

# Chapitre 4 : La modélisation de la croissance

## Introduction

La modélisation de la croissance en production et nutrition animale est essentielle pour prédire et optimiser la performance des animaux d'élevage. Elle permet de mieux comprendre les facteurs biologiques, nutritionnels et environnementaux qui influencent le développement et la productivité des animaux. Ces modèles sont utilisés dans divers secteurs, notamment la gestion de l'alimentation, la génétique, l'optimisation de la reproduction, la gestion des exploitations agricoles, et l'amélioration de l'efficacité des productions animales tout en minimisant les coûts et l'impact environnemental.

## 1. Concepts fondamentaux de la croissance animale

### 1.1 Définition de la croissance animale

La croissance animale se réfère à l'augmentation de la taille et du poids d'un animal au cours de sa vie, résultant de l'accumulation de tissus corporels (muscles, os, graisses) à partir des nutriments issus de l'alimentation. La croissance est influencée par une multitude de facteurs :

- Facteurs nutritionnels : La qualité et la quantité des nutriments disponibles, y compris l'énergie, les protéines, les vitamines et les minéraux, sont des déterminants clés de la croissance.
- Facteurs génétiques : La capacité de croissance est influencée par la génétique de l'animal, qui détermine des caractéristiques comme la croissance musculaire, la production de graisse et la maturité.
- Facteurs environnementaux : Les conditions climatiques, le stress thermique, les maladies, et la densité de peuplement peuvent affecter la vitesse et l'efficacité de la croissance.
- Facteurs hormonaux et physiologiques : Les hormones de croissance, telles que l'insuline, le cortisol et l'hormone de croissance (GH), régulent le métabolisme et la croissance.

### 1.2 Types de croissance

- Croissance linéaire : L'augmentation du poids corporel est proportionnelle au temps.
- Croissance sigmoïdale : La croissance suit une courbe en S, avec une phase initiale lente, une phase de croissance rapide, et une phase de ralentissement à l'approche de la maturité.
- Croissance spécifique : C'est la croissance d'un composant corporel particulier, par exemple, la masse musculaire ou la masse grasse, qui peut être modélisée indépendamment de la masse corporelle totale.

## 2. Modèles de croissance animale

### 2.1 Modèles empiriques de croissance

Les modèles empiriques sont construits à partir de données observées et utilisent des équations statistiques pour décrire la relation entre les entrées (alimentation, conditions environnementales) et les sorties (croissance, gain de poids).

#### 2.1.1 Modèles de croissance linéaire

Les modèles linéaires sont simples et décrivent la croissance comme une augmentation constante du poids corporel au fil du temps. Ils sont souvent utilisés dans des contextes où les animaux sont en phase de croissance rapide et peuvent être appliqués pour de courtes périodes.

### Exemple : Croissance des bovins d'engraissement

Lorsque des bovins en phase d'engraissement sont nourris avec une ration équilibrée (en énergie et protéines), il est possible d'observer une **croissance linéaire** du poids corporel en fonction de l'apport en nutriments jusqu'à un certain point.

Quantité d'aliments (kg/jour)	Gain de poids (kg/jour)
4	0.8
5	1.0
6	1.2
7	1.4
8	1.6

- **Relation linéaire :**

À chaque augmentation de **1 kg/jour** de la quantité d'aliments consommés, le gain de poids quotidien augmente de **0,2 kg/jour**.

Cela peut être exprimé sous forme d'équation :

$$Y = Ax + b$$

Où :

- Y est le gain de poids (kg/jour)
- X est la quantité d'aliments consommés (kg/jour)
- a est la pente (ici, 0.2 kg de gain par kg d'aliments)
- b est une constante initiale (ici 0, si on part de zéro).

### Limites de la croissance linéaire :

- La croissance linéaire est généralement observée au début ou dans des conditions optimales.
- À des niveaux d'alimentation très élevés, la croissance peut ralentir en raison de limites biologiques (saturation du métabolisme ou inefficacité de l'utilisation des nutriments).

Cet exemple illustre une relation linéaire entre la consommation d'aliments et le gain de poids chez les bovins. Ce concept est également applicable pour d'autres animaux en production comme la volaille lorsqu'une augmentation progressive de la ration alimentaire entraîne une croissance proportionnelle dans certaines limites.

#### 2.1.2 Modèles sigmoïdes

Les modèles sigmoïdes, comme le modèle de « Brody » ou « von Bertalanffy », sont plus utilisés pour modéliser la croissance de l'animal sur une période prolongée car ils reflètent mieux les trois phases de la croissance biologique :

1. **Croissance initiale lente** (phase de latence).
2. **Croissance rapide** (phase exponentielle).
3. **Croissance stabilisée** (phase de plateau due à la maturité).

Ils tiennent compte de la phase de ralentissement de la croissance qui survient à l'approche de la maturité.

### Modèle de Brody

Le modèle de Brody est utilisé pour décrire la croissance asymptotique des animaux, en particulier pour les ruminants comme les bovins. La formule est la suivante :

$$W(t) = W_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot t})^b$$

Où :

- $W(t)$  est le poids à un moment  $t$  (temps).
- $W_{\infty}$  est le poids asymptotique (poids mature ou plateau).
- $k$  est le taux de croissance.
- $e$  est la base du logarithme naturel.
- $b$  est un paramètre de forme (fixé à 1 dans le modèle de Brody pour simplification).

Le poids augmente de manière rapide au début, puis ralentit progressivement en approchant un poids asymptotique (maturité).

### Modèle de von Bertalanffy

Le modèle de von Bertalanffy est plus flexible et tient compte des contraintes métaboliques liées à la croissance. Sa formule est :

$$W(t) = W_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot (t-t_0)})^3$$

Où :

- $W(t)$  est le poids à un moment  $t$ .
- $W_{\infty}$  est le poids asymptotique.
- $k$  est le paramètre de vitesse de croissance.
- $t_0$  est le temps initial où la croissance commence.
- $e$  est la base du logarithme naturel.

Le modèle von Bertalanffy est souvent utilisé pour modéliser la croissance chez les poissons, volailles, et autres animaux où le métabolisme joue un rôle important dans la régulation de la croissance.

### Comparaison des deux modèles

Modèle	Caractéristiques	Utilisation
Brody	- Simple, asymptotique avec une croissance décroissante.	Ruminants (bovins, ovins)
von Bertalanffy	- Inclut un facteur métabolique et est plus flexible.	Poissons, volailles, croissance générale

#### 2.1.3 Modèles de gain de poids basé sur la ration alimentaire

Certains modèles relient directement la croissance animale à la quantité et à la qualité des nutriments fournis. Ces modèles sont souvent utilisés dans des contextes où les régimes alimentaires sont modifiés ou ajustés pour optimiser la performance.

**Exemple :**

Le gain de poids quotidien ( $G$ ) est lié à l'énergie métabolisable consommée ( $EM$ ) par l'équation suivante :

$$G = a \cdot (EM - EM_{\text{entretien}})$$

Où :

- $G$  est le gain de poids quotidien (kg/jour).
  - $EM$  est l'énergie métabolisable fournie par la ration (MJ/jour).
  - $EM_{\text{entretien}}$  est l'énergie nécessaire pour couvrir les besoins d'entretien (MJ/jour).
  - $a$  est un coefficient d'efficacité de conversion de l'énergie en gain de poids.
- 
- Si  $EM > EM_{\text{entretien}}$  : L'énergie excédentaire est utilisée pour la croissance (gain de poids).
  - Si  $EM = EM_{\text{entretien}}$  : L'animal ne croît pas, car toute l'énergie est utilisée pour l'entretien des fonctions vitales.
  - Si  $EM < EM_{\text{entretien}}$  : L'animal perd du poids.

## 2.2 Modèles physiologiques de croissance

Les modèles physiologiques sont plus complexes et cherchent à simuler les processus biologiques sous-jacents à la croissance. Ces modèles intègrent les mécanismes de l'absorption des nutriments, la synthèse des tissus et l'utilisation des ressources par l'organisme.

### Exemple : Modèle physiologique basé sur la synthèse des tissus

Ce modèle utilise des équations pour simuler la croissance du poids corporel en décomposant les nutriments absorbés en deux flux principaux :

1. Synthèse des protéines tissulaires.
2. Dépôt de lipides (graisses).

Le poids corporel total ( $W$ ) à un temps donné  $t$  est la somme des dépôts en protéines et en lipides :

$$W(t) = P(t) + L(t)$$

Où :

- $P(t)$  représente le poids des protéines.
- $L(t)$  représente le poids des lipides.

Les équations sont :

#### 1. Synthèse des protéines :

$$\frac{dP}{dt} = k_p \cdot (I - M_p)$$

- $k_p$ : efficacité de conversion des nutriments en protéines.
- $I$  : quantité de nutriments absorbés (énergie ou protéines alimentaires).
- $M_p$  : besoin en nutriments pour l'entretien protéique.

#### 2. Synthèse des lipides :

$$\frac{dL}{dt} = k_l \cdot (I - M_l)$$

- $k_l$  : efficacité de conversion des nutriments en lipides.
  - $M_l$  : besoin en nutriments pour l'entretien énergétique.
- L'énergie et les protéines absorbées sont utilisées pour l'entretien ( $M_p$ ,  $M_l$ ) en premier.
  - L'excédent est utilisé pour la croissance des tissus corporels sous forme de protéines (masse maigre) et de lipides (réserves de graisse).
  - La dynamique des deux composants (protéines et lipides) permet de prédire la composition corporelle au cours du temps.

### 2.2.1 Modèles de la dynamique de croissance

Les modèles de la dynamique de croissance considèrent la croissance comme une série de processus biochimiques et physiologiques qui relient l'ingestion de nourriture, la digestion, l'absorption des nutriments, et la biosynthèse des tissus corporels.

Un modèle typique de dynamique de la croissance inclut :

- Absorption des nutriments : La quantité de nutriments absorbée par l'animal, en fonction de l'aliment et de la capacité digestive de l'animal.

- Synthèse des tissus : La conversion des nutriments absorbés en protéines, lipides et autres tissus corporels. La vitesse de croissance est influencée par des facteurs tels que la quantité de nutriments disponibles et l'efficacité de la biosynthèse.

- Dégradation des tissus : Certains modèles incluent aussi la dégradation des tissus corporels, par exemple en période de jeûne ou de stress, ce qui peut ralentir la croissance.

### Exemple :

Un modèle de croissance musculaire relie directement la quantité de protéines alimentaires ingérées à la synthèse des protéines musculaires dans l'organisme. Ce modèle prend en compte l'efficacité de conversion des protéines alimentaires en protéines corporelles, qui dépend de facteurs comme :

- La qualité de la ration (teneur en acides aminés essentiels).
- Les hormones de croissance (ex. IGF-1, insuline).
- La génétique de l'animal (potentiel de croissance musculaire).

La croissance musculaire ( $G_m$ ) peut être modélisée par l'équation suivante :

$$G_m = k_p \cdot (P_{\text{ingérées}} - P_{\text{entretien}})$$

### Où :

- $G_m$  : gain quotidien de protéines musculaires (g/jour).
- $P_{\text{ingérées}}$  : quantité de protéines alimentaires ingérées (g/jour).
- $P_{\text{entretien}}$  : besoins en protéines pour l'entretien (g/jour).
- $k_p$  : efficacité de conversion des protéines alimentaires en protéines corporelles ( $0 < k_p < 1$ ).

### Exemple numérique :

- L'animal consomme **500 g/jour** de protéines alimentaires ( $P_{\text{ingérées}}$ ).
- Les besoins d'entretien en protéines sont **200 g/jour** ( $P_{\text{entretien}}$ ).
- L'efficacité de conversion des protéines alimentaires en protéines musculaires est  $k_p = 0.5$ .

L'équation devient :

$$G_m = 0.5 \cdot (500 - 200)$$
$$G_m = 0.5 \cdot 300 = 150 \text{ g/jour}$$

L'animal gagne **150 g/jour** de protéines musculaires grâce à la conversion efficace des protéines alimentaires en tissu musculaire.

## 2.2.2 Modèles basés sur l'énergie et les protéines

Les modèles basés sur les flux d'énergie et de protéines sont utilisés pour simuler la croissance des animaux en prenant en compte non seulement la quantité d'énergie ingérée, mais aussi l'efficacité avec laquelle cette énergie est utilisée pour produire de la biomasse corporelle.

### Exemple :

L'énergie et les protéines consommées sont allouées en priorité pour :

1. L'entretien des fonctions vitales (respiration, digestion, etc.).
2. La croissance musculaire (protéines) et la croissance des réserves grasses (lipides).

### Équations du modèle :

1. **Besoins énergétiques pour l'entretien :**

$$EM_{\text{net}} = EM_{\text{ingérée}} - EM_{\text{entretien}}$$

2. **Utilisation de l'énergie pour la croissance :**

$$G = k_g \cdot EM_{\text{net}}$$

- G : Gain corporel total (énergie sous forme de masse musculaire et grasse).
- $k_g$  : Efficacité d'utilisation de l'énergie nette pour la croissance ( $0 < k_g < 1$ ).

3. **Répartition du gain entre protéines et lipides :**

$$G = G_p + G_l$$

- $G_p = k_p \cdot EM_{\text{net}}$  : Gain de protéines corporelles.
- $G_l = k_l \cdot EM_{\text{net}}$  : Gain de lipides corporels.

### Exemple numérique :

Supposons :

- $EM_{\text{ingérée}} = 50$  MJ/jour (énergie métabolisable ingérée).
- $EM_{\text{entretien}} = 30$  MJ/jour (besoins pour l'entretien).
- $k_g = 0.6$  (efficacité pour la croissance).
- Proportion :  $k_p = 0.4$  (pour les protéines) et  $k_l = 0.6$  (pour les lipides).

### Étapes :

1. Énergie nette pour la croissance :

$$EM_{\text{net}} = 50 - 30 = 20 \text{ MJ/jour}$$

2. Gain total corporel :

$$G = 0.6 \cdot 20 = 12 \text{ MJ/jour}$$

3. Répartition du gain :

- Gain en protéines :

$$G_p = 0.4 \cdot 12 = 4.8 \text{ MJ/jour}$$

- Gain en lipides :

$$G_l = 0.6 \cdot 12 = 7.2 \text{ MJ/jour}$$

Avec une consommation de **50 MJ/jour** d'énergie métabolisable :

- **4.8 MJ/jour** sont utilisés pour la croissance musculaire (protéines).
- **7.2 MJ/jour** sont utilisés pour le dépôt de graisse (lipides).

### **3. Applications pratiques de la modélisation de la croissance**

#### **3.1 Optimisation des régimes alimentaires**

Les modèles de croissance permettent de définir des stratégies alimentaires plus efficaces pour maximiser la production tout en minimisant les coûts. Par exemple, en ajustant les apports en protéines, en énergie, et en minéraux, on peut améliorer la vitesse de croissance des animaux et leur efficacité alimentaire. Cela est particulièrement important dans des contextes commerciaux où la rentabilité est cruciale.

#### **3.2 Gestion de la performance animale**

Les modèles de croissance aident à prédire la performance des animaux en fonction de différents facteurs :

- Croissance des jeunes animaux : Les modèles permettent de simuler le gain de poids en fonction de l'alimentation et de l'âge des animaux.

- Optimisation de la production de viande, de lait ou d'œufs : Les modèles peuvent être utilisés pour maximiser la production de produits d'origine animale (par exemple, la production de lait ou de viande) tout en optimisant les intrants.

#### **3.3 Sélection génétique**

Les modèles de croissance sont utilisés dans la sélection génétique des animaux. Par exemple, des modèles basés sur la génétique permettent de prédire la croissance et la composition corporelle en fonction des caractéristiques génétiques des animaux, ce qui peut améliorer l'efficacité de la sélection.

#### **3.4 Impact environnemental**

Les modèles permettent d'analyser l'impact environnemental des différents systèmes de production en termes de l'efficacité de la conversion alimentaire, des émissions de gaz à effet de serre (comme le méthane), et de la gestion des ressources.

#### **3.5 Gestion de la santé animale**

Les modèles de croissance peuvent également être utilisés pour prédire l'effet de maladies ou de stress sur la croissance des animaux. Par exemple, une infection ou un stress thermique peut ralentir la croissance, et ces impacts peuvent être modélisés pour ajuster les régimes alimentaires ou les stratégies de gestion.

### **Conclusion**

La modélisation de la croissance en production et nutrition animale est un outil puissant pour optimiser les régimes alimentaires, prédire les performances des animaux, et améliorer l'efficacité des systèmes de production animale.