

Une approche par modélisation de l'élaboration du rendement des ligneux fruitiers : cas du kiwi et du pêcher

R HABIB
INRA
Écophysologie et horticulture
Domaine Saint-Paul
Site Agroparc
84914 Avignon cedex 9
France

D AGOSTINI
INRA
SRA de San Giuliano
20230 San Nicolao
France

M GÉNARD
INRA
Écophysologie et horticulture
Domaine Saint-Paul
Site Agroparc
84914 Avignon cedex 9
France

Reçu : mars 1994
Accepté : juin 1995

Modélisation de l'élaboration du rendement de ligneux fruitiers (kiwi et pêcher).

RÉSUMÉ
Les modèles d'élaboration du rendement proposés depuis quelques années ne prennent pas en compte, en général, des paramètres tels que la variabilité et la qualité de la production. Ces dimensions, considérées comme essentielles, ont été intégrées dans les travaux de modélisation rapportés, qui portent respectivement sur la variabilité de la floraison chez le kiwi et sur la qualité du fruit chez le pêcher. Le modèle développé pour le kiwi permet de décrire le déroulement des différents processus conduisant au développement de la fleur, par les événements phénologiques associés. Quatre étapes de la modélisation ont été définies sur cette base. À partir de certaines hypothèses permettant d'expliquer la variabilité de la qualité de la pêche et certaines corrélations observées entre sucres solubles et acides, un modèle à compartiments, dont une des variables d'entrée est la vitesse de croissance du fruit, a été élaboré. Deux versions de ce modèles sont présentées.

Modeling yield patterns in fruit trees (kiwi and peach).

ABSTRACT
Yield pattern models proposed in recent years generally do not take parameters such as production variability and quality into consideration. These essential factors were included in the models described here — which were designed to simulate flowering variability in kiwi and fruit quality in peach. The kiwi model describes processes leading to flower development through associated phenological events. Four modeling steps are defined on this basis. A compartmental model, which includes fruit growth rate as an input variable, was designed on the basis of certain hypotheses explaining quality variations in peach and known correlations between soluble sugars and acids. Two versions of these models are presented.

Modelización de la elaboración del rendimiento de los frutales leñosos (kiwi y melocotonero).

RESUMEN
Los modelos de elaboración del rendimiento propuestos desde hace algunos años no toman en cuenta, en general, parámetros como la variabilidad y la calidad de la producción. Estas dimensiones, consideradas como esenciales, han sido integradas en los trabajos de modelización restituidos, que tratan respectivamente de la variabilidad de la floración del kiwi y de la calidad del fruto del melocotonero. El modelo desarrollado para el kiwi permite describir el desarrollo de los diferentes procesos que conducen al desarrollo de la flor por los acontecimientos fenológicos asociados. Cuatro etapas de la modelización han sido determinadas sobre esta base. A partir de ciertas hipótesis permitiendo explicar la variabilidad de la calidad del melocotón y ciertas correlaciones observadas entre azúcares solubles y ácidos, se elaboró un modelo con compartimentos, cuya una de las variables de entrada es la velocidad de crecimiento del fruto. Dos versiones de este modelo son presentadas.

Fruits, vol 50, n° 3, p 215-220
© Elsevier, Paris

MOTS CLÉS
Actinidia, Prunus persica,
rendement, floraison, qualité,
modèle de simulation.

KEYWORDS
Actinidia, Prunus persica,
yields, flowering, quality,
simulation models.

PALABRAS CLAVES
Actinidia, Prunus persica,
rendimiento, floración, calidad,
modelos de simulación.

● introduction

De nombreux modèles d'élaboration du rendement ont été proposés depuis une dizaine d'années. Ils sont en général fondés sur une description du fonctionnement de la plante. Ces modèles ne donnent souvent en sortie que des valeurs moyennes (poids moyens de fruits...) alors que la variabilité de ces valeurs est un élément important pour le producteur qui cherche à la diminuer. En outre, hormis le calibre, la qualité est rarement considérée.

Ces points sont intégrés dans des modèles de l'élaboration du rendement du kiwi et du pêcher (fig 1), en cours de construction aux laboratoires d'agronomie d'Avignon et de San Giuliano. Deux exemples de modélisation portant respectivement sur la variabilité de la floraison chez le kiwi et sur la qualité chez le pêcher sont présentés.

● modélisation de la floraison chez le kiwi

Chez le kiwi, la réussite de la pollinisation détermine le nombre d'ovules fécondés par fleur et ainsi la

croissance du fruit. Or cette réussite dépend de l'étalement de la floraison des pieds mâles et femelles. C'est pourquoi un programme de recherche a été entrepris sur la floraison de cette espèce.

La floraison d'une canne de kiwi est l'aboutissement de différents processus biologiques (dormance, différenciation florale, etc) qui se déroulent selon un ordre chronologique. Ces processus sont difficilement mesurables mais peuvent être décrits par des caractéristiques du développement de la plante telles que le débourrement et l'apparition des bourgeons floraux. L'objectif du modèle est de décrire le déroulement des différents processus par les événements phénologiques associés. Pour pouvoir décrire chacune des composantes à la fois par leur importance quantitative et leur dispersion dans le temps, deux approches ont été utilisées conjointement (fig 2) :

- une approche déterministe permettant d'estimer le nombre de bourgeons démarrés, le nombre de boutons floraux apparus (il y en a plusieurs par bourgeon), le nombre de boutons floraux après avortement ;

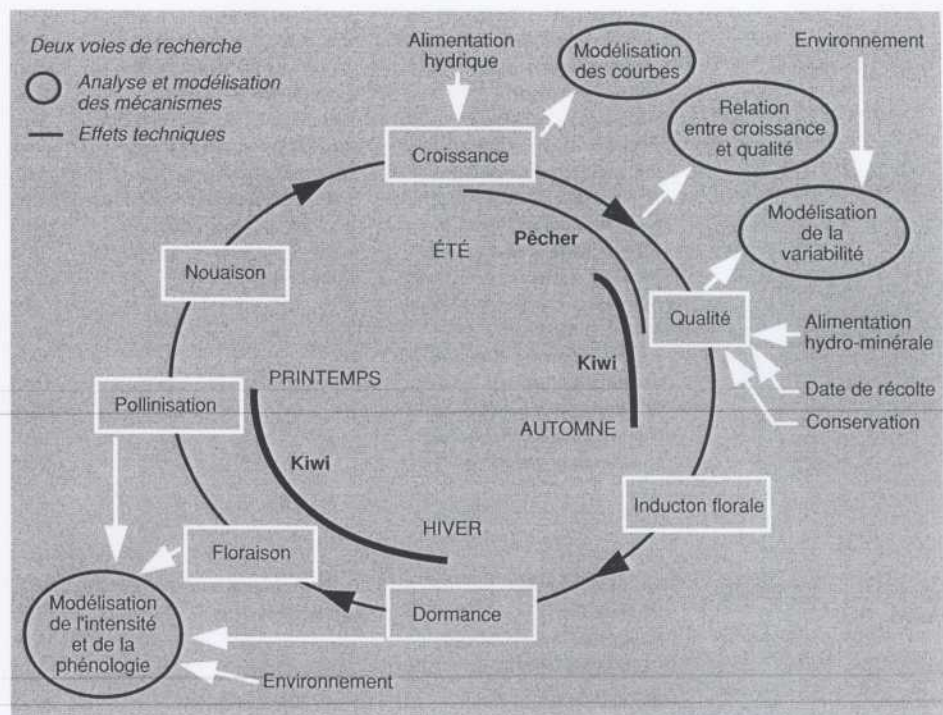


Figure 1
Organisation des programmes de recherche selon l'élaboration du rendement et selon le cycle de développement des ligneux fruitiers. L'espèce étudiée préférentiellement est mentionnée selon les parties du cycle.

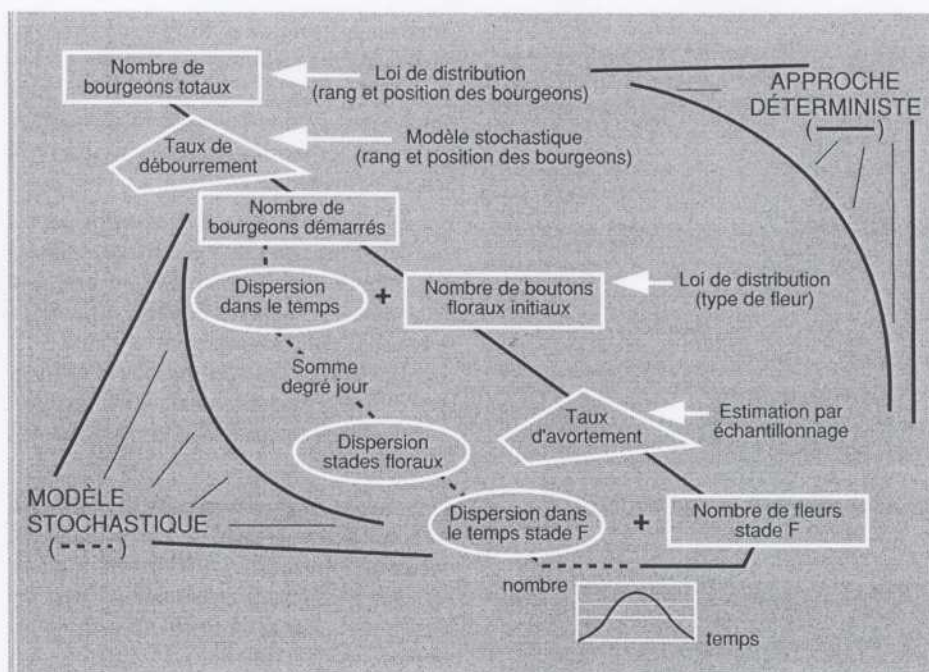


Figure 2
Modélisation de la floraison sur
une canne de kiwi.

– une approche stochastique permettant de décrire la dispersion de chacune de ces composantes.

étapes de la modélisation

étape 1

La canne de kiwi comprend un ensemble de bourgeons ordonnés dans l'espace, qui n'auront pas le même devenir selon leur situation plus ou moins basale sur le rameau (rang) et leur position au-dessus ou au-dessous de celui-ci (orientation). C'est pourquoi la position des bourgeons a été simulée en tirant aléatoirement la position du premier bourgeon, puis en appliquant pour les bourgeons suivants une loi phyllotaxique de 2/5.

étape 2

Les lois de débourrement des bourgeons sont établies par catégorie de bourgeons en fonction de l'orientation et du rang, à partir d'un modèle logistique :

$$Tx = K/[1 + \exp(-a(x-x_i))]$$

où Tx est le taux de débourrement, x une somme de degrés jours comptabilisés au-dessus d'une valeur seuil de 9°C, K le taux maximal de débourrement, a l'accroissement relatif du taux

de débourrement lorsque la vitesse de débourrement est maximale et x_i la valeur de x associée à cette vitesse maximale.

Ce modèle permet d'obtenir à la fois l'intensité du débourrement et le délai nécessaire à sa réalisation.

étape 3

L'apparition des boutons floraux est très rapide après le débourrement. À défaut de modèle déterministe, la loi de distribution du nombre de boutons floraux est établie par échantillonnage.

étape 4

Le développement de la fleur est décomposé en six stades :

- 1 : débourrement des boutons floraux ;
- 2 : bouton floral au stade 10 mm de diamètre ;
- 3 : ouverture des sépales ;
- 4 : moitié de la surface de la fleur couverte par les pétales ;
- 5 : fleur épanouie ;
- 6 : chute des pétales.

Le développement de la fleur est considéré comme un processus probabiliste consistant en l'accumulation de petites quantités de temps actif

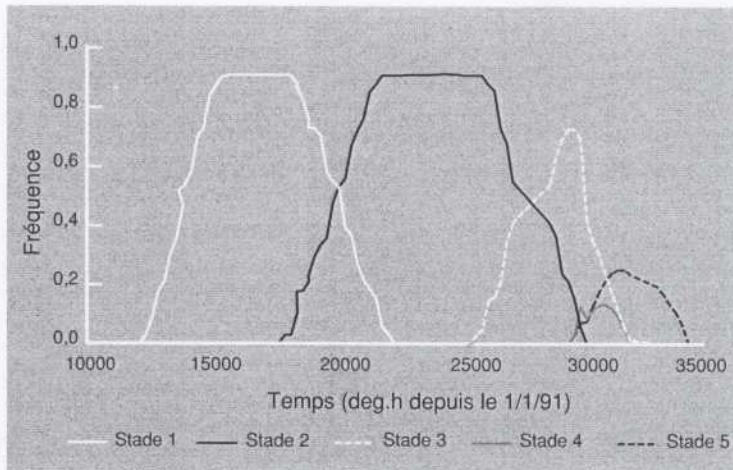


Figure 3
Simulation de l'évolution temporelle de la proportion de fleurs dans les différents stades floraux (kiwi).

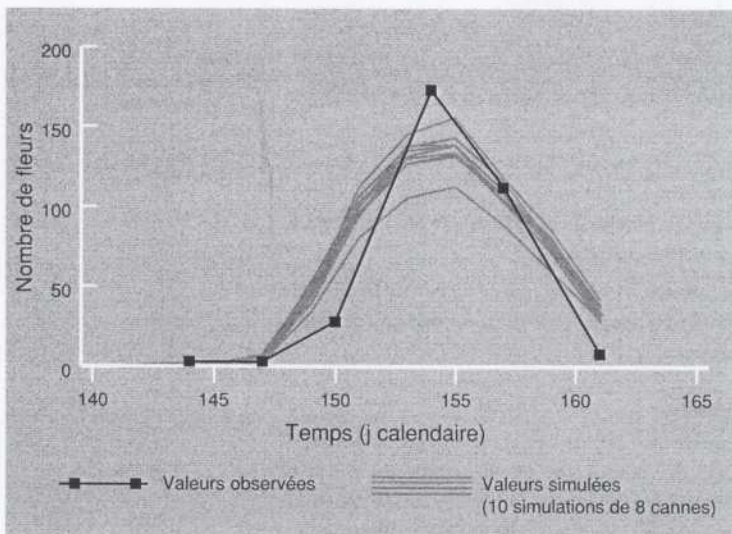


Figure 4
Dispersion de la floraison : comparaison des valeurs ajustées et observées (kiwi).

Tableau I
Coefficients de corrélation (r) entre différents paramètres de la qualité chez la pêche.

	Saccharose		Acide citrique		Acide malique	
	observé	simulé	observé	simulé	observé	simulé
Sucres réducteurs	-0,33	-0,19	-0,52	-0,69	-0,36	-0,5
Saccharose			-0,66	-0,84	0,91	0,94
Acide citrique					-0,68	-0,97

exprimé en degré-heure. À un moment t , l'état de développement de la fleur est représenté par $S(t)$, quantité de temps actif accumulée par l'organe. La distribution de la probabilité de $S(t)$ est simulée par une distribution logistique. Lorsque $S(t)$ est compris entre deux valeurs seuil c_{k-1} et c_k , la fleur est au stade k .

Les six valeurs de c_k et un paramètre lié à la distribution de probabilité de $S(t)$ ont été évalués par ajustement non linéaire. Les proportions de fleurs dans les cinq premiers stades, estimées par le modèle, sont présentées sur la figure 3. La comparaison des données simulées et observées dans différentes expérimentations montre que le modèle rend bien compte de la variabilité de la floraison.

Ces résultats de dispersion associés aux estimations de nombre de boutons floraux (étape 3) et de leur taux d'avortement permettent de simuler l'évolution temporelle du nombre de fleurs dans chaque stade. Le cas du stade « fleur épanouie » est présenté sur la figure 4.

● modélisation de la qualité biochimique de la pêche

Dans un contexte de forte concurrence, une meilleure adaptation des productions aux exigences de qualité des consommateurs est une nécessité. C'est pourquoi des recherches ont été entreprises sur la qualité de la pêche.

Dans une première étape, il a été montré qu'il existait, sur plusieurs variétés, une variabilité de la qualité entre fruits d'un arbre comparable ou supérieure à celle existant en moyenne entre différentes variétés. Cette variabilité de la qualité est notamment liée à celle de la croissance du fruit. En effet, les gros fruits ayant une longue et forte croissance ont des teneurs plus élevées en saccharose et en acide malique et des teneurs plus faibles en acide citrique que les petits fruits. En outre, il existe à la récolte de fortes corrélations entre certains paramètres de la qualité (tableau I).

Plusieurs hypothèses principales ont été émises pour expliquer la variabilité de la qualité et les corrélations observées entre sucres solubles et acides (fig 5a) :

1) les assimilats (sorbitol et saccharose) provenant du phloème peuvent être classés en deux ensembles ; le premier est utilisé pour l'élaboration des matières insolubles (parois...) ; le second alimente le pool de sucres solubles, et l'on considère que cette alimentation est proportionnelle à la croissance du fruit ;

2) les assimilats alimentant le deuxième pool sont stockés dans le fruit (saccharose) ou transformés en sucres réducteurs (sorbitol) par l'action de la sorbitol oxydase et de l'acide invertase ; les sucres réducteurs sont ensuite stockés dans le fruit ou transformés en saccharose par la sucrose synthase et la sucrose phosphate synthase ; le saccharose peut être transformé en sucres réducteurs par l'action de l'acide invertase ;

3) une partie des sucres réducteurs est utilisée pour la respiration *via* la glycolyse puis le cycle de Krebs au cours duquel il y a formation des acides citrique et malique.

Ces hypothèses ont été formalisées dans un modèle à compartiments dont une des variables d'entrée est la vitesse de croissance du fruit.

Une première version de ce modèle concerne les teneurs en sucre dans le fruit. Le schéma du modèle est présenté sur la figure 6 et les équations utilisées sont :

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= k_4 \times (1/p) \times dp/dt + k_3 \times s \\ &- k_2 \times t \times r - k_5 - k_6 \times (1/p) \times dp/dt \end{aligned}$$

$$\frac{ds}{dt} = k_1 \times (1/p) \times dp/dt - k_3 \times s + k_2 \times t \times r$$

où p, r et s sont respectivement le poids du fruit, sa teneur en sucres réducteurs et sa teneur en saccharose et $\frac{dr}{dt}$ est la dérivée de r en fonction de t. Les paramètres k_i sont constants. La transformation des sucres réducteurs en saccharose est supposée augmenter linéairement avec le temps (t). Les pertes par respiration par unité de masse sont supposées constantes pour la respiration d'entretien (k_5) et proportionnelles à la vitesse de croissance relative pour la respiration de croissance.

Les simulations réalisées donnent des courbes d'évolution des teneurs en sucres et en acides comparables à celles décrites dans la littérature (figs 5b et 5c).

Une seconde version modélise le système dans son ensemble, mais la partie sucre est simplifiée. Les équations utilisées sont :

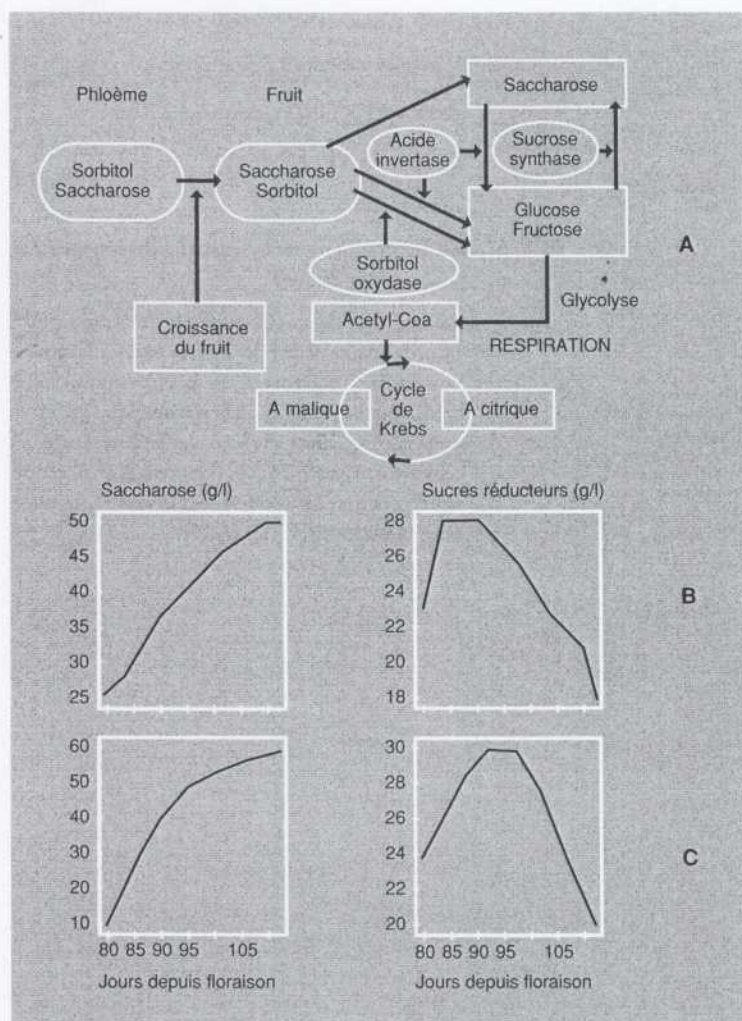


Figure 5 Modélisation de l'élaboration de la qualité gustative chez la pêche. A) Structure du modèle ; B) courbes d'évolution des teneurs en sucres (données de la littérature) ; C) courbes d'évolution des teneurs en sucres (simulations).

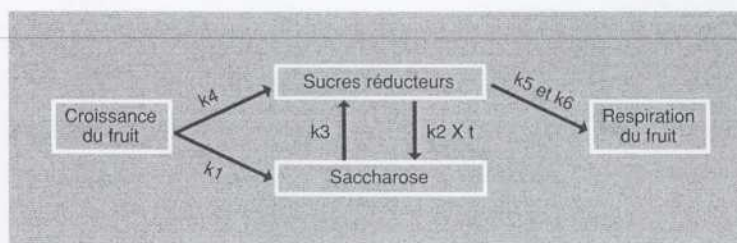


Figure 6 Schéma d'une version (teneurs en sucre dans le fruit) du modèle à compartiments dont une des variables d'entrée est la vitesse de croissance du fruit (pêche). Les paramètres k_i sont constants.

$$dr/dt = k1 \times (1/p) \times dp/dt - k2 \times r - k3$$

$\times r$ ($k3 \times r$ = pertes par respiration)

$$ds/dt = k1 \times (1/p) \times dp/dt + k2 \times r$$

$$dc/dt = k3 \times r - k4 \times c$$

$$dm/dt = k4 \times c$$

où c et m sont respectivement les teneurs en acides malique et citrique.

La variation des sucres et des acides a été simulée pour 50 fruits ayant des durées et des niveaux de croissance différents. Les teneurs en sucres et acides ont été estimées à la récolte pour un jeu de paramètres choisi et les corrélations entre ces teneurs ont été calculées. Les relations obtenues sont proches de celles généralement observées chez le pêcher (tableau I).

● conclusions

Ces quelques exemples d'utilisation de l'outil modélisation montrent que l'étude de l'élaboration du rendement peut être abordée en prenant en compte des dimensions essentielles telles que la variabilité et la qualité de la production. En outre, l'approche par modélisation permet de tester des hypothèses complexes qu'il est difficile d'étudier par une approche fondée uniquement sur l'analyse exploratoire ou l'expérimentation. Enfin, elle oblige le chercheur à définir un cadre conceptuel dans lequel il mènera sa réflexion lors de l'élaboration du modèle.