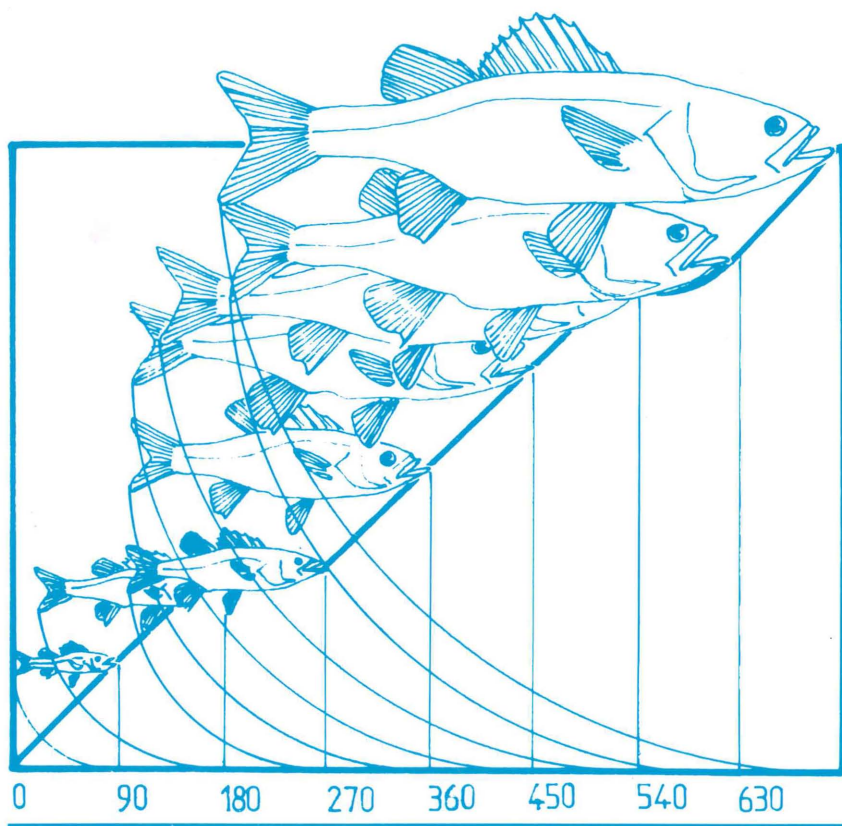


Arnaud MULLER-FEUGA

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

MODÉLISATION DE LA CROISSANCE DES POISSONS EN ÉLEVAGE

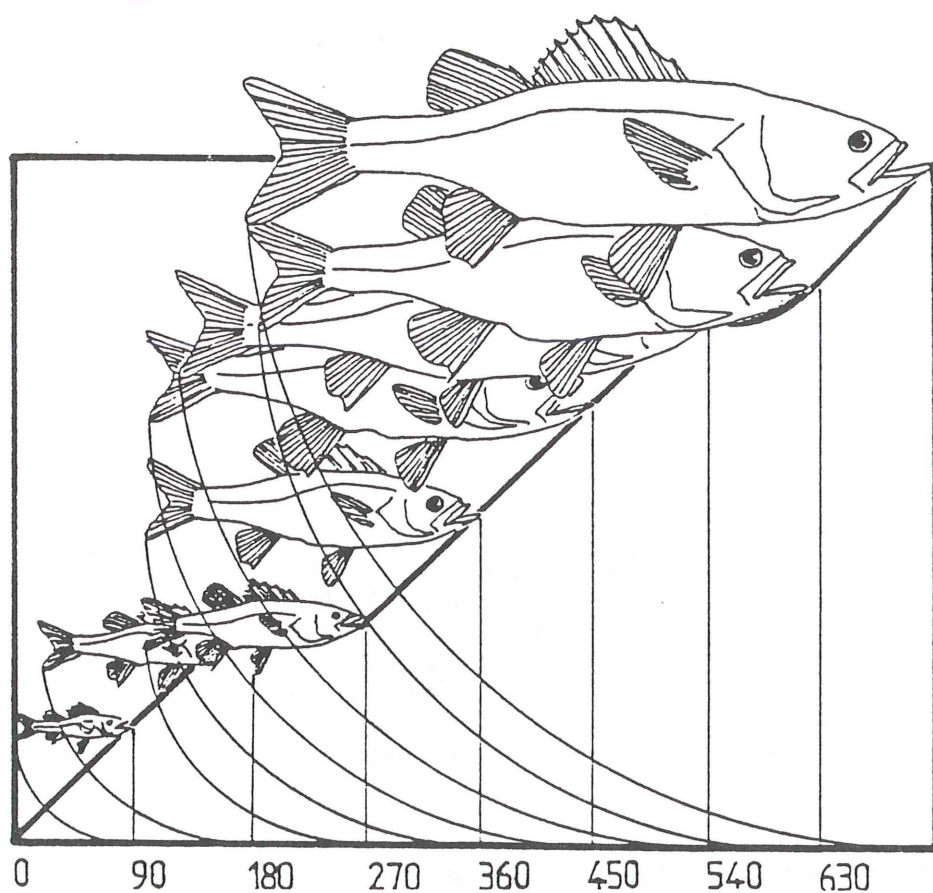


Rapports scientifiques et techniques de l'IFREMER

N° 21 - 1990

MODÉLISATION DE LA CROISSANCE DES POISSONS EN ÉLEVAGE

Arnaud MULLER-FEUGA



*Service de la Documentation
et des Publications (S.D.P.)*
IFREMER - Centre de Brest
B.P. 70 - 29263 PLOUZANÉ
Tél. 98.22.40.13 - Télex 940 627 F

ISSN : 0761-3970

MODÉLISATION DE LA CROISSANCE
DES POISSONS EN ÉLEVAGE

Arnaud MULLER-FEUGA

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

Le rapport

MODELISATION DE LA CROISSANCE DES POISSONS EN ELEVAGE

a été réalisé par

Arnaud Muller-Feuga

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
Centre de Brest

avec la collaboration

de la *Direction de l'Ingénierie et de la Technologie*,

notamment de *Jacques Labeyrie*,

de la *Direction des Ressources Vivantes*

de l' ***IFREMER***,

et de la Société "***Les Salmonidés d'Aquitaine***"

Résumé

Après avoir passé en revue les modèles de croissance des poissons présentés dans la littérature, il en est proposé un pour l'aide opérationnelle en élevage intensif, aux caractéristiques suivantes.

Une expression mathématique simple et intégrable rend compte de la croissance en éliminant l'influence du poids individuel des animaux. Elle conduit à une définition générale de la croissance spécifique. Le mode d'action de la température sur la vitesse de croissance est exprimé par la soustraction de deux fonctions exponentielles. Une méthode de calcul automatique des paramètres thermiques est proposée. L'influence torpide des basses températures est considérée. La ration alimentaire agit selon des règles simples sur la vitesse de croissance et une fonction à deux paramètres est proposée pour prendre en compte explicitement ce facteur. Les autres facteurs de croissance, plus difficiles à appréhender, sont exprimés sous la forme d'un paramètre synthétique de correction dont la mise à jour est effectuée à partir de la comparaison entre les résultats réels et ceux de la simulation.

Un examen de l'applicabilité du modèle aux principales espèces d'élevage montre son caractère général. Il est mis en oeuvre dans des logiciels d'aide à la décision dont les fonctionnalités sont illustrées à l'aide d'exemples.

Abstract

After a literature overview of growth models applied to intensively cultured fishes, a new one is proposed for assistance in rearing operations, with following characteristics.

A simple and integratable mathematic expression simulates growth while eliminating individual weight influence. It gives way to a specific growth general definition. Temperature action mode on growth speed is simulated by subtraction of two exponential functions. An automatic calculation method of thermal parameters is proposed. The torpid action of low temperatures is considered. Feeding ration influences growth through simple rules which are explicitly taken in account by mean of a two parameters function. The other growth factors, more difficult to seize, are expressed through a synthetic correction parameter updated by comparison between measured and calculated results.

An examination of the model applicability to main reared species shows its general character. It is operated in professional decision assistance softwares which functionalities are illustrated by examples.

Mots clés : Modèle, croissance, élevage poissons, pisciculture, model, growth, fish culture.

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

INTRODUCTION	7
I - LES THEORIES EN PRESENCE	9
1 Définitions et conventions	9
2 La croissance des populations naturelles	9
3 Modèles empiriques	10
4 Modèles bioénergétiques	12
5 La démarche retenue	12
II - LA PRISE EN COMPTE DU POIDS	15
1 Matériels et méthode	15
2 Variation de l'indice de consommation	16
3 Choix de la fonction somatique f_1	17
4 La croissance spécifique	17
5 Résultats	18
III - LA PRISE EN COMPTE DE LA TEMPERATURE	21
1 Choix de la fonction thermique f_2	21
2 Ajustement de la fonction thermique	22
3 Paramètres thermiques initiaux	23
4 Le processus itératif	23
5 La croissance aux basses températures	26
6 Généralisation aux autres espèces	27
IV - LA PRISE EN COMPTE DE LA RATION ALIMENTAIRE	29
1 Conventions et méthodes	29
2 Analyse de la fonction de nourrissage f_3	31
3 Résultats	33
V - LA PRISE EN COMPTE DES FACTEURS IMPLICITES	35
1 Les facteurs implicites	35
2 La correction du modèle	36
3 Ajustements et corrections	37
VI - L'EXPLOITATION DU MODELE	39
1 Le régime thermique	39
2 Notion de programme d'alimentation	41
3 Notion d'indice de performance	41
4 Stratégies d'élevage	41
5 Evaluation de projet	42
6 Aide à l'exploitation	43
CONCLUSION	45
BIBLIOGRAPHIE	47
REPERTOIRES	51

INTRODUCTION

Dans la plupart des industries humaines, la modélisation des processus est génératrice de progrès lorsqu'elle présente suffisamment de vraisemblance et de précision pour renforcer le pouvoir d'analyse et contribuer aux prises de décisions. Dans le cas des processus biologiques complexes, comme l'élevage des animaux, la modélisation nécessite la prise en compte de la croissance, laquelle est d'autant plus délicate que sont nombreux les facteurs qui l'influencent. Notre propos ici est de présenter un modèle opérationnel pour le pilotage des élevages de poissons.

La croissance est le résultat de l'ensemble des mécanismes physiologiques par lesquels tout être vivant accroît sa substance. Elle est dite continue lorsqu'elle dure toute la vie de l'animal. C'est le cas des poissons encore que, très active pendant la phase qui suit la naissance, elle diminue ensuite à l'approche d'un poids maximal théorique.

Chez les animaux poïkilothermes, tels que les poissons, la température influence la croissance de façon déterminante, de sorte que l'éleveur, qui n'est généralement pas maître de ce facteur, doit le prendre en compte dans sa stratégie. C'est là un point fondamental par lequel se distinguent les élevages d'animaux à habitat atmosphérique et à habitat aquatique. Si la durée des gestations et de l'élevage est immuable pour les premiers, que la régulation homéotherme rend peu dépendants de la température ambiante, elle varie dans d'importantes proportions avec la période de l'année et l'hydroclimat pour les seconds. L'introduction de la température parmi les critères de décision ajoute à la difficulté de l'élevage aquatique pour lequel, plus qu'ailleurs, la complexité et le nombre des facteurs d'influence font que le métier est essentiellement basé sur l'expérience, voire l'intuition.

Comme dans tout le règne animal, la croissance des poissons varie avec la quantité de nourriture ingérée. Toutefois, le phénomène n'est pas linéaire et, en outre, la vitesse de croissance ne peut être raisonnablement maintenue à son niveau maximal: il s'ensuivrait une mauvaise utilisation de l'aliment et une augmentation des risques nutritionnels et pathologiques. On recherchera donc le compromis le plus favorable entre la meilleure croissance et le meilleur rendement de transformation de l'aliment. Dans la pratique, ceci conduit à nourrir les animaux selon des rations inférieures à celles qui procureraient la plus grande vitesse de croissance et supérieures à celles correspondant au rendement de transformation optimal.

Ces conditions de nourrissage sont définies par des tables de rationnement mises à la disposition des éleveurs ou établies par eux, et correspondent à ce que nous appellerons le niveau de rationnement standard. Outre la définition par des tables, il faut en général considérer que le poisson est soumis à un jour de jeûne par semaine, souvent le dimanche. Ces règles sont suffisamment précises et invariantes pour que, dans un premier temps, nous puissions étudier la croissance sans prise en compte des conditions de nourrissage. Ce facteur revêt cependant une telle importance que nous serons conduits à y revenir largement.

D'autres facteurs interviennent pour déterminer la croissance, parmi lesquels, en particulier, l'état sanitaire, la densité (nombre d'individus par unité de volume), l'activité locomotrice et génésique, etc. La prise en compte de ces facteurs est faite globalement, après avoir supposé, dans un premier temps, qu'ils sont invariants et maintenus à leur niveau le plus favorable à l'élevage.

Après une revue des travaux sur la modélisation de la croissance, nous présentons le modèle retenu (Muller-Feuga, 1984), et les logiciels "Aquastock", "Pisci", et "Ictio" dont il constitue l'ossature

I - LES THEORIES EN PRESENCE

1 Définitions et conventions

Les activités d'élevage intensif, qui consistent à produire le maximum de biomasse dans le minimum de temps, ont retenu le critère de croissance présentant le plus de signification économique: l'accroissement de biomasse par unité de temps, dit aussi **vitesse de croissance**. En pisciculture intensive, la mesure de cette biomasse est effectuée dans les conditions qui se rapprochent de celles de la mise en marché: elle s'adresse à des animaux sortis de l'eau et qui ont subi un égouttage d'une durée suffisante pour réduire l'influence de l'eau superficielle sur la précision de la mesure.

On apprécie le rendement de transformation du couple aliment-animal sur une période à l'aide de l'**indice de consommation**, souvent noté IC, qui est le rapport de la quantité d'aliment ingérée sur le gain de biomasse correspondant, pendant la période considérée.

2 La croissance des populations naturelles

La littérature fait mention de nombreux modèles de croissance parmi lesquels ceux des populations naturelles tiennent une large part. Ces modèles permettent de connaître l'évolution dans le temps des biomasses et interviennent dans la gestion des stocks exploités par la pêche. Ils sont, le plus souvent, inspirés de celui de Bertalanffy (1938) :

$$[1] \frac{dB}{dt} = H B^h - K B^k \quad \text{avec} \quad B(t_0) = B_0$$

où B est la biomasse de la population, H, K, h et k sont des paramètres d'ajustement, t est le temps.

Par cette expression à deux termes, il est ainsi rendu compte que la croissance est le résultat du conflit entre les processus de synthèse de la matière vivante (anabolisme) et ceux de sa dégradation (catabolisme). Cette approche est à la base de l'analyse bioénergétique de la croissance que nous examinons en I-4.

Les théories en présence

La valeur des paramètres h et k permet de distinguer certains types de modèles qui résultent de l'intégration de la formule précédente, auxquels les auteurs ont vu leur nom souvent associé.

Des polémiques sont nées des tentatives d'interprétation des valeurs de paramètres obtenues, desquelles certains auteurs ont pu tirer des conclusions jugées contestables par d'autres. Sans entrer dans ce débat, hors de propos ici et dont l'analyse est faite notamment par Laurec *et al.* (1981), nous retiendrons que ces modèles rendent bien compte globalement de l'évolution des poids dans le temps d'une population naturelle, mais ne font pas intervenir la température et sont, de ce fait, inadaptés à une application aux élevages.

Pourtant, ce besoin existe aussi pour décrire la croissance des populations naturelles et leurs oscillations liées aux variations thermiques saisonnières. Il a conduit certains auteurs (Buestel *et al.*, 1975; Gaschütz *et al.*, 1980) à rechercher un ajustement par fonction circulaire de la courbe de croissance, sans toutefois que la température prenne place explicitement dans l'expression mathématique.

Se référant cette fois à l'élevage, d'autres auteurs ont proposé des modèles mathématiques rendant plus ou moins compte des mécanismes physiologiques de la croissance tout en faisant intervenir la température. Il sont examinés ci-après.

3 Modèles empiriques

Ces modèles consistent, en général, dans le produit d'une fonction du poids unitaire par une fonction de la température. Ces fonctions sont déterminées séparément ou par l'analyse multivariable globale.

Dans une analyse de l'optimum économique de l'élevage du homard *Homarus americanus*, Botsford *et al.* (1975) proposent un modèle de la forme :

$$[2] \quad \frac{dp}{dt} = \Gamma p^m (\theta - \theta_m)^n \quad \text{avec} \quad p(t_0) = p_0$$

où Γ est une constante faisant intervenir le rationnement et le volume d'élevage, p est le poids frais individuel, θ est la température du milieu d'élevage, θ_m est la température minimale d'arrêt de croissance (7,5 °C), m et n sont des constantes de valeurs respectives 0,7 et 0,5.

Les tentatives que nous avons faites pour appliquer ce modèle à la croissance des poissons n'ont pas été satisfaisantes : si toutefois la globalité du phénomène est bien reproduite, ce modèle ne rend pas compte du fléchissement de la vitesse de croissance aux fortes températures.

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

En vue d'une étude du marché de la truite arc-en-ciel *Oncorhynchus mykiss* en Bretagne, Ruer et Fauré (1980) ont mis en oeuvre un modèle basé sur les connaissances disponibles en salmoniculture, notamment :

- le modèle de consommation d'oxygène de Liao (1971),
- la méthode de Willoughby (1968), pour déterminer cette même consommation,
- la variation de l'indice de consommation avec le poids.

La confrontation de la formule de Liao (1971) et du principe dégagé par Willoughby, selon lequel la demande en oxygène est proportionnelle à la quantité d'aliment distribuée, permet d'établir une expression donnant la ration à distribuer quotidiennement en fonction du poids de l'animal et de la température. Le résultat correspond bien aux normes reconnues de l'élevage, notamment celles recommandées par les fabricants d'aliment sous la forme des tables de rationnement. L'expression différentielle générale obtenue s'écrit sous une forme semblable à [2] où l'on notera seulement que $m = 0,75$.

Le calage paramétrique de ce modèle est malaisé puisqu'il nécessite une correction du coefficient de Willoughby avec la température. Sur la base d'une étude de la demande en oxygène de la truite en élevage (Muller-Feuga et al, 1978), nous avons constaté que la valeur de ce coefficient varie entre 70 et 300 grammes d'oxygène par kilogramme d'aliment et par jour, avec une discontinuité marquée vers 12°C.

Dans une étude de la croissance des salmonidés et après une vaste revue de la littérature, Iwama *et al.* (1981) proposent un modèle dont l'expression différentielle présente la forme [2] et où $n = 1$, $\Gamma = 1/3000$, et $m = 2/3$. Sans doute mal calé, ce modèle conduit à des croissances plus lentes que celles observées, notamment chez la truite arc-en-ciel en élevage, et donne lieu aux critiques précédentes. Il a toutefois le mérite de la simplicité.

On constate ainsi que l'action de la température est souvent décrite au moyen d'une fonction puissance dont l'exposant est variable. Dans les modèles précédents, cet exposant est voisin de 1. Dans celui de Stauffer (1973) et de Papst (1982), il est de quatre.

A quelques exceptions près (Nie *et al.*, 1975; Boehlert *et al.*, 1983), ces modèles ont en commun le mode d'intervention du poids individuel dans l'expression différentielle. Il est de la forme :

$$[3] \frac{dp}{dt} = \Gamma p^m$$

avec la condition aux limites $p(t_0) = p_0$.

Les théories en présence

Comme Corey *et al.* (1983), nous rappelons que cette relation, à laquelle se rallient la plupart des auteurs, est vérifiée lorsque l'on admet que la vitesse de croissance de la longueur du corps est constante. Dans ce cas, l'analyse dimensionnelle donne pour m une valeur de $2/3$.

4 Modèles bioénergétiques

La démarche tendant à rendre compte des processus bio-énergétiques consiste à expliciter les deux termes de flux énergétique dont la croissance est la différence: l'assimilation anabolique, d'une part, la consommation catabolique, d'autre part. Ceci est conforme à la forme générale [1] (von Bertalanffy, 1938).

La décomposition de chacun des termes en fonctions élémentaires des facteurs agissants a fait l'objet de nombreux travaux, notamment de la part de Winberg (1956), Paloheimo *et al.* (1965, 1966 a et b), Warren *et al.* (1967), Kerr (1971), Beamish *et al.* (1975), Sparre (1976), Corey *et al.* (1983).

On sait que ces fonctions varient avec la quantité de nourriture assimilée, le poids et la température. Mais leur décomposition donne lieu à des expressions complexes et à des hypothèses souvent incomplètement étayées. C'est ainsi que Sparre (1976), pour la prévision de la croissance des truites arc-en-ciel, utilise un modèle où le terme de catabolisme est la somme du catabolisme du jeûne et du catabolisme de la nutrition. L'auteur suppose que le premier dépend exclusivement du poids et de la température, le second de la quantité d'aliment ingérée, du poids et de la température, selon des fonctions convenues par lui. Ce modèle est de mise en oeuvre malaisée, mais a le mérite de tenter une approche analytique du phénomène de croissance, même si les mécanismes proposés sont encore imparfaitement appréhendés.

Nous retiendrons que le catabolisme et l'anabolisme apparaissent de façon disjointe dans ces modèles, ce qui permet en particulier de simuler les pertes de poids à la différence des modèles basés sur une démarche empirique.

Il existe également des modèles mixtes, c'est à dire résultant à la fois de démarches empirique et bioénergétique (Corey *et al.*, 1983).

5 La démarche retenue

Dans un but de simplicité, nous avons renoncé à décrire le mécanisme des flux énergétiques, dont l'étude nécessite des moyens expérimentaux importants.

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

Les facteurs d'influence que sont le poids p , la température θ et la ration alimentaire r sont analysés sous hypothèse de leur découplage. Ceci permet de séparer les variables, conformément à la démarche préconisée par Stauffer(1973) :

$$[4] \frac{dp}{dt} = \Gamma f_1(p) f_2(\theta) f_3(r)$$

avec la condition initiale $p(t_0) = p_0$, et où p est le poids frais individuel, θ la température, r la ration alimentaire, f_1 la fonction somatique, f_2 la fonction thermique, et f_3 la fonction de nourrissage.

Γ est un paramètre de correction qui prend en compte l'influence résiduelle des facteurs non explicités par le modèle et dont la valeur est 1 dans les conditions standard.

Bien entendu, la validité de l'hypothèse de découplage des facteurs d'influence est examinée aux différents stades de l'étude.

..
.

II - LA PRISE EN COMPTE DU POIDS

1 Matériels et méthode

C'est l'expression [3] que nous avons retenue pour la fonction somatique f_1 : elle est simple et la plupart des auteurs consultés s'y réfèrent.

L'absence d'un deuxième terme, contrairement à l'expression de von Bertalanffy [1], est justifiée par le fait que l'élevage intéresse la période de la vie de l'animal où la croissance est la plus rapide. L'effet atténuateur de ce deuxième terme serait faible, et il est probable que la précision obtenue ne justifierait pas l'accroissement de complexité résultant de son introduction dans le modèle. En revanche, ceci fixe une limite d'utilisation: le fléchissement de la vitesse de croissance avec l'âge ne peut pas être pris en compte.

Les données expérimentales de croissance sont fournies par une importante exploitation piscicole. Elles sont relatives à la truite arc-en-ciel en eau douce et résultent d'une compilation de données expérimentales dont la qualité et le nombre donnent satisfaction pour une utilisation intensive dans la conduite de l'élevage.

Ces données sont disponibles sous la forme de plages de valeurs sans description de la distribution des variables dépendantes. Nous avons donc pris le parti de ne considérer que les valeurs moyennes, ce qui restreint du même coup la portée de notre analyse. C'est ainsi que l'on ne prétend pas décrire, sans vérification préalable, la croissance des animaux de tête ou de queue d'une population donnée, ou les situations particulières, telles que l'influence de la maturation sexuelle.

Tableau 1 - Données expérimentales

a) Variations de l'indice de consommation avec le poids frais individuel:

Poids (g)	0,7	2,0	5,5	11,5	24,0	66,5	125	185
IC	0,75	0,95	1,15	1,30	1,30	1,50	1,55	1,75

La prise en compte du poids

Tableau 1 (suite) - Données expérimentales :

b) Table de rationnement : variations des rations journalières exprimées en % de la biomasse avec le poids frais individuel et la température.

Poids (g)	Température (°C)					
	4,0	7,5	11,0	14,5	17,0	19,0
0,7	3,7	5,0	6,0	6,5	6,5	6,2
2,0	3,1	4,0	5,5	6,0	6,0	5,7
5,5	2,9	3,6	4,5	5,0	5,0	4,7
11,5	2,5	3,2	4,0	4,5	4,5	4,2
24,0	2,2	2,7	3,3	3,7	3,9	3,5
46,5	1,7	2,2	2,8	3,3	3,4	3,0
80,0	1,5	2,0	2,4	3,0	3,2	2,7
125,0	1,3	1,8	2,0	2,7	3,0	2,4
225,0	1,3	1,6	2,2	2,5	2,8	2,3

Les données expérimentales (tableau 1) consistent dans les indices de consommation correspondant à différents poids des animaux (a) et dans les rations journalières à distribuer en fonction de ces mêmes poids et de la température (b). De ces deux catégories de données, on peut déduire le gain de poids journalier.

2 Variation de l'indice de consommation

L'absence d'influence de la température sur l'indice de consommation est constatée par l'expérimentateur, confirmant les observations de Ruer (1980). Ce même auteur préconise un ajustement par moindres carrés dans une échelle logarithmique pour exprimer la variation de l'indice de consommation IC par rapport au poids frais moyen.

Pour la population statistique de huit observations du tableau 1.a, la régression obtenue est $IC = 0,16 \text{ Log}(p) + 0,84$ avec un coefficient de corrélation de 0,99. La qualité de cette régression nous autorise à l'utiliser pour prévoir les gains de poids journaliers à partir de la table de rationnement du tableau 1.b.

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

3 Choix de la fonction somatique f_1

Partant de l'expression [3], on se propose d'examiner l'influence de la température sur l'exposant m du poids. Pour cela, on considère la régression linéaire dans une échelle logarithmique du gain de poids journalier par rapport au poids donné par le développement limité à l'ordre 1 de Taylor, et cela pour chaque température.

Tableau 2 - Régression du logarithme du gain de poids journalier par le logarithme du poids frais à différentes températures.

Température (°C)	m	Log(Γ)	r
4,0	0,668	-3,14	0,9990
7,5	0,667	-2,88	0,9997
11,0	0,663	-2,65	0,9987
14,5	0,689	-2,58	0,9998
17,0	0,709	-2,60	0,9997
19,0	0,678	-2,62	0,9997

Les résultats obtenus (tableau 2) montrent que Γ dépend peu du poids, puisque les coefficients de régression expriment une bonne qualité de l'ajustement, et que m dépend peu de la température, puisque les valeurs obtenues sont regroupées autour de 0,68. Ceci valide l'expression [3] pour la modélisation de la fonction f_1 .

4 La croissance spécifique

Pour comparer les performances de croissance observées aux différents stades de l'élevage, il est nécessaire de disposer d'une **grandeur indépendante de la taille de l'animal**. On l'appelle généralement la croissance spécifique.

Parmi les expressions de la croissance spécifique (notée CS) que l'on peut trouver dans la littérature, les plus classiques sont [5] et [6].

$$[5] \text{ CS} = \frac{(P - P_0) 100}{P_0 (t - t_0)}$$

où CS est exprimé en pourcentage par jour, le poids s'entendant sec ou frais.

La prise en compte du poids

Cette expression, aussi appelée croissance relative, est fréquemment rencontrée, notamment chez Brett (1969, 1981). Elle ne permet de comparer que des animaux de poids semblables et ne répond donc pas à notre besoin.

$$[6] \text{ CS} = \frac{\text{Log}(p) - \text{Log}(p_0)}{t - t_0}$$

en 1/(unité de temps). De nombreux auteurs, dont notamment Chevassus (1976), Fressard (1977), Hogendoorn (1983), et Goolish (1984), utilisent cette expression pour la comparaison des performances de croissance d'animaux de poids assez différents.

D'après ce que nous venons de voir, Γ varie peu avec le poids et devrait constituer une croissance spécifique satisfaisante.

Pour intégrer l'expression différentielle [4], notons qu'elle s'écrit aussi :

$$[7] d\left(\frac{p^{1-m}}{1-m}\right) = \Gamma dt$$

Il vient :

$$[8] \text{ CS} = \frac{p^{1-m} - p_0^{1-m}}{(1-m)(t - t_0)}$$

Cette expression est plus satisfaisante que les précédentes, et nous la retiendrons dans ce qui suit. Remarquons, en particulier, que cette définition de la croissance spécifique inclut [6] par passage à la limite $m \rightarrow 1$.

5 Résultats

La croissance spécifique, telle qu'elle vient d'être définie, ne dépend que de la température lorsque toutes les autres conditions sont égales par ailleurs, en particulier, lorsque le nourrissage est conforme aux tables de rationnement (nourrissage standard). Le tableau 3 rassemble les valeurs de la croissance spécifique (CS) calculées à partir des données du tableau 1 avec $m=2/3$.

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

Tableau 3 - Valeurs de la croissance spécifique ($CS \times 10^4$) en fonction de la température et du poids frais. Coefficients de variation à températures constantes CV_1 et à poids frais constants CV_2 .

Poids (g)	Température (°C)						CV_2 %
	4,0	7,5	11,0	14,5	17,0	19,0	
0,7	415	558	667	721	721	689	19,2
2,0	407	524	716	780	780	742	23,7
5,5	456	565	704	781	781	735	19,7
11,5	455	581	724	814	814	760	20,9
24,0	467	572	698	782	824	740	20,0
46,5	417	539	685	807	831	734	24,1
80,0	416	554	665	830	885	747	25,7
125,0	300	553	615	829	920	737	28,2
225,0	451	555	763	866	970	797	26,5
CV_1 %	5,8	3,1	6,1	5,2	9,2	3,8	

Le coefficient de variation ($100 \times \text{écart-type} / \text{moyenne}$) exprimé en pourcentage, permet d'évaluer les plages de dispersion des valeurs autour de la moyenne. A poids constant et température variable, le coefficient de variation (CV_2) est élevé comparé à celui obtenu à température constante et poids variable (CV_1). Ceci confirme que CS ne dépend que de la température, et que l'hypothèse de découplage des variables p et θ est réaliste.

III - LA PRISE EN COMPTE DE LA TEMPERATURE

1 Choix de la fonction thermique f_2

Le choix d'une fonction f_2 , permettant l'ajustement des résultats expérimentaux du tableau 1 s'appuie sur un ensemble de connaissances a priori, dont nous rappelons les principaux éléments.

La croissance spécifique augmente selon une forme probablement exponentielle, puis culmine avant de diminuer. On sait aussi que la croissance s'annule, tout en s'accompagnant de désordres et de mortalité, pour une température relativement invariante, caractéristique du système espèce-environnement. Ce point peut être ajouté à la population statistique des données expérimentales.

L'allure de la courbe d'ajustement évaluée graphiquement d'après la répartition des points expérimentaux, est semblable à celle déjà mise en évidence par Brett *et al.* (1969), From *et al.* (1979), Papst *et al.* (1982), Corey *et al.* (1983) chez les Salmonidés, par Hogendoorn *et al.* (1983) chez *Clarias gariepinus*¹, par Boehlert *et al.* (1983) chez *Sebastes melanops*. D'autre part, ainsi que l'ont déjà remarqué certains auteurs dont From *et al.* (1979), elle rappelle la cinétique des réactions biochimiques et notamment enzymatiques.

La fonction thermique consiste probablement dans une loi d'Arrhénius (1889) diminuée d'une loi de dénaturation thermique des molécules protéiques, l'une et l'autre exponentielles. Sans reprendre l'expression de la loi d'Arrhénius, mais en retenant la forme exponentielle sous laquelle intervient la température, il vient:

$$[9] f_2 = e^{\frac{\alpha (\theta_M - \theta)}{e} - \frac{\beta (\theta_M - \theta)}{e}}$$

où α et β , paramètres thermiques, sont à définir par ajustement statistique, θ est la température moyennée pendant la période élémentaire servant au calcul de la croissance, et θ_M est la température maximale que l'animal peut supporter dans les conditions de l'élevage et aucun facteur léthal n'existant par ailleurs.

Cette fonction s'annule bien pour $\theta = \theta_M$.

¹ *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) et *Clarius lazera* (C & V, 1840) désignent la même espèce suite à la révision de la nomenclature du genre *Clarias* (Teugels, 1984, *Aquaculture*, 38: 373-374)

La prise en compte de la température

La valeur de la température maximale peut être prise égale, en première approximation, à la température létale (TL50 à 92 heures, par exemple), qui est d'environ 23°C pour la truite arc-en-ciel en eau douce (à saturation en oxygène, sous une atmosphère) pour les tailles couramment rencontrées en élevage. Mais elle peut faire l'objet d'un ajustement plus fin si les données disponibles le permettent, comme nous le verrons au paragraphe 4.

La présente démarche est analogue à celle de From *et al.* (1979), bien que les expressions d'ajustement soient différentes. Ainsi, la remarque faite par cet auteur, selon laquelle le second terme exponentiel est négligeable aux faibles températures, reste valable dans le cas présent, au moins pour les Salmonidés.

Chez certaines espèces, la croissance s'interrompt à des températures sensiblement supérieures à 0°C (loup, daurade), ce que l'expression choisie est inapte à simuler. Pour cela, des retouches sont proposées plus loin.

2 Ajustement de la fonction thermique

L'ajustement de la fonction transcendante [9] par la méthode des moindres carrés ne peut se faire que par itération à partir d'une solution approchée (α_0, β_0). En remplaçant les exponentielles de α et β par leur développement limité au premier ordre de la série de Taylor avec de petits accroissements $\Delta\alpha$ et $\Delta\beta$, on obtient une expression linéarisée de f_2 . La régression linéaire par moindres carrés fournit des valeurs de $\Delta\alpha$ et $\Delta\beta$ qui sont la solution du système d'équations issues de la dérivation et de l'annulation de cette expression :

$$[10] \quad \Delta\alpha = \frac{S_1 S_3 - S_2 S_4}{S_3^2 - S_4^2}$$

et

$$[11] \quad \Delta\beta = \frac{S_1 S_4 - S_2 S_3}{S_3^2 - S_4^2}$$

avec

$$[12] \quad S_1 = \sum_{i=1}^n Y_i x_i e^{\alpha_0 x_i} - \sum_{i=1}^n x_i e^{\alpha_0 x_i} (e^{\beta_0 x_i} - e^{\alpha_0 x_i})$$

$$[13] \quad S_2 = \sum_{i=1}^n Y_i x_i e^{\beta_0 x_i} - \sum_{i=1}^n x_i e^{\beta_0 x_i} (e^{\alpha_0 x_i} - e^{\beta_0 x_i})$$

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

$$[14] \quad S_3 = \sum_{i=1}^n x_i^2 e^{\alpha_0 x_i}$$

$$[15] \quad S_4 = \sum_{i=1}^n x_i^2 e^{\alpha_0 x_i + \beta_0 x_i}$$

où les y_i sont les valeurs expérimentales de la croissance spécifique (CS) et les x_i les valeurs de $\theta_M - \theta$ correspondantes. α et β sont actualisés des petits accroissements ainsi obtenus. Un calcul itératif permet la convergence vers une solution permettant une prédiction de qualité satisfaisante.

3 Paramètres thermiques initiaux

La solution initiale (α_0, β_0) est fournie par l'analyse algébrique. On constate, en effet, que si θ_0 est la température pour laquelle la dérivée première de la fonction f_2 s'annule (température optimale), et θ_i est la température pour laquelle la dérivée seconde s'annule (température d'inflexion), on a :

$$[16] \quad \theta_0 - \theta_i = \theta_M - \theta_0$$

Il devient possible de repérer, parmi les points expérimentaux, ceux qui correspondent le mieux aux températures θ_0 et θ_i , soient y_0 et y_i . L'analyse donne alors les valeurs initiales de α et β :

$$[17] \quad \beta_0 = \frac{\text{Log}(z)}{(\theta_M - \theta_0)(z - 1)} \quad \text{et} \quad [18] \quad \alpha_0 = z \beta_0$$

avec

$$[19] \quad z = \frac{y_i - y_0^2}{y_i + y_0^2}$$

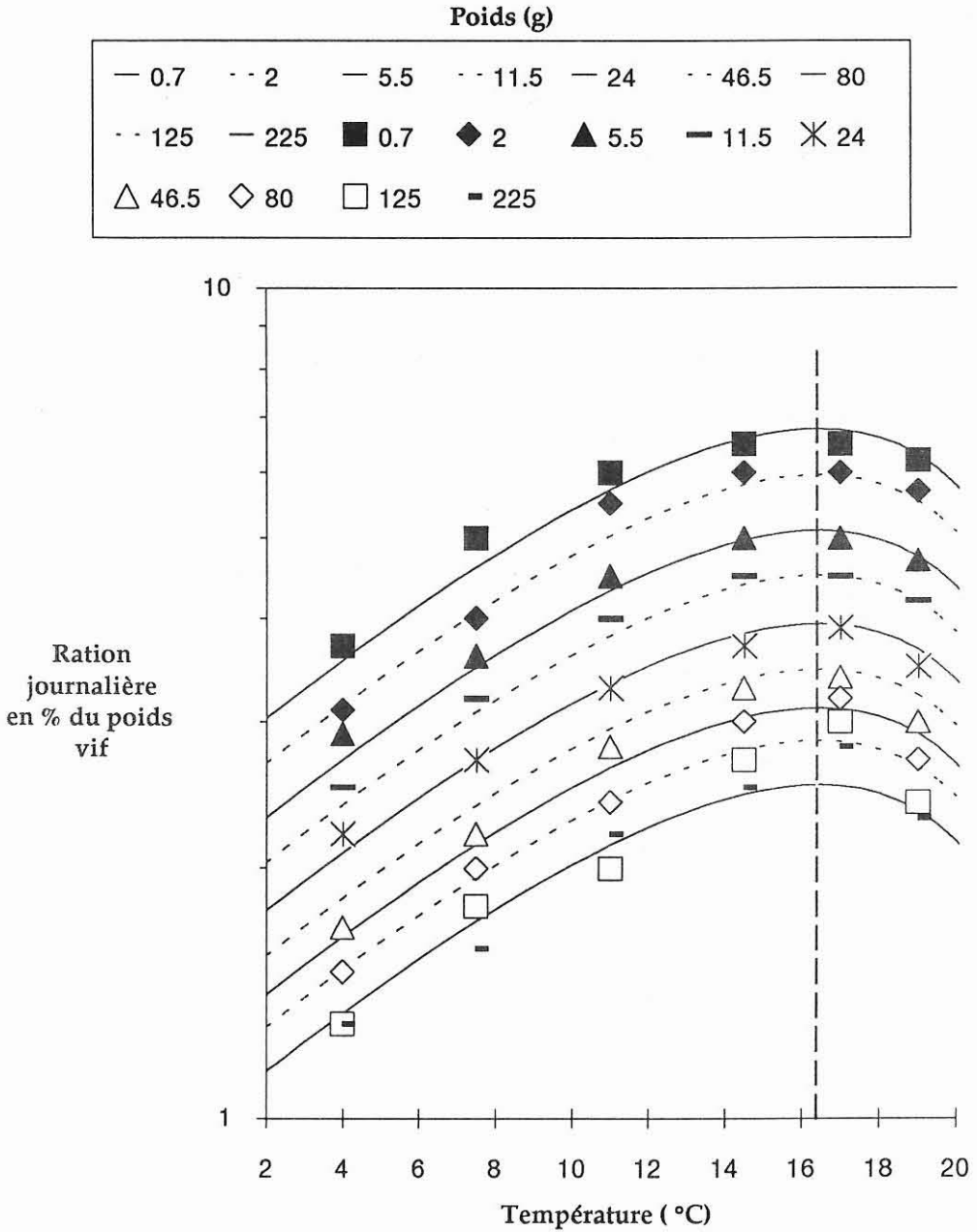
4 Le processus itératif

Les fonctions retenues composent un modèle de la forme :

$$[20] \quad \frac{dp}{dt} = \Gamma p \left(e^{\alpha (\theta_M - \theta)} - e^{\beta (\theta_M - \theta)} \right) f_3$$

La prise en compte de la température

Figure 1 - Comparaison entre le modèle (courbes) et les valeurs expérimentales (marques) de la ration journalière pour la truite arc-en-ciel *Oncorhynchus mykiss* en eau douce (l'échelle verticale est logarithmique).



Modélisation de la croissance des poissons en élevage

Lorsque l'alimentation est conforme aux tables de rationnement, dp/dt est la vitesse de croissance standard, et nous avons $f_3 = 1$ et $\Gamma = 1$ par définition.

Les données expérimentales disponibles sous la forme des tables de rationnement conduisent à calculer d'abord la croissance spécifique pour chaque couple d'observations (poids, température), puis à ajuster la variation de cette croissance spécifique avec la température à l'aide de la fonction thermique.

Pour le calcul de CS, seul le paramètre m est nécessaire. Le modifier revient à effectuer un changement de variable. Il convient donc de choisir la valeur de m de telle sorte que le biais soit minimum.

Les paramètres de la fonction thermique f_2 sont au nombre de trois (α , β et θ_M), alors que les données expérimentales sont au nombre de deux (CS et θ). Le modèle est donc sur-paramétré. Mais le calcul séparé des paramètres thermiques, de m et de θ_M est possible dès lors qu'il n'existe pas de couplage entre eux.

La méthode de calcul des paramètres thermiques décrite plus haut est robuste et rapide: quelques itérations suffisent pour obtenir un ajustement de qualité. Le processus itératif retenu pour minimiser le résidu est une méthode de la sécante consistant dans la recherche par balayage alternatif de la température θ_M procurant la variance la plus faible avec $m = 2/3$, puis, avec cette valeur de θ_M , dans la recherche par balayage alternatif de la valeur de m procurant le biais le plus faible.

La figure 1 montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et calculées des rations journalières de la truite arc-en-ciel *Oncorhynchus mykiss*¹ en eau douce. Les premières sont celles du tableau 1, tandis que les secondes, présentées sous forme de courbes, sont fournies par le modèle et calculées à l'aide des valeurs de la première ligne du tableau 4.

Pour faciliter la lecture de la figure, l'échelle verticale est logarithmique ce qui a pour effet de dilater la partie basse.

On peut constater que les grandes tendances de cette triple variation sont globalement respectées, même si les points expérimentaux ne sont pas rigoureusement en coïncidence avec les courbes correspondantes du modèle. La qualité de l'ajustement confère au modèle un caractère prédictif dans son domaine de validité.

On notera que la température optimale se situe vers 16 °C pour toutes les tailles.

¹ *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792) et *Salmo gairdneri* (Richardson, 1836) désignent la même espèce (Billard, *Aq. Liv. Res.*, 1989)

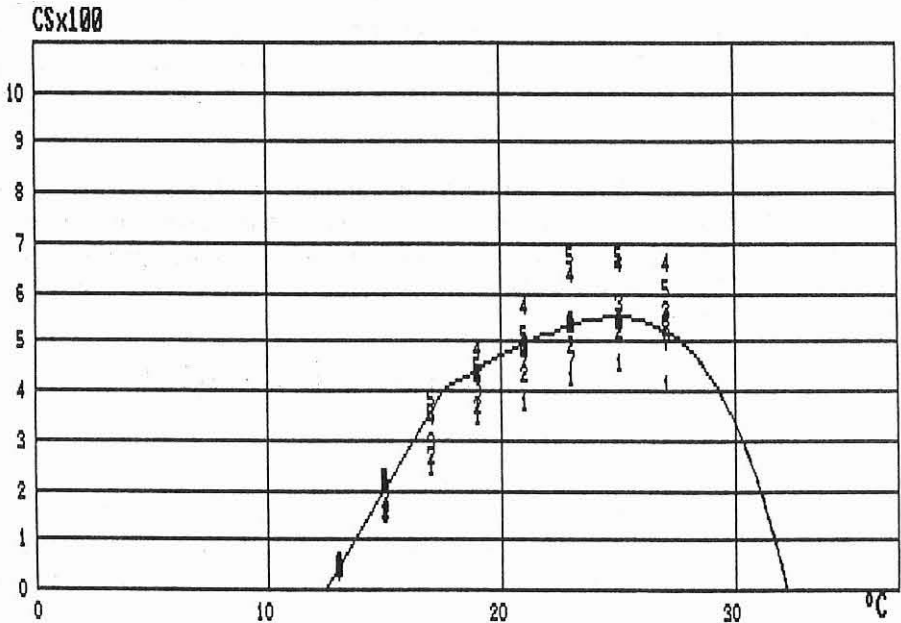
La prise en compte de la température

5 La croissance aux basses températures

La fonction d'ajustement de la croissance spécifique ne présente pas d'annulation pour les faibles valeurs de température positive. Or on sait que certaines espèces interrompent toute prise de nourriture, et donc toute croissance, pour des températures sensiblement supérieures à la prise en glace (0 à -3°C, selon les salinités) en dessous de laquelle la vie d'aucune espèce de poissons n'est possible. La fonction f_2 doit donc subir des retouches pour rendre compte de ce fait.

Pour le loup *Dicentrarchus labrax*, on observe que la croissance spécifique s'annule pour une valeur θ_m (température minimale) comprise entre 10 et 13°C après une décroissance progressive depuis une température optimale θ_0 voisine de 25°C. La température pour laquelle la croissance spécifique quitte la courbe f_2 se situe quelque part entre θ_m et θ_0 .

Figure 2 - Résultats graphiques de l'ajustement de la croissance spécifique en fonction de la température pour le loup *Dicentrarchus labrax*. Les chiffres correspondent à chaque aliment de la table de rationnement.



Afin de simplifier l'ajustement, nous avons choisi un point remarquable pour localiser ce décrochage : le point d'inflexion de la courbe. La relation [16] permet de situer ce point précisément.

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

Dans les ajustements réalisés par la suite, tous les points expérimentaux situés à gauche de la température θ_i sont retirés de la statistique : on considère que la croissance spécifique est linéaire depuis le point d'annulation ($\theta_m, 0$) jusqu'au point d'inflexion (θ_i, CS_i).

La figure 2 montre les résultats graphiques d'un ajustement de la croissance spécifique obtenu pour le loup. La température minimale θ_m est prise égale à 12,4 °C. L'ajustement n'est pas de très bonne qualité en raison d'un manque d'affinage des tables de rationnement, mais on voit que l'effet des basses températures est correctement pris en compte par le modèle. Le caractère satisfaisant des résultats obtenus pour toutes les espèces examinées permet de valider cette disposition.

D'un point de vue biologique, tout se passe comme si l'animal subit un engourdissement, d'autant plus important que la température est basse, qui se traduit par une perte d'efficacité des fonctions de recherche et de capture de la nourriture. Ceci l'empêche de s'alimenter et entraîne un ralentissement puis un arrêt de la croissance, voire une perte de poids.

6 Généralisation aux autres espèces

Après avoir mis au point le modèle et les méthodes d'ajustement pour la truite arc-en-ciel, nous avons examiné les possibilités d'application à d'autres espèces en effectuant le calage paramétrique à partir des tables de rationnement de plusieurs fournisseurs disponibles dans le commerce. Les résultats obtenus pour six espèces de poissons élevées en France sont présentés dans le tableau 4. Lorsqu'il s'agit de Salmonidés, les environnements marins et continentaux sont considérés séparément. Les valeurs des paramètres de *Oncorhynchus mykiss* en eau douce résultent de l'exploitation des données du tableau 1.

On constate un bon regroupement des valeurs des paramètres fournies par l'ajustement, ce qui nous incite à considérer que le modèle est généralisable. Les valeurs de la variance (erreur quadratique) et du biais du modèle indiquent la qualité de l'ajustement. Les valeurs inférieures à 0,02 doivent être recherchées pour la variance comme pour le biais.

Dans ces conditions, le cas de la truite *O. mykiss* en eau de mer apparaît entaché d'imprécision, et doit être utilisé avec précaution. Les fortes valeurs de α et β obtenues pour cette espèce et cet environnement sont sans doute dues au fait que les températures maximale et de croissance optimale (environ 15 °C) sont particulièrement proches, ce qui donne à la courbe de croissance spécifique un profil plus abrupt que pour les autres espèces.

La prise en compte de la température

En ce qui concerne m , les valeurs ne s'écartent de $2/3$ que pour le saumon du Pacifique *O. kisutch*, la daurade *S. aurata*, et le loup *D. labrax*, espèces encore mal connues pour lesquelles les tables de rationnement nécessitent probablement un affinage.

Tableau 4 - Quelques valeurs des paramètres de croissance, de la variance de l'erreur, et du biais du modèle obtenues pour les principales espèces de poissons en élevage.

Espèces	Milieu	$-\alpha$	$-\beta$	m	θ_M	θ_m	Var.	Biais
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	ED	0,12	0,14	0,70	24,2	-5,0	0,01	0,004
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	EM	0,13	0,18	0,69	20,4	2,0	2,46	0,01
<i>Salmo trutta</i>	ED	0,12	0,14	0,66	22,6	-2,0	0,02	0,02
<i>Salmo trutta</i>	EM	0,12	0,15	0,67	22,0	0,0	0,27	0,02
<i>Oncorhynchus kisutch</i>	ED	0,13	0,15	0,78	21,2	0,0	0,02	0,01
<i>Dicentrarchus labrax</i>	EM	0,12	0,15	0,56	32,0	12,4	0,02	0,01
<i>Sparus aurata</i>	EM	0,12	0,15	0,55	32,9	12,0	0,02	0,02
<i>Scophthalmus maximus</i>	EM	0,12	0,14	0,63	24,8	3,5	0,01	0,02

EM : eau de mer; ED : eau douce

Le fait que m prenne des valeurs différentes pour chaque espèce rend délicate la comparaison des croissances spécifiques. Pour apprécier les potentialités de croissance attachées à différentes espèces, il est préférable de procéder à une simulation autour du même régime thermique et des mêmes conditions initiales. Les logiciels "Aquastock", "Pisci" et "Ictio" présentés au chapitre VI le permettent.

IV - LA PRISE EN COMPTE DE LA RATION ALIMENTAIRE

1 Conventions et méthodes

La fonction f_3 de la formule [4] permet la prise en compte de la ration alimentaire dans le calcul de la croissance. Nous avons seulement vu, jusqu'à présent, que sa valeur est 1 lorsque le nourrissage est standard, c'est à dire conforme aux tables de rationnement. L'analyse présentée ici est exclusivement basée sur l'exploitation des données issues de la littérature.

La ration alimentaire, notée dR/dt , est le poids d'aliment distribué par unité de temps. On la trouve généralement dans les tables de rationnement sous la forme du poids d'aliment à distribuer par jour rapporté au poids frais des animaux. Ainsi, nous pouvons exprimer l'indice de consommation IC, dont la définition est donnée page 9, sous la forme suivante :

$$[21] \quad IC = \frac{\frac{dR}{dt}}{\frac{dB}{dt}}$$

C'est le rapport du débit pondéral d'aliment ingéré par la vitesse de croissance de la biomasse.

Comme l'indice de consommation IC, la ration alimentaire ainsi définie change de valeur avec la composition et le degré d'hydratation de l'aliment - en particulier selon qu'il s'agit d'aliment composé en préparation sèche ou d'aliment frais. C'est ainsi que l'indice de consommation moyen pour la truite nourrie avec de l'aliment composé est inférieur à 2, alors que ce même indice pour la sériole japonaise nourrie avec du poisson frais est en moyenne de 8 (Harada, 1965).

On peut définir un certain nombre de rationnements singuliers, qui sont :

- le jeûne, soit $dR/dt=0$,
- le rationnement d'entretien dR_e/dt , qui couvre uniquement les besoins courants sans entraîner de variation de poids de l'animal ($dp/dt = 0$),

La prise en compte de la ration alimentaire

- le rationnement optimal dR_o/dt , pour lequel l'indice de consommation IC est minimum,
- le rationnement standard dR_s/dt de l'élevage, défini par les tables de rationnement,
- le rationnement de satiété dR_M/dt , correspondant au plus faible rationnement qui permet d'atteindre la vitesse de croissance maximale.

Pour la facilité du calcul, toutes les grandeurs sont adimensionnalisées (réduites). Ceci nous conduit, comme certains auteurs, à introduire la notion de **niveau de rationnement**; noté r , c'est le rapport de la ration distribuée sur la ration de satiété :

$$[22] \quad r = \frac{\frac{dR}{dt}}{\frac{dR_M}{dt}}$$

Aux rationnements singuliers précédemment décrits correspondent des niveaux de rationnement singuliers notés r_j, r_e, r_o, r_s, r_M , avec $r_j = 0$ et $r_M = 1$.

La variation de la transformation alimentaire avec le niveau de rationnement est communément exprimée au travers de l'indice de consommation, d'une part, de la vitesse de croissance, d'autre part. De nombreuses études sont disponibles concernant ces variations, que nous avons tenté de modéliser.

Tout d'abord, il faut noter que, si $Y(r)$ est l'indice de consommation réduit et $Z(r)$ la vitesse de croissance réduite, ces deux fonctions sont liées par la relation simple :

$$[23] \quad r = Y(r) Z(r)$$

Nous avons, en effet, par définition :

$$[24] \quad Y(r) = \frac{\frac{dR}{dt}}{\frac{dB}{dt}} = \frac{\frac{dB_M}{dt}}{\frac{dR_M}{dt}} \quad \text{et} \quad [25] \quad Z(r) = \frac{\frac{dB}{dt}}{\frac{dB_M}{dt}}$$

où dB_M/dt est le gain de poids correspondant au niveau de satiété r_M .

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

Nous avons cherché une fonction mathématique simulant le comportement de Y et Z. Une telle fonction permettrait de calculer la croissance connaissant la ration car, d'après [25], on voit que :

$$[26] \quad \frac{dp}{dt} = \frac{dp_s}{dt} \frac{Z(r)}{Z(r_s)}$$

où la croissance standard dp_s/dt est connue grâce au modèle [20]. r_s est le niveau de rationnement standard qui correspond au meilleur compromis technico-économique recherché par les éleveurs. Sa valeur est relativement stable (environ 0,8) pour les tables de rationnement évoluées qui ont bénéficié d'une mise au point suffisamment poussée.

A l'heure actuelle, de telles tables ne sont disponibles que pour les espèces dont la production en élevage intensif atteint un niveau significatif (quelques milliers de tonnes par an).

Ainsi, la fonction f_3 cherchée a pour expression :

$$[27] \quad f_3 = Z(r) / Z(r_s)$$

avec

$$[28] \quad r = \frac{\frac{dR}{dt} r_s}{IC(p) \frac{dp_s}{dt}}$$

où dR/dt est la ration distribuée, et $IC(p)$ est donné par la régression linéaire étudiée page 16. On vérifie que f_3 prend la valeur 1 pour le rationnement standard. Il faut donc maintenant déterminer une fonction simulant au mieux le comportement de $Z(r)$.

2 Analyse de la fonction de nourrissage f_3

Les fonctions Y et Z, ou plutôt leur équivalent dimensionnel, ont été décrites pour quelques espèces. Citons en particulier Thompson (1941), qui semble être le premier à analyser l'allure de la première fonction, Harada (1965) qui la définit pour la sériole *Seriola quinqueradiata*, Brett *et al.* (1969) qui contribuent à sa connaissance dans le cas du saumon *Oncorhynchus nerka*.

La prise en compte de la ration alimentaire

La fonction proposée par Stauffer (1973) pour Z est une portion de sinusöide. Elle n'est pas satisfaisante puisque Y ne présente pas d'asymptote pour $r = r_e$. La fonction proposée par Corey *et al.* (1983) pour Z est un polynome. Il ne convient pas non plus car Y n'admet pas de minimum entre r_e et 1.

Tableau 5 - Variations des fonctions Z et Y et de leur dérivées premières avec la ration réduite r.

r	0	r_e	r_o	1
Y'	$1/Z_0$	-	0	1
Y	0	$-\infty$	Y_0	1
Z'	Z'_0	+	Z_0/r_o	0
Z	Z_0	0	r_o/Y_0	1

Nous avons procédé à la recherche des expressions mathématiques simulant le comportement de ces deux fonctions, et présentant notamment les propriétés suivantes, résumées dans le tableau 5.

- La fonction Z a une dérivée nulle pour $r = 1$. En effet, la croissance ne dépend plus du rationnement au delà du niveau de satiété, l'aliment distribué en surplus étant perdu. On constate parfois une légère diminution de la vitesse de croissance lorsque l'animal est sur-nourri, mais nous conviendrons que cette vitesse atteint un palier et donc que $Z = 1$ pour $r \geq 1$.
- La fonction Y et son équivalent dimensionnel présentent souvent une difficulté de détermination au voisinage de la ration de satiété ($r=1$). D'après la relation [23], Y se prolonge par la droite $Y = r$ qu'elle tangente au point (1,1).
- La fonction Y s'annule pour le jeüne ($r=0$), puisque Z prend une valeur négative et non nulle.
- La dérivée de [23] montre que la tangente à Y au point (0,0) ne présente pas une pente nulle.

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

3 Résultats

L'expression la plus simple que nous ayons trouvée pour simuler le comportement de Y résulte de l'addition d'une parabole et d'une hyperbole d'asymptote $r = r_e$. Cela donne :

$$[30] Y = r \left[1 + \frac{c (1 - r)^2}{r_e (1 - r_e)^2 (r - r_e)} \right]$$

Dans le domaine $[0,1]$, nous retiendrons cette fonction, Z se déduisant de Y par la relation [23]. A droite du domaine, nous avons $Y=r$ et $Z=1$. Les fonctions comportent donc deux paramètres :

- r_e , qui est le niveau de rationnement d'entretien,
- c , qui intervient dans la cambrure des courbes et l'abscisse du minimum de Y .

La valeur de ces deux paramètres est choisie d'après les informations disponibles dans la littérature, et sur la base des considérations suivantes.

- Le niveau d'entretien r_e est-il influencé par la température? Brett *et al.* (1969) présentent des résultats graphiques pour le saumon *Oncorhynchus nerka*, où ce niveau augmente avec la température de 0,08 environ à plus de 0,2. Mais Sparre (1976) fait état de résultats, dus à Sperber, où le niveau d'entretien est d'environ 0,17 à 2°C et diminue jusqu'à 0,08 à 18°C pour la truite arc-en-ciel. Chez *Clarias gariepinus*, les résultats graphiques de Hogendoorn *et al.* (1983) laissent attendre également que le niveau d'entretien diminue avec la température.

Constatant que la dispersion de la valeur de r_e reste relativement faible et que personne ne s'accorde sur le sens de sa variation, nous choisissons de la considérer constante et égale aux valeurs les plus fréquemment rencontrées. Cette valeur du niveau de rationnement d'entretien r_e est choisie égale à 0,12.

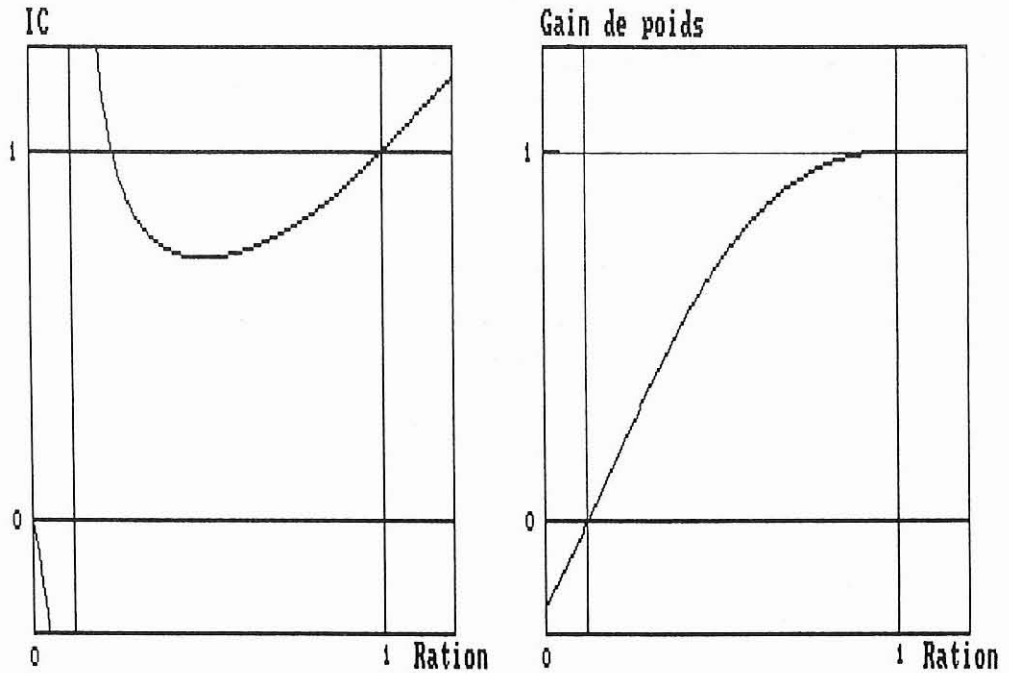
- L'abscisse du minimum de Y est en règle générale approximativement égale à la moitié du niveau de satiété, soit $r_0=0,5$. Cette valeur nous donne $c=0,06$. Si Z_j est le gain (la perte) de poids à jeun, on a $Z_j=-0,2$ pour cette valeur de c .

Les valeurs choisies sont donc $r_e=0,12$ et $c=0,06$. La figure 3 représente les graphes des fonctions ainsi obtenues. Faute de données expérimentales, les deux paramètres de la fonction de rationnement f_3 n'ont donc pas été ajustés dans le cas de l'élevage de la truite arc-en-ciel en eau douce examiné ici, mais sont choisis en conformité avec les résultats présentés dans la littérature.

La prise en compte de la ration alimentaire

Il apparaît clairement que le niveau de nourrissage standard de l'élevage ($r_s=0,8$) ne correspond ni à l'optimum de transformation alimentaire ($r_o=0,5$) pour lequel la vitesse de croissance est insuffisante, ni au maximum de production ($r_M=1$) pour lequel l'efficacité de l'aliment est médiocre.

Figure 3 - Graphe des fonctions de transformation alimentaire réduites Y et Z.



La courbe de la fonction Z montre que la croissance évolue de façon sensiblement linéaire avec le niveau de rationnement jusqu'à amorcer un palier aux environs de la valeur r_s . Au-delà, la pente diminue et s'annule pour la ration de satiété, tandis que l'effort financier d'accroissement de la ration perd sa justification.

V - LA PRISE EN COMPTE DES FACTEURS IMPLICITES

1 Les facteurs implicites

Nous venons d'examiner l'influence de trois facteurs dont le rôle est prépondérant. Mais d'autres facteurs, qui ne sont pas considérés explicitement dans le modèle, doivent être pris en considération. Il s'agit notamment des facteurs liés à l'environnement aquatique, à la technicité de l'éleveur, aux caractères génétiques et phénotypiques des animaux. La prise en compte de ces facteurs ne peut se faire que de façon globale.

Les facteurs liés à l'environnement aquatique sont en particulier la qualité et la disponibilité en eau. En pisciculture continentale, ces deux facteurs sont particulièrement critiques et la nécessité, pour l'éleveur, d'en limiter les variations le conduisent souvent à se doter de moyens sophistiqués pour sur-oxygéner l'eau d'élevage.

On entend par technicité de l'éleveur l'ensemble des gestes d'exploitation qui concourent plus ou moins au bon déroulement de l'élevage. Leurs diverses influences sur les performances de croissance et survie sont déterminantes, mais très difficiles à prendre en compte de façon simple. Parmi cet ensemble de facteurs implicites, notons en particulier la distribution de la nourriture, la prophylaxie, la fréquence et la répartition des tris, la gestion de l'eau,...

La qualité intrinsèque des animaux d'élevage est un facteur de première importance, au point que certains éleveurs qui souhaitent en conserver la maîtrise se constituent leur propre fournisseur d'alevins. En fait, cela complique le système de production au point qu'il est souvent nécessaire d'y renoncer. L'histoire génétique et phénotypique des animaux est alors un facteur sinon inconnu, du moins mal contrôlé.

La remise à jour fréquente des éléments du modèle qui prennent ces facteurs implicites en compte est d'autant plus nécessaire qu'ils évoluent constamment : un exploitant peut modifier ses processus d'élevage, la qualité génétique des animaux peut évoluer, etc. Bien entendu, les données permettant cette remise à jour doivent être issues de l'exploitation elle-même, et non de sources extérieures, quelles que soient leur qualité. Ces données doivent être facilement accessibles. Les protocoles de remise à jour utilisant ces données doivent être simples et rapides en vue d'une utilisation fréquente.

La prise en compte des facteurs implicites

2 La correction du modèle

Dans la pratique, les caractéristiques en poids moyen, effectif et dispersion d'une population ne sont connues avec certitude qu'à l'introduction des animaux dans une unité de confinement (bassin, cage,...), et au moment de leur recapture. Entre-temps, la connaissance de ces caractéristiques s'estompe. Toutefois, le poids moyen est l'une des rares à pouvoir être suivie, et la pratique des échantillonnages périodiques est courante en pisciculture.

La comparaison des résultats du calcul du poids moyen avec ceux constatés en nature permet de générer une correction du modèle qui prend en compte les particularités de chaque exploitation à l'égard des facteurs implicites. Γ est le paramètre qui permet de régler finement la vitesse de croissance pour qu'elle soit conforme aux résultats observés.

La variation de Γ se traduit par une affinité de la croissance spécifique autour de l'axe des températures. Dans le cas standard, la valeur de Γ est 1. Voyons comment effectuer une correction sur la base d'une comparaison entre mesure et calcul.

L'intégration du modèle [20] sur la période $(t-t_0)$ donne :

$$[31] \quad p_C^{(1-m)} = (1-m) \Gamma S + p_0^{(1-m)}$$

où p_0 est le poids moyen initial à la date t_0 , p_C le poids moyen calculé à la date t , et S l'intégrale du produit des fonctions thermique f_2 et de nourrissage f_3 sur la même période.

Recherchons comment varie Γ avec un écart Δp constaté entre la valeur calculée et la valeur mesurée du poids moyen à la date t . Pour cela, dérivons l'expression [31] par rapport à Γ :

$$[32] \quad \frac{dp}{d\Gamma} = S \frac{m}{p_C}$$

En négligeant les dérivées d'ordre supérieur à 1 dans le développement en série de Taylor de cette expression différentielle, et en la combinant avec la valeur de S donnée par [31], on obtient :

$$[33] \quad \Delta \Gamma = \frac{\Delta p (1-m) \Gamma}{p_C \left[p_C^{(1-m)} - p_0^{(1-m)} \right]}$$

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

On dispose, par conséquent, du moyen de corriger le paramètre Γ . Dans la pratique, il faut éviter les oscillations de grande amplitude autour de la valeur moyenne de Γ à chaque correction. Pour cela, elles doivent être amorties.

3 Ajustements et corrections

Après un certain nombre de corrections, l'exploitant dispose d'un outil de simulation adapté à son exploitation. Toutefois, il faut considérer que certaines conditions d'élevage évolueront encore, notamment la technicité du personnel.

Si des conditions d'élevage changent trop radicalement, l'exploitant doit refaire le calage de son modèle en ajustant les paramètres des facteurs explicites. C'est le cas, par exemple, lorsqu'il change de variété génétique ou lorsqu'il s'équipe d'une plate-forme d'oxygénation. Cette dernière a pour effet d'accroître sensiblement les performances de transformation alimentaire pendant les périodes où la respiration est critique, soit pour cause d'étiage, soit pour cause de températures trop élevées.

Il faut considérer, dans la pratique, que la mise à jour des paramètres doit être permanente, selon des fréquences élevées en ce qui concerne le paramètre de correction Γ , et de façon plus espacée dans le temps en ce qui concerne les paramètres explicites par le modèle.

. .
.

VI - L'EXPLOITATION DU MODELE

La modélisation de l'élevage piscicole introduit plus de rigueur dans la conception et le pilotage des exploitations. Elle ouvre la voie aux automatismes destinés à soulager l'exploitant des tâches répétitives, et à dégager du temps pour la gestion proprement dite.

C'est dans ce but qu'ont été développés les logiciels dont le modèle de croissance présenté ici sert d'ossature. "Aquastock"¹ et "Pisci"² sont des logiciels d'aide au pilotage de l'élevage intensif. Par le soutien qu'ils procurent au jour le jour, ces logiciels constituent un outil d'aide à la décision destiné aux exploitants.

Un autre logiciel, du nom de "Ictio"³ permet de conduire la phase préliminaire des projets en comparant les croissances et les prix de revient obtenus en différents sites et pour différentes espèces. Il est destiné aux bureaux d'étude, aux fabricants d'aliment, et aux aménageurs.

La mise en oeuvre du modèle dans ces logiciels implique des dispositions et conventions nouvelles qui sont présentées ci-dessous. Des graphiques illustrent les résultats de calcul.

1 Le régime thermique

La première disposition concerne le calcul de l'intégrale de la fonction thermique sur la période de croissance. Elle est prise égale à la somme des valeurs de f_2 pour chaque pas de temps élémentaire pendant cette période. Cette approximation classique est rendue nécessaire par la difficulté de modéliser les variations thermiques et l'instrumentation sophistiquée que requiert le calcul de l'intégrale. Elle entraîne une erreur d'autant plus faible qu'est plus court le pas de temps pendant lequel la température est prise constante et égale à la moyenne. Il faut aussi que l'amplitude des variations thermiques au cours de ce pas de temps reste compatible avec une croissance normale.

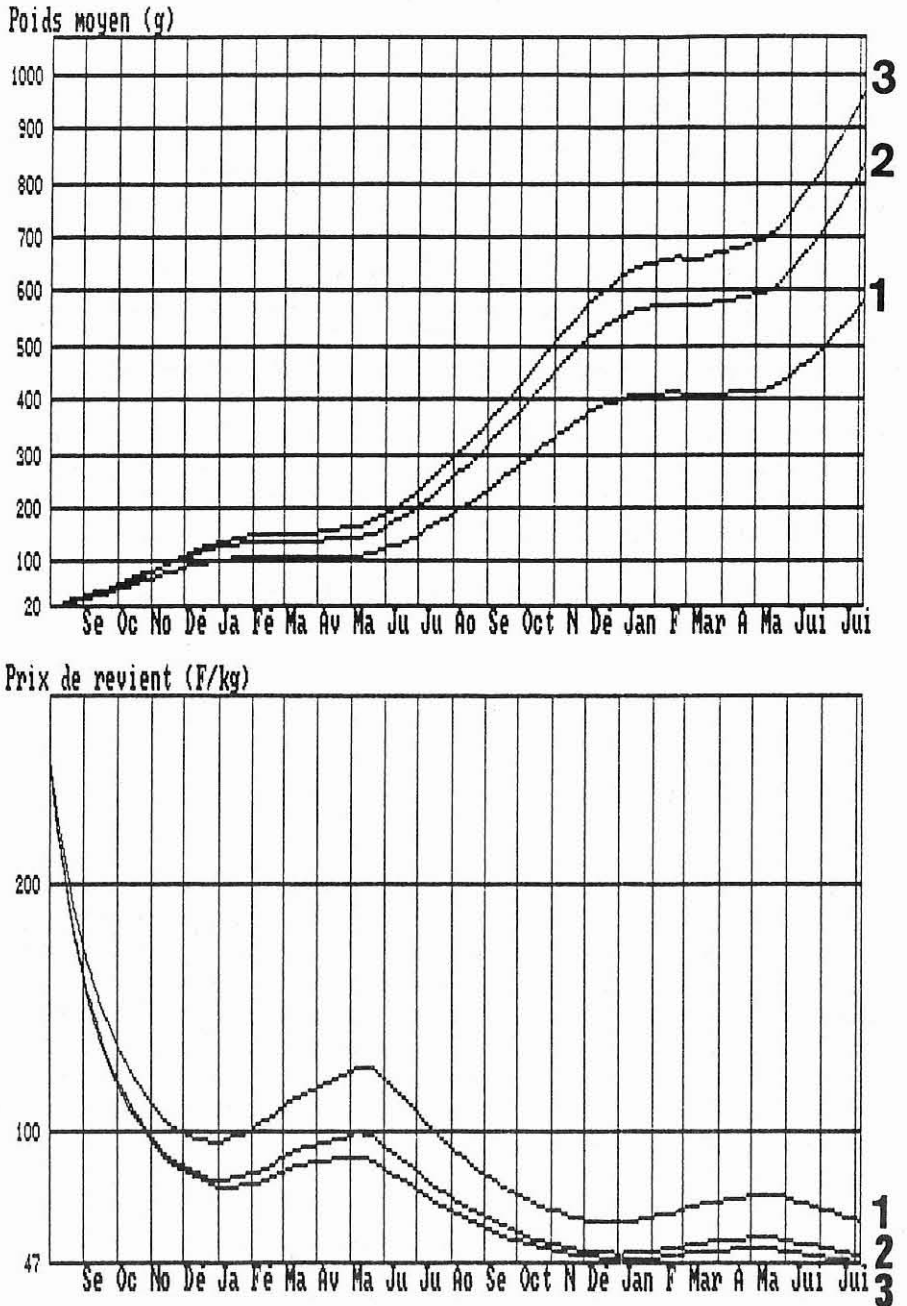
1 disponible auprès de la CREO, Allée des Tamaris, 17000 La Rochelle, pour les applications marines.

2 disponible auprès de l'IGER, 9 rue Eugène Flachet, 75017 Paris, pour les applications en eau douce.

3 disponible auprès de la CREO ou de l'IGER, selon les applications.

L'exploitation du modèle

Figure 4 - Simulation de la croissance du loup *Dicentrarchus labrax* pour différents taux de nourrissage (1: 60%; 2: 80%; 3: 100%), et variation simultanée du prix de revient.



Modélisation de la croissance des poissons en élevage

Le choix d'une période hebdomadaire, qui réalise un compromis entre la précision et la lourdeur, semble adapté à la plupart des situations. Un site d'élevage est donc caractérisé par son régime thermique constitué par la série des températures moyennes de chaque semaine de l'année.

2 Notion de programme d'alimentation

Elle a pour but d'alléger la saisie des informations portant sur les quantités d'aliment distribuées. Cette saisie n'est effectuée que lorsqu'intervient un changement quantitatif ou qualitatif de régime d'alimentation.

Un programme d'alimentation est une période de plusieurs jours pendant laquelle la ration quotidienne est constante, et qui peut comporter un ou plusieurs jours jeûnés, par convention en fin de période.

Dans la pratique, la durée la plus courante est la semaine, mais elle peut être de plusieurs semaines, le pas de temps élémentaire étant le jour.

3 Notion d'indice de performance

Le paramètre de correction synthétique Γ , tel que défini au chapitre V, sert d'indice de performance de croissance. Noté IP, sa valeur est 100 dans les conditions standard.

Il permet à l'éleveur de suivre l'évolution de ses résultats de croissance dans le temps, d'une période sur l'autre, ou dans l'espace, d'une population à l'autre. Sa mise à jour fréquente, à l'occasion des échantillonnages de poids moyens ou des mouvements d'animaux, lui confère un intérêt particulier pour suivre les progrès zootechniques, et améliorer le système de production.

4 Stratégies d'élevage

La prévision de la croissance d'une espèce en un site donné peut être faite conformément à des hypothèses dont l'influence permet de déterminer les meilleures stratégies. A titre d'exemple, la figure 4 montre les résultats du calcul de la croissance pour différents taux de nourrissage. Le graphique du bas présente l'évolution simultanée du prix de revient. Ce dernier est formé du coût initial de la population (alevins), auquel sont ajoutés tous les jours le coût de l'aliment et les charges fixes d'exploitation correspondant à la population élevée.

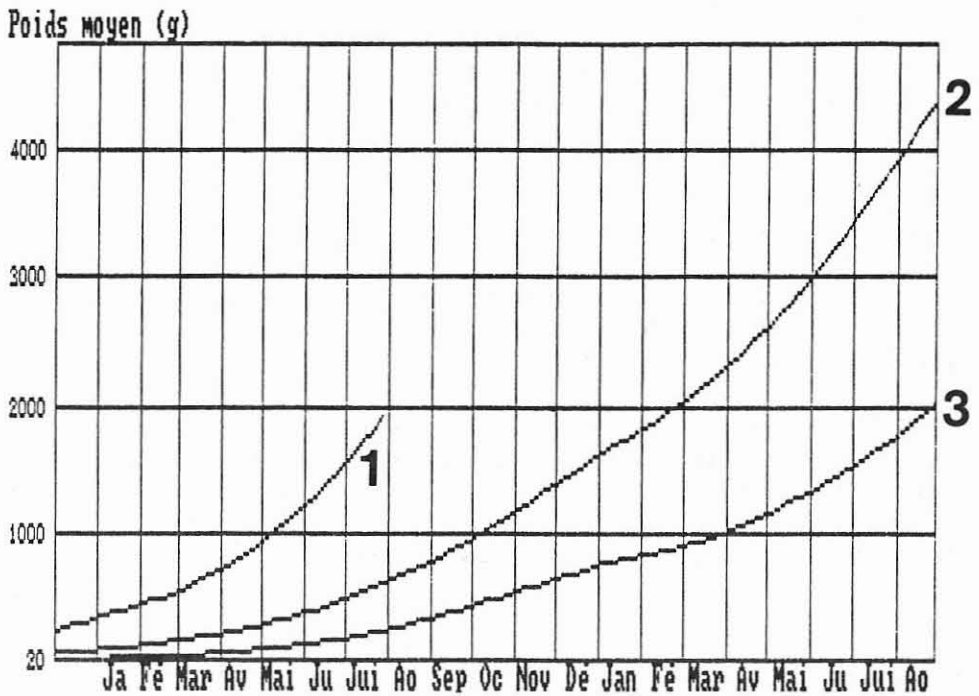
L'exploitation du modèle

5 Evaluation de projet

Le logiciel "Ictio" est destiné à l'évaluation des projets. Il permet notamment de comparer les croissances obtenues avec la même espèce sur différents sites, et avec différentes espèces sur le même site.

A titre d'exemple, la figure 5 montre les croissances comparées de la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*), de la truite fario (*Salmo trutta*), et du turbot (*Scophthalmus maximus*) sur un site marin unique caractérisé par son régime thermique.

Figure 5 - Comparaison des croissances de trois espèces sur le même site d'élevage (1 : truite arc-en-ciel; 2 : truite fario; 3 : turbot).



Une telle simulation permet de contribuer au choix de l'espèce la plus performante. En outre, l'évolution dans le temps des biomasses et des quantités d'aliment consommées permet d'établir le compte prévisionnel d'exploitation et le plan de trésorerie.

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

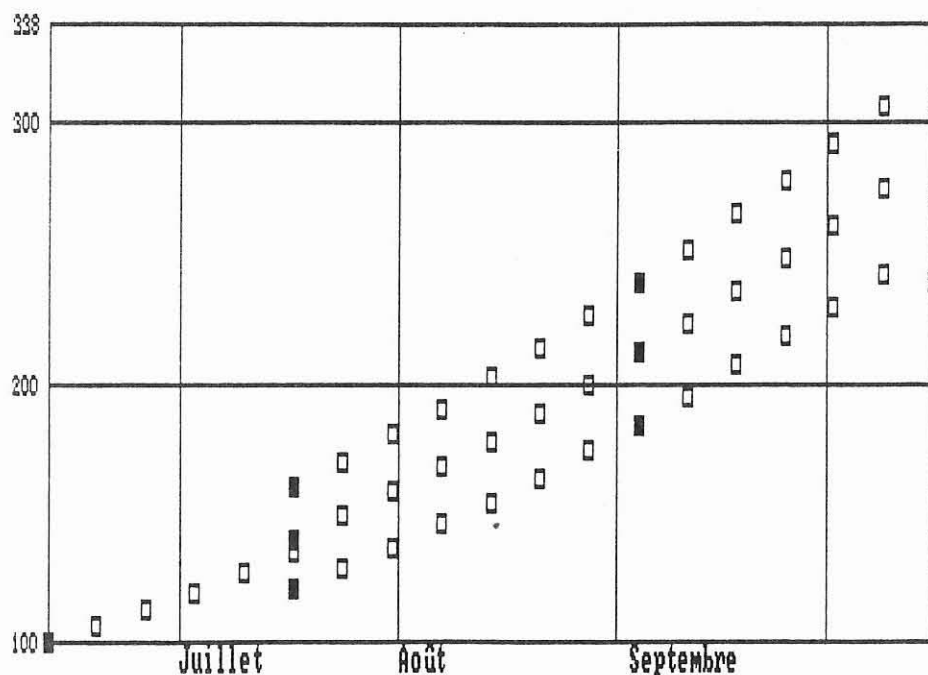
Bien que ne présentant pas de valeur comptable, l'étude du prix de revient des animaux fournit des indications sur les opportunités de vente et leur adéquation aux conditions du marché, et notamment à ses fluctuations saisonnières.

6 Aide à l'exploitation

Les logiciels "Aquastock" et "Pisci", exécutables sur compatibles PC et AT, sont spécialement adaptés à la gestion des populations de poissons en élevage intensif.

Figure 6 - Exemple d'évolution d'une population de poissons en élevage. Les marques blanches correspondent au calcul et les noires aux mesures.

Poids moyen (g)



Ils génèrent des archives à l'occasion de chaque mouvement d'animaux et de chaque validation des programmes d'alimentation. La consultation rapide de ces archives procure à l'éleveur une visibilité complète sur les situations antérieures (Fig. 6) et de nouvelles possibilités d'analyse.

L'exploitation du modèle

Le modèle de croissance **met à jour les biomasses** de l'exploitation au fur et à mesure de la saisie des températures moyennes et des quantités d'aliment distribuées (programmes d'alimentation). Ceci permet de **calculer les rations à distribuer** en fonction des températures prévisionnelles et des niveaux de rationnement choisis par l'exploitant. Des indications sur l'opportunité d'effectuer des **mouvements d'animaux** sont également fournies.

Ces programmes permettent, comme précédemment, d'envisager les situations futures (**prévision et rétro-prévision** de la croissance), ainsi que de calculer les **besoins en aliments**.

Les corrections de l'indice de performance effectuées à l'occasion des pesées-test permettent, par comparaison avec les résultats du calcul, d'affiner le paramétrage, et de maintenir la fiabilité du modèle. Le suivi des trois indices (performance, conversion et transformation) procure à l'exploitant une visibilité complète dans sa progression vers de meilleurs résultats en matière de croissance, utilisation alimentaire et survie.

CONCLUSION

Le modèle de croissance obtenu présente une précision et un domaine de validité satisfaisants pour les espèces d'élevage examinées. Les données utilisées pour le calage paramétrique des fonctions somatiques et thermiques sont constituées par les tables de rationnement qui ont l'avantage de représenter une vaste synthèse des performances moyennes obtenues en élevage. Seul, le calage paramétrique des fonctions de transformation alimentaire nécessite un affinage expérimental.

La validité du modèle n'est pas garantie pour des situations extrêmes, telles que les périodes de maturation sexuelle, ou pour des animaux présentant des performances de croissance s'écartant nettement de la moyenne, ou encore, en dehors de la gamme des poids ayant servi au calage des paramètres. La répartition des valeurs autour des résultats donnés par le modèle n'a pas fait l'objet d'étude.

Une retouche permanente des paramètres de croissance est nécessaire en élevage en raison de la multiplicité des facteurs agissant qui rendent les performances évolutives. Dans ce but, les logiciels qui mettent en oeuvre ce modèle prévoient un ajustement automatique prenant en compte les facteurs explicites de la croissance, et la correction - à partir des résultats réels de la croissance - d'un paramètre exprimant de façon globale les facteurs implicites.

La place de l'informatique dans la gestion des élevages de poissons est destinée à croître, comme dans la plupart des activités économiques. Pour exploiter pleinement les possibilités offertes par ce puissant outil, il faut procéder à une rationalisation de l'élevage et à une amélioration de certaines procédures. En particulier, la biomasse en élevage et les quantités d'aliment distribuées devront être connues avec plus de précision grâce à la mise en oeuvre d'une nouvelle génération d'outillages. Dans une perspective plus lointaine, ces moyens permettent d'envisager un pilotage automatique des principales fonctions de l'exploitation piscicole.

BIBLIOGRAPHIE

- BEAMISH, F.W.H, DICKIE, L.M. 1967. Metabolism and bio-logical production in fish. Gerking, S.D. (Editeur), The biological Basis of fresh water fish production. Blackwell, Oxford-Edinburg, pp. 215-242.
- BEAMISH, F.W.H, NIIMI, A.J., LETT, P.F.K.P. 1975. Bioenergetics of teleost fishes: environmental influences. In: L. Bolis, H.P. Maddrell, and K. Schmidt-Nielson (Editeurs), Comparative physiology- Fundamental aspects of structural materials. North Holland Publishing Cy, Amsterdam
- BERTALANFFY, L. von. 1934. Untersuchungen über die Gesetzmäßigkeiten des Wachstums. I. Roux' Archiv für Entwicklungsmechanik, 131: 613-652.
- BOEHLERT, G.W, YOKLAVICH, M.M. 1983. Effects of temperature, ration, and fish size on growth of juvenile black rockfish *Sebastes melanops*. *Env. Biol. Fish.*, Vol. 8, 1, pp.17-28.
- BOTSFORD, L.W, SCHUUR, A.M., SHLESER, R. 1975. An economical optimum aquaculture facility. NOAA, Office of Sea Grant, 407-419.
- BRETT, J.R, SHELBURN, J.E, SHOOP, C.T. 1969. Growth rate and body composition of *Oncorhynchus nerka*, in relation to temperature and ration size. fingerling sockeye salmon J. *Fish. Res. Board of Can.*, vol. 26, 9, 2363-2394.
- BRETT, J.R, BLACKBURN, J.M. 1981 Oxygen requirements for growth of young Coho (*Oncorhynchus kisutch*) and Sokeye (*O. nerka*) salmon at 15°C. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 38: 399-404.
- BUESTEL, D., LAUREC, A. 1975. Croissance de la coquille Saint-Jacques (*Pecten maximus* L) en rade de Brest et en baie de Saint-Brieuc. *Haliotis*, Vol. 5, 173-177.
- COREY, P.D, LEITH, D.A, ENGLISH, M.J. 1983. A growth model for coho salmon including effects of varying ration allotments and temperature. *Aquaculture*, 30, 125-143.
- FAURE, A, RUER, P. 1980. Mise en place d'un modèle de prévision de la production de truites. *La Pisc. Franç.*, 3ème & 4ème trim., pp. 53-57.

Bibliographie

- FROM, J, RASMUSSEN, G. 1979. Growth modelling for use in trout production planning. Proc. World Symp. on Finfish Nutrition and Fishfeed Technology. Hamburg 20-23 juin 1978, Vol. 2, pp. 591-605.
- GASCHUTZ, G, PAULY, D., DAVID, N. 1980. A versatile BASIC program for fitting weight and seasonally oscillating length growth data. Internat. Counc. Explo. Sea, Pelagic, Demersal and Shellfish, 23 p.
- GOOLISH, E.M, ADELMAN, I.R. 1984. Effects of ration size and temperature on the growth of juvenile common carp (*Cyprinus carpio* L.). *Aquaculture*, 36, 27-35.
- HARADA, T, 1965. Studies on propagation of yellowtail (*Seriola quinqueradiata* T & S). Memoirs of the Fac. of Agric., Kinki University, N°3. (en japonais)
- HOGENDOORN, H. 1983. Growth and production of the african catfish, *Clarias lazera* (C & V). III. Bioenergetic relations of body weight and feeding level. *Aquaculture*, 35: 1-17.
- HOGENDOORN, H, KOOPS, W.J. 1983. a) Growth and production of the african catfish, *Clarias lazera* (C & V). I. Effects of stocking density, pond size and mixed culture with tilapia (*Sarotherodon niloticus* L.) under extensive field conditions. *Aquaculture*, 34, pp. 253-263.
- HOGENDOORN, H, JANSEN, J.A.J, KOOPS, W.J, MACHIELS, M.A.M, EWIJK van, P.H, HEES van, J.P. 1983. b) Growth and production of the african catfish, *Clarias lazera* (C & V). II. Effects of body weight, temperature and feeding level in intensive tank culture. *Aquaculture*, 34, pp. 265-285.
- IWAMA, G.K, TAUTZ, A.F. 1981. A simple growth model for salmonids in hatcheries. *Can. Jour. of Fis. and Aq. Sci.*, 38(6), 649-656.
- KERR, S.R. 1971. a. Analysis of laboratory experiments on growth efficiency of fishes. *Fish. Res. Board Can.*, 28: 801-808.
- KERR, S.R. 1971. b. Prediction on fish growth efficiency in nature. *J. Fish. Res. Board Can.*, 28: 815-819.
- LAUREC, A, LE GUEN, J.C. 1981. Dynamique des populations marines exploitées. Tome 1: Concepts et modèles. *Rap. Scient. Tech. CNEXO*, 45: pp 117.
- LIAO, P.B. 1971. Water requirements of Salmonids. *Prog. Fish. Cult.*, 33 (4): 210-215.

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

MULLER-FEUGA, A, PETIT, J, SABAUT, JJ. 1978. Influence de la température et du poids vif sur la demande en oxygène de la truite arc-en-ciel (*Salmo gairdneri* R.) en eau douce. *Aquaculture*, 14: 355-363 (en anglais).

MULLER-FEUGA, A. 1984. Les conditions d'extension de la pisciculture intensive à la mer ouverte. Thèse de doctorat d'état-sciences. Université d'Aix-Marseille II, 31-48.

NIE, N.H, HULL, C.H, JENKINS, J.G, STEINBRENNER, K, BENT, D.H.1974. Statistical package for the social sciences. Mc Graw Hill, New York, pp. 675.

PALOHEIMO, J.E, DICKIE, L.M. 1965. Food and growth of fishes. I. A growth curve derived from experimental data. *J. Fish. Res. Board Can.*, 22: 521-542

PALOHEIMO, J.E, DICKIE, L.M. 1966. a. Food and growth of fishes. II. Effects of food and temperature on the relation between metabolism and body weight. *J. Fish. Res. Board Can.*, 23: 869-908.

PALOHEIMO, J.E, DICKIE, L.M. 1966. b. Food and growth of fishes. III. Relations among food body size, and growth efficiency. *J. Fish. Res. Board Can.*, 23: 1209-1248.

PAPST, M.H, AYLES, G.B, URAIWAN, S. 1982. A model for estimating the growth of cultured Rainbow Trout (*Salmo gairdneri* Richardson). *Can. Tech. Rep. of Fish. and Aquat. Sci.*, N. 1088, pp. 10.

RUER, P. 1980. Essai de modélisation d'une unité de production salmonicole. Mém. 3ème année, I.N.A., Paris, pp 60.

SPARRE, P. 1976. A markovian decision process applied to optimization of production planning in fish farming. *Medd. Dan. Fisk. Havunders.*, N.S., 7:111-197.

STAUFFER, G.D. 1973. A growth model for salmonids reared in hatchery environments. Thèse PhD, Dep. of Zoology, Univ. Washington, Seattle, WA.

THOMPSON, D.H. 1941. The fish production of inland streams and lakes. *Symp. Hydrobiol.*, Univ. Wisconsin Press., Madison, Wis., 206-217.

WARE, D.M. 1978. Bioenergetics of pelagic fish: theoretical change in swimming speed and ration with body size. *J. Fish Res. Board Can.*, 35: 220-228

WARREN, C.E, DAVIS, G.E. 1967. Laboratory studies on the feeding, bioenergetics and growth of fishes. In: Gerking, S.D. (Editeur), *The Biological Basis of Freshwater Fish Production*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 175-214.

Bibliographie

WEBB, P.W. 1975. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. *Bull. Fish. Res. Board of Can.*, 190: 158 p.

WEBB, P.W. 1978. Partitioning of energy into metabolism and growth. In S.D. Gerking (Editeur), *Ecology of freshwater fish production*. Blackwell Sci. Publ., Oxford-Londres-Edinburgh-Melbourne

WILLOUGHBY, H. 1968. A method for calculating carrying capacities of hatchery troughs and ponds. *Prog. Fish Cult.*, 30 (3):173-174.

WINBERG, G.G. 1956. Rate of metabolism and food requirements of fishes. Université d'Etat de Biélorussie, Minsk. (traduit du russe par le service de traduction du *Fish. Res. Board Can.*, 194, 1960).

WINBERG, G.G. 1960. Rate of metabolism and food requirements of fishes. Minsk, URSS, *Fish. Res. Board Can.*, Série traduction n° 194, 239 p.

WINBERG, G.G. 1961. New information on metabolic rate in fishes. *Vopr. Ikhtiol.* Vol.1: 157-165., *Fish. Res. Board Can.*, Série Traduction n° 362, 11 p.

REPertoire des figures

Figure 1	24
Comparaison entre le modèle (courbes) et les valeurs expérimentales (marques) de la ration journalière pour la truite arc-en-ciel <i>Oncorhynchus mykiss</i> en eau douce.	
Figure 2	26
Résultats graphiques de l'ajustement de la croissance spécifique en fonction de la température pour le loup <i>Dicentrarchus labrax</i> .	
Figure 3	34
Graphe des fonctions de transformation alimentaire réduites Y et Z.	
Figure 4	40
Simulation de la croissance du loup <i>Dicentrarchus labrax</i> pour différents taux de nourrissage, et variation simultanée du prix de revient.	
Figure 5	42
Comparaison des croissances de trois espèces sur le même site d'élevage.	
Figure 6	43
Exemple d'évolution d'une population de poissons en élevage.	

. .
.

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

REPertoire DES NOTATIONS

α	premier paramètre thermique
β	second paramètre thermique
B	biomasse
Γ	paramètre de correction
c	cambrure, paramètre des fonctions de nourrissage (sans dimension)
CS	croissance spécifique (en 1/t)
f_1	fonction somatique dans l'expression de la croissance
f_2	fonction thermique dans l'expression de la croissance
f_3	fonction de nourrissage dans l'expression de la croissance
θ	température (en degrés Celsius)
θ_i	température d'inversion de la courbe de croissance (en degrés Celsius)
θ_M	température maximale de croissance (en degrés Celsius)
θ_m	température d'arrêt de prise de nourriture (en degrés Celsius)
θ_o	température optimale (en degrés Celsius)
IC	indice de consommation (sans dimension)
IP	indice de performance
m	exposant du poids dans l'expression de la croissance (sans dimension)
p	poids frais individuel (en grammes)
R	ration alimentaire (en grammes)
r	ration réduite (sans dimension)
re	ration d'entretien réduite (sans dimension)
t	temps (en jours)
Y	IC réduit fonction de la ration réduite (sans dimension)
Z	Gain de poids réduit fonction de la ration réduite (sans dimension)

REPERTOIRE DES FORMULES

$$[1] \quad \frac{dB}{dt} = H B^h - K B^k \quad \text{avec } B(t_0) = B_0$$

$$[2] \quad \frac{dp}{dt} = \Gamma p^m (\theta - \theta_m)^n \quad \text{avec } p(t_0) = p_0$$

$$[3] \quad \frac{dp}{dt} = \Gamma p^m \quad \text{avec } p(t_0) = p_0$$

$$[4] \quad \frac{dp}{dt} = \Gamma f_1(p) f_2(\theta) f_3(r) \quad \text{avec } p(t_0) = p_0$$

$$[5] \quad CS = \frac{(p - p_0) 100}{p_0 (t - t_0)}$$

$$[6] \quad CS = \frac{\text{Log}(p) - \text{Log}(p_0)}{t - t_0}$$

$$[7] \quad d\left(\frac{p^{1-m}}{1-m}\right) = \Gamma dt \quad \text{avec } p(t_0) = p_0$$

$$[8] \quad CS = \frac{p^{1-m} - p_0^{1-m}}{(1-m)(t - t_0)}$$

$$[9] \quad f_2 = e^{\frac{\alpha (\theta_M - \theta)}{e} - \frac{\beta (\theta_M - \theta)}{e}}$$

$$[10] \quad \Delta\alpha = \frac{S_1 S_3 - S_2 S_4}{S_3^2 - S_4^2}$$

Répertoire des formules

$$[11] \Delta\beta = \frac{S_1 S_4 - S_2 S_3}{S_3^2 - S_4^2}$$

$$[12] S_1 = \sum_{i=1}^n y_i x_i e^{\alpha_0 x_i} - \sum_{i=1}^n x_i e^{\alpha_0 x_i} (e^{\alpha_0 x_i} - e^{\beta_0 x_i})$$

$$[13] S_2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i e^{\beta_0 x_i} - \sum_{i=1}^n x_i e^{\beta_0 x_i} (e^{\alpha_0 x_i} - e^{\beta_0 x_i})$$

$$[14] S_3 = \sum_{i=1}^n x_i^2 e^{2\alpha_0 x_i}$$

$$[15] S_4 = \sum_{i=1}^n x_i^2 e^{\alpha_0 x_i + \beta_0 x_i}$$

$$[16] \theta_0 - \theta_i = \theta_M - \theta_0$$

$$[17] \beta_0 = \frac{\text{Log}(z)}{(\theta_M - \theta_0)(z - 1)}$$

$$[18] \alpha_0 = z \beta_0$$

$$[19] z = \frac{Y_i - Y_0^2}{Y_i + Y_0^2}$$

$$[20] \frac{dp}{dt} = \Gamma p^m (e^{\alpha(\theta_M - \theta)} - e^{\beta(\theta_M - \theta)}) f_3$$

$$[21] IC = \frac{\frac{dR}{dt}}{\frac{dB}{dt}}$$

Modélisation de la croissance des poissons en élevage

$$[22] \quad r = \frac{\frac{dR}{dt}}{\frac{dR_M}{dt}}$$

$$[23] \quad r = Y(r) Z(r)$$

$$[24] \quad Y(r) = \frac{\frac{dR}{dt}}{\frac{dB}{dt}} = \frac{\frac{dB_M}{dt}}{\frac{dR_M}{dt}}$$

$$[25] \quad Z(r) = \frac{\frac{dB}{dt}}{\frac{dB_M}{dt}}$$

$$[26] \quad \frac{dp}{dt} = \frac{dp_S}{dt} \frac{Z(r)}{Z(r_S)}$$

$$[27] \quad f_3 = Z(r) / Z(r_S)$$

$$[28] \quad r = \frac{\frac{dR}{dt} r_S}{IC(p) \frac{dp_S}{dt}}$$

$$[29] \quad \theta_i = \theta_M - 2 \frac{\text{Log}(\alpha) - \text{Log}(\beta)}{\beta - \alpha}$$

Répertoire des formules

$$[30] Y = r \left[1 + \frac{c (1 - r)^2}{r_e (1 - r_e)^2 (r - r_e)} \right]$$

$$[31] p^{(1-m)} = (1-m) \Gamma S + p_0^{(1-m)}$$

$$[32] \frac{dp}{d\Gamma} = S p^m$$

$$[33] \Delta\Gamma = \frac{\Delta p (1-m) \Gamma}{p_C^m [p_C^{(1-m)} - p_0^{(1-m)}]}$$

...

Après avoir passé en revue les modèles de croissance des poissons présentés dans la littérature, il en est proposé un pour l'aide opérationnelle en élevage intensif, aux caractéristiques suivantes.

Une expression mathématique simple et intégrable rend compte de la croissance en éliminant l'influence du poids individuel des animaux. Elle conduit à une définition générale de la croissance spécifique. Le mode d'action de la température sur la vitesse de croissance est exprimé par la soustraction de deux fonctions exponentielles. Une méthode de calcul automatique des paramètres thermiques est proposée. L'influence torpide des basses températures est considérée. La ration alimentaire agit selon des règles simples sur la vitesse de croissance et une fonction à deux paramètres est proposée pour prendre en compte explicitement ce facteur. Les autres facteurs de croissance, plus difficiles à appréhender, sont exprimés sous la forme d'un paramètre synthétique de correction dont la mise à jour est effectuée à partir de la comparaison entre les résultats réels et ceux de la simulation.

Un examen de l'applicabilité du modèle aux principales espèces d'élevage montre son caractère général. Il est mis en œuvre dans des logiciels d'aide à la décision dont les fonctionnalités sont illustrées à l'aide d'exemples.

After a literature overview of growth models applied to intensively cultured fishes, a new one is proposed for assistance in rearing operations, with following characteristics.

A simple and integratable mathematic expression simulates growth while eliminating individual weight influence. It gives way to a specific growth general definition. Temperature action mode on growth speed is simulated by subtraction of two exponential functions. An automatic calculation method of thermal parameters is proposed. The torpid action of low temperatures is considered. Feeding ration influences growth through simple rules which are explicitly taken in account by mean of a two parameters function. The other growth factors, more difficult to seize, are expressed through a synthetic correction parameter updated by comparison between measured and calculated results.

An examination of the model applicability to main reared species shows its general character. It is operated in professional decision assistance softwares which functionalities are illustrated by examples.

Mots clés : Modèle, croissance, élevage poissons, pisciculture, model, growth, fish culture.

*Service de la Documentation
et des Publications (S.D.P.)
IFREMER - Centre de Brest
B.P. 70 - 29280 PLOUZANÉ
Tél. 98 22 40 13 - Telex 940 627 F*



IFREMER