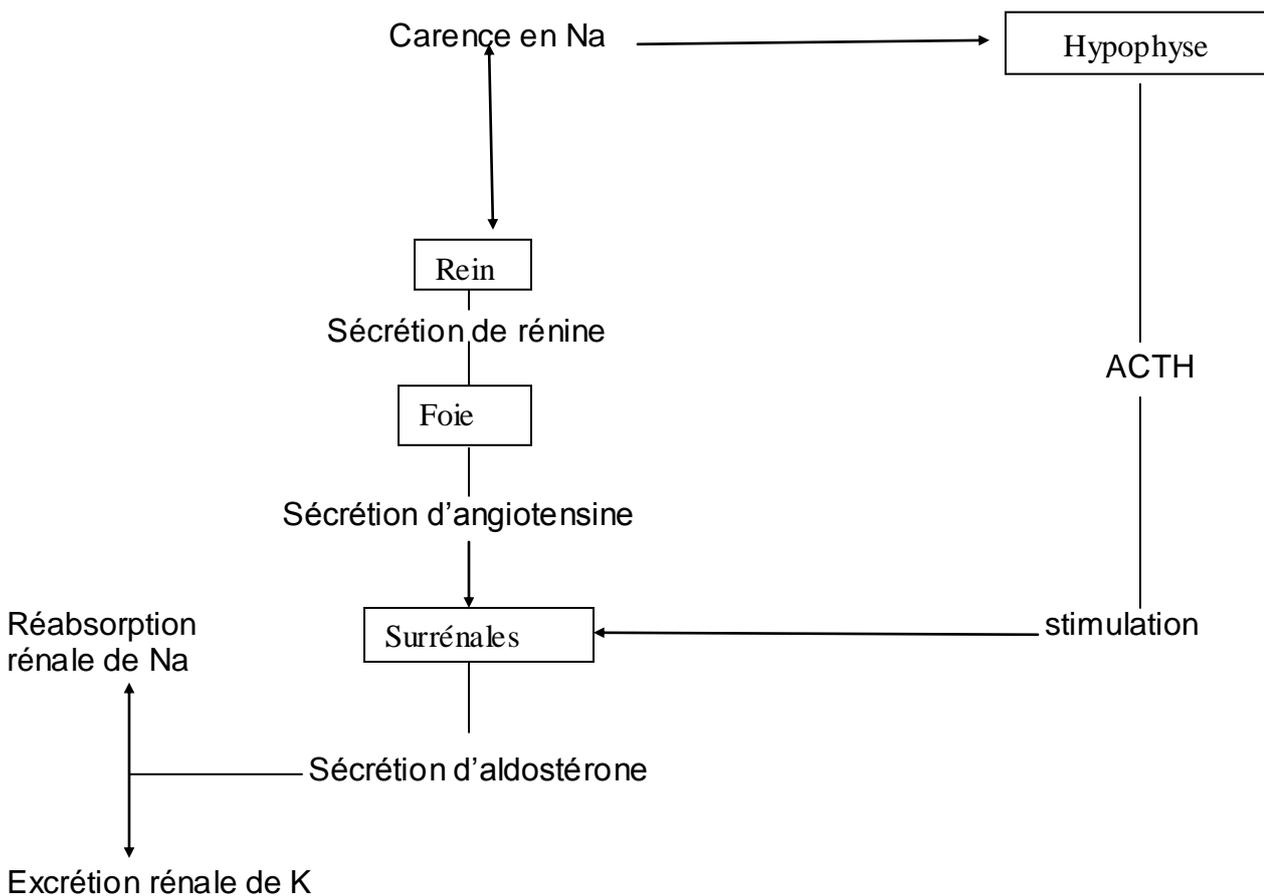
Le sodium plasmatique joue un rôle très important dans l'équilibre de la pression osmotique. Les matières premières destinées aux volailles (céréales + tourteaux) sont pauvres en sodium, la supplémentation est toujours nécessaire. En cas de carence, les mécanismes de régulation conduisent à une réabsorption intense de sodium par les tubules rénaux, les réserves corporelles n'existent guère. En cas d'excès, les reins excrètent une grande quantité de

sodium. Quand ses capacités d'excrétion sont dépassées, les phénomènes de toxicité s'installent : hypertrophie rénale, ralentissement de la croissance. D'une manière générale, les apports doivent être très réguliers pour éviter les carences et les excès.

Le potassium est très abondant dans les matières premières d'origine végétales (céréales + tourteaux). Les apports dépassent toujours les besoins dans les conditions pratiques. Le rein est amené à excréter en permanence l'excès de potassium fourni par l'alimentation.

1.1 - Régulation de l'équilibre sodium – potassium

Il existe en permanence une réabsorption rénale du sodium sauf dans les situations d'excès. Elle a lieu dans les tubes rénaux et est stimulée par l'Aldostérone : hormone minéralocorticoïde de nature stéroïdienne est synthétisée par les glandes surrénales. Lorsque la concentration plasmatique en Na⁺ diminue, l'hypophyse sécrète l'ACTH qui stimule la sécrétion de l'aldostérone pour les sur rénales. Cette dernière entraîne une réabsorption intense de sodium par le rein ainsi une excrétion accrue de potassium. L'excès de potassium alimentaire produit des effets semblables. Il existe donc une synergie entre Na⁺ et K⁺. L'excès de K⁺ dans des limites inférieures de celles de toxicité produit une réabsorption de Na⁺. Inversement, un excès de Na⁺, réduisant la sécrétion de l'aldostérone et réduisant réabsorption de Na⁺, ralentit l'excrétion et par la même le besoin en potassium.



Régulation des bilans de Na et de K

ACTH= *Adreno CorticoTropic Hormone*

Le chlore est souvent apporté dans l'alimentation en même temps que le sodium sous forme de chlorure. Le chlore est essentiellement présent dans les liquides extracellulaires (plasma) où

il assure l'équilibre ionique avec le Na⁺. La carence spécifique en chlore apparaît chez le poulet à des concentrations alimentaires inférieures à 0,7g/kg, la croissance est ralentie, la mortalité est importante. On observe en outre une hémococoncentration, une déshydrations de l'organisme et une chute de la chlorémie.

1.2. Besoins en sodium, potassium et chlore

En dehors des situations d'excès et de carence, l'organisme peut supporter pour les 3 éléments de larges variations grâce aux régulations décrites précédemment. Les besoins en Na, Cl et K comportent surtout une composante liée à l'entretien. C'est la raison pour laquelle il n'existe pas de différences entre espèces et entre états physiologiques. Par ailleurs, l'absence de réserves corporelles implique des apports réguliers toute carence ou tout excès se traduisant pour une diminution rapide de l'appétit. En pratique, le principal facteur de variation de la concentration des aliments est leur niveau énergétique ; les aliments peu énergétiques devront être moins riches en Na⁺, K⁺ et Cl⁻ que les aliments très énergétiques.

Apports optimum et limites inférieurs (carence) et supérieures (toxicité) des principaux éléments sous forme disponible (g/kg)^{*}.

		Optimum	Minimum	Maximum
Na⁺	croissance	1.32	1.00	10
	ponte	1.45	1.00	10
K⁺	croissance	3.00	1.90	20
	ponte	1.90	1.70	20
Cl⁻	croissance	1.23	0.80	4
	ponte	1.33	0.80	4
Mg⁺⁺	croissance	0.42	0.40	3
	ponte	0.45	0.40	10
Fer	croissance	45	35	1000
	ponte	60	45	500
Cuivre^{**}	croissance	10	4	250
	ponte	10	4	250
Zinc^{**}	croissance	50	40	800
	ponte	50	40	800
Manganèse^{**}	croissance	60	45	600
	ponte	40	30	1000
Iode^{**}	croissance	0.35	0.10	1000
	ponte	0.30	0.10	1000
Sélénium	croissance	0.10	0.05	4
	ponte	0.10	0.05	4

(^{*}) = aliment titrant 3000kcal/kg

(^{**}) = mg/kg

2/- Le calcium et le phosphore

Le calcium et phosphore sont les minéraux quantitativement les plus importants qui représentent 75% des minéraux de l'organisme. Les oiseaux en production, ont à faire face à des dépenses importantes en ces éléments, soit qu'ils fabriquent leur squelette (oiseaux en croissance), soit qu'ils effectuent la synthèse de la coquille de l'œuf. Ils sont aussi des constituants important notamment le phosphore de nombreuses molécules organiques. Le Ca assure une fonction primordiale dans la coagulation du sang. Pour ces minéraux, l'os est le principal réservoir de l'organisme. Il constitue une source de réserve échangeable avec d'autres compartiments de l'organisme. L'os est en perpétuel renouvellement, il s'en forme et s'en détruit sans cesse dans le même temps. La résorption absence ou ostéolyse est la formation de l'os à l'ostéosynthèse (accrétion) co-existent

2.1/ La régulation hormonale du métabolisme phosphocalcique

La régulation hormonale du métabolisme phosphocalcique est réglée par des actions hormonales mettant en jeu 3 éléments clefs:

1. un dérivé de la vitamine D₃, 1,25 dihydrocholécalférol (1,25(OH)₂D₃)
2. la parathormone (PTH) c'est une hormone produite par les glandes parathyroïdes
3. la calcitonine (C.T) c'est une hormone produite par les glandes thyroïdes.

Le 1,25 (OH)₂ D₃ exerce un contrôle essentiel dans l'absorption intestinale du calcium en déclenchant la synthèse de la Ca BP(Calcium binding Protein) qui permet un transport actif du calcium. Elle stimule en outre la fixation du calcium et du phosphore dans l'os.

La régulation de la synthèse du 1,25(OH)₂ D₃ dépend :

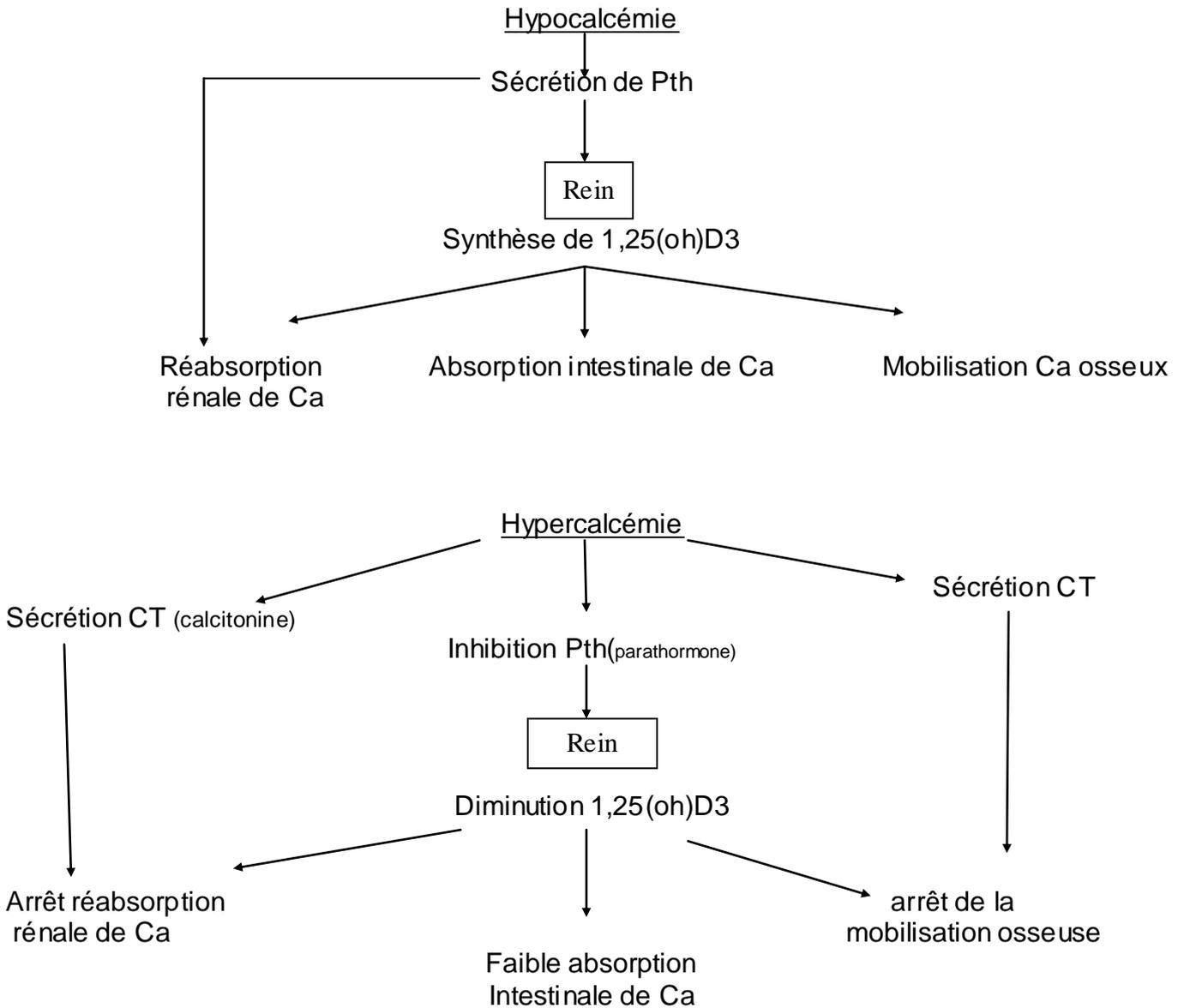
- de facteurs qui stimulent sa production : baisse de la calcémie (hypocalcémie), avec la production de la PTH.
- de facteurs qui inhibent sa production, c'est la production de la CT excès de la quantité circulante de 1,25 (OH)₂ D₃

La PTH favorise l'ostéolyse pour libérer le calcium osseux et stimule la production de 1,25 (OH)₂ D₃. Sa production est stimulée par l'hypocalcémie et freinée par l'hypercalcémie.

La CT est antagoniste de la PTH en s'opposant à l'ostéolyse : elle favorise le dépôt de Ca dans l'os et protège ainsi le squelette de la déminéralisation de. Sa sécrétion est stimulée par une calcémie élevée.

La constante de la calcémie est donc assurée par l'équilibre entre deux hormones antagonistes.PTH hypercalcémiante et CT hypocalcémiante.

- L'hypocalcémie entraîne une sécrétions du PTH qui accélère l'ostéolyse et une production de 1,25 (OH)₂ D₃ qui augmente l'absorption intestinal de calcium : la calcémie augmente.
- L'hypercalcémie entraîne une sécrétion de la CT qui favorise l'ostéosynthèse, freine la production de 1,25 (OH)₂ D₃ et donc l'absorption intestinale de Ca : la calcémie diminue.



Régulation du métabolisme calcique

2.2/ Besoins en calcium et phosphore

Contrairement au sodium et au potassium, le besoin en calcium et phosphore comporte surtout une composante de production, alors que la composante de l'entretien est faible. Un oiseau adulte à l'entretien n'a besoin en effet que de très faibles apports de calcium et phosphore du fait des mécanismes de régulation décrites précédemment. Au contraire, le jeune en croissance et la femelle en ponte doivent trouver dans leur alimentation les quantités nécessaire à leurs synthèses. Le besoin net de production peut être estimé grâce aux tableaux suivants. Les apports alimentaires de calcium et phosphore peuvent donc être calculés en divisant les besoins totaux par les coefficients d'utilisations qui sont de 50 à 60 p.100.

En pratique une déficience modérée en calcium n'affecte de façon sensible la croissance que chez le très jeune animal.

Chez l'animal en croissance, on peut estimer que le besoin en calcium est constant tout au long de la journée et en fonction surtout de la vitesse de croissance.

Chez la poule en ponte, il existe une période de la journée où le besoin en calcium est particulièrement élevé : il s'agit des heures au cours desquelles se réalise la formation de la coquille. Il apparait alors un appétit spécifique pour le calcium qui peut être satisfait par un apport séparé de calcium soit sous forme de coquilles d'huitres broyées, soit de granulés de carbonate de calcium.

Composition en minéraux du poulet (g/ kg poids vif)

	Eclosion	7 semaines	Adulte
Cendres	32	31	30
Totales	1.97	1.27	1.05
Na	1.90	1.82	2.5
K	0.69	0.15	0.53
Cl	3.40	6.80	12
Ca	3.30	5.10	7.20
P	0.37	0.65	0.60
Mg	0.038	0.038	0.035
Fe	0.0015	0.0015	0.0015
Zn	0.030	0.030	0.031
I	--	--	0.0003
Se	0.00014	--	0.00020

Composition minérale de l'œuf de poule (mg/g d'œuf)

	Total	Coquille	Blanc	Jaune
Ca	36	35.5	0.07	0.45
P	2	0.1	0.1	1.8
Mg	0.45	--	0.05	0.45
Na	1.2	0.10	0.38	0.21
K	1.2	--	0.82	0.38
Cl	1.4	--	0.93	0.47
Fe	38	--	5	33
Cu	1.7 à 6.0	--	0.5	1.0 à 5.5
Zn	17 à 19	--	0.01	10 à 17
Mn	0.1 à 0.6	--	0.1	0.1 à 0.6
I*	0.05 à 0.15	--	--	0.05 à 0.15
Se	0.04 à 0.14	--	--	--

(*) =microgrammes

La production quotidienne d'un œuf occasionne une exportation de 2,1 à 2,3 g de calcium, alors que la totalité du Ca osseux représente environ 25 g soit l'équivalent d'une dizaine de coquille. Le Ca sanguin utilisé pour la fabrication de la coquille a une double origine :

- l'absorption intestinale = lorsque la poule forme une coquille, la fixation de Ca est augmentée en raison d'une efficacité plus grande de l'absorption intestinale sous l'action d'une quantité accrue de $1.25 (OH)_2 D_3$. L'ingestion du Ca doit être favorisée avant et pendant la formation de la coquille d'autant plus qu'il y a chez la pondeuse un appétit spécifique pour le Ca qui se manifeste après l'ovulation c'est-à-dire juste avant et pendant la formation de la coquille.
- La mobilisation du Ca du squelette est indispensable et intervient dès le début de la formation de la coquille mais il est plus assez importante en fin de nuit lorsque le tube digestif ne contient plus assez de calcium.

N.B : On a intérêt à favoriser la provenance intestinale et réduire la participation du squelette. Pour cela, l'apport alimentaire du Ca doit être considéré à un triple point de vue, quantité, forme et la chronologie.

La carence en phosphore se traduit par une perte d'appétit, un ralentissement de la croissance, des troubles locomoteurs graves et de la mortalité

3/ Le magnésium

Le magnésium représente 0.04 à 0.05 % du poids vif. Il est localisé pour 70 à 75% dans le squelette. Il intervient dans les réactions mettant en œuvre l'ATP. Ainsi toutes les synthèses tissulaires (protéine, lipides...) et l'activité musculaire requièrent du magnésium. En pratique les matières premières utilisées dans l'alimentation des volailles sont largement riche en magnésium ce qui rend les risques de carence extrêmement rares. Les symptômes de toxicité apparaissent pour des teneurs proches de 0.3 à 0.4% (3 à 4g/1kg d'aliment). Le premier d'entre eux est un ralentissement de la croissance. Chez la poule pondeuse, on constate surtout un ralentissement de l'intensité de ponte, un abaissement de poids de l'œuf, la fragilité de la coquille et une diminution de la concentration de l'œuf (surtout le jaune) en magnésium

II .Les oligo-éléments

Les oligo-éléments sont des éléments présents sous forme de traces dans les tissus des animaux mais remplissent souvent des fonctions essentielles pour la vie et la croissance. Les plus importantes qui posent des problèmes spécifiques aux volailles ou exigent en pratique une supplémentation sont principalement le fer, le cuir, le zinc, le manganèse, l'iode et le sélénium. Leurs niveaux de concentration dans l'aliment se traduit par 3 types de réaction de l'animal : aux faibles concentrations c'est la zone de carence, aux concentrations supérieures à une zone assez large où le besoin est satisfait et où l'animal maintient constant ses réserves, enfin aux concentrations très élevées la zone de toxicité qui se traduit chez le jeune animal par un ralentissement de la croissance et chez la poule en ponte par une baisse de taux de ponte (voir tableau)

1/ Le Fer

Il joue un rôle essentiel comme constituant fonctionnel de diverses molécules indispensables aux transports de l'oxygène au niveau du sang (Hémoglobine). Le fer est en outre stocké dans la moelle osseuse. La carence en fer, très rare en pratique, se traduit par un ralentissement de la croissance, une anémie et une pigmentation des plumages roux et noirs. Les excès de fer ne conduisent à des effets toxiques que pour des teneurs très élevés dans l'aliment (voir tableau).

2/ Le cuivre

Il est présent en très faible concentration dans l'organisme animal (1.5 mg/kg de poids vif). Les organes les plus riches sont le foie, le cerveau, les reins et le cœur. La déficience en cuivre, comme celle du fer est très rare dans les conditions usuelles de l'alimentation. Le principal symptôme de carence est l'anémie, un retard de croissance, des troubles de l'ossification et de la pigmentation du plumage, enfin des troubles nerveux et des fibroses myocarde.

3/ Le zinc

Le zinc est présent à la concentration moyenne de 27mg/kg de P.V chez les oiseaux. Il a une activité enzymatique très importante en particulier au niveau de la respiration cellulaire. La carence en zinc induit un ralentissement de la croissance chez les jeunes animaux, un épaissement et un raccourcissement des pattes, un emplumement retardé et une consommation réduite de l'aliment. Chez la pondeuse, l'intensité de ponte est abaissée, mais ce sont surtout la viabilité embryonnaire et l'éclosivité qui sont affectées de façon spectaculaire. Chez l'embryon, le développement du squelette est retardé, les os sont déformés et certains doigts peuvent être absents. Contrairement au Fer et au cuivre, le zinc est souvent présent en quantité insuffisantes dans les matières premières d'origine végétales destinées aux volailles. La supplémentation s'impose donc.

4/ Le manganèse

Le manganèse est un élément abondant dans les os et les mitochondries. La teneurs moyenne des oiseaux en manganèse est de 0,9 mg/Kg de poids vif. La carence en manganèse peut être aisément observée en l'absence de supplémentation. Elle se traduit de façon classique par le pérosis (enflure (tuméfaction) et déformation de l'articulation tibio-métarsale). Chez la poule pondeuse on observe des coquilles fragiles, une chute de l'éclosivité et une baisse de l'intensité de ponte. La supplémentation est toujours nécessaire.

5/ L'iode

L'iode est spécifiquement impliqué dans la synthèse des hormones thyroïdiennes et se trouve donc concentré dans la glande thyroïde. La carence en iode induit une déficience en hormones thyroïdiennes. Il s'en suit une hypertrophie de la glande thyroïde. La carence en iode ralentit aussi la croissance des animaux et entraîne une baisse notable de la ponte.

En pratique, la supplémentation des aliments en iodure est indispensable surtout quant il s'agit de matières premières d'origine végétale dont les teneurs en iode sont faibles et très variables. Les farines animales contiennent en général plus d'iode, en particulier les farines de poisson. En pratique il est indispensable d'assurer une légère supplémentation en iode.

6/Le sélénium

Le sélénium est un constituant de la glutathion- peroxydase, enzyme jouant un rôle antioxydant à l'intérieur des cellules. A diathèse exsudative est le principal symptôme de carence. Il s'agit de la formation d'œdèmes

Le besoin en sélénium dépendant des apports de vitamine E et les teneurs et la disponibilité du sélénium des matières premières étant très variables, on est amené à compléter les aliments destinés aux oiseaux avec une source de sélénium très disponible.