

PREDICTION DE LA CROISSANCE DU BANANIER PLANTAIN (*Musa sp.*, AAB, cultivar Corne 1) A PARTIR DE MODELES MATHEMATIQUES

N. KOUAME^{1*}, N.E. ASSIDJO², A.E. DICK³

¹Unité d'Enseignement de Physiologie Végétale et biotechnologie, UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon GUEDE(UJLoG), BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.

²Laboratoire des Procédés Industriels de Synthèse et Environnement, Institut National Polytechnique Felix Houphouët-Boigny (INP-HB), BP 1313 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire.

³Laboratoire de Agrophysiologie et Phytopathologie, UFR Biosciences, Université Felix Houphouët-Boigny (UFHB) de Cocody-Abidjan, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant : Email : maximekouamelma@yahoo.fr Tel : 00225 09 24 01 26 / 00225 06 25 45 10

RESUME

La production de banane plantain est influencée par la croissance de l'appareil végétatif. Cette croissance concerne le nombre, la longueur et la largeur des feuilles d'une part, la hauteur et la circonférence du pseudotrunc d'autre part. La croissance du bananier plantain a été évaluée sur deux types de parcelles (Parcelle avec et sans engrais) dans deux localités de Côte d'Ivoire (Azaguié et Yamoussoukro). A cet effet, des modèles mathématiques ont été élaborés pour prévoir cette croissance à partir des réseaux de neurones artificiels. L'analyse des résultats obtenus a montré que tous les coefficients de détermination sont supérieurs à 0,99. Ces modèles ont permis de prédire la croissance du bananier plantain.

Mots clés : Bananier plantain, croissance, modélisation, réseau de neurones artificiels

ABSTRACT

PREDICTION OF PLANTAIN (*Musasp.*, AAB cultivar Corne1) GROWTH WITH MATHEMATICAL MODELS

The production of plantain is influenced by the growth of the vegetative phase. This growth concerns the number, the length and the width of the leaves on the one hand, the height and the circumference of the pseudo stem on the other hand. Plantain growth was evaluated on two types of plots (Plot with and without fertilizer) in two localities of Côte d'Ivoire (Azaguié and Yamoussoukro). To this end, mathematical models have been developed to predict this growth from artificial neural networks. The analysis of the results obtained showed that all the coefficients of determination are greater than 0.99. These models predict the growth of plantain.

Keywords : Banana plantain, growth, modeling, artificial neural networks.

INTRODUCTION

La modélisation se définit comme étant l'établissement de modèles, utilisés notamment en automatique, en informatique, en recherche opérationnelle, en physique, en médecine et en économie. Une autre définition estime que la modélisation est l'opération par laquelle on établit un modèle d'un phénomène, afin d'en proposer une représentation interprétable, reproductible et simulable (Assidjo *et al.*, 1998).

Mais plus simplement, la modélisation est la conception d'un modèle (Rumelhart *et al.*, 1986). En somme, la modélisation consiste à représenter le comportement dynamique d'un système complexe à travers des modèles mathématiques paramétrés (Assidjo *et al.*, 1998).

Un modèle mathématique est donc une représentation simplifiée de la réalité, décrivant un phénomène, en facilitant la prédiction ou l'estimation et en permettant parfois l'analyse

des mécanismes à l'origine (Mohamed, 2006). Il existe plusieurs groupes de modélisation dont la modélisation scientifique. Celle-ci est utilisée en mathématiques appliquées, en chimie, en physique, en informatique, en météorologie et en sciences de la vie et de la terre. Elle permet d'analyser des phénomènes réels et de prévoir des résultats à partir de l'application d'une ou plusieurs théories à un niveau d'approximation donné (Leray, 2000).

Il existe dans la modélisation scientifique, selon Yao *et al.* (2007), essentiellement trois grands types de modèles :

- les modèles de connaissance ou de premier principe qui sont obtenus en s'appuyant sur la théorie de la conservation de la matière et celle de l'énergie ;
- les modèles empiriques ou « boîtes noires » qui sont des modèles basés sur les données expérimentales ; ils sont généralement obtenus par régression linéaire ou non linéaire ;
- les modèles mixtes qui sont créés pour allier la flexibilité des modèles empiriques et l'information que donnent les modèles de connaissance.

Les modèles empiriques sont construits pour décrire le mieux possible un nuage de points (Syu et Tsao, 1993 ; Mohamed, 2006). L'utilisation de ces modèles est essentiellement pratique. Il s'agit par exemple, de prédire le temps au bout duquel la croissance maximale peut être obtenue (Mohamed, 2006). Ils correspondent en général à une démarche phénoménologique, fondée uniquement sur

l'observation des effets et non sur la compréhension des mécanismes. Les modèles boîtes noires établissent, le plus souvent, une relation mathématique qui retranscrit de manière la plus fidèle possible, le comportement entrée/sortie d'un processus. Ces modèles utilisent comme outil les réseaux de neurones.

Un réseau de neurones est composé de plusieurs unités de calcul simples fonctionnant en parallèle, dont la fonction est de déterminer la solidité des connexions par la structure du réseau et l'opération effectuée par les éléments ou nœuds. Pour Zurada (1992), les réseaux de neurones sont des systèmes qui peuvent acquérir, stocker et utiliser des connaissances empiriques. Nigrin (1993) définit, pour sa part, les réseaux de neurones comme un circuit composé d'un nombre très important d'unités de calcul simples basées sur les neurones biologiques. D'autres définitions indiquent que les réseaux de neurones sont des modèles inspirés du fonctionnement du cerveau humain, et dont le but est de voir surgir des propriétés analogues au système biologique (Roussillon, 2004). Il ressort de ces définitions, que les réseaux de neurones, comme leur nom l'indique, sont organisés autour d'un ensemble de cellules ou neurones, connectées entre elles par des liaisons affectées de poids : les synapses.

En définitive, les réseaux de neurones apparaissent comme des modèles calqués sur l'activité du cerveau humain, composés de plusieurs unités de calcul simples appelées neurones et fonctionnant en parallèle, dont le but est de traiter les informations de façon analogue au système biologique (Figure 1).

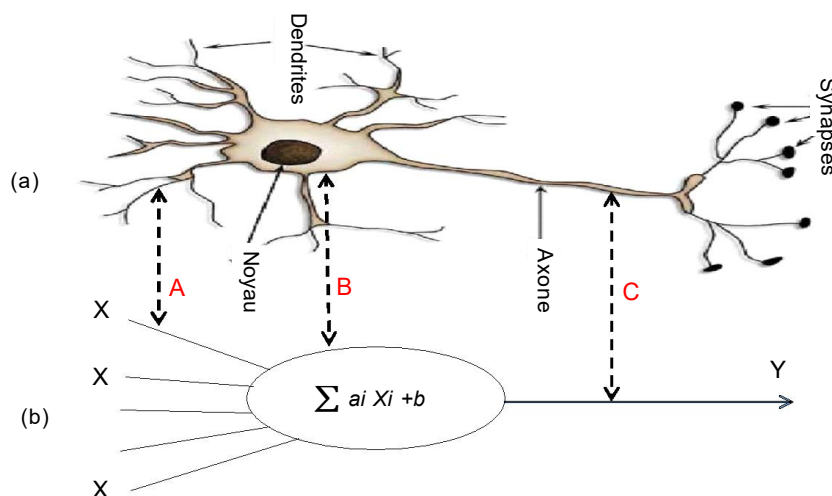


Figure 1 : Structure d'un neurone : (a) biologique. (b) artificiel **A** : Réception ; **B** : Traitement ; **C** : Transfert
*Structure of a neuron : (a) biological, (b) artificial **A** : Reception ; **B** : Treatment ; **C** : Transfert*

Les réseaux de neurones se sont révélés être des approximateurs non linéaires universels (Hornik *et al.*, 1989). A cet effet, ils sont utilisés pour résoudre des phénomènes complexes tels que la modélisation de la croissance, le processus de fermentation, les systèmes de culture et l'élaboration ainsi que l'accroissement racinaire.

Parmi ces approches, on trouve les modèles concernant, entre autres, l'étude des mécanismes de l'élaboration du rendement (Jannoyer, 1995), la formation et de la maturation des fruits (Julien, 2000), la croissance de l'appareil racinaire (Leconte, 2002) ou des systèmes de culture (Tixier, 2004). Cependant, les modèles concernant la croissance du bananier plantain demeurent rares. C'est pourquoi la présente étude se propose de combler ce déficit, en proposant des modèles mathématiques pour la croissance du bananier plantain.

L'objectif principal de ce travail est d'utiliser les réseaux de neurones artificiels pour prévoir la

croissance du bananier en temps réel et anticiper celle-ci afin de permettre une agronomie de précision notamment la maîtrise de la productivité.

MATERIEL ET METHODES

ZONES D'ETUDE

La phase d'expérimentation s'est déroulée dans deux zones de production de banane de la Côte d'Ivoire. Il s'agit d'Azaguié et de Yamoussoukro, localités respectivement situées au sud et au centre de la Côte d'Ivoire.

DESCRIPTION DE LA ZONE D'AZAGUIE

Les parcelles d'Azaguié font partie du patrimoine de la station de recherche du CNRA de Bimbresso, antenne pilote d'Azaguié-Abbe. Azaguié est situé à 50 km au nord d'Abidjan sur la latitude 5°38' N et la longitude 4°05'O (Figure 2).

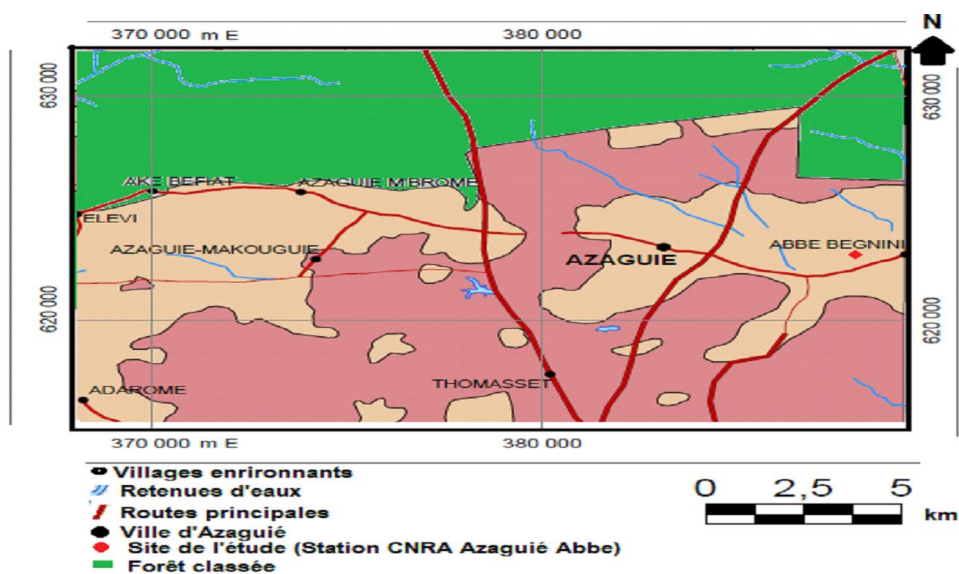


Figure 2 : Carte du site d'Azaguié.

Azaguié Site Map.

La localité d'Azaguié est située en zone forestière avec des plinthicsferralsols, fluvisols (Lassoudière, 1978) de composition argilo-sableux. Le climat est de type « Attiéen » avec quatre saisons. Une grande saison sèche de Décembre à Mars, une grande saison pluvieuse de Mars à Juillet, deux petites saisons sèche et pluvieuse respectivement d'Août à mi-Septembre et de mi-Septembre à Novembre.

DESCRIPTION DE LA ZONE DE YAMOUS-SOUKRO

Les parcelles de Yamoussoukro sont situées dans l'enceinte du Lycée Mamie Adjoua, plus précisément à la ferme dudit établissement. Yamoussoukro est la capitale politique de la Côte d'Ivoire, située sur la latitude 6°49' N et la longitude 5°16'O (Figure 3).



Figure 3 : Carte du site de Yamoussoukro.

Yamoussoukro Site Map.

C'est une zone de transition entre la forêt et la savane, avec des plinthics ferralsols, fluvisols (Legros, 2007) moyennement et/ou faiblement désaturés, gravillonnaires, remaniés avec des propriétés physiques médiocres à moyennes.

Le climat est de type « Baouléen » caractérisé par quatre saisons, dont deux saisons pluvieuses (Avril à Juillet et Septembre à Octobre) et deux saisons sèches (Novembre à Avril et Août à Septembre).

TECHNIQUES CULTURALES

Le matériel biologique utilisé est constitué de rejet-écailles de cultivars de bananier plantain majoritairement cultivés en Côte d'Ivoire, *Musa AAB cv Corne 1* (Figure 4). Ces rejet-écailles proviennent des plantations bananières du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) d'Azaguié. Ils constituent les éléments de la reproduction et de la pérennité du bananier plantain (Anno, 1981).

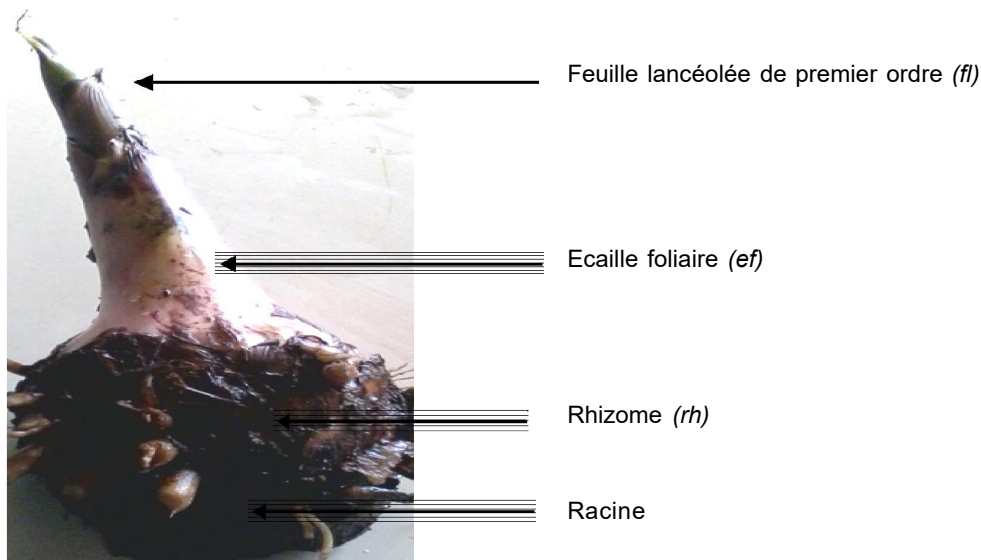


Figure 4 : Rejet-écaille frais de bananier plantain, cv Corne 1.

Fresh reed-flounder of plantain, cv Horn 1.

Les rejets sélectionnés ont été mis en culture sur quatre parcelles, dont deux dans la localité de Yamoussoukro (parcelles avec et sans engrais) et deux autres à Azaguié (avec et sans engrais). Chacune des parcelles mesure 800 m², avec une densité de 150 pieds de bananiers plantain par parcelle soit (150 p / 800 m²). Les

parcelles de chaque localité sont espacées de 3 m, les unes des autres. Les rejets ont été plantés dans des trous mesurant chacun 40 cm de long, 40 cm de large, et 40 cm de profondeur (Sebuwufu *et al.*, 2005). Le planting est fait en respectant un intervalle de 2,5 m entre les lignes et de 2,5 m entre les pieds (Figure 5).

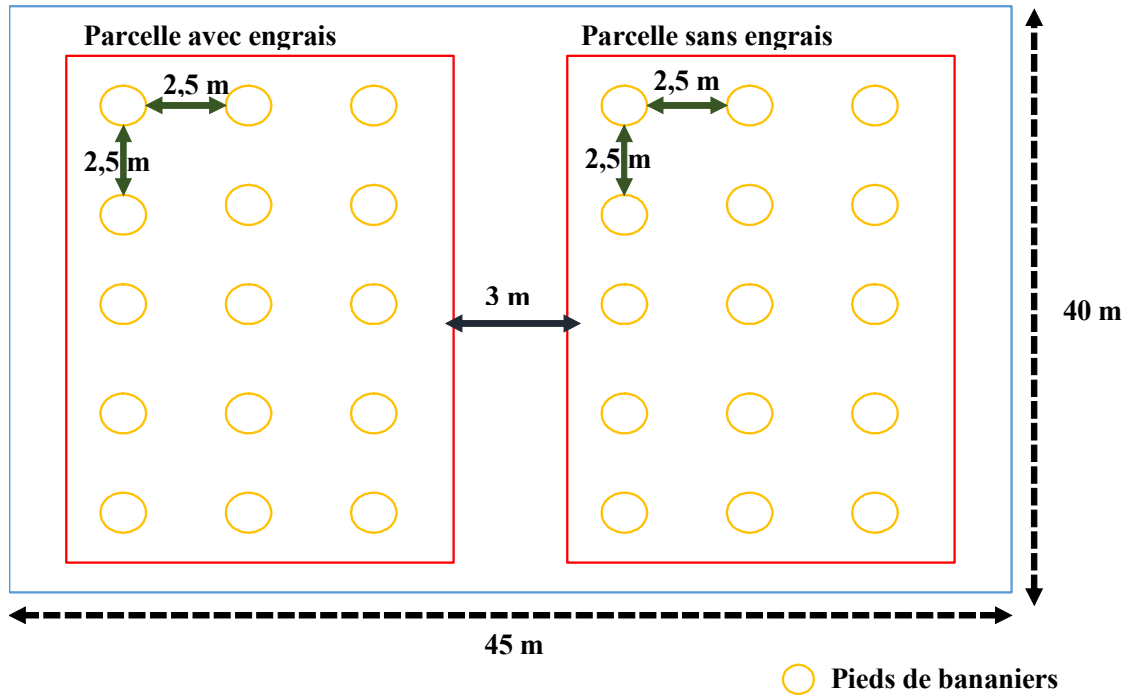


Figure 5 : Représentation schématique du dispositif expérimental au champ.

Schematic representation of the experimental device in the field.

L'apport des fertilisants et les traitements herbicides ont été faits selon la méthode de Lassoudière (1978) (Tableau 1). Le mode de fertilisation est l'engrais chimique. Les engrais utilisés sont l'Urée (46 % N) et du KCl (60 % K).

Des traitements nématicides et insecticides ont été effectués à partir du deuxième mois après plantation, puis tous les trois mois suivants grâce à un produit d'action mixte, le Furadan 10G dont le principe actif est le carbofuran à une dose de 30 g par plant.

Tableau 1 : Programme de fertilisation et traitements pesticides.*Pesticide fertilization and treatments program.*

Age du bananier	Fertilisation azotée (Urée) en g / plant	Fertilisation potassique (KCl) en g / plant	Furadan 10G en g / plant
3 semaines	25		
1 mois 15 jours	25	40	
2 mois	40	40	30
3 mois	40	50	
4 mois	40	50	
5 mois	40	50	30
6 mois		50	
7 mois	40	100	
8 mois	40	100	30
9 mois	40		
10 mois	50	50	

Source : Lassoudière (1978) modifié

MESURE ET APPRECIATION DE LA CROISSANCE ET DU DEVELOPPEMENT

Les observations ont porté sur l'appareil végétatif, notamment le pseudotrunc pour la hauteur et la circonférence et la dernière feuille fonctionnelle pour le nombre de feuilles, la longueur et la largeur. Elles ont démarré après un mois de culture et se sont achevées à la floraison. La croissance foliaire a été appréciée de façon hebdomadaire en mesurant la longueur (Lg) de la dernière feuille fonctionnelle, de la base du limbe jusqu'à l'extrémité de celle-ci, c'est-à-dire au niveau du filament précurseur. La largeur (lg) de la feuille a été évaluée en considérant la plus grande dimension de la partie médiane de l'organe. La hauteur et la circonférence sont les paramètres mesurés pour suivre la croissance du pseudotrunc. La hauteur du pseudotrunc (Hp) a été mesurée à partir du collet jusqu'au sommet de la plante, au niveau du V que forme les deux dernières feuilles fonctionnelles. La circonférence du pseudotrunc a, par contre, été évaluée à trois niveaux différents de l'organe, c'est à dire à 10 cm au-dessus du sol (C₁₀), au milieu (Cm) et au sommet (Cs) au niveau du V. Cette modalité de mesure a été adoptée du fait que le pseudotrunc n'est pas cylindrique. Il est large à la base et rétrécit au fur et à mesure qu'on va vers le sommet de la plante. Le développement général du bananier plantain a été apprécié par le nombre de feuilles émises (Nf) pendant la durée de l'expérimentation. Il a été mesuré conjointement à celui des paramètres de la croissance.

METHODES DE MODELISATION

La modélisation de la croissance du bananier plantain a été réalisée grâce à un réseau de neurone artificiel à travers un programme élaboré dans le logiciel Matlab R2007b (MathWorks Inc., Massachusetts USA).

Un réseau de neurones artificiels est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisés en couches. Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent l'architecture du modèle (Touzet, 1990).

Le principe de fonctionnement est le suivant : on dispose d'une base de connaissances constituées de couples (entrées-sorties), et on veut utiliser celle-ci pour entraîner une mémoire informatique à raisonner en prenant en compte comme référence cette base empirique (Philip *et al.*, 1995). En effet, chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones en amont. A chacune de ses entrées est associé un poids représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones en aval. A chaque connexion est associé un poids.

Les réseaux les plus couramment utilisés sont les perceptrons multicouches (PMC) dont les neurones sont généralement disposés sur des couches (Dreyfus *et al.*, 2002). Ces neurones sont organisés en couches successives où les informations circulent dans un seul sens, de la

couche d'entrée vers la couche de sortie (Figure 6). Les neurones d'une même couche ne sont pas interconnectés (Hornik *et al.*, 1994 ; Rivals, 1995). Un neurone ne peut envoyer son résultat qu'à un neurone situé dans une couche postérieure à la sienne (Rivals, 1995).

Le perceptron multicouche dispose d'une couche d'entrée qui reçoit les entrées du phénomène à modéliser. Cette couche d'entrée représente toujours une couche virtuelle associée aux entrées du système. Elle est composée des cellules d'entrée qui correspondent aux *k* variables d'entrée. Elle reçoit les données sources qui sont utilisées pour une analyse donnée. Ces neurones ont une fonction d'activation dite «identité», laissant passer l'information sans la modifier. La taille du réseau de neurones, précisément le PMC, est donc directement déterminée par le nombre de variables d'entrées (Faur-Brasquet et Le Cloirec, 2003). Le PMC possède une ou plusieurs couches cachées dont le nombre et la taille ne sont pas explicites, mais doivent être ajustés en fonction des résultats attendus.

Chaque couche cachée est composée de *p* neurones, dont la fonction d'activation est de la famille des sigmoïdes. Les neurones de cette couche n'ont aucun lien avec l'extérieur et sont appelés neurones cachés (Rivals, 1995). En plus des couches d'entrée et cachées, il dispose aussi d'une couche de sortie. Cette couche de sortie constitue l'interface du réseau avec l'extérieur. Les neurones de cette couche ont une fonction d'activation linéaire ou non, suivant la nature du problème à résoudre. Ces sorties correspondent aux sorties du système. Ainsi, à partir de ce PMC on obtiendra le modèle mathématique suivant :

$$Y = a_1 \times Y'_1 + a_2 \times Y'_2 + B \quad (1)$$

Avec ;

$$Y'_1 = \sum_{i=1}^N \tanh (X_i \times P_i) + b_i \quad (2)$$

B et *b_i* sont les biais.

RESULTATS

L'architecture de base avec le perceptron multicouche (PMC) a permis d'obtenir les

modèles mathématiques suivants :

Pour la parcelle d'Azaguié avec engrais, on a

$$Y_{Nf(t)} = 0,79 Y'_1 + 1,12 Y'_2 + 0,19 \quad (1)$$

Avec :

$$Y'_1 = \tanh [0,33 Nf_{(t+1)} - 0,13 Lg_{(t+1)} - 0,15 lg_{(t+1)} + 0,48 Hp_{(t+1)} - 0,04 C_{10(t+1)} + 0,14 Cm_{(t+1)} + 0,04 Cs_{(t+1)} - 0,56]$$

$$Y'_2 = \tanh [0,05 Nf_{(t+1)} + 0,06 Lg_{(t+1)} + 0,22 lg_{(t+1)} - 0,09 Hp_{(t+1)} + 0,21 C_{10(t+1)} + 0,12 Cm_{(t+1)} + 0,01 Cs_{(t+1)} + 0,21]$$

Tanh = tangente hyperbolique ; Nf : Nombre de feuilles émises ; Lg : Longueur des feuilles ;

lg : largeur des feuilles ; Hp : Hauteur du pseudotrunc ; C₁₀ : Circonférence à 10 cm du sol

Cm : Circonférence au milieu du pseudotrunc ; Cs : Circonférence au sommet du pseudotrunc.

Au niveau de la parcelle d'Azaguié sans engrais le modèle mathématique permettant de prévoir la croissance du bananier plantain est :

$$Y'_1 = \tanh [-0,13 Nf_{(t+1)} + 0,14 Lg_{(t+1)} + 0,55 lg_{(t+1)} - 0,28 Hp_{(t+1)} - 0,15 C_{10(t+1)} + 0,90 Cm_{(t+1)} + 0,71 Cs_{(t+1)} + 0,18]$$

$$Y'_2 = \tanh [-0,03 Nf_{(t+1)} + 0,48 Lg_{(t+1)} + 0,32 lg_{(t+1)} - 0,44 Hp_{(t+1)} + 0,17 C_{10(t+1)} - 0,10 Cm_{(t+1)} - 0,19 Cs_{(t+1)} - 0,61]$$

$$Y'_3 = \tanh [-0,05 Nf_{(t+1)} + 0,17 Lg_{(t+1)} + 0,12 lg_{(t+1)} - 0,64 Hp_{(t+1)} + 0,03 C_{10(t+1)} + 0,27 Cm_{(t+1)} - 0,06 Cs_{(t+1)} - 0,45]$$

$$Y_{Lg(t)} = 0,00026 Y'_1 + 0,2 Y'_2 + 0,1 Y'_3 - 0,72 \quad (2)$$

Le modèle mathématique qui prévoit la croissance du bananier plantain pour la parcelle de Yamoussoukro avec engrais est :

$$Y'_1 = \tanh [0,03 Nf_{(t+1)} + 0,01 Lg_{(t+1)} + 0,52 lg_{(t+1)} + 0,07 Hp_{(t+1)} - 0,18 C_{10(t+1)} - 0,35 Cm_{(t+1)} - 0,06 Cs_{(t+1)} + 0,33]$$

$$Y'_2 = \tanh [0,7 Nf_{(t+1)} - 0,13 Lg_{(t+1)} - 0,49 lg_{(t+1)} + 0,51 Hp_{(t+1)} - 0,2 C_{10(t+1)} - 0,95 Cm_{(t+1)} + 0,31 Cs_{(t+1)} - 0,1]$$

$$Y'_3 = \tanh [-0,05 Nf_{(t+1)} + 0,13 Lg_{(t+1)} + 0,05 lg_{(t+1)} - 0,11 Hp_{(t+1)} + 0,11 C_{10(t+1)} + 0,26 Cm_{(t+1)} + 0,07 Cs_{(t+1)} + 0,065]$$

$$Y'_4 = \tanh [0,19 Nf_{(t+1)} - 0,39 Lg_{(t+1)} + 0,22 lg_{(t+1)} + 0,24 Hp_{(t+1)} - 0,07 C_{10(t+1)} + 0,13 Cm_{(t+1)} - 0,25 Cs_{(t+1)} - 1,28]$$

$$Y'_5 = \tanh [0,001 Nf_{(t+1)} + 0,14 Lg_{(t+1)} - 0,06 lg_{(t+1)}$$

$$+ 0,26 Hp_{(t+1)} - 0,02 C_{10(t+1)} - 0,30 Cm_{(t+1)} + 0,06 Cs_{(t+1)} + 1,15]$$

$$Y_{Cm(t)} = -0,44 Y'_1 - 0,24 Y'_2 + 1,23 Y'_3 + 6,29 Y'_4 + 8,26 Y'_5 - 1,35 \tag{3}$$

Pour la parcelle de Yamoussoukro sans engrais, la croissance du bananier plantain peut être prévue par le modèle suivant :

$$Y'_1 = \text{Tanh} [0,76 Nf_{(t+1)} - 0,49 Lg_{(t+1)} - 0,23 lg_{(t+1)} + 0,78 Hp_{(t+1)} + 0,03 C_{10(t+1)} - 0,88 Cm_{(t+1)} - 0,46 Cs_{(t+1)} - 0,03]$$

$$Y'_2 = \text{Tanh} [-0,63 Nf_{(t+1)} + 0,61 Lg_{(t+1)} + 0,63 lg_{(t+1)} - 0,40 Hp_{(t+1)} - 0,33 C_{10(t+1)} - 0,57 Cm_{(t+1)} + 0,52 Cs_{(t+1)} - 0,01]$$

$$Y'_3 = \text{Tanh} [0,28 Nf_{(t+1)} - 0,03 Lg_{(t+1)} - 0,04 lg_{(t+1)} + 0,27 Hp_{(t+1)} + 0,09 C_{10(t+1)} - 0,34 Cm_{(t+1)} + 0,05 Cs_{(t+1)} - 0,05]$$

$$Y'_4 = \text{Tanh} [0,02 Nf_{(t+1)} + 0,02 Lg_{(t+1)} + 0,27 lg_{(t+1)} + 0,16 Hp_{(t+1)} - 0,05 C_{10(t+1)} + 0,11 Cm_{(t+1)} - 0,04 Cs_{(t+1)} + 0,06]$$

$$Y'_5 = \text{Tanh} [-0,09 Nf_{(t+1)} + 0,1 Lg_{(t+1)} - 0,09 lg_{(t+1)} + 0,37 Hp_{(t+1)} + 0,05 C_{10(t+1)} - 0,21 Cm_{(t+1)} - 0,07 Cs_{(t+1)} + 0,64]$$

$$Y'_6 = \text{Tanh} [-0,31 Nf_{(t+1)} - 0,93 Lg_{(t+1)} + 0,09 lg_{(t+1)} + 0,2 Hp_{(t+1)} + 0,18 C_{10(t+1)} + 0,39 Cm_{(t+1)} + 0,65 Cs_{(t+1)} - 0,36]$$

$$Y_{C10(t)} = -0,85 Y'_1 - 0,42 Y'_2 + 1,92 Y'_3 + 0,11 Y'_4 + 0,49 Y'_5 + 0,03 Y'_6 - 0,17 \tag{4}$$

La validation des modèles neuronaux a été effectuée par les coefficients de détermination (R^2) entre les valeurs prédites par le réseau et celles expérimentales à partir des mesures de la base de données ainsi que par la comparaison des courbes expérimentales et celles prédites par le modèle mathématique (Figure 5, 6, 7 et 8).

Les résultats montrent que le nombre de feuilles, la longueur et la largeur des feuilles ainsi que les dimensions du pseudotrunc augmentent progressivement au cours de la croissance. Ces tendances sont également observées à travers l'évolution d'ensemble des valeurs expérimentales et celles prédites par le modèle. Les courbes ont pratiquement les mêmes allures. Les valeurs expérimentales et celles prédites sont pratiquement identiques voire confondues. Au demeurant, chaque point expérimental relatif au nombre de feuilles, à la longueur des feuilles, à la hauteur du pseudotrunc, à la circonférence de la base, du milieu, et du sommet du pseudotrunc, sont quasi identiques à ceux prédits par le modèle neuronal. De même, les valeurs expérimentales et celles prédites évoluent dans le même sens bien que globalement certains écarts soient observés.

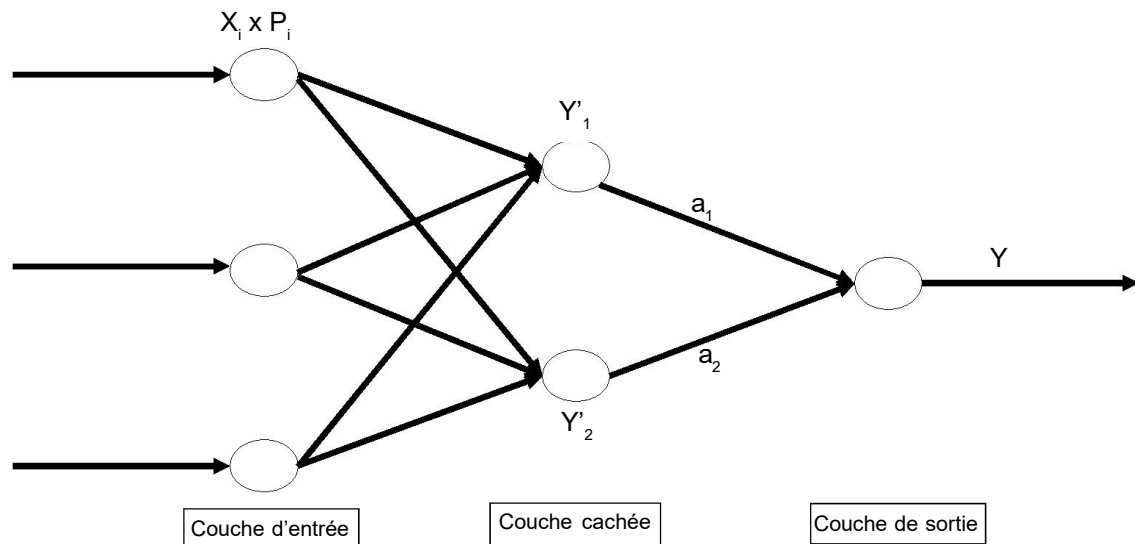


Figure 6 : Représentation schématique d'un Perceptron Multicouche.

Schematic representation of a Perceptron Multilayer.

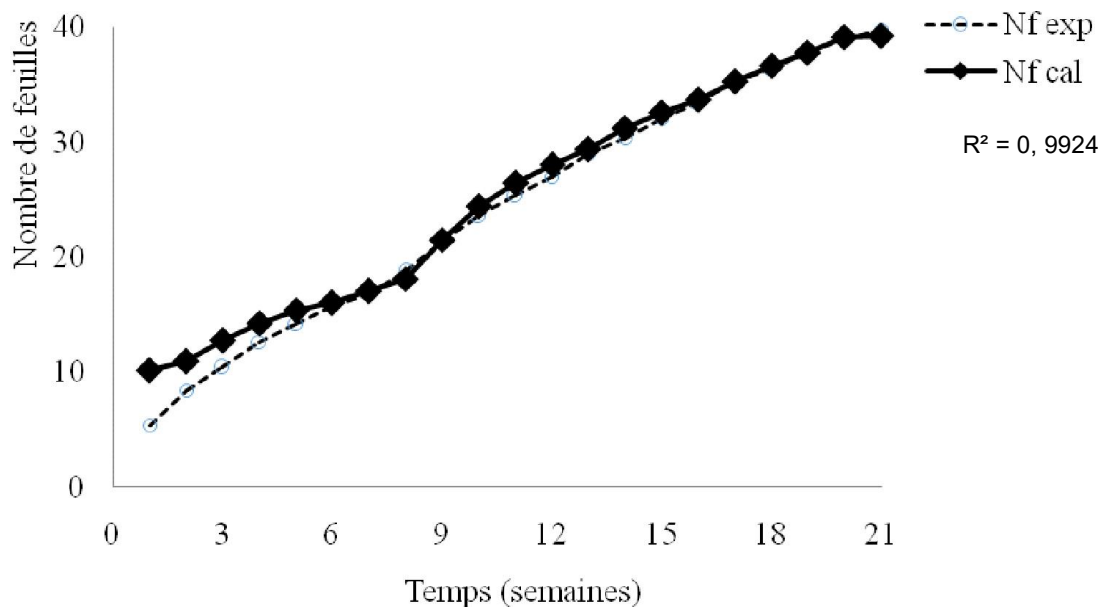


Figure 7 : Courbe d'évolution des valeurs expérimentales et des valeurs prédites en fonction du temps (nombre de feuilles Azaguié engrais).

Curve of evolution of experimental values and predicted values as a function of time (number of leaves Azaguié fertilizers).

Nf exp : Nombre de feuille expérimental ; Nf cal : Nombre de feuille calculé

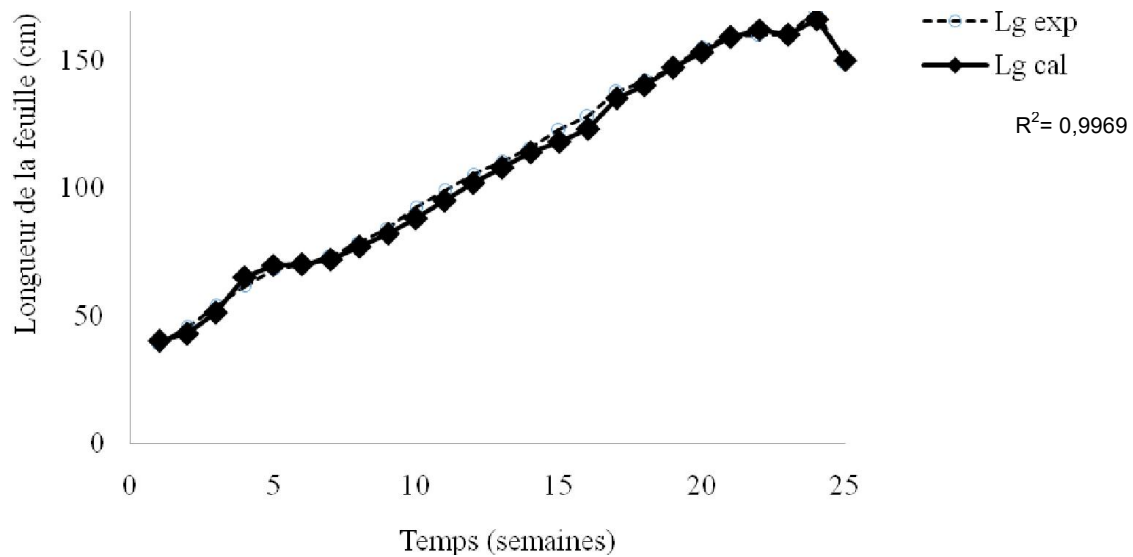


Figure 8 : Courbe d'évolution des valeurs expérimentales et des valeurs prédites en fonction du temps (longueur des feuilles Azaguié sans engrais).

Curve of evolution of experimental values and predicted values as a function of time (Azaguié leaf length without fertilizers).

Lg exp : Longueur de feuille expérimental ; Lg cal : Longueur de feuille calculé

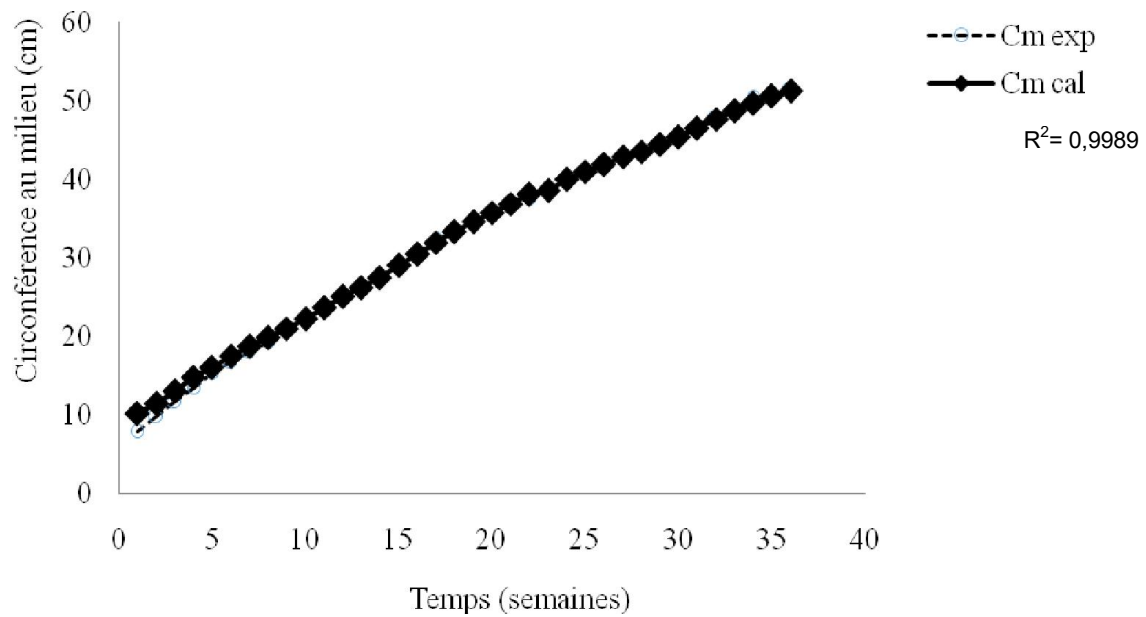


Figure 9 : Courbe d'évolution des valeurs expérimentales et des valeurs prédites en fonction du temps (circonférence au milieu Yamoussoukro avec engrais).

Curve of evolution of experimental values and predicted values as a function of time (circumference in the middle Yamoussoukro with fertilizer).

Cmexp : Circonférence au milieu expérimentale ; Cm cal : Circonférence au milieu calculée

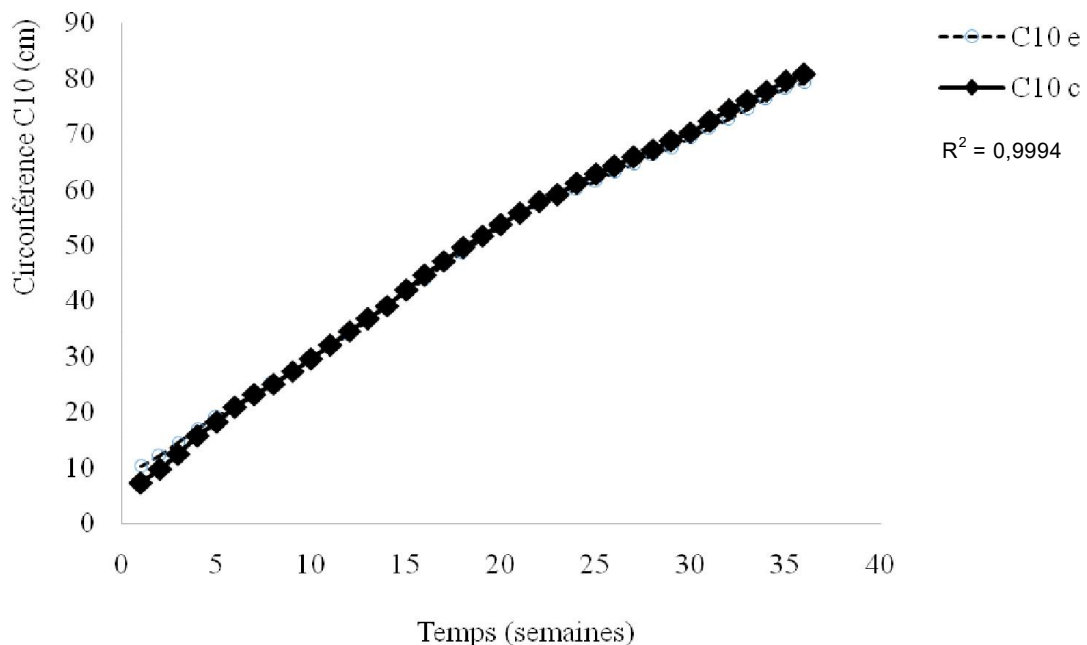


Figure 10 : Courbe d'évolution des valeurs expérimentales et des valeurs prédites en fonction du temps (circonférence C10 Yamoussoukro sans engrais).

Curve of evolution of experimental values and predicted values as a function of time (circumference C10 Yamoussoukro without fertilizers).

C10exp : Circonférence à 10 cm expérimentale ; Cm cal : Circonférence à 10 cm calculée

DISCUSSION

L'analyse des résultats de la prévision et de la simulation montre une étroite adéquation entre les courbes des valeurs prédites par le réseau de neurone artificiel et les courbes des valeurs expérimentales quel que soit le paramètre étudié. Les coefficients de détermination (R^2) entre les valeurs expérimentales et celles prédites par le réseau de neurone artificiel, sont supérieurs à 0,99 et sont donc très proches de 1. Le réseau de neurones permet donc de prévoir la croissance du bananier plantain à une valeur supérieure à 99 %. La croissance des feuilles et du pseudotrunc observée expérimentalement est comparée à celle prédite par le modèle mathématique. Il a été observé que le nombre de feuilles, la longueur et la largeur des feuilles ainsi que les dimensions du pseudotrunc augmentent progressivement au cours de la croissance. Ces tendances sont également observées à travers l'évolution d'ensemble des valeurs expérimentales et celles prédites par le modèle. Les courbes ont pratiquement les mêmes allures. Ces courbes des valeurs expérimentales et celles prédites par le réseau de neurones artificiel sont pratiquement identiques voire confondues. Au demeurant, chaque point expérimental relatif au nombre de feuilles, à la longueur des feuilles, à la hauteur du pseudotrunc, à la circonférence de la base, du milieu, et du sommet du pseudotrunc, sont quasi identiques à ceux prédits par le modèle neuronal. De même, l'observation des courbes montre que les valeurs expérimentales et celles prédites évoluent dans le même sens bien que globalement certains écarts soient observés.

Ce résultat confirme l'aptitude des réseaux de neurones artificiels, de façon générale, à prédire par approximation dans le domaine de la modélisation des phénomènes dynamiques tels que la croissance du bananier plantain. Ce dernier a la capacité de bien représenter les relations complexes non-linéaires et convient pour l'approximation de la croissance du bananier plantain. En effet, selon Chouai *et al.* (2000) et Mohamed (2007), le modèle développé par les réseaux de neurones artificiels est un modèle « type boîte noire » qui constitue la forme la plus primitive de modèle mathématique. Il est réalisé uniquement à partir des mesures expérimentales ou d'observations. Il peut avoir une valeur prédictive, dans certains domaines de validité, mais il n'a aucune valeur explicative.

Dans l'ensemble, les valeurs élevées des R^2 observés permettent de dire que le modèle utilisé est valable.

Les résultats obtenus de la prévision et de la simulation de la croissance du bananier plantain en temps réel, sont similaires à ceux d'Assidjo *et al.* (2006) dans le cas de la modélisation du processus de brassage d'une bière à l'échelle industrielle par le réseau de neurone artificiel. Il en est de même pour Kouamé *et al.* (2008) dans le cas de la conception de modèle empirique au cours du processus de fermentation discontinue du moût de sorgho (Tchapalo). Ces auteurs ont montré que les valeurs prédites par le réseau de neurone artificiel sont très proches des données expérimentales dans la mesure où les valeurs des coefficients de détermination (R^2) sont nettement supérieures à 0,95. Par ailleurs, Chen et Ramaswamy (2002) puis Mohamed (2007) ont utilisé avec succès le réseau de neurone artificiel respectivement pour la modélisation de transfert thermique et de réactions chimiques dans l'industrie alimentaire. Ces résultats sont aussi conformes à ceux de Tixier (2004) dans le cas de la conception assistée par modèle de systèmes de culture durable : application aux systèmes bananiers de Guadeloupe.

CONCLUSION

La modélisation a été réalisée à partir du modèle empirique utilisant le réseau de neurone artificiel à partir des mesures expérimentales faites au champ. Elle a été réalisée à partir des paramètres de croissance du bananier plantain. Les modèles utilisant comme outil le réseau de neurones artificiels ont permis de prévoir avec succès la croissance du bananier plantain à partir des variables opératoires que sont le nombre de feuilles, la longueur et la largeur des feuilles, la hauteur et la circonférence du pseudotrunc. Ces modèles ont donné une adéquation étroite entre les valeurs des variables opératoires expérimentales et celles calculées par le réseau.

REFERENCES

- Anno A.P. 1981. Etude des caractéristiques de croissance, en relation avec la floraison, de *Musa corniculata* L. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université

- de Côte d'Ivoire, 207 p.
- Assidjo E., Chianea T., Dreyfus M. F., Cardot P. 1998. Validation procedures of sedimentation field-flow fractionation techniques for biological applications. *J. of Chromat.*, 68 : 215 - 226.
- Assidjo E., Yao B., Amané D., Ado G., Azzaro-Pantel C., Davin A. 2006. Industrial brewery modelling by using artificial neural network. *JABS*, 6 : 1123 - 1127.
- Chen C.R., Ramaswamy H.S. 2002. Modelling and optimization of variable retort temperature (VRT) thermal processing using coupled neural networks et genetic algorithms. *J. of Food Eng.*, 53 : 209 - 220.
- Chouai A., Cabassud M., Le Lann M.V., Gourdon C., Casamatta G. 2000. Use of neural networks for liquid-liquid extraction column modelling : an experimental study. *Chem. Eng. and Proces*, 39 : 171 - 180.
- Dreyfus G., Martinez J.M., Samuelides M., Gordon M.B., Badran F., Thiria S., Herault L. 2002. *Réseaux de Neurones Artificiels*. New York, USA : *Gr. Eyrol*, 374 p.
- Faur-Brasquet C., LeCloirec P. 2003. Modelling of the flow behaviour of activated carbon cloths using a neural network approach. *Chem. Eng. and Proces*, 2 (42) : 645 - 652.
- Hornik K., Stinchcombe M., White H. 1989. Multilayer feed-forward networks are universal approximators. *Neur. Net. comp.*, 2 : 359 - 366.
- Hornik K., Stinchcombe M., White H., Auer P. 1994. Degree of approximation results of feedforward networks approximating unknown mapping et their derivatives. *Neur. Net. Comp.*, 6 : 1262 - 1275.
- Jannoyer M. 1995. Déterminisme du nombre d'organes reproducteurs d'une inflorescence de bananier (*Musa acuminata*, cv 'Grande Naine'). *Thèse de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon*. 175p.
- Julien A. 2000. Croissance, développement et qualité des fruits du bananier (Musaspp AAA group cv Cavendish Grande Naine). Modélisation de la répartition des assimilats entre les fruits du régime. *Thèse de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon*. 189 p.
- Kouame K. B., Assidjo E., Akaki D., Yao K.B. 2008. Genetic algorithms using for a batch fermentation process identification. *Pakistan J. of Appl. Sci.*, 8 (12) : 2272 - 2278.
- Lassourdiere A. 1978. Le bananier et sa culture en Côte d'Ivoire. Première partie : Connaissance de la plante, interaction avec le milieu écologique. *Doc. Tech. IRFA*, 104 P.
- Lecompte F. 2002. Mise en place de l'architecture racinaire du bananier dans un andosol : effet des contraintes physiques liées au compactage. *Thèse de l'Institut national agronomique Paris-Grignon*, 113 p.
- Legros J.P. 2007. Les grands sols du monde. Sciences et technologie de l'Environnement, *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, Sciences de la terre, 574 p.
- Leray P. 2000. Quelques types de réseaux de neurones. La rétropropagation. *Fond de cours*. INSA ROUEN-Département ASI-Laboratoire PSI, France, 52 p.
- Mohamed H.R. 2006. Modélisation de phénomènes microbiologiques, biochimiques et physico-chimiques intervenant lors de l'affinage d'un fromage de type pâte molle croûte lavée. *Thèse de Doctorat Unique, Institut National Agronomique*. Paris-Grignon, France, 164 p.
- Mohamed Y. A. 2007. Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu. *Thèse de Doctorat Unique. Institut National Polytechnique*, Toulouse, France, 156 p.
- Nigrin A. 1993. *Neuronal Networks for Pattern Recognition*, Cambridge, MA : *The MIT Press*, 11 p.
- Philip E., Walter Murray G., Wright M. H. 1995. *Practical Optimization. Sciences of process and Environment*. *Acad. Press*, Institute National Polytechnic of Toulouse. France : 134 - 165.
- Rivals I. 1995. Modélisation et commande de processus par réseaux de neurones artificiels : Application au pilotage d'un véhicule autonome. *Thèse de Doctorat Unique. Université Pierre et Marie Curie-Paris 6*, France, 145 p.
- Roussillon C. 2004. Prédiction de la température par les réseaux de neurones artificiels. *Thèse de Doctorat Unique. Université Victor Hugo BESANCON*, France, p 234.
- Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. 1986. Learning internal representations by error propagation: Paralleldistributed processing and explorations in the microstructure of cognition. *MIT Press*, 1 : 318 - 362.
- Sebuwufu G., Rubaihayo P. R., Blomme G. 2005. Effet de la profondeur du trou de plantation sur le développement du plant et des racines de *Musa spp.* *Infomusa*, 14 (2) : 27 - 31.

- Syu M.J., Tsao G.T. 1993. Neural network modelling of batch cell growth pattern, *Biotechnol. Bioeng.*, 42 : 376 - 380.
- Tixier P. 2004. Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables : Application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. *Thèse de l'École Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier*. France, 234 p.
- Touzet C. 1990. Contribution à l'étude et au développement de modèles connexionnistes séquentiels, *Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc*, Montpellier, France, 221 p.
- Yao B., Assidjo E., Ado G., Azzaro-Pantel C., Davin A. 2007. Modelling and Optimization of M-cresol Isopropylation for Obtaining N-thymol: Combining a Hybrid Artificial Neural Network with a Genetic Algorithm. *Int. J. Chem. React. Eng.*, 5 : 87 - 97.
- Zurada J.M. 1992. Introduction to artificial neural system. *West Publishing Co.*, Saint Paul, Minnesota, 327 p.