

Modélisation stochastique de la croissance et ses applications à l'étude de la croissance du *Spilanthes acmella L. (felimafana)*. I- Tiges principales.

*Stochastic modeling of growth and its application to the study of the *Spilanthes acmella L. (felimafana)* growth. I-Main stems.*

Auteurs:

VAVITSARA Marie Elodie*: Université de Mahajanga, B.P. 652, 401 Mahajanga, MADAGASCAR,
e-mail: vavitsara@gmail.com, Tél : +261341995744 / +261320414970

RANARIJAONA hery lisy Tiana : Université de Mahajanga, B.P. 652, 401 Mahajanga, MADAGASCAR
e-mail: herylisy-simon@moov.mg

REMERCIEMENT

Au Service de Coopération et d'Action Culturel (SCAC) via l'Ambassade de France à Madagascar, qui a financé ce travail.

Au laboratoire UMR AMAP, CIRAD Montpellier FRANCE, pour leur collaboration.

Modélisation stochastique de la croissance et ses applications à l'étude de la croissance du *Spilanthes acmella* L. (*felimafana*). I- Tiges principales.

*Stochastic modeling of growth and its application to the study of the *Spilanthes acmella* L. (*felimafana*) growth. I-Main stems.*

M.E. Vavitsara (1), H.L.Ranarijaona (1)

(1) Université de Mahajanga, B.P. 652, 401 Mahajanga, MADAGASCAR

Résumé

L'étude de la croissance de *Spilanthes acmella* L. en rapport avec la biomasse apporte des idées sur l'optimisation de la production végétale. Dans cet article, un modèle mathématique de la croissance de la plante est présenté, basé sur une conception stochastique. L'expérience a été faite sur une culture en pots de 65 individus de *S. acmella* en 2011. Pour chaque individu, dix relevés de taille, nombre des entrenœuds, des feuilles et des fruits ont été faits à un intervalle régulier entre les mois de Mai et le mois d'Août. Les variations des différents paramètres ont été analysées en rapport avec la croissance des plantes. Le développement des méristèmes y est considéré comme régi par une succession de « tests d'accroissement » assortis chacun d'une certaine probabilité de réussite pour la formation d'un entrenœud. La construction d'une tige ou d'une branche est ici décrite par une loi de probabilité de type binomial. Le modèle produit très bien la distribution du nombre de phytomère et nombre de nœud par pied. Les probabilités de croissance trouvées pour l'axe principal ou A1 sont voisines de 0,9 (résultat obtenu par trois méthodes différentes) et celles des branches ou A2 sont de l'ordre de 0,95.

Lorsque les paramètres des lois de croissance ont été définis, un logiciel nous permet de construire graphiquement des *S. acmella* par une succession de tirages au sort, et cela avec toute la variabilité de structure qu'on peut observer dans la nature. La présente étude est la première sur les légumes feuilles malgache, notamment *S. acmella* en tenant compte de son architecture qui a pour objet de quantifier les facteurs écologiques qui influent sa croissance.

Mots clés: légume feuille, *Spilanthes acmella*, architecture, modélisation stochastique, probabilité.

ABSTRACT

The study of the growth of *Spilanthes acmella* L. related to biomass provides ideas on optimizing crop production. In this paper, a mathematical model of the growth of the plant is presented, based on a stochastic design. The experiment was conducted on a culture pot of 65 individuals of *S. acmella* in 2011. For each individual, ten statements size, internodes number, leaves and fruits were made at regular intervals between the months of May and August. The changes in various parameters were analyzed in relation to plant growth. The meristem development is regarded as governed by a series of "tests increase" each matching a certain probability of success for the formation of an inter-node. The construction of a stem or branch is here described by a probability law binomial type. The model produces very well the distribution of the number of phytomer and node number per foot. The growth probabilities found for the main axis 1 are close to 0.9 (result obtained by three methods type) and those of the branches are of the order of 0.95.

When the parameters of the growth laws have been defined, software allows us to construct a graphically models of *S. acmella* by successive draw, and it with any structural variability can be observed in nature. This study of the leafy vegetables is the first on Madagascar, including *S. acmella* taking into account its architecture that aims to quantify the environmental factors that affect growth.

Keywords: leaf vegetable, *Spilanthes acmella*, architecture, stochastic modeling, probability.

1. INTRODUCTION

L'organogenèse ou la production d'organes par les méristèmes et la photosynthèse ou la production de biomasse par les feuilles sont le double mécanisme résultant de la complexité de l'architecture d'une plante. On appelle architecture du *Spilanthes acmella* l'arrangement de la structure des branches sympodiales (fructifères) qui composent la plante. Autrement dit, « le développement architectural est le déroulement d'une séquence précise et ordonnée d'événements, faisant appel à la répétition et à l'intégration de divers « niveaux d'organisation » : phytomère, unité de croissance, axe feuillé et unité architecturale » (Barthélémy *et al.*, 2007). Dans cette étude, elle permet de définir des critères précis de sélection pour la croissance optimale végétale. La croissance végétale représente ainsi un modèle

dynamique qui fonctionne en boucle de rétroaction et engendre mécaniquement des effets quantitatifs bien établis.

Par ailleurs, « la modélisation est l'adaptation mathématique des connaissances de la botanique, de l'agronomie et de la physiologie pour qu'elles puissent fournir les paramètres nécessaires aux équations dynamiques qui décrivent la croissance de la plante » (De Reffye *et al.*, 2008).

Toutefois, la modélisation du développement végétal (création des organes par les méristèmes) a été spécialement étudiée sous forme de grammaires stochastiques.

Les agronomes ont cherché à simuler la production végétale, sous l'angle de la croissance, pour les besoins de l'agriculture. « Le modèle GreenLab consiste à développer le modèle de croissance végétale générique » (De Reffye, 2009). « L'application du modèle GreenLab a commencé sur la croissance du caféier *Coffea robusta* » (De Reffye, 1979). « La validation du modèle GreenLab a été déjà réalisée sur de nombreuses cultures (céréales, légumes) en France, en Chine et aux Pays-Bas » (De Reffye, 2009). Elle est souvent appliquée aux arbres (Guo H. *et al.*, 2009), son application en agriculture existait déjà en Chine : sur les arbres fruitiers (Wang F. *et al.*, 2009), sur la tomate (Zhang B. *et al.*, 2009), sur le cotonnier (De Reffye *et al.*, 1988 ; Franquin, 1970 ; et Dong *et al.*, 2009), tandis qu'elle est la première à Madagascar. Nous avons adapté la modélisation au cas de *S. acmella*.

Le but de cette étude est de préciser notre connaissance de l'architecture du *S. acmella* par une méthode nouvelle faisant appel au calcul des probabilités. Il s'agit d'une conception stochastique (probabiliste) de la description et de la modélisation des divers processus qui vont entraîner la construction de l'architecture de la plante, notamment la croissance de la tige et des rameaux, et la ramification au niveau des nœuds déjà formés.

2. MATERIELS ET METHODES D'ETUDES

2.1. Matériel végétal

S. acmella est une plante herbacée la plus réputée et cultivée à Mahajanga parmi les légumes feuilles. C'est un légume feuille le plus consommé par la population de Mahajanga et à Madagascar. Elle est originaire de l'Amérique méridionale, c'est une plante annuelle, elle appartient à la famille des Asteraceae.

Description morphologique : c'est une plante caractérisée des feuilles simples, à phyllotaxie opposées décussées, une floraison terminale, les fruits sont des akènes. La cime de *S. acmella* est l'ensemble formé par la tige principale et les branches ou ramifications issues du développement des méristèmes latérales de la tige principale.

Modèle architectural : la plante est au début monocaule, elle élabore ensuite une inflorescence terminale. Les méristèmes latérales élaborent ultérieurement des ramifications sympodiales, ce qui permet le développement de la plante entièrement sympodiale.



Figure 1 : Illustration du matériel végétale, *Spilanthus acmella* L.

Illustration material plant, Spilanthus acmella L.

2-2- Méthodes d'études

2-2-1- Protocole et dispositif expérimentale

L'expérimentation a été réalisée à l'Université de Mahajanga et a duré trois mois et demi, de 20 Avril 2011 au 01 Août 2011. Le semis a été réalisé le 20 Avril 2011, les graines ont été semées en foule et puis repiquées après 3 semaines (21 jours). Le repiquage a été faite dans des 65 pots de 20 cm de hauteur, 59 cm de diamètre, muni chacun du substrat sans matière organique. Chaque pot contient un seul individu pour éviter tout effet de compétition entre pieds.

Pour chaque individu, un comptage du nombre de tous les phytomères (entre-nœuds, feuilles, fruits) sur la tige principale ainsi que sur toutes les ramifications, a été réalisé durant le développement de la plante et jusqu'à la fin du cycle.

2-2-2- Méthodes d'analyse des données

a- Le modèle GreenLab

Cet algorithme permet d'appliquer les méthodes classiques d'optimisation qui ont cours dans les modèles dynamiques. L'architecture de la plante observée à un moment donné, et qui a stocké et distribué par accumulation dans ses organes l'historique de la production issue de la photosynthèse, fournit par inversion du modèle les paramètres du processus de croissance. « A partir des mesures prélevées sur les plantes dans un peuplement, on peut ainsi calculer les paramètres du développement et des fonctions attachées aux interactions sources – puits » (De Reffye, 2009). Selon le même auteur, les interactions croissance – développement sont prises en compte et l'organogénèse est alors dépendante de la photosynthèse, principalement sous la dépendance du rapport entre l'offre en assimilats produits par les feuilles et la demande en biomasse des organes en expansion. Le modèle de croissance végétale générique GreenLab consiste à classer les organes d'une plante par cohortes selon leur ordre d'apparition. Dans une même cohorte, « tous les organes de même nature sont identiques et leur nombre est calculé par les règles de production de la grammaire stochastique » (De Reffye, 2009).

L'analyse des données fait appel de manière constante au calcul des probabilités. Dans le texte qui suit, nous appliquons un certain nombre de formules découlant de l'utilisation de cet outil mathématique.

b- Le modèle mathématique :

Le modèle mathématique reposait sur les constatations suivantes : un axe végétatif est formé par une succession d'entre-nœuds résultant du fonctionnement du méristème terminal. Si l'on prend des axes identiques et de même âge, et que l'on note au cours du temps l'augmentation du nombre d'entre-nœuds de ces axes, on constate que ce nombre est variable. Ainsi la population obtenue possède une distribution caractéristique du nombre d'entre-nœuds par axe. Cette distribution évolue au cours du temps. La variation observée résulte du fait que les méristèmes des différents axes n'ont pas une croissance continue et synchrone.

Il y a en effet des décalages dans les élongations des entre-nœuds qui résultent de pause, plus ou moins longues, propres aux conditions locales subies par un méristème donné. On peut alors considérer que le méristème est soumis régulièrement à une succession de « tests d'accroissement » et que, lors de chacun d'entre eux, l'évènement « élongation » se produira ou ne se produira pas, et cela avec une certaine probabilité. Ainsi, le fonctionnement du méristème est assimilable à une succession de tirages au sort

affectés chacun d'une certaine probabilité de donner un résultat positif. On pourra donc utiliser les règles du calcul des probabilités pour modéliser ce fonctionnement.

Il en résulte une nouvelle notion, celle de « dimension » du rameau formé par un méristème : c'est le nombre de tests d'accroissement subis par le méristème. La taille réelle d'un rameau, comptée en nombre d'entre-nœuds, ne peut donc être qu'égale ou inférieure à sa dimension. Elle lui est égale seulement si tous les tests d'accroissement ont donné un résultat positif.

La croissance d'une population d'axes végétatifs identiques peut alors être décrite par un processus aléatoire simple. A chaque test d'accroissement « i », on fait correspondre une probabilité « b_i » d'élongation de l'entre-nœud formé. Il est intéressant de constater que cette conception n'est pas nécessairement liée au temps. Ainsi si les conditions locales sont plus ou moins bonnes (climat, nutrition), le test d'accroissement pourra comprendre à une durée plus ou moins longue. Par contre, s'il existe un temps minimum pour la formation et l'élongation d'un entre-nœud, le temps maximum n'est pas défini. A chaque étape de croissance de la population, on peut associer une moyenne et une variance de la distribution instantanée du nombre d'entre-nœuds qui lui correspond. « On peut parfaitement décrire le processus si on connaît la liaison moyenne-variance ». (De Reffye *et al.*, 1988)

* **La distribution du nombre de phytomères** observés sur les tiges est une loi binomiale de paramètre N, b, puisque ce nombre est obtenu par une succession de tirages aléatoires et indépendants et de probabilité constante égale à b. Si N est le nombre de test et b la probabilité d'élongation, la moyenne \bar{X} vaut :

$$\bar{X} = Nb \quad (1)$$

Et la variance V :

$$V = (1 - b) \bar{X} = Nb(1 - b) \quad (1')$$

* **La liaison moyenne-variance** est alors représentée par une droite. Nous verrons que cette situation est formellement celle qui se produit chez *S. acmella*.

* **Calcul pour la cime d'un arbre**

Le calcul du nombre de test et des probabilités d'élongation nécessiterait normalement un suivi de la croissance de la population. On peut arriver au même résultat en tirant parti de l'architecture des cimes en observant celles-ci du sommet vers la base, en commençant à partir du point où les entre-nœuds deviennent visibles.

Supposons que nous disposons de T cimes résultant du même processus de croissance, et constituées de ramifications d'ordre 1 et 2. Supposons en outre que la probabilité d'élongation des axes d'ordre 1 est constante et vaut P , et que celle des axes d'ordre 2 est constante et vaut b . Ce qui revient à dire que les rameaux de la cime sont identiques, au décalage de formation près. Mais si les probabilités sont les mêmes, les rythmes de création des entre-nœuds peuvent être différents. Ainsi, pendant que l'axe 1 a subi N tests d'accroissement entre le sommet et l'entre-nœud qui porte l'axe 2, ce dernier pourra subir $W \times N$ tests, si W est le paramètre qui définit ce que nous appellerons le « rapport de rythme ». W peut être inférieur, égal ou supérieur à un.

Finalement, nos T cimes pourront être décrits de façon dynamique par quatre paramètres : trois constantes P , b et W , et une variable, N .

Les trois paramètres P , B , W sont, au départ, des inconnues. Il nous faut donc trois relations pour les calculer. Pour cela, nous allons observer sur les différentes plantes tous les rameaux qui sont branchés à la même distance K (entre-nœuds) du sommet : nous mesurerons leur taille, et nous calculerons la moyenne et la variance des valeurs obtenues.

Appelons TK le point de branchement de ces rameaux (Figure 2). En fait, compte tenu du fonctionnement aléatoire de la tige principale, « l'étage » TK ainsi choisi ne correspond pas à une seule « dimension », mais théoriquement à une infinité de valeurs possibles.

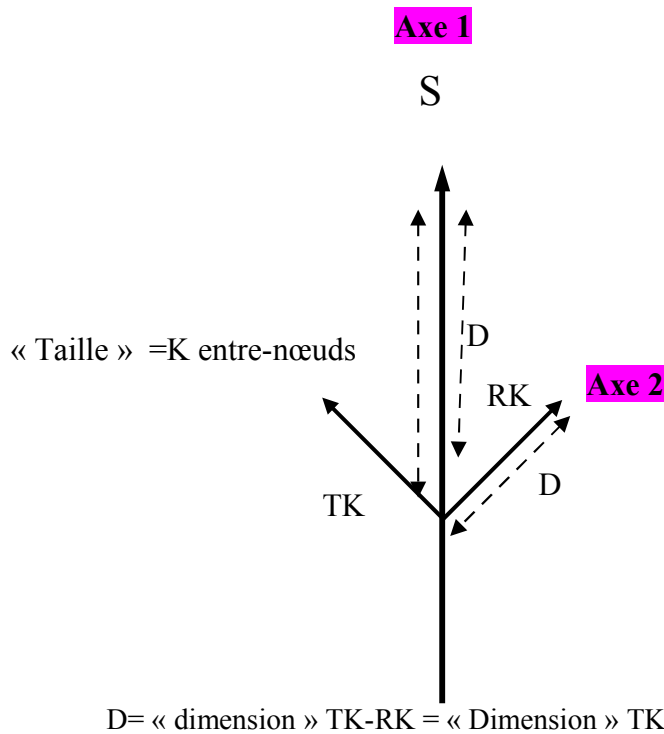


Figure 2. Schéma du branchement d'un axe d'ordre 2 sur un axe d'ordre 1.

Diagram for connecting an order 2 axis to an order 1 axis.

La « dimension » dans ce cas varie selon la loi binomiale négative (K, P), la valeur moyenne du nombre d'unités de dimension qui correspond au nombre K d'entre-nœuds réellement observés sera alors :

$$N = \frac{K}{P}$$

Avec une variance :

$$V = \frac{K(1 - P)}{P^2}$$

Connaissant la « dimension » moyenne N correspondant au nombre K d'étages qui séparent le sommet du point de branchement, on pourra déterminer la distribution de la taille des axes 2 de l'étage TK, puisque ceux-ci ont nécessairement subi le même nombre d'unités de dimension (Figure 2).

On obtient :

$$\bar{X} = \frac{WKb}{P} \quad (2)$$

$$V = \frac{WKb(1-b)}{P} + \frac{W^2K b^2 (1-P)}{P^2} \quad (3)$$

Cette variance V est dite variance totale de la population des axes d'ordre 2 branchés à K étages du sommet. Dans la pratique, elle sera estimée par la valeur classique :

$$V = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{T - 1}$$

Il nous manque encore une relation pour calculer nos trois inconnues. Pour cela, nous allons calculer la variance interne moyenne des différents couples constitués chacun par le rameau du même ordre mais branché L entre-nœuds plus bas, ces deux rameaux étant pris sur la même plante. Soient X_1 et X_2 ces rameaux. La variance interne pour une plante peut se mettre sous la forme suivante :

$$v_i = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2}{2 - 1}$$

ou bien, sous une forme plus simple :

$$v_i = \frac{(X_1 - X_2)^2}{2(2 - 1)}$$

La variance interne moyenne pour T plantes est :

$$V_i = \frac{\sum (X_1 - X_2)^2}{2T}$$

Cette variance est plus faible que celle donnée par deux rameaux pris dans les mêmes conditions sur deux tiges différentes. En effet du sommet jusqu'à l'entre-nœud K la succion des tests d'accroissement est la même pour les deux rameaux. On peut démontrer que :

$$V_i = \frac{(K + L/2)}{P} Wb(1-b) + \frac{b^2 W^2 L(1-P)}{2P^2} + \frac{W^2 L^2 b^2}{2P^2} \quad (4)$$

Un cas particulier est celui où $L=0$ (verticille de rameaux), c'est le cas du *S. acmella*, on a alors :

$$V_i = \frac{WKb(1-b)}{P}$$

Cette relation est utilisée chez le caféier (de REFFYE, 1981a), qui présente justement la particularité de posséder des verticilles. On remarque que dans le deuxième terme de la variance totale V a disparu.

Nous avons donc finalement \bar{X} , V , V_i , exprimés en fonction de K , L , P , b et W et L étant fixés, nous pouvons donc calculer les trois inconnues P , b , et W en fonction de X , V et V_i .

Pour faciliter les calculs, on pose :

$$U = \frac{Wb}{P} = \frac{\bar{X}}{K}$$

Cela donne

$$1-b = \frac{1}{\bar{X}} \left[V_i - \frac{L}{2} \left(\frac{V}{K} + LU^2 \right) \right]$$

$$1-P = \frac{1}{\bar{X}^2} \left[K \left(V - V_i + \frac{L^2U^2}{2} \right) + \frac{VL}{2} \right]$$

$$W = \frac{\bar{X}P}{Kb}$$

On peut donc calculer les paramètres de la croissance des cimes à partir de l'observation de leur variabilité, si cette croissance suit le modèle proposé.

Simulation graphique du *S. acmella* : avec le logiciel MATLAB

Le logiciel MATLAB est utilisé. Il s'agit d'un programme informatique conçu pour simuler la croissance et l'architecture de n'importe quel végétal, au sens le plus large. Le logiciel peut indifféremment tracer des plantes herbacées, des fleurs, des buissons, des arbustes ou des arbres avec un degré de précision qui ne dépend que de l'investissement fait dans la mesure des éléments du végétal. Il permet également d'obtenir une présentation fidèle de la plante calculée. Lorsque les différentes probabilités de fonctionnement ont été déterminées par le calcul, il nous est possible de dessiner un *S. acmella* avec toute sa variabilité, grâce à l'ordinateur : celui-ci n'a plus qu'à simuler le développement des différents axes en affectant de manière aléatoire une valeur 0 ou 1 au résultat de chaque test avec la probabilité convenable.

b-Liaison moyenne-variance de la distribution du nombre d'entre-nœuds de la tige principale pendant la période de croissance.

Mean-variance of the internode number distribution on the main stem during the growing period.

Moyenne X	Variance V
0	0
3,2	0,2
4,2	0,2
5,4	0,3

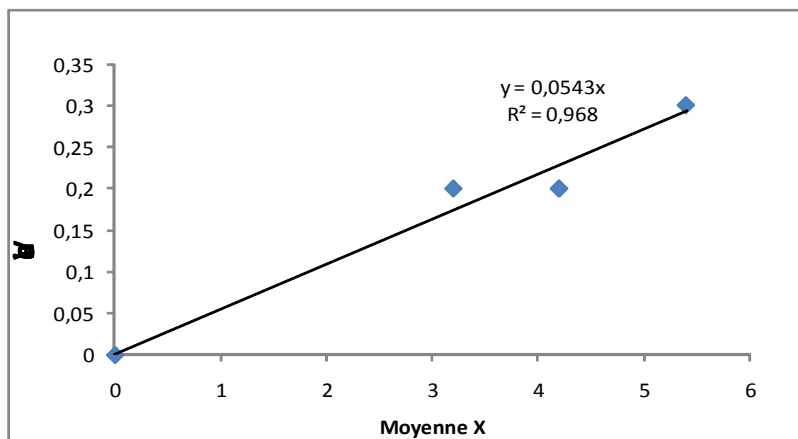


Figure 3. Liaison moyenne-variance trouvée sur les valeurs de la « taille » (nombre d'entre-nœuds) des tiges du *S. acmella* pendant la période de croissance.

*Mean-variance relation found on the values of the "size" (number of internodes) of the *S. acmella* plant stems, during the growth period.*

b) Distribution du nombre des entre-nœuds par tige en fin de croissance

Le tableau 2 montre la distribution obtenue en ce qui concerne le nombre d'entre-nœuds par tige après l'arrêt de la croissance.

TABLEAU II

Distribution du nombre des entre-nœuds sur la tige principale de *S. acmella*

Distribution of the internode number on the main stem of S. acmella

Nombre d'entre-nœuds	5	6
Nombre d'individus	15	20

Cette distribution présente une moyenne $M=5,5714$ et une variance $V=0,2521$

On peut considérer qu'il s'agit d'une loi binomiale de paramètres P et N :

$$P = 1 - (0,2521/5,5714) = 0,954$$

Et

$$N = \frac{5,5714}{0,954} = 5,84$$

Soit sensiblement six tests de croissance : la « dimension » des tiges est de six.

En opérant un regroupement des classes à faible effectif, on peut tester la validité de l'ajustement à la loi binomiale (6, 0,954). La probabilité d'obtenir une valeur x de nombre d'entre-nœuds, donc d'obtenir une succession de x résultats positifs après N tests d'accroissement, est d'après cette loi de :

$$P_{(x)} = C_N^x p^x (1 - p)^{N-x}$$

En multipliant cette probabilité par 35, taille de l'échantillon du *S. acmella*, on obtient l'effectif théorique attendu de *S. acmella* présentant x entre-nœuds. Le tableau III permet de comparer cette valeur avec celle réellement observée. La figure 4 présente les histogrammes correspondants.

c) Ajustement du nombre d'entre-nœuds de la tige à une loi binomiale

Le tableau 3 montre l'ajustement du nombre d'entre-nœuds de la tige à une loi binomiale

TABLEAU III

Ajustement du nombre d'entre-nœuds de la tige à une loi binomiale (6, 0,954).

Adjustement of the number of internodes on the stem to a binomial law (6, 0.954)

Classe	Nombre. observé	Nombre. Théorique
--------	--------------------	----------------------

		(calculé)
4	0	2,7
5	15	11,6
6	20	20,3

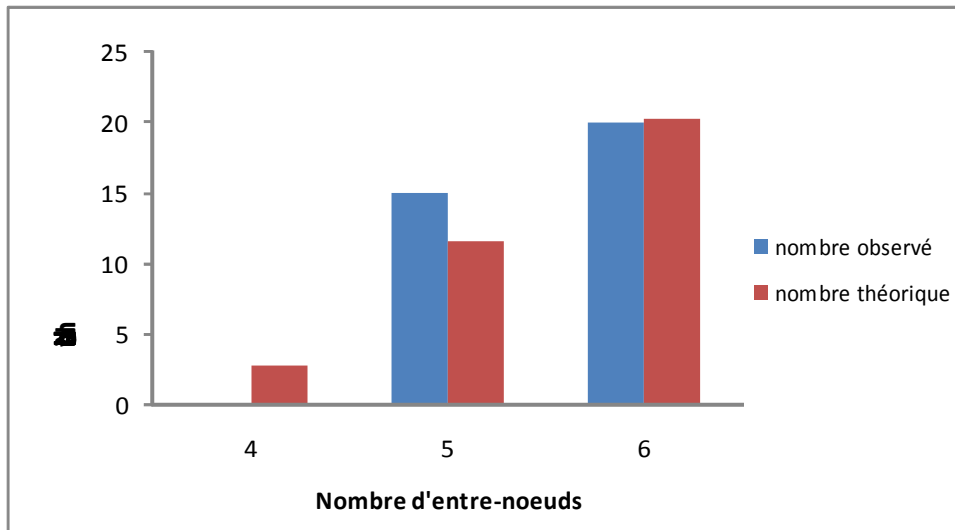


Figure 4. Histogramme de la « taille » de l'axe principal observée sur 35 individus de *S. acmella* après l'arrêt de la croissance. Comparaison avec la valeur calculée pour un ajustement à une loi binomiale.

*Histogram of the "size" of the main axis observed on 35 individuals of *S. acmella* after cessation of the growth. Comparison with a calculated value for an adjustment to a binomial law.*

La croissance de l'axe principal du *S. acmella* se réalise avec des probabilités d'élongation constantes et égales à 0,954 au cours du temps. On peut considérer que tout se passe comme si le fonctionnement du méristème terminal était soumis à une succession de tops d'horloge réguliers, au nombre de six au total et qu'à chacun de ces tops se déroule un tirage aléatoire, qui décide si oui ou non un entre-nœud va se former, et ceci avec une probabilité de 0,954 de réussite à chaque fois.

3-2- La cime de *S. acmella* après l'arrêt de la croissance

Sur la cime de *S. acmella*, on pourra mesurer facilement le nombre d'entre-nœuds de branches sur chaque étage à partir du sommet vers la base. Dans notre cas, L=0 (verticille de rameau)

La résolution du système constitué par les équations (2), (3) et (4) permet de calculer facilement la P, b, W de la plante.

Dans le cas de *S.acmella*, selon l'analyse des cimes, nous avons :

Pour la cime de l'axe A2 sur l'axe A1 :

- la probabilité d'élongation de la tige $P = 0,87$
- la probabilité d'élongation des rameaux $b = 0,95$
- le rapport de rythme tige/rameaux $W = 0,84$

On remarque ici que la probabilité d'élongation des rameaux est plus forte que celle des tiges, par contre le rythme de la croissance des rameaux n'est pas très différent de celui de la tige.

Ainsi, on peut parler de la validité de la comparaison des valeurs de P calculées par les trois méthodes qui sont :

- la méthode de la liaison moyenne-variance : $P=0,9457$
- la distribution de la taille des tiges en fin de croissance : $P=0,954$
- et le calcul des cimes : $P=0,87$

3-3- Simulation graphique du *S.acmella* : avec le logiciel MATLAB

La figure suivante montre le résultat d'une simulation de l'architecture du *S. acmella* par le logiciel Groups dans MATLAB. Il s'agit d'une représentation de 5 individus de *S. acmella* obtenus par tirage aléatoire. C'est une simulation complète de la plante, on peut y observer la variabilité d'un pied à un autre en ce qui concerne le nombre d'entre-nœuds des tiges principales, le nombre d'entre-nœuds et la dispositions de divers branches fructifères.

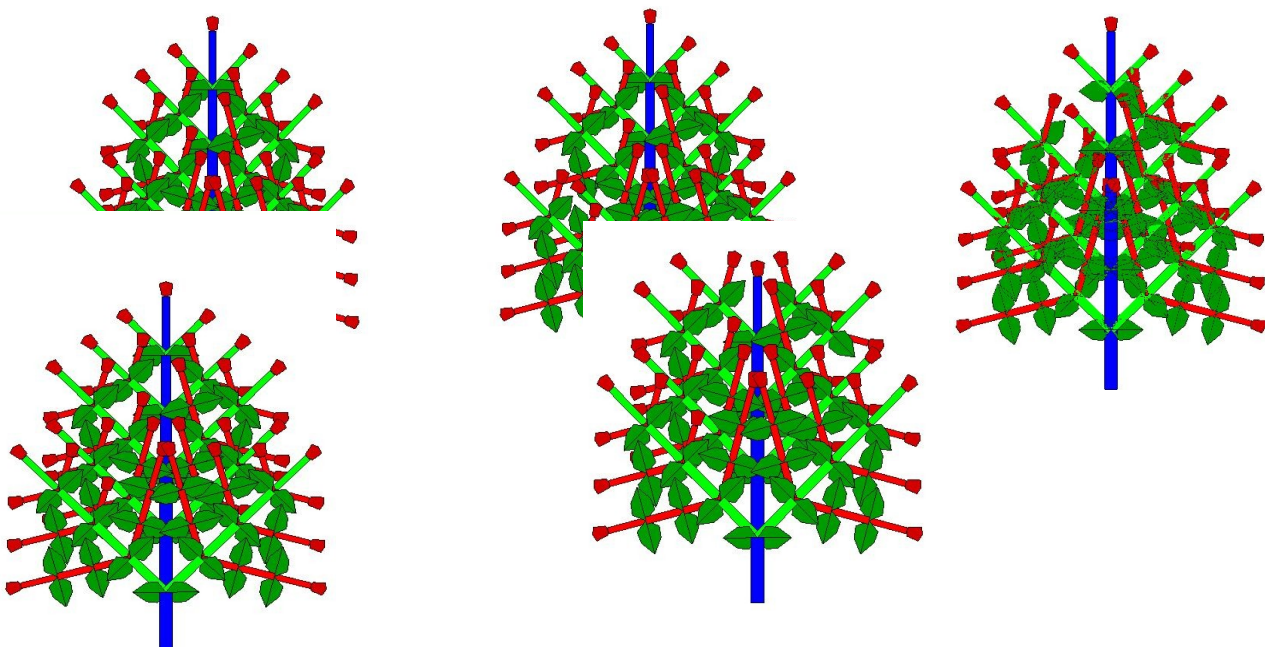


Figure 5. Simulation complète de cinq tirages aléatoires de *S. acmella*.

*Complete simulation of five random samples of *S. acmella**

4-DISCUSSION

« Les interactions croissance–développement sont prises en compte et l’organogénèse est alors dépendante de la photosynthèse, principalement sous la dépendance du rapport entre l’offre en assimilât produit par les feuilles et la demande en biomasse des organes en expansion » (De Reffye, 2009). Le développement des méristèmes y est considéré comme régi par une succession de « tests d’accroissement » assortis chacun d’une certaine probabilité de réussite pour la formation d’un entre-nœud. « Dans le cas du cotonnier, les tiges se développent environ 4 fois plus vite que les branches fructifères ou les rameaux » (De Reffye *et al.*, 1988).

« Dans le cas du caféier, les probabilités de fonctionnement successives observées sur un même axe peuvent prendre des valeurs variables : c’est ce qu’on observe sur les rameaux à croissance « amortie » » (De Reffye, 1981 a). « Le phénomène de mortalité des rameaux vient compliquer encore la structure des arbres » (De Reffye, 1981 b). Dans le cas de *S. acmella*, c’est le cas contraire car il présente un fonctionnement plus simple : il n’y a pas de mortalité des rameaux, ni de phénomène d’amortissement. La croissance de la plante n’est alors pas stochastique puisque que sa probabilité de ramification est élevée (0,95), cela veut dire que la plante se ramifie à chaque entre-nœud, ce qui n’est pas le cas du caféier.

Notons toutefois que dans d’autres conditions de culture (climat, effet matière organique, densité de repiquage...), la croissance de *S. acmella* pourrait être divergente en produisant à la fois la quantité et la qualité de la récolte y compris dans sa composante stochastique.

Les paramètres identifiés devraient fournir de nouveaux critères pour la sélection. Le contrôle optimal du modèle devrait enfin permettre d'optimiser rigoureusement les itinéraires culturaux (irrigation, traitement).

Dans notre cas, on n'a pas étudié l'effet matière organique, prochainement si on fera l'étude de l'effet de matière organique, le modèle stochastique de la plante pourra être différente de ce qu'on a eu.

CONCLUSION

L'utilisation d'une méthode stochastique dans la modélisation de l'architecture du *S. acmella* a donné des résultats cohérents et s'est révélée tout à fait fructueuse.

Dans les conditions de notre étude, nous pouvons considérer que les probabilités de fonctionnement pour l'ensemble des branches sont constantes, avec une valeur de 0,95. Pour l'axe principal la probabilité de fonctionnement est un peu plus réduite, de l'ordre de 0,87. Le rapport de rythme est de l'ordre de 0,84. Une conclusion particulièrement importante est que dans tous les cas, les probabilités ont pu être calculées avec une bonne précision et avec des résultats concordants par l'utilisation de trois méthodes différentes telles que : par liaison moyenne-variance, par l'ajustement du nombre des entre-nœuds de la tige, par l'analyse des cimes. On peut dire que, la probabilité de croissance et de ramification du *S. acmella* est quasi déterministe. Cette espèce n'est pas stochastique car à chaque entre-nœud, il y a toujours des ramifications.

Une fois que les paramètres caractérisant les diverses probabilités de fonctionnement ont été calculés, le logiciel AMAP nous permet de construire graphiquement par une succession de tirages aléatoire les entre-nœuds d'un *S. acmella* qui sera exactement une copie de ce qu'on peut réellement trouver dans la nature, avec tous ses détails et ses irrégularités.

Dans un prochain article nous utiliserons la méthode stochastique pour décrire le fonctionnement du reste de la partie de la plante : les branches (les axes secondaire, tertiaires,....)

BIBLIOGRAPHIE

- De Reffye P., 1979. *Modélisation de l'architecture des arbres tropicaux par des processus stochastiques*. Thèse de Doctorat-ès-Sciences n°2193, Université de Paris-Sud (France).
- De Reffye P., 1981 a. Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. 1. Etude du fonctionnement des méristèmes et de la croissance des axes végétatifs. *Café Cacao Thé*, 25(2), 83-103.
- De Reffye P., 1981 b. Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. 2. Etude de la mortalité des méristèmes plagiotropes. *Café Cacao Thé*, 25(4), 219-229.
- De Reffye P., 1982. Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. 3. Etude de la ramification sylleptique des rameaux primaires et de la ramification proleptique des rameaux secondaires. *Café Cacao Thé*, 26(2), 77-96.
- De Reffye P., Cognée M., Jaeger M. et Traoré B., 1988. Modélisation stochastique de la croissance et de l'architecture du cotonnier. I. Tiges principales et branche fructifères primaires. *Cot. Fib. Trop.* vol. XLIII, fasc.4
- De Reffye P., Houllier F., et al., 2003. Fitting a Functional-structural growth model with plant architectural data. 2003, *International Symposium on Plant Growth Modelling, Simulation, Visualization and their Applications-PMA'03, Beijing / China*, p.108-117.
- De Reffye P., 2009. Production végétale et architecture des plantes. Académie d'agriculture de France. 7p.
- Dong L., Letort V., Guo Y., De Reffye P., Zhan Z., 2009. A functional-Structural Kiwifruit Vine Model. *Plant Growth Modeling And Applications*, p 206-213.
- Dong, Qi. et al., 2008. Does the Structure-Function Model GREENLAB Deal with Crop Phenotypic Plasticity Induced by Plant Spacing. *A case Study on Tomato*. 101(8), 1195-1206.
- Letort V., Lei X., Lu Y., De Reffye P., 2009. Applying GreenLab Model to Adult Chinese Pine Trees with Topology Simplification. p 58-61.
- Guo, Y. et al., 2006. Parameter optimization and field validation of the functional-structural model GREENLAB for maize. *Annals of Botany*, 97(2), 217-230.

- Halle F. et Oldeman R.A., 1970. Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Ed. Masson et Cie, (Paris).
- Kang, M. et al., 2008. The derivation of sink functions of wheat organs using the GREENLAB model. *Annals of Botany*, 101(8), 1099-1108.
- Mathieu A. et al., 2009. A dynamic model of plant growth with interactions between development and functional mechanisms to study plant structural plasticity related to trophic competition. *Annals of Botany*, 103(8), 1173-1186.
- Qi, R. et al., 2010. Optimization of source-sink dynamics in plant growth for ideotype breeding: A case study on maize. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(1), 96-105.
- Wang F., Kang M., Lu Q., Han H., Letort V., Guo Y., 2009. Calibration of topological development in the procedure of parametric identification: application of the stochastic GreenLab model for *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Plant Growth Modeling And Applications*, p 26-33.
- Zhang B., Kang M., Letort V., Wang X., De Reffye P., 2009. Comparison between empirical or functional sink of organs- Application on Tomato plant. *Plant Growth Modeling And Applications*, p 191-197.