

Modélisation de la courbe de croissance staturo-pondérale de la première année de la vie

Kirsten B. Simondon^a

Introduction

L'unité de recherche des maladies de dénutrition de l'ORSTOM a pour thème central la malnutrition protéino-énergétique (MPE) des jeunes enfants et plus particulièrement le retard de croissance en taille.

Plusieurs études ont été réalisées dans le but d'étudier la relation entre la croissance infantile staturo-pondérale et le retard de taille d'enfants d'âge préscolaire (Simondon *et al.*, 1991; Simondon, 1991). La nature des données de croissance analysées a nécessité le recours à la modélisation de la croissance. En effet, les données de croissance provenant de différents enfants sont rarement directement comparables parce que les âges, aux mesures, varient entre enfants.

A partir de courbes de croissance estimées par modélisation on peut calculer des poids ou tailles estimés à tout âge, pour tous les enfants.

La modélisation de la croissance est définie comme l'ajustement d'un modèle mathématique aux données de croissance, c'est-à-dire la mise en équation de la courbe de croissance. Le poids ou la taille sont alors exprimés comme une fonction de l'âge de l'enfant et d'un certain nombre de paramètres. Voici un exemple de modèle de croissance dont il sera question dans cet exposé:

$$\text{Modèle de Count (1943): } Y = A + Bt + C \ln(t)$$

Y est la variable à modéliser (poids ou taille), t est l'âge du sujet exprimé en mois ou années) et A , B et C sont les paramètres des modèles. L'ajustement d'un modèle à des données de croissance consiste en l'estimation des paramètres par un programme informatique de régression.

Lors d'une modélisation individuelle le modèle est ajusté à la courbe de chaque enfant. Ainsi toute la série de données d'un enfant est résumée dans un petit nombre de paramètres. Les valeurs de ces paramètres estimés diffèrent bien sûr entre enfants en fonction de leur croissance.

Le choix du modèle dépend de la forme générale des courbes à modéliser, qui dépendent à leur tour essentiellement de l'intervalle d'âge à modéliser et du caractère normal ou anormal de la croissance. La croissance infantile (entre la naissance et l'âge de 1 an) est caractérisée par une vitesse initiale très importante et une décélération permanente. Ces caractéristiques sont encore plus prononcées

^aURAF ORSTOM

dans les pays en développement, où un enfant prend en moyenne 3 kg et 10 cm au cours des trois premiers mois de la vie contre 0,5 kg et 3 cm entre 9 et 12 mois.

1 Données et méthodes

1.1 Données

Deux types de données ont été utilisés pour cette étude:

- Des données de croissance pondérale entre 0 et 13 mois de 95 enfants congolais. Ces mesures de poids, réalisées dans des Centres de Santé Maternelle et Infantile, ont été relevées sur les carnets de santé des enfants au cours d'une enquête nutritionnelle nationale au Congo (Cornu *et al*, 1990).
- Des données de croissance staturale entre 0 et 13 mois de 151 enfants sénégalais. Ces mesures de taille ont été récoltées au cours de suivis longitudinaux d'enfants à Pikine, réalisés sous la direction de B. Maire.

1.2 Méthodes

Les cinq modèles suivants, tous proposés pour la croissance des jeunes enfants ont été testés :

Nom	Equation	Référence
Count	$Y = A + Bt + C \ln(t)$	(Count, 1943)
Reed 1	$Y = A + Bt + C \ln(t) + D/t$	(Berkey & Reed, 1987)
Reed 2	$Y = A + Bt + C \ln(t) + D/t + E/t^2$	
Karlberg	$Y = A + B(1 - e^{-Ct})$	(Karlberg, 1987)
Kouchi	$Y = A + Bt^C$	(Kouchi <i>et al</i> , 1983)

Ils ont été appliqués à la croissance infantile pour la première fois (mis à part le modèle de Karlberg) dans une étude récente (Simondon *et al*, accepté pour publication).

Les trois premiers modèles cités ci-dessus sont dits "linéaires", parce qu'ils constituent des combinaisons linéaires des paramètres. Le modèle de Karlberg est dit "non-linéaire" parce que le paramètre C est sous forme exponentielle.

Les modèles linéaires peuvent être ajustés à des données à l'aide d'un simple programme de régression linéaire (comme BMDP 1R) alors que l'emploi de modèles non-linéaires nécessite l'utilisation de programmes de régression non-linéaire (comme BMDP 3R) qui estiment les valeurs des paramètres par une procédure itérative.

Dans la présente étude l'ajustement aux données a été réalisé à l'aide du programme BMDP 3R pour tous les modèles. Le matériel informatique était un micro-ordinateur IBM-compatible.

Le programme BMDP 3R exige la spécification du modèle et des dérivées premières par rapport aux paramètres (dY/dA , dY/dB , etc). Il faut également donner une estimation initiale des paramètres comme point de départ des itérations. Les items de comparaison entre modèles ont été les suivants:

- la variance résiduelle, qui mesure globalement les écarts entre valeurs observées et estimées et qui doit être aussi faible que possible;

- l'existence ou l'absence de biais, c'est à dire de sur- ou sous-estimations systématiques à certains âges, qui sont bien sûr à éviter;
- la courbe de vitesse estimée moyenne, et son aptitude à suivre les gains mensuels moyens;
- la parcimonie (dans le nombre de paramètres).

La variance résiduelle est la somme des carrés des résidus divisée par le nombre de degrés de liberté. Le nombre de degrés de liberté est le nombre de points dans la série de croissance d'un enfant (ici entre 7 et 13) moins le nombre de paramètres du modèle (ici entre 3 et 5). Un résidu de poids ou de taille à un âge donné est la valeur observée moins la valeur estimée par le modèle de la variable modélisée au même âge.

Quand le résidu moyen d'un groupe d'enfants est négatif à un âge donné cela signifie que le modèle surestime la variable à cet âge. L'estimation est alors dite "biaisée", c'est à dire entâchée d'une erreur systématique.

Une courbe individuelle de vitesse de croissance instantanée peut être estimée à partir de la dérivée première du modèle par rapport à l'âge, et des paramètres estimés. Ici la courbe de vitesse moyenne, définie comme la moyenne des courbes individuelles, a été comparée aux gains mensuels moyens de croissance. Ces gains mensuels sont les différences entre mesures successives de poids ou de taille divisées par l'intervalle d'âge qui les sépare.

2 Résultats

2.1 Comparaison de cinq modèles sur la croissance pondérale

Les modèles de Count, de Kouchi, de Karlberg et les modèles 1 et 2 de Reed ont été comparés sur des données de croissance pondérale infantile.

Avant d'aborder les comparaisons, quelques exemples d'ajustement illustrent le comportement du modèle de Karlberg pour différents types de courbes (Fig. 1). Les particularités de ces courbes sont a: une erreur de mesure, b: une perte de poids importante, c & d: une croissance régulière, et e: une croissance négative à partir de l'âge de 5 mois. Les courbes e et f illustrent un phénomène fréquent, à savoir la perte pondérale néonatale (durant la première semaine de vie). Le modèle de Karlberg, qui ne contient que 3 paramètres, n'est pas adapté à la description de telles pertes de poids.

Les modèles de Reed s'ajustent mieux que les autres modèles à des courbes contenant des pertes de poids, car ils ont 1 (respectivement 2) paramètres supplémentaires et peuvent alors permettre 1 (respectivement 2) points d'inflexion.

Ces différences d'ajustement sont visibles sur le graphique des résidus moyens en fonction de l'âge (Fig. 2). Les modèles à 3 paramètres (Karlberg, Count, Kouchi) sous-estiment le poids de naissance et surestiment le poids à l'âge de 1 mois, alors que les modèles de Reed donnent des estimations non-biaisées durant la période néo-natale.

Parmi les modèles à 3 paramètres, celui de Karlberg est meilleur que les deux autres.

La qualité de l'ajustement est également illustrée sur le graphique de la courbe moyenne des vitesses estimées (Fig. 3). Celle-ci est comparée aux gains mensuels

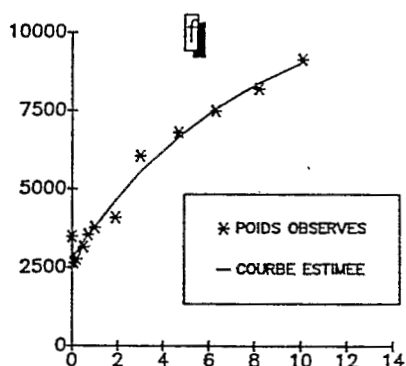
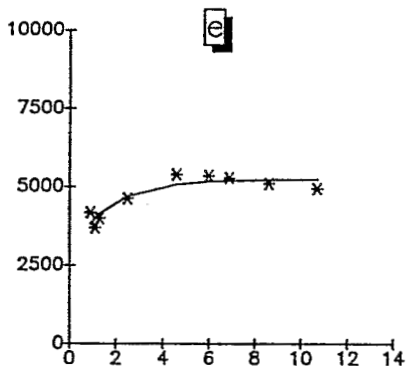
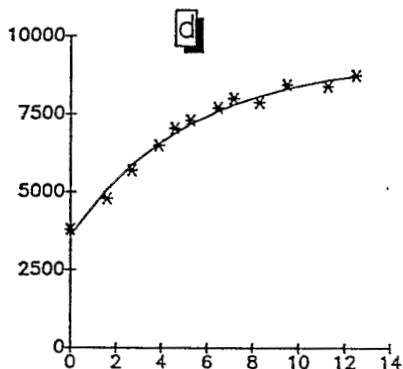
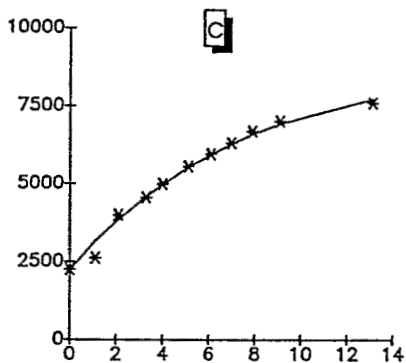
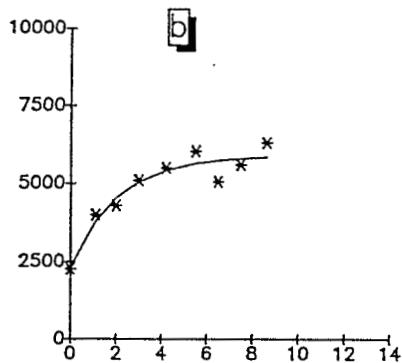
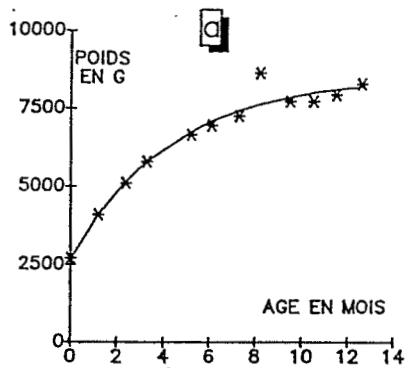


Figure 1: Exemples d'ajustement du modèle de Karlberg à des courbes de croissances pondérale

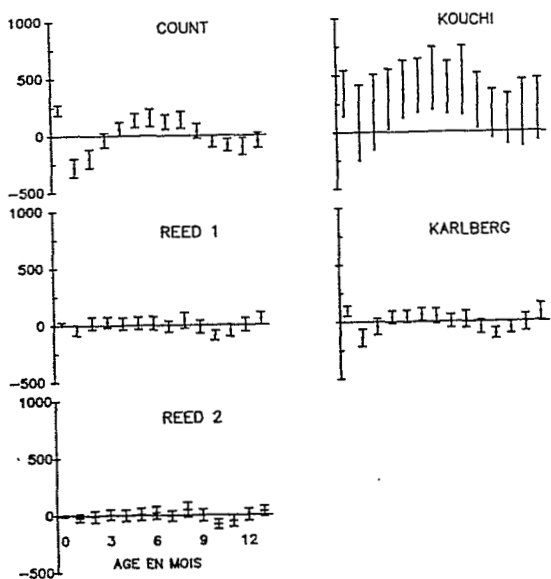


Figure 2: Résidus pondéraux moyens en fonction de l'âge

moyens. Seuls les modèles de Reed sont capables de décrire l'augmentation initiale de la vitesse de croissance, c'est à dire l'accélération positive. Plus tard, au-delà de l'âge de 3 mois, les courbes de vitesses estimées par Reed et par Karlberg sont identiques.

Les différences d'ajustement sont résumées dans la variance résiduelle de la modélisation (Tableau I). Les modèles ont été classés en fonction croissante de la qualité d'ajustement. La variance résiduelle a été comparée entre modèles deux à deux à l'aide du test des rangs signés de Wilcoxon. Le meilleur ajustement est obtenu à l'aide des modèles de Reed, suivi par le modèle de Karlberg, qui est donc le meilleur modèle parmi ceux à 3 paramètres. Le modèle 2 de Reed (à 5 paramètres) ne s'ajuste pas significativement mieux aux données que le modèle 1 (à 4 paramètres).

2.2 Comparaison de deux modèles sur la croissance staturale

Le modèle 1 de Reed et le modèle de Karlberg ont également été comparés sur des données de croissance staturale infantile. De nouveau le modèle de Karlberg conduit à de nombreux biais d'estimation. La taille de naissance est surestimée, alors que la taille est sous-estimée entre 1 et 4 mois (Fig. 4).

Entre 5 et 7 mois et entre 11 et 13 mois les deux modèles conduisent à des sous-estimations de la taille.

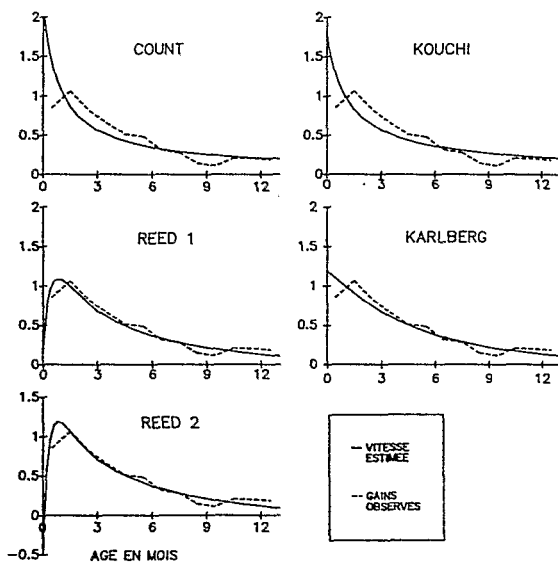


Figure 3: Courbes de vitesse de croissance pondérale moyennes estimées par modélisation comparées aux gains pondéraux mensuels

Les courbes de vitesse estimée moyenne illustrent la différence de comportement entre ces deux modèles (Fig. 5). Malgré l'inexistence de "pertes de taille néonatales" la courbe estimée par le modèle de Reed suit mieux la courbe des gains estimés que le modèle de Karlberg.

La variance résiduelle du modèle de Reed est significativement inférieure à celle du modèle de Karlberg pour la plupart des courbes ($p < 0,001$, Tableau II).

3 Discussion

La qualité d'ajustement d'un modèle dépend de sa flexibilité. Pour un même nombre de paramètres un modèle non linéaire est plus flexible qu'un modèle linéaire. Ainsi les modèles de Kouchi et de Karlberg s'ajustaient significativement mieux aux données pondérales que le modèle de Count.

Parmi les deux modèles non-linéaires à 3 paramètres, celui de Karlberg s'ajustait très significativement mieux que celui de Kouchi.

Sur ces données staturo-pondérales infantiles, le modèle linéaire à 4 paramètres de Reed 1, s'ajustait très significativement mieux que le modèle non-linéaire à 3 paramètres de Karlberg. En effet la flexibilité d'un modèle dépend en grande partie du nombre de paramètres qu'il contient.

Il ne faut toutefois pas augmenter outre mesure le nombre de paramètres. Le modèle de Reed à 5 paramètres ne s'ajustait pas significativement mieux aux données pondérales que la version à 4 paramètres.

Par ailleurs, la modélisation de la croissance a été développée à l'origine dans un objectif de réduction de la dimensionnalité de données de croissance, c'est à dire dans le but de résumer un nombre important de mesures en un petit nombre de paramètres.

Tableau 1: Variance résiduelle (en kg^2) des modèles ajustés à la croissance pondérale infantile

Modèle	Moy.	E.-type	Min.	Méd.	Max.	p
Count	0.1382	0.1298	0.0013	0.0902	0.6800	0.015
Kouchi	0.1323	0.1300	0.0006	0.0879	0.6829	0.0001
Karlberg	0.0971	0.1101	0.0020	0.0745	0.5826	<0.0001
Reed 1	0.0714	0.0805	0.0005	0.0393	0.4610	0.108
Reed 2	0.0688	0.0841	0.0006	0.0405	0.4815	

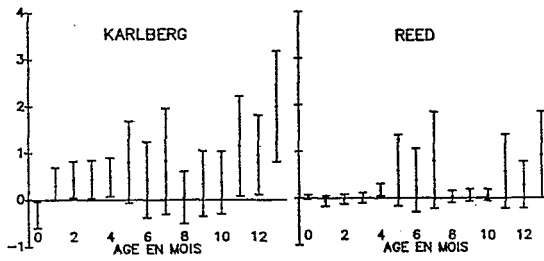


Figure 4: Résidus staturaux moyens en fonction de l'âge

En choisissant un modèle à peu de paramètres, la modélisation permet de décrire la tendance générale d'une croissance en ignorant des variations transitoires dues par exemple à des pertes de poids ou des erreurs de mesure.

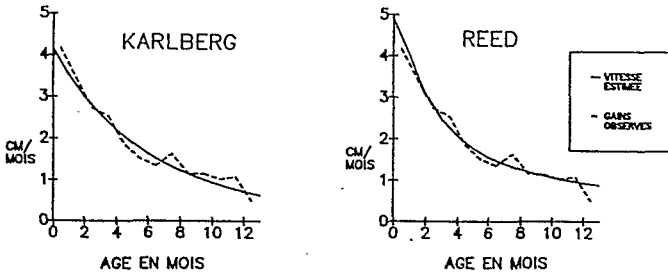


Figure 5: Courbes de vitesse de croissance staturale moyenne estimées par modélisation comparées aux gains staturaux mensuels

Tableau 2: Variance résiduelle (en cm^2) des modèles de Karlberg et de Reed ajustés à la croissance staturale infantile

Modèle	Moy.	E.-type	Min.	Méd.	Max.	p
Karlberg	0,9239	0,6698	0,0261	0,7311	3,5675	<0.0001
Reed	0,6353	0,4636	0,0181	0,4968	2,2813	

Références bibliographiques

- Berkey CS, Reed RB. A model for describing normal and abnormal growth in early childhood. *Hum Biol* 1987;59 : 973-987.
- Cornu A, Delpuech F, Simondon F, Tchibindat F, Faucon LD, Massamba JP, Goma I, Olivola D. Enquête nationale sur l'état nutritionnel des enfants d'âge préscolaire au Congo. Coll. Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris, 1990.
- Cornu A, Delpuech F, Simondon F, Tchibindat F, Massamba JP, Goma I, Olivola M, Enquête nationale sur l'état nutritionnel des enfants d'âge préscolaire au Congo. *Bull OMS*, 1991 ; 69(5) : 561-571.
- Count EW. Growth patterns of the human physique: an approach to kinetic anthropometry. Part I. *Hum Biol* 1943 ; 15 : 1-32.
- Karlberg J. On the modelling of human growth. *Stat Med* 1987 ; 6 : 185-192.
- Kouchi M, Mukherjee D, Roche AF. Curve fitting for growth in weight during infancy with relationships to adult status, and familial associations of the estimated parameters. *Hum Biol* 1983 ; 37 : 245-263.

- Kouchi M, Roche AF, Mukherjee D. Growth in recumbent length during infancy with relationships to adult status and familial associations of the estimated parameters. *Hum Biol* 1983 ; 57 : 449-472.
- Simondon KB. Modélisation de la croissance pondérale entre 0 et 14 mois d'enfants du Congo rural: application à la détection précoce d'enfants à haut risque de retard de taille. Mémoire de DEA, Université de Paris-Sud, Paris, 1988.
- Simondon KB. Prédiction des malnutritions protéino-énergétiques par la croissance infantile au Congo rural et à Pikine, Sénégal. Thèse présentée pour l'obtention du Doctorat en Statistique et Santé, Université de Paris Sud, Paris, 1991.
- Simondon KB, Simondon F, Cornu A, Delpuech F. The utility of infancy weight curves for the prediction of growth retardation in preschool children. *Acta Paediatr Scand* 1991 ; 80 : 1-6.
- Simondon KB, Simondon F, Maire B, Delpuech F, Cornu A. Comparison of five growth models on weight data from Congolese infants between birth and age 13 months. *Am. J. Hum. Biol.* à paraître.