



## PARAMETRISATION DES MODELES DE TRANSFERT HYDRIQUE DANS LE SOL SOUS TROIS PLANTATIONS D'EUCALYPTUS DANS LA REGION DE POINTE-NOIRE (CONGO) : APPLICATIONS A L'ETABLISSEMENT DES BILANS HYDRIQUES

D. G. MOUKANDI-NKAYA<sup>1</sup>, B. MABIALA<sup>1</sup>, C. TATHY<sup>1</sup>, D. NGANGA<sup>2</sup>,  
P. DELEPORTE<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Université Marien Ngouabi, B.P. 69 Brazzaville Congo,

<sup>2</sup>Faculté des Sciences Université Marien Ngouabi, Brazzaville Congo.

<sup>3</sup>UR2PI/ CIRAD-Forêt, BP 1291 Pointe-Noire, Congo.

---

### RESUME

La quantification de la répartition de l'eau dans le sol et des flux hydriques est essentielle pour comprendre les relations sol-eau-plante. Pour les plantations d'Eucalyptus de la région de Pointe-Noire (Congo) installées sur des sols sableux très filtrants, une bonne connaissance du comportement de l'eau dans les couches supérieures de sols apparaît capitale pour une gestion durable des plantations d'Eucalyptus, mais aussi pour mesurer l'impact de ces plantations sur les ressources en eau de la région. L'objectif de cette étude est de paramétrer un modèle de transfert hydrique dans le sol sous trois plantations d'eucalyptus à l'aide du logiciel spécifique HYDRUS 1D et à des expériences de drainage interne in situ afin (i) de comparer ces trois parcelles quant à leur fonctionnement hydrique, et (ii) d'établir le bilan hydrique de peuplements d'Eucalyptus à différents stades de développement. Les résultats montrent des caractéristiques hydriques différentes pour les parcelles imputables à la géométrie et à la morphologie de l'espace poral et au passé cultural des sols. Les bilans hydriques montrent que la consommation d'eau pour les eucalyptus dépend de leur stade de développement.

---

**Mots clés :** Transfert hydrique ; Bilan hydrique ; Modèle mécaniste ; HYDRUS 1D ; Pointe-Noire ; Congo

---

### ABSTRACT

Quantifying soil water repartition and hydrous fluxes is essential to understanding soil-plants relationships. In the case of eucalyptus plantations in Pointe Noire (Congo), set on very filter sandy soils, a good knowledge of water behavior in the topsoil appears as of major concern to sustainable management as well as for measuring the impacts of these plantations on the region water resource.

The objective of this study was to parameterize a model of hydrous transfer in the soil under three eucalyptus plantations using the HYDRUS 1D software combined to experiment of in situ internal drainage so as (i) to compare sites as for their hydrous operation, and as (ii) to establish the hydrous assessment of settlements of Eucalyptus at various stages of development. The results showed different hydrodynamic characteristics according to sites; these differences are ascribable with the geometry and the morphology of poral space and the farming past of the soils. The hydrous yields for four development states of the plantations are established and the implication of these results is discussed.

---

**Key words :** Hydrous Transfer ; Hydrous Assessment ; Mechanics Model ; HYDRUS 1D ; Pointe-Noire ; Congo

## INTRODUCTION

L'eau est indispensable à la vie et à la croissance des plantes. Elle est essentiellement prélevée dans le sol par les racines. Dans le sol, de nombreux autres processus dépendent aussi de l'eau [14]. Elle est le vecteur essentiel des transferts de gaz et de matière en solution et en suspension. Elle constitue un milieu réactionnel, siège des phénomènes d'altération, de solubilisation et d'insolubilisation organo-minérales [2]. Les connaissances sur la répartition et les flux (transferts) de l'eau dans le sol s'avèrent donc très importantes pour comprendre les relations sol-eau-plante.

Les sols de la région de Pointe-Noire (située au sud ouest du Congo) sur lesquels sont cultivées les plantations d'eucalyptus à forte productivité, sont très sableux, peu fertiles, et très drainants avec une faible capacité de rétention hydrique [17, 10]. Dans ces sols se pose le problème d'estimation des flux d'eau et de la lixiviation d'éléments minéraux. D'une part, ces flux profonds pourraient conduire à d'importantes pertes d'éléments minéraux qui par conséquent pourraient provoquer des pollutions de la nappe phréatique par les intrants (engrais azotés, herbicides, ...). D'autre part, la réputation de forte consommation en eau des Eucalyptus pourrait limiter les ressources hydriques de ces sols [5, 20] et réduire la recharge des nappes superficielles qui sont essentiellement alimentées par les eaux de pluie qui s'infiltrent dans le sol [13].

Une bonne connaissance du comportement de l'eau dans les couches supérieures des sols apparaît capitale pour une gestion durable des plantations d'Eucalyptus, mais aussi pour mesurer l'impact de ces plantations sur les ressources en eau dans la région de Pointe-Noire.

Les transferts hydriques dépendent de nombreux facteurs physico-chimiques, et biologiques du sol [14]. Plusieurs approches sont possibles pour étudier les transferts hydriques dans le sol. La modélisation

«mécaniste» est actuellement privilégiée car elle permet d'interpréter les paramètres des modèles et de généraliser les résultats plus facilement.

L'objectif de cette étude est de paramétrer un modèle de transfert hydrique dans le sol sous trois plantations d'eucalyptus à l'aide du logiciel spécifique HYDRUS 1D et d'expériences de drainage interne *in situ* afin (i) de comparer ces trois parcelles en fonction de leur comportement hydrique, (ii) et d'établir le bilan hydrique de ces peuplements.

## MATERIEL ET METHODES

### Modélisation des transferts hydriques dans le sol

La modélisation des transferts hydriques dans le sol met généralement en jeu deux types de processus dont la combinaison donne l'équation de Richards. L'équation de Richards à une dimension (profondeur) est à la base du fonctionnement hydraulique des sols puisqu'elle établit une relation entre l'humidité du sol, le potentiel hydrique et la conductivité hydraulique [21]. Cette équation est obtenue en considérant d'une part l'équation dite de continuité (1) qui établit une relation entre le flux d'eau  $q$  ( $L.T^{-1}$ ) et l'humidité du sol ( $L^3.L^{-3}$ ) en effectuant un bilan entrées/sorties pendant le temps  $\partial t$  (T) pour un volume de sol d'épaisseur  $\partial z$  (L) tel que :

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} \quad (1)$$

et d'autre part l'équation dynamique (2) de conservation de la quantité de mouvement (loi de Darcy, 1856) qui permet de décrire les écoulements ou les transferts hydriques dans un milieu poreux saturé :

$$q = K \left( - \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Elle exprime la proportionnalité entre le flux d'eau  $q$  traversant une colonne et le gradient de charge hydraulique. Cette relation, bien qu'elle fût conçue à l'origine pour les écoulements en milieux saturés, a été étendue par Richards en 1931 aux écoulements en milieux non saturés en spécifiant que la constante de proportionnalité  $K(\theta)$  appelée conductance hydraulique est une fonction de la teneur en eau du sol [6].

La combinaison des deux équations (1) et (2) a la forme ci-dessous dite équation de Richards :

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - I \right) \right] \quad (3)$$

dans laquelle  $h$  est le potentiel hydrique exprimé souvent en équivalent hauteur d'eau et  $H$ , la charge hydraulique, définie par  $H = h(\theta) - z$ , et à laquelle on peut ajouter une fonction puits lorsqu'il y a extraction d'eau par les racines.

La résolution de l'équation (3), exige la connaissance de la relation entre l'humidité du sol et le potentiel hydrique pour chaque profondeur. Cette relation  $h(\theta)$  est une composante importante des phénomènes de transfert hydrique dont un certain nombre de travaux ont développé des expressions mathématiques [1, 8, 18] plus ou moins complexes utilisables dans des modèles de transfert. Dans cette étude, la formulation de van Genuchten [7, 24] ci-dessous sera utilisée car elle est une des plus souples :

$$h(\theta) = r + \frac{s - r}{\left[ 1 + (\alpha h)^n \right]^m} \quad (4)$$

où  $\alpha$ ,  $n$  et  $m$  sont des paramètres indépendants que l'on peut déterminer par des ajustements statistiques. Une relation de dépendance entre  $m$  et  $n$  ( $m = 1 - 1/n$ ) améliore la représentativité de la relation presque pour tous les sols [24].

La relation peut également s'exprimer analytiquement en fonction de  $K(\theta)$  dans les

conditions initiales considérées (humidité au temps 0) par :

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{s - r}{s - r} \right)^i \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{s - r}{s - r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (5)$$

où

$s$  : est la teneur en eau à saturation naturelle ( $L^3.L^{-3}$ ) ;

- $r$  : est la teneur en eau résiduelle ( $L^3.L^{-3}$ ) ;
- $K_s$  : est la conductivité hydraulique à saturation naturelle ( $L.T^{-1}$ ) ;
- $i$  : paramètre empirique de la courbe de rétention d'eau ( $L^{-1}$ ) ;
- $m$  et  $n$  : paramètres de la courbe de rétention d'eau liés à la structure du sol (-) ;
- $\alpha$  : paramètre relatif à la porosité des sols et fixé à 0,5 [15].

La caractérisation des sols requiert la détermination de ces paramètres qui interviennent dans le modèle de Richards décrit ci-dessus. Les paramètres  $n$  et  $m$  sont des paramètres de forme,  $s$  et  $r$  sont des paramètres d'échelle. Haverkamp *et al.* (1998) [9] ont démontré que les paramètres d'échelle sont fortement liés à la texture du sol alors que les paramètres de forme dépendent principalement des propriétés structurales du sol.

### Expériences de drainage in situ

Ces expériences permettent d'établir la relation entre l'humidité du sol et le potentiel hydrique pour chaque niveau de mesure et pour tout le profil de sol étudié. A cet effet, les « expériences de drainage interne » sur deux parcelles ont été réalisées. Pour la troisième parcelle, les données ont été recueillies dans la banque des données de l'UR2PI, mesurées en 2001 [4]. Les expériences se sont déroulées dans les plantations expérimentales d'eucalyptus situées dans la région de Pointe-Noire (entre les latitudes 4° et 5° sud et les longitudes 11°.

et 12° est) qui est localisée au sud-ouest du Congo ; comprise entre la façade maritime à l'ouest et le massif forestier du Mayombe à l'est [14]. Sur un même site (Kondi), il a été choisi deux plantations voisines (Kondi R0013A et R0013B) distantes de quelques 100 mètres âgées de 3 ans avec deux clones (1-41 et 18-52) à productivité différente. La troisième plantation (Hinda H9807) est située dans un autre site (Hinda) distant du premier de quelques dizaines de kilomètres, il s'agit d'une plantation âgée de 6 ans avec le clone 1-41.

Dans chaque parcelle, un anneau métallique (25 cm de hauteur et 1 m de diamètre) est enfoncé de 10 cm dans le sol afin de délimiter une zone de 0,75 m<sup>2</sup> au-dessus d'une répétition de sondes TDR (Réflectométrie dans le Domaine Temporel) qui permettent d'évaluer l'humidité volumique du sol. Cet anneau est entouré d'un deuxième anneau (25 cm de hauteur et 2 m de diamètre) délimitant une surface de 3,14 m<sup>2</sup>. Ce deuxième anneau est installé pour limiter les écoulements latéraux. L'expérience de « drainage interne » consiste à saturer le sol dans la zone délimitée par ces deux anneaux par apport d'eau externe (environ 4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> d'eau ont été déversés), puis de laisser le sol se ressuyer afin d'assurer des transferts hydriques homogènes autour des sondes TDR. Dans l'anneau central sont installées au plus proche des sondes TDR, des tensiomètres à mercure dont le point d'entrée d'air se situe aux alentours d'une pression de -800 cm d'eau. Sous l'influence de la succion du sol, l'eau contenue dans la bougie se met en équilibre potentiel avec l'eau du sol et cette succion équilibre la montée d'une colonne manométrique de mercure [1]. Pendant la phase de ressuyage, l'humidité volumique du sol est mesurée simultanément à pas de temps régulier avec les sondes TDR et le potentiel hydrique  $h$  avec les tensiomètres, placés respectivement à 15, 50, 100 150 et 200 cm de profondeur [14]. Les dispositifs installés sont bâchés pour éviter les pertes d'eau par évaporation.

La relation entre  $h$  et  $\theta$  mesurés expérimentalement peut être représentée graphiquement par une courbe caractéristique de l'humidité du sol ou « courbe de rétention

de l'humidité du sol ». A partir des données mesurées, les paramètres de transfert hydrique dans le sol ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_n$  et  $m$ ) de la formule mathématique de van Genuchten sont estimés par ajustement à chaque profondeur avec le logiciel *HYDRUS 1D*.

Les sols de ces plantations étant très drainants, il est difficile de pouvoir déterminer l'humidité à la saturation du sol. Pour remédier à cette difficulté, les humidités à la saturation  $\theta_s$  ont été estimées à la porosité totale calculée à partir des densités réelles et apparentes. Les valeurs d'humidité résiduelle  $\theta_r$  sont fixées aux plus faibles humidités observées en fin de saison sèche, car les valeurs minimales d'humidité sont difficiles à déterminer à partir de l'expérience de drainage interne, la limite d'utilisation des tensiomètres étant d'environ 0.8 bar (soit 816 cm d'eau).

### Bilan hydrique

Le bilan hydrique calculé au pas de temps journalier peut s'écrire :

$$UW_z = P - In - Ru - ETR - US$$

avec

- $UW_z$ , le flux d'eau drainé à la profondeur  $z$  ;
- $P$ , la pluviométrie ;
- $In$ , l'interception ;
- $Ru$ , le ruissellement ;
- $ETR$ , l'Evapotranspiration réelle, qui dépend de l'Evapotranspiration potentielle,  $ETP$ ) et de l'eau disponible dans le sol ;
- $US$ , la variation de stock d'eau dans le sol.

L'ETP journalière a été calculée à partir de la formule de Penman-Monteith (1981) séparément pour la savane, le sol nu et la plantation d'Eucalyptus à partir des données météorologiques de Pointe-Noire (ASECNA). L'interception et le ruissellement ont été estimés à partir des formules de Laclau (2001)[10]. Le prélèvement racinaire (égal à la transpiration réelle) est estimé proportionnellement à la densité de racines fines et est contrôlé par l'équation de Feddes *et al.* (1978) [6].

## Présentation du logiciel HYDRUS 1D

Le programme *HYDRUS 1D* utilise un modèle d'éléments finis pour simuler le mouvement unidimensionnel de l'eau, de la chaleur et de corps dissouts multiples dans des milieux variables selon la profondeur. Le programme résout numériquement l'équation de Richards pour l'écoulement saturé-insaturé de l'eau [22]. Il peut utiliser les modèles de van Genuchten [24], de Brooks et Correy [3] et de van Genuchten modifié pour estimer les paramètres hydrodynamiques de sols. *HYDRUS 1D* permet entre autres : (i) d'estimer les paramètres des courbes de rétention d'eau et  $K_s$  à partir des valeurs mesurées par les expériences de drainage interne ; (ii) de simuler les humidités, les potentiels hydriques et les flux profonds à différentes profondeurs d'un sol à un pas de temps journalier à partir de variables d'entrée (précipitation, transpiration potentielle, évaporation potentielle), du prélèvement racinaire, de caractéristiques du sol (paramètres de l'équation de van Genuchten pour chaque couche) et de l'état initial (humidité au temps 0).

## RESULTATS

### Les paramètres hydrodynamiques

Les valeurs des paramètres de la courbe de rétention (tableaux I a, b et c) varient avec la parcelle et selon la profondeur. Les sols de la région de Pointe-Noire ayant à peu près le même profil pédologique présentent des valeurs de  $\theta_s$  identiques pour une même profondeur dans les parcelles de Kondi R0013A et R0013B. Les valeurs de  $\theta_s$  les plus élevées sont observées en surface. Ces valeurs de  $\theta_s$  diminuent avec la profondeur.

A Kondi, les valeurs du paramètre dans la parcelle R0013A sont plus élevées que dans la parcelle R0013B sauf à 100 cm. Les

valeurs du paramètre  $n$  dans les deux parcelles de Kondi sont inférieures à celles observées dans la parcelle de Hinda.

Les valeurs de  $K_s$  sont très élevées et elles diminuent rapidement avec la profondeur. Quelle que soit la profondeur, les valeurs de  $K_s$  sont plus élevées dans la parcelle R0013B que dans la parcelle R0013A.

La variabilité des valeurs des paramètres de l'équation de van Genuchten caractérise les trois plantations d'eucalyptus étudiées. Cette variabilité traduit celle des courbes de rétention. Les courbes obtenues aux différentes profondeurs et parcelles ont des formes typiques de sol sableux (figure 1). Les courbes de rétention estimées coïncident parfaitement avec les courbes de rétention mesurées pour toutes les profondeurs et pour les trois parcelles.

Afin de bien caractériser le comportement hydrique des sols sous plantation d'eucalyptus, les capacités au champ à  $pF = 2$  ( $\theta_{fc}$ ), les points de flétrissement permanent à  $pF = 4,2$  ( $\theta_{wilt}$ ) et les réserves utiles ( $RU = \theta_{fc} - \theta_{wilt}$ ) pour chaque profondeur et chaque site ont été calculés à partir de l'équation de van Genuchten (Tableau II). Quelle que soit la profondeur, les valeurs de la capacité au champ dans la parcelle Hinda H9807 sont peu variables avec la profondeur. Les valeurs de  $\theta_{wilt}$  obtenues augmentent avec la profondeur dans les deux parcelles de Kondi et sont presque identiques dans les premiers 50 centimètres ( $0.031$  et  $0.034 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ). Dans la parcelle de Hinda H9807, les valeurs du  $\theta_{wilt}$  sont presque identiques dans tout le profil du sol et oscillent entre  $0.041$  à  $0.045 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ .

Les valeurs de la réserve utile  $RU$  varient d'une parcelle à une autre et selon la profondeur. Il est constaté que les valeurs de  $RU$  sont peu différentes en profondeur dans les trois parcelles étudiées.

Tableau I : Paramètres de la relation  $n(h)$  dans les trois parcelles étudiées

<i>Hinda H9807</i>	Profondeurs		
Paramètres	50 cm	100 cm	200 cm
$\theta_r (m^3.m^{-3})$	0.041	0.045	0.042
$\theta_s (m^3.m^{-3})$	0.357	0.362	0.362
$\alpha (m^{-1})$	2.400	3.900	2.150
n (-)	2.828	2.158	2.725

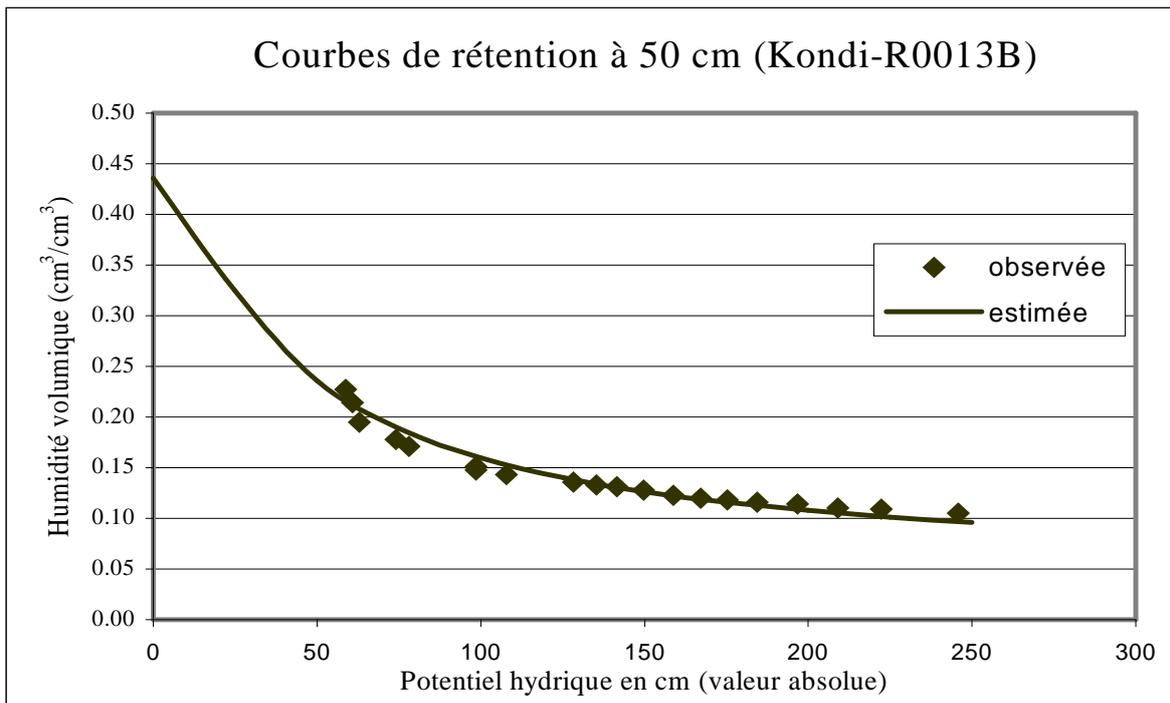
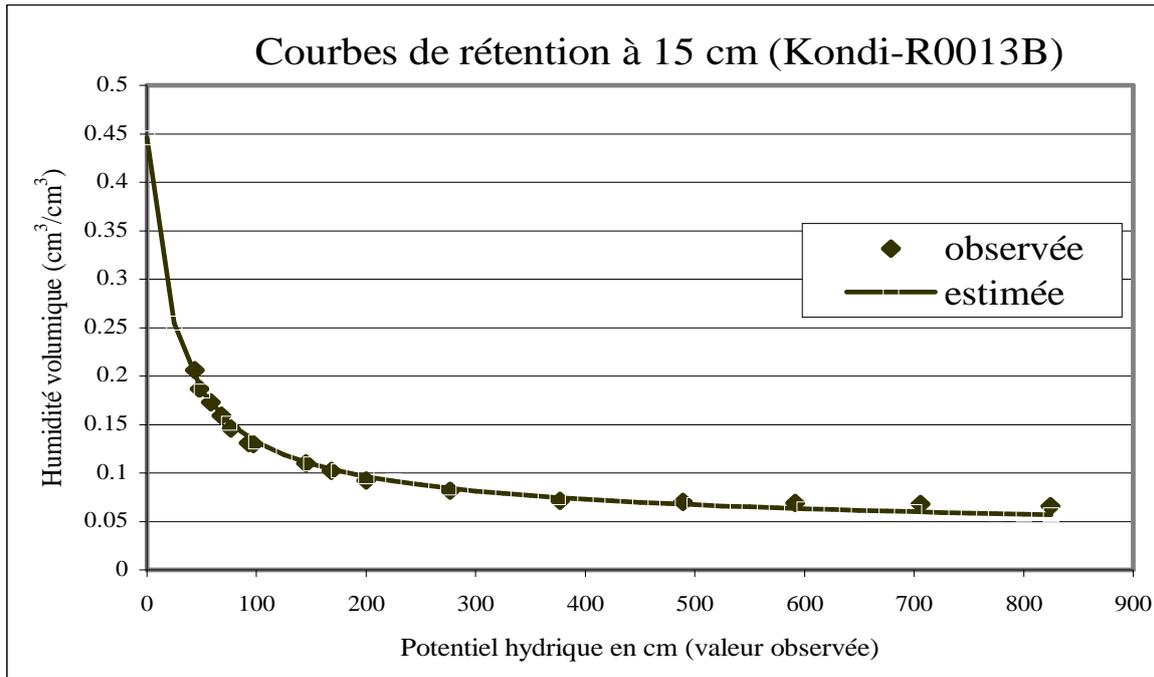
a

<i>Kondi R0013B</i>	Profondeurs			
Paramètres	15 cm	50 cm	100 cm	200 cm
$\theta_r (m^3.m^{-3})$	0.029	0.031	0.036	0.078
$\theta_s (m^3.m^{-3})$	0.446	0.436	0.390	0.390
$\alpha (m^{-1})$	9.310	4.210	36.390	4.140
n (-)	1.623	1.776	1.341	2.009
$K_s (m.j^{-1})$	373.7	200.2	66.5	45.3

b

<i>Kondi R0013A</i>	Profondeurs			
Paramètres	15 cm	50 cm	100 cm	200 cm
$\theta_r (m^3.m^{-3})$	0.029	0.031	0.036	0.054
$\theta_s (m^3.m^{-3})$	0.446	0.436	0.390	0.361
$\alpha (m^{-1})$	13.513	9.781	3.826	5.828
n (-)	1.741	2.015	2.357	1.877
$K_s (m.j^{-1})$	350.2	62.1	45.9	29.3

c



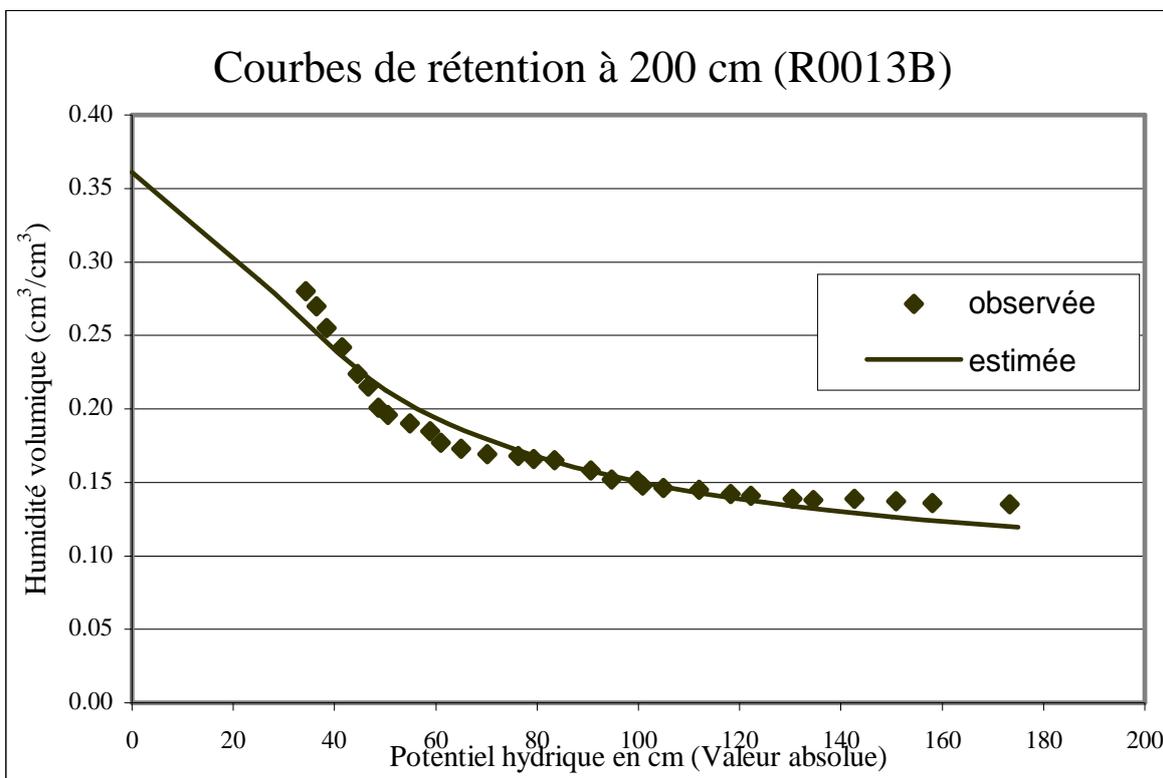
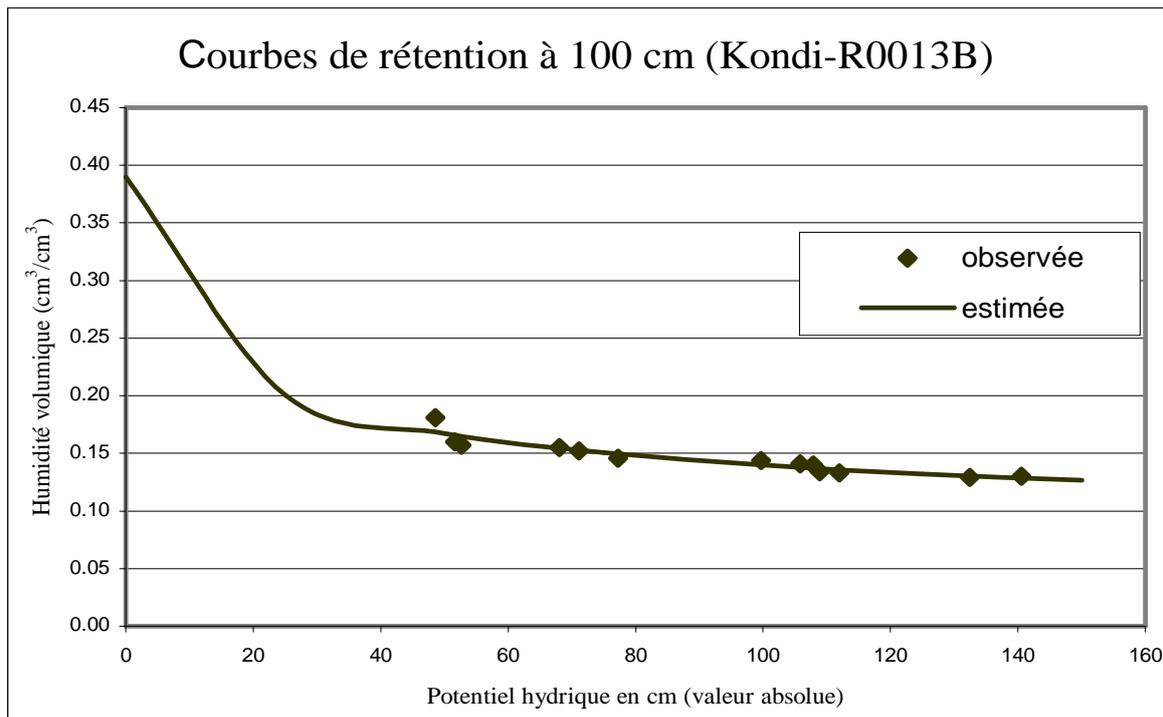


Figure 1 : Exemples de courbes de rétention d'eau à différentes profondeurs (Kondi R0013B).

Tableau II :  $f_{c_s}$ ,  $wilt$  et  $RU$  des trois parcelles.

Profondeur	Plantations			
	( $m^3.m^{-3}$ )	Hinda H9807	Kondi R0013B	Kondi R0013A
15 cm	$f_{c_s}$		0.132	0.090
	$wilt$		0.034	0.031
	$RU$		0.098	0.059
50 cm	$f_{c_s}$	0.102	0.160	0.071
	$wilt$	0.041	0.034	0.031
	$RU$	0.061	0.126	0.040
100 cm	$f_{c_s}$	0.109	0.140	0.092
	$wilt$	0.045	0.055	0.036
	$RU$	0.064	0.085	0.056
200 cm	$f_{c_s}$	0.119 <sup>(*)</sup>	0.150	0.130
	$wilt$	0.042 <sup>(*)</sup>	0.078	0.055
	$RU$	0.077 <sup>(*)</sup>	0.072	0.075

(\*): valeurs calculées à 150 cm

## Les bilans hydriques

L'utilisation des paramètres obtenus par les expériences de drainage interne permet une bonne simulation des humidités observées quelle que soit la profondeur (figures 2 et 3). Les bilans hydriques établis montrent que les eucalyptus consomment plus d'eau que le milieu naturel (savane, Cf. tableau III), mais cette consommation dépend du stade de développement de la plantation. La consommation moyenne des plantations d'eucalyptus est estimée à 64 % de la pluviométrie, soit environ 20 % de plus que la savane.

Les pertes par ruissellement superficiel sont faibles aussi bien sous savane que sous Eucalyptus.

On note cependant que la somme ETR+Ruissellement+Drainage peut être différente de la pluviométrie à cause des variations de stock dans le sol.

Pour une pluviométrie moyenne annuelle de 1200 mm à Pointe-Noire, la recharge de l'aquifère est estimée à 520 mm/an sous savane, à 680 mm/an la première année après plantation, à 410 mm/an pour les plantations de 1 à 2 ans, et à 260 mm/an pour une plantation de 6 à 8 ans. Pour une rotation de 7 ans, la recharge moyenne annuelle est estimée à 400 mm, soit 120 mm de moins que sous savane.

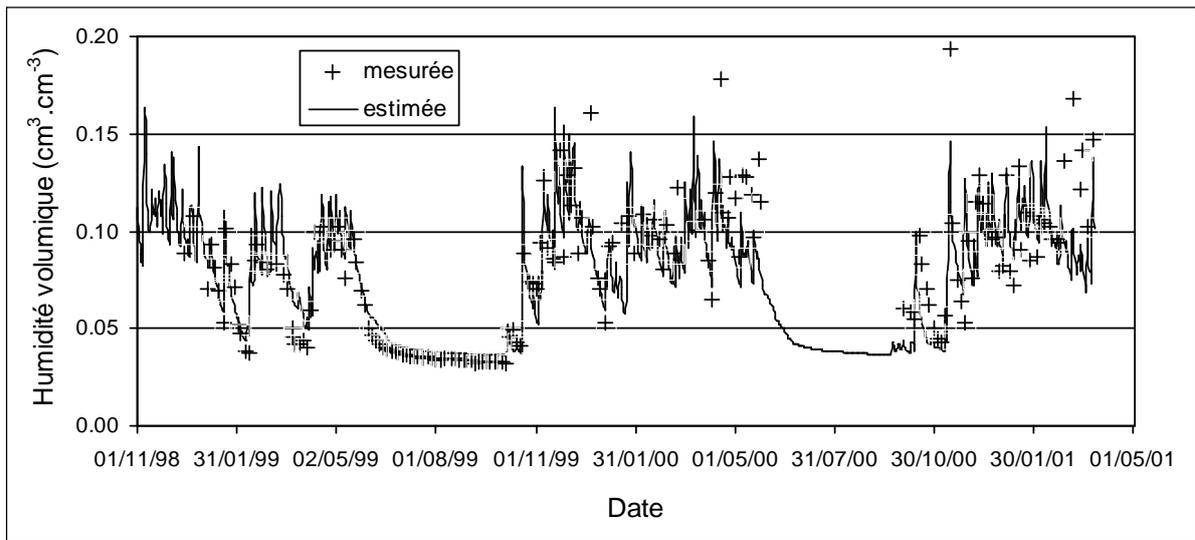


Figure 2 : Exemple d'humidités estimées et observées à 15 cm de profondeur (Kondi R00-13B).

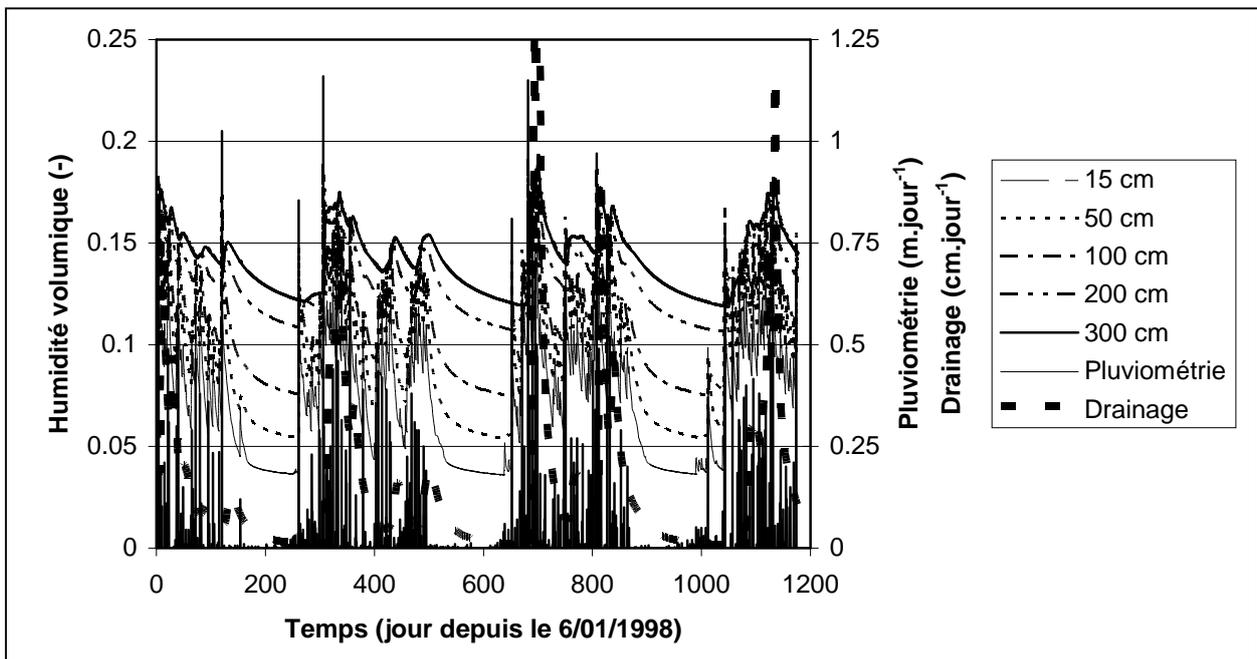


Figure 3 : Exemple d'estimation de l'humidité volumique à différentes profondeurs et du drainage profond par Hydrus1D (Kondi-R00-13B).

Tableau III : Bilan hydrique annuel selon l'écosystème.

Ecosystème		Pluviométrie	ETP <sup>1</sup>	ETR <sup>2</sup>	Ruissellement	Drainage <sup>3</sup>
Savane	mm	1500	1050	820	5	660
	% <sup>4</sup>	100	70	55	0.3	44
Plantation (0-1 an)	mm	1170	1020	600	10	660
	%	100	87	51	0.9	56
Plantation (2-3 ans)	mm	1390	1200	930	15	470
	%	100	86	67	1.1	34
Plantation (6-8 ans)	mm	1500	1140	1040	25	335
	%	100	76	69	1.7	22

<sup>1</sup> ETP : Evapotranspiration potentielle du aux conditions climatique ; <sup>2</sup> ETR : Evapotranspiration réelle

<sup>3</sup> Drainage : quantité d'eau drainée ; <sup>4</sup> Pourcentage par rapport à la pluviométrie

## DISCUSSION

Les sols de la région de Pointe-Noire ont des caractéristiques physico-chimiques très semblables dans toutes les parcelles étudiées [3, 4], les propriétés hydriques devraient donc aussi être similaires. Or, l'estimation des paramètres qui caractérisent la courbe de rétention et le comportement hydrique des sols étudiés révèle une variabilité selon la profondeur sur un même site et entre sites pour une même profondeur.

La variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol a fait l'objet de nombreuses études et d'hypothèses sur leur origine. Les résultats obtenus dans cette étude montrent que la composition granulométrique (texture) ne peut pas à elle seule expliquer la variabilité des courbes de rétention en eau et de leurs paramètres. Les sols des parcelles étudiées ont la même composition granulométrique et des valeurs de densité apparente, de matière organique, de CEC peu différentes [10]. La variation des paramètres hydriques entre parcelles pourrait être due à des différences de la distribution de tailles de pores et de leur organisation dont on ne connaît pas l'origine (macro faune du sol, pédogenèse, géologie...) et aussi au passé cultural des sols. Mais ces caractéristiques n'ont pas été mesurées, car il est difficile de mesurer la taille des pores et leur connectivité par une méthode directe. Outre ces facteurs, les cumuls des petites

différences de texture, de densité apparente, de matière organique et de capacité d'échange cationique entre sites peuvent contribuer aussi à la variabilité du comportement hydrique du sol.

Pour un même site, les variations des paramètres hydriques avec la profondeur sont cohérentes avec les variations de texture, de matière organique et de CEC.

La forme des courbes de rétention en eau des sols sous les trois parcelles étudiées révèle que les sols de la parcelle R0013B succédant à une savane originelle peuvent retenir plus d'eau que les sols des parcelles qui ont déjà connu une replantation (H9807 et R0013A). Chaque parcelle et chaque profondeur présentent un comportement hydrique particulier. Les sols des parcelles H9807 et R0013A sont plus drainants que les sols de la plantation R0013B. Cependant un comportement hydrique similaire s'observe en profondeur dans tous les sites étudiés.

Ces sols ont une réserve utile théorique importante pour le profil 0-200 cm. Néanmoins l'humidité à la capacité au champ n'est jamais atteinte simultanément sur tout le profil des sols sous les trois plantations d'eucalyptus étudiées (figure 3). Ces sols étant très drainants, la quantité d'eau qui tombe sur le sol se laisse ressuyer rapidement en profondeur. Dans ces sols, la RU par unité de volume

augmente avec la profondeur et a tendance à se stabiliser [14].

La détermination des paramètres hydrodynamiques des sols pose le problème de leur variabilité d'une parcelle à une autre. Toutes les études sur la variabilité montrent que les informations obtenues (ou prédictives réalisées) pour une parcelle donnée, sont difficilement transposables à une autre parcelle. Or l'objectif de cette étude était de paramétrer un modèle de transfert hydrique transposable à toute parcelle, mais les différents sols étudiés présentent trois modèles de transferts hydriques distincts.

Le modèle mécaniste basé sur des lois physiques de Richards (1931), caractérise bien le comportement hydrique des sols étudiés en calculant les paramètres de l'équation de van Genuchten (1980) qui lie l'humidité du sol au potentiel hydrique. Les paramètres obtenus montrent que le comportement du sol vis-à-vis de l'eau varie d'une parcelle à une autre.

Les résultats obtenus avec les mesures de pluviométrie (P), d'évapotranspiration potentielle (ETP), de relation entre la transpiration réelle (TR) et l'humidité volumique, et de répartition en profondeur des racines fines permettent de simuler fidèlement l'évolution de l'humidité volumique du sol et des flux d'eau au cours du temps.

Les bilans hydriques calculés montrent que les plantations d'Eucalyptus utilisent en moyenne 120 mm d'eau par an de plus que la savane originelle pour la durée habituelle de rotation de 7 ans. Cette augmentation de l'utilisation de l'eau est due à une transpiration plus importante des Eucalyptus, surtout en saison sèche grâce à leur système racinaire plus profond (supérieur à 6 m pour les Eucalyptus et inférieur à 2 m pour la savane) qui permet de prospecter des couches de sol ayant de l'eau disponible en saison sèche [10]. Ils montrent aussi que les plantations d'Eucalyptus n'empêchent pas une recharge des nappes phréatiques superficielles, même si elles sont moindres que sous savane. Le drainage profond sous Eucalyptus a toujours lieu pour deux raisons. La première est que l'ETP annuelle est en moyenne inférieure à la pluviométrie annuelle, ce qui explique que les

conditions climatiques, en particulier le rayonnement, ne permettent pas aux Eucalyptus de prélever toute l'eau disponible. La deuxième raison est que les sols sont très filtrants, et malgré un système racinaire très développé et croissant rapidement [11, 23], les Eucalyptus ne parviennent pas à capturer toute l'eau du sol lors des épisodes pluvieux importants.

Au niveau régional, la diminution de la recharge des nappes phréatiques à cause des plantations d'Eucalyptus est à relativiser car ces plantations ne forment pas un massif compact. En effet, les plantations sont entrecoupées de savanes et de forêts-galeries. Il est estimé qu'environ un tiers du territoire est occupé par les plantations. En extrapolant les résultats, la diminution annuelle de la recharge des nappes phréatiques ne serait que de 40 mm soit moins de 10% de la recharge sous savane. Il se peut pourtant que les années sèches (pluviométrie inférieure à 1000 mm), les effets des plantations d'Eucalyptus sur les nappes phréatiques soient relativement plus conséquents pour les populations habitant dans le périmètre des plantations.

La diminution du drainage sous Eucalyptus a également pour conséquence de diminuer les risques de pertes d'éléments minéraux et de pollution des nappes phréatiques par les intrants.

Ces bilans hydriques confirment également la très bonne efficacité d'utilisation de l'eau par les Eucalyptus, puisque pour une consommation d'eau 20 % supérieure à celle de la savane, leur production annuelle de biomasse est deux fois plus importante [12, 19].

## CONCLUSION

Notre étude montre, à travers la variabilité des paramètres hydrodynamiques du modèle de Richards, l'hétérogénéité des sols de la région de Pointe-Noire. Les bilans hydriques calculés suggèrent une consommation d'eau par les Eucalyptus plus grande que celle de la savane originelle compensée toutefois par une production de biomasse plus importante. Cependant les plantations d'Eucalyptus n'empêchent pas une

recharge des nappes phréatiques superficielles. En effet, il a été montré dans cette étude que le drainage profond sous Eucalyptus a toujours lieu du fait que l'ETP annuelle reste en moyenne inférieure à la pluviométrie annuelle d'une part, et que les sols sont très filtrants, malgré un système racinaire très développé et croissant rapidement, les Eucalyptus ne parviennent pas à capturer toute l'eau du sol lors des épisodes pluvieux importants, d'autre part.

Les résultats obtenus permettront de faire d'une part, la simulation des écoulements souterrains à l'aide d'un modèle à saturation variable multidimensionnel pouvant gérer par exemple l'infiltration (la recharge) très rapide dans un sol très perméable ou macroporeux (ainsi le couplage de cette infiltration avec la nappe sous-jacente); et d'autre part la modélisation de l'intrusion saline à l'aide d'un modèle d'écoulement densitaire. Ce modèle pourrait tenir compte des forçages hydrologiques (pluies, évaporation), des conditions d'écoulement en amont (dans les plantations d'eucalyptus), des extractions d'eau de pompes (forages industriels), et des communications (drainance) entre différents aquifères (profond, superficiel,...).

## BIBLIOGRAPHIE

1. Bonneau M. et Souchier B., 1994. Pédologie: Constituants et propriétés du sol. Vol. 2, 2<sup>ème</sup> éd. Paris: Masson, 665p.
2. Bourrie G. et Lelong F., 1994. Les solutions du sol du profil au bassin versant. In : Pédologie. Constituants et propriétés du sol. In Bonneau et Souchier. Vol. 2, 2<sup>ème</sup> éd., Paris: Masson., pp 239-273.
3. Brooks R.H. et Correy A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Pap. 3, colo. State Univ., Fort Collins.
4. Damman G., 2001. Etude et modélisation du fonctionnement hydrique de plantation d'Eucalyptus au Congo. Mémoire de DEA, ENSA, Rennes, 44p.
5. Dye P.J., 1996. Climate, forest and streamflow relationships in South African afforested catchments. Commonwealth Forestry Review; 75 (1): 31-38.
6. ddes R.A., Kowalik P.J., and Zaradny H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. New York: John Wiley Sons, 188p.
7. Guennelon R., 1994. – Le sol et l'eau. In Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol. Bonneau et Souchier. 2<sup>ème</sup> édition. Paris: Masson, pp 395-428.
8. Haines W.B., 1936. – Studies in the physical properties of soils: the hysteresis effect in capillary properties and the modes of moisture distribution associated therewith. J. agric. Sci.; 20: 97-116.
9. Haverkamp R., Bouraoui F., Zammit C., Angulo-Jaramillio R., 1998. – Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone. The Handbook of Groundwater Engineering.
10. Laclau J.P., 2001a. – Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation d'eucalyptus. Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais ; conséquence pour la gestion des plantations industrielles. Thèse de Doctorat, INA-PG, 146 p.
11. Laclau J.P., Arnaud M., Bouillet J.P. and Ranger J., 2001b. - Spatial distribution of Eucalyptus roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. Tree Physiol.; 21 (2-3): 129-136.
12. Laclau J.P., Sama-Poumba W., Nzila J.D. Bouillet J.P. and Ranger J., 2002.- Biomass and nutrient dynamics in a littoral savanna subjected to annual fires in Congo. Acta Oecol. ; 23 (1): 41-50.
13. Moukandi-Nkaya D.G., 2003- Esquisse de la morphologie de la surface piézométrique de l'aquifère du bassin sédimentaire de la plaine côtière du Congo : cas de Pointe-Noire, Mémoire de maîtrise, Université Marien Nguabi, 117p.
14. Moukandi-Nkaya D.G., 2004- Paramétrisation de modèles de transfert hydrique dans le sol sous trois plantations d'eucalyptus dans la région de Pointe-Noire, Mémoire de DEA, Université Marien Nguabi, 36p + annexes.
15. Mualem Y., 1976. – A New model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. ; 12 (3) : 513-522.
16. Ngnepieba P., Le Dimet F.X., Boukong A. et Ngnetseng G., 2002. – Identification des paramètres : Une application à l'équation de Richards. ARIMA; 1: 127-157.
17. Nzila J.D., 1996. – Principales caractéristiques des sols de reboisement dans la région de Pointe-Noire. Document interne UR2PI, 15 p.
18. Rogowski A.S., 1971. – Watershed physics: model of soil moisture characteristics. Water Resour. Res. ; 7 : 1575-1582.

19. Saint-André L., Mortier F., Nouvellon Y., and Daquitaine R., 2004. - Confidence intervals for biomass storage and increment within the standing trees. Methodology and application to an age series of eucalyptus plantation. IUFRO, Division 1 Conference, June 14-18 2004, Montpellier, France.
20. Scott D.F. and Smith R.E., 1997. – Preliminary empirical models to predict reductions in total and low flows resulting from afforestation. *Water S.A.*; 23 (2): 135-140.
21. Šim nek J, Suarez D.L. and Sejna M., 1996- The UNSATCHEM Software Package for Simulating the One-Dimensional Variably Saturated Water Flow, Heat Transport, Carbon Dioxide Production and Transport, and Multicomponent Solute Transport with Major Ion Equilibrium and Kinetic Chemistry. Version 2.0 Research Report n° 141, U.S.L.A.R.S., USDA, Riverside, California, 185p.
22. Šimunek J., Šejna M. and al., 1998. – The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0 Riverside, California, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, 80 p.
23. Thongo A., 2003. - Caractérisation de la dynamique de croissance racinaire dans une chronoséquence d'Eucalyptus au Congo. Mémoire de DEA, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo, 30p.
24. van Genuchten M.Th., 1980. – A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am.J.*; 14: 892-898.