



HAL
open science

Contribution à l'intégration des cycles biogéochimiques aux modèles de croissance à base dendrométrique

Julien Sainte-Marie

► **To cite this version:**

Julien Sainte-Marie. Contribution à l'intégration des cycles biogéochimiques aux modèles de croissance à base dendrométrique. 2021. hal-03447553

HAL Id: hal-03447553

<https://hal.science/hal-03447553>

Preprint submitted on 24 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONTRIBUTION À L'INTÉGRATION DES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES AUX MODÈLES DE CROISSANCE À BASE DENDROMÉTRIQUE

JULIEN SAINTE-MARIE

La communauté scientifique, en relation avec les gestionnaires forestiers, travaille depuis plus de trente ans à l'élaboration d'outils d'aide à la décision. Chaque discipline (écophysiologie, biogéochimie, dendrométrie...) propose un éventail de modèles dédiés aux écosystèmes forestiers. Cependant, aucune approche ne permet une évaluation simultanée de l'impact sur la forêt des changements globaux et de la gestion sylvicole sur les services écosystémiques. La nécessité de développer une nouvelle génération de modèles s'appuyant sur la remise en jeu des concepts fondateurs des approches existantes s'impose comme une nécessité de premier plan.

Parmi les modèles dédiés au fonctionnement des écosystèmes forestiers, les modèles à base dendrométrique Fagacées (Dhôte, 1996) et E-Dendro (Saint-André *et al.*, 2002) permettent d'estimer l'impact de la sylviculture sur la croissance et la production des écosystèmes équiennes et monospécifiques. L'écosystème forestier est considéré de l'arbre à la parcelle, sur des échelles de temps allant du mois à la décennie. Les estimations de ces modèles dépendent du concept d'indice de fertilité qui est déterminé dès lors que la hauteur dominante d'un peuplement est connue à un âge donné. Il est alors possible d'estimer la productivité de l'écosystème à n'importe quel âge. L'avantage majeur de ce concept est qu'il rend possible l'utilisation de ces modèles sur la base de mesures *in situ* peu coûteuses en ressources humaines et matérielles.

L'indice de fertilité englobe implicitement l'ensemble des conditions biophysiques de l'écosystème. Ainsi, les paramètres de ces modèles sont associés à des conditions environnementales particulières qu'il est nécessaire de respecter lors de l'utilisation du modèle. Il est alors impossible de différencier l'influence du climat et des cycles biogéochimiques sur la production et la croissance, ce qui constitue une limitation majeure dans le contexte des changements globaux.

Nos travaux contribuent à l'introduction explicite du rôle du climat et des cycles biogéochimiques dans les modèles dendrométriques. L'objectif est d'éliminer le concept d'indice de fertilité et d'explicitement les relations du modèle à l'environnement tout en respectant la granulométrie des modèles dendrométriques (Saint-André, 2013). Cet article présente le modèle *Stand Leaf Cohort Dynamics* (SLCD) dédié à la modélisation de la dynamique mensuelle du feuillage puis s'intéresse à l'étude d'un modèle de décomposition de la matière organique (MO) le long d'un profil vertical de sol.

CONTRIBUTIONS

Modélisation de la dynamique mensuelle du feuillage

- *Rôle de la canopée*

Le couvert foliaire joue un rôle majeur dans la régulation des flux au sein de l'écosystème forestier. Sa dynamique est impliquée dans chaque cycle biogéochimique :

- cycle biochimique : les feuilles sont le siège de la photosynthèse et de la retranslocation d'éléments minéraux lors de sénescence ;
- cycle biologique : la création et la maintenance des feuilles requièrent l'allocation d'éléments minéraux qui sont restitués au sol forestier par les litières ;
- cycle géochimique : la fermeture du couvert influence le cycle de l'eau, les flux énergétiques et l'interception des dépôts atmosphériques.

- *Modèle Stand Leaf Canopy Dynamics (SLCD)*

Le modèle probabiliste SLCD a été développé afin d'estimer la dynamique mensuelle du feuillage (Sainte-Marie *et al.*, 2012, 2014). SLCD considère la canopée comme une population de feuilles distribuées en classes d'âge mensuelles i appelées cohortes. L'âge d'une feuille est déterminé par sa période d'attachement à l'arbre, c'est-à-dire la différence entre le mois où l'âge de la feuille est considéré et le mois de bourgeonnement. Si une feuille est tombée, son âge est égal à la durée entre le mois de bourgeonnement et le mois d'abscission.

La population totale de feuilles au sein de la canopée au mois k est notée $N(k) \in \mathbb{N}$. Elle est la somme des populations de chaque cohorte présente au sein de la canopée :

$$N(k) = \sum_{i \geq 1} N^i(k)$$

où $N^i(k) \in \mathbb{N}$ est le nombre de feuilles au sein de la cohorte d'âge i le mois k .

Chaque mois, le modèle SLCD effectue deux opérations successives qui permettent de simuler la dynamique de ces populations (figure 1, p. 613) : vieillissement ou mortalité des feuilles suivant une probabilité de chute, et production de nouvelles feuilles. La biomasse foliaire, l'indice foliaire (LAI) et les chutes de litière sont obtenus en combinant la dynamique de la population de feuilles avec des informations sur leurs traits (masse, surface).

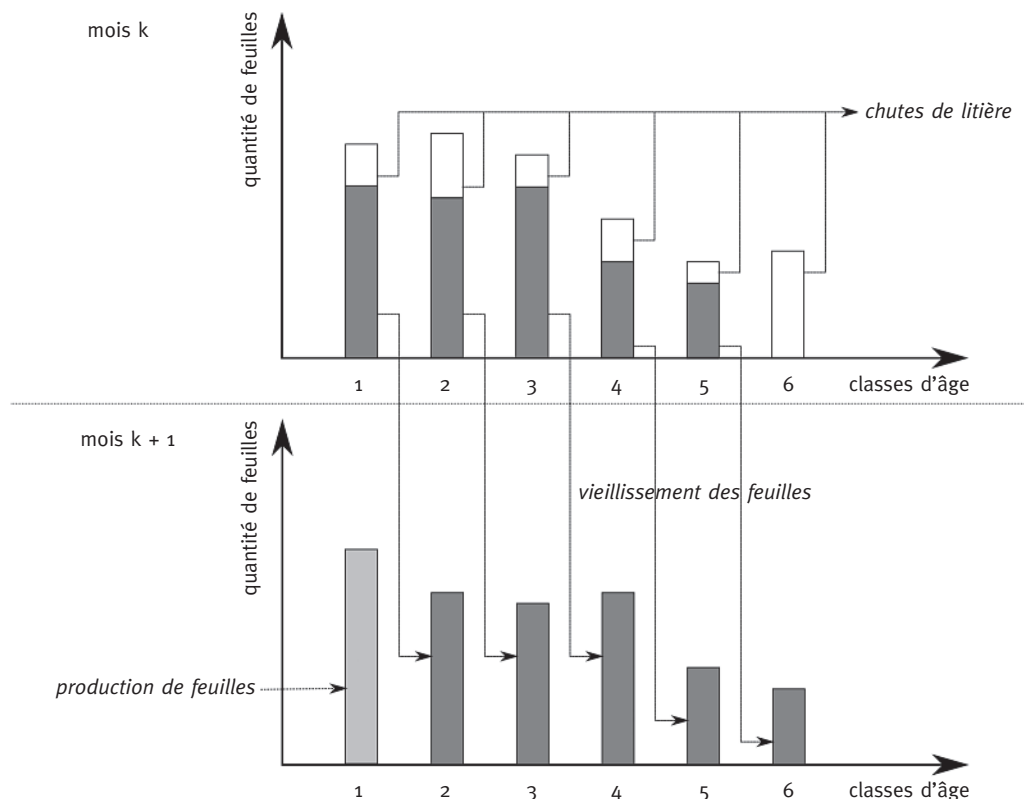
Les possibilités de SLCD ont permis de l'appliquer aussi bien au contexte tempéré que tropical. Son formalisme général a permis notamment l'introduction d'éléments issus d'autres modèles, ce qui démontre une relative souplesse d'utilisation et une ouverture à des améliorations futures.

Plusieurs hypothèses sur la phénologie des eucalyptus issues de la littérature ont été utilisées avec succès. Notre modèle confirme que les effets combinés de la sécheresse (sur la foliation et chute de litières) et du rayonnement solaire (sur les chutes de litières) sont les moteurs principaux de la phénologie de ces écosystèmes. Une forte régulation interne associée aux variations de LAI a également été mise en évidence : il influence la quantité d'énergie absorbée par le feuillage et donc la saturation de la capacité photosynthétique et il permet de montrer que la production de nouvelles feuilles accélère la chute des anciennes. Ces points démontrent la capacité d'investigation de SLCD qui permet d'apporter un éclairage supplémentaire sur la phénologie mal comprise des essences ligneuses.

FIGURE 1

DESCRIPTION DE LA DYNAMIQUE DES COHORTES DANS LE MODÈLE *STAND LEAF COHORT DYNAMICS* (SLCD)

Elle repose sur trois processus clés (*en italique*), tenant compte de la phénologie de l'essence et de l'évolution des conditions environnementales : (1) la production de feuilles (en gris clair), (2) le vieillissement (en gris foncé), (3) la chute des feuilles (en blanc) déterminée par des probabilités.



Décomposition de la matière organique le long du profil vertical de sol

La décomposition de la matière organique du sol est un processus clé du cycle des éléments minéraux au sein des écosystèmes forestiers. Elle est le produit de l'activité de la biodiversité du sol, la macrofaune, la mésofaune, la microfaune, et les assemblages d'espèces fongiques et bactériennes. La production de composés organiques et minéraux résultante est une composante importante de la biodisponibilité en éléments minéraux dans le sol.

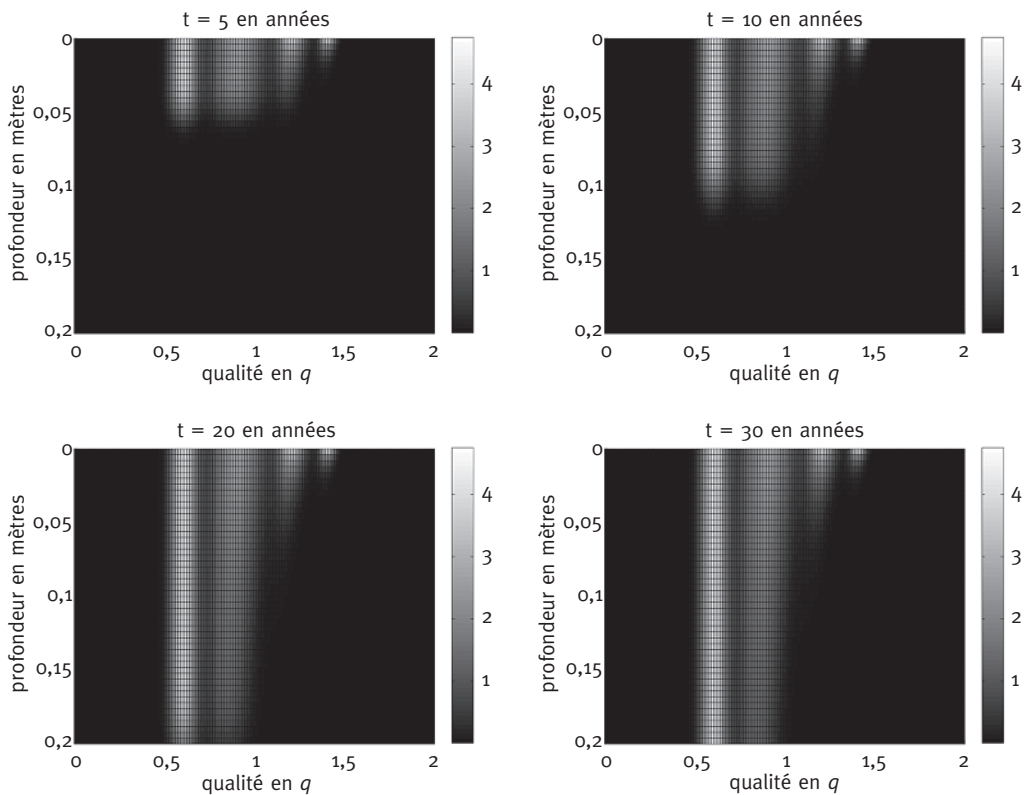
La communauté scientifique a produit depuis les années 1970 plus de 250 modèles dédiés à l'étude de l'évolution de la matière organique du sol (Manzoni et Porporato, 2009). Parmi cette multiplicité d'approches, Göran Ågren et Ernesto Bosatta ont développé à partir des années 1980 une théorie originale reposant sur le concept de qualité caractérisant l'hétérogénéité de la matière organique, et traduite dans leur modèle par différents couples d'équations intégro-différentielles.

La notion de communauté de décomposeurs mentionnée ici représente de manière indifférenciée les communautés bactériennes et microbiennes agissant sur la matière organique. Les activités de la macrofaune et de la mésofaune n'ont pas été prises en compte. La théorie de la qualité consiste à associer à chaque atome de carbone présent dans la matière organique, une qualité notée q

évoluant au cours du temps. Cette variable d'état caractérise la réactivité de la matière organique face à l'activité des décomposeurs : une qualité faible correspond à la matière organique peu réactive (exemple : lignine), tandis qu'une qualité élevée traduit l'inverse. Les concentrations de carbone et d'éléments minéraux associés sont alors vues comme des distributions dépendant de la qualité. Cette approche permet de ne pas détailler la composition biochimique de la matière organique tout en tenant compte de son hétérogénéité.

FIGURE 2 MODÉLISATION SUR 30 ANS DE LA DYNAMIQUE DE LA QUALITÉ ET DE LA CONCENTRATION EN CARBONE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LE CAS D'UN APPORT CONSTANT LE LONG D'UN PROFIL VERTICAL DE SOL SUR 20 CM

Le modèle permet de mettre en évidence une diminution de la qualité du carbone organique associée à l'augmentation de la profondeur. Le carbone de qualité élevée est rapidement consommé dans les premiers centimètres de sol par les décomposeurs alors que les qualités faibles sont transportées en profondeur sans être dégradées. Les paramètres utilisés ici sont arbitraires et pourront être ajustés selon le site d'étude considéré.



Bosatta et Ågren (1996) proposent un modèle mathématique intégrant l'évolution de la matière organique le long d'un profil vertical de sol, présentant de nombreux avantages pour l'élaboration de modèles écosystémiques :

- son formalisme très général, en particulier le concept « d'activité des décomposeurs », permet d'envisager une intégration progressive des acquis de la microbiologie, sans modification fondamentale des propriétés mathématiques du modèle,

— l'intégration de la dimension verticale permet d'envisager la modélisation de nombreuses interactions entre le sol et la plante en considérant notamment les profils racinaires. Or, cette approche mathématique n'a pour l'instant pas été prolongée dans la littérature.

Cette thèse a permis l'analyse mathématique du modèle. Nous avons proposé :

- une preuve d'existence et l'unicité de solutions à l'équation de transport intégro-différentielle du modèle général,
- des schémas de différences finies implicites-explicites convergents estimant les solutions du modèle ;
- une discussion autour des hypothèses sous-jacentes à la formulation du modèle.

Grâce à ces éléments mathématiques, nous avons désormais à notre disposition un nouvel outil pour modéliser la décomposition de la matière organique du sol, reposant sur la théorie de la qualité. Nos travaux se concentrent sur la litière foliaire mais sont capables de prendre en compte n'importe quel type de litière organique (branches, écorces...). De plus, ce modèle peut prendre en compte aussi bien des apports réguliers que ponctuels de matière organique (exemple : apport de rémanents).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

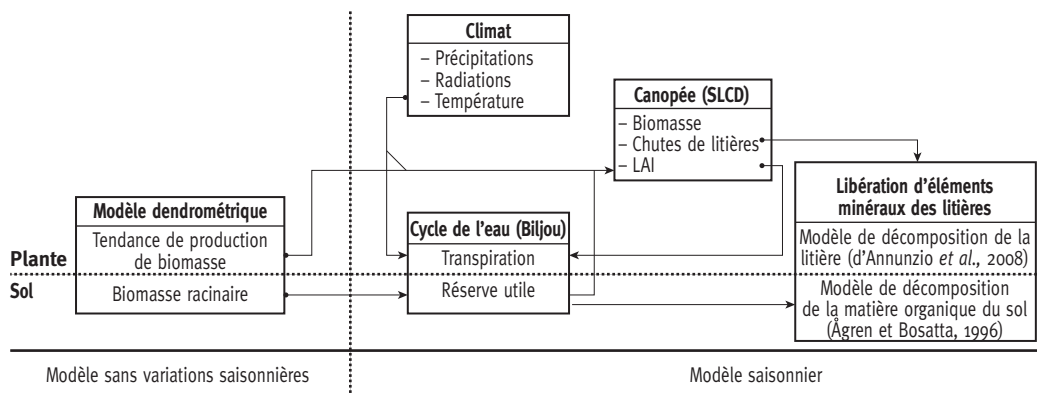
L'élaboration d'une nouvelle génération de modèles sol-plante passe par une prise en compte de l'ensemble des processus de l'écosystème forestier. La révision du concept d'indice de fertilité nécessite d'intégrer les cycles géochimiques et biologiques aux modèles dendrométriques. Leur introduction nécessite l'incorporation de la chimie du sol, interface naturelle entre ces deux cycles, aux modèles dendrométriques.

La méthodologie mise en œuvre dans les modèles ForSafe et Profile (Sverdrup, 2009) est actuellement l'une des plus performantes pour simuler la chimie du sol. Rendre possible l'utilisation de Safe (Alveteg, 1998), sous-compartiment pour la chimie du sol de ForSafe, est l'un de nos objectifs à moyen terme.

Le flux d'éléments issu de l'altération des minéraux devrait s'estimer sur la base d'une modélisation géochimique dérivée de l'analyse totale du sol. L'intégration du climat et du bilan hydrique est une étape indispensable à la quantification du flux d'éléments perdus par drainage. L'intégration du cycle de l'eau est envisagée avec le modèle Biljou (Granier *et al.*, 1999). Ce modèle écophysologique climat-dépendant permet d'estimer l'interception des pluies par le peuplement, la transpiration journalière de l'écosystème, la réserve utile d'eau du sol et le drainage à partir des données climatiques locales. Les modèles E-Dendro, SLCD et Biljou sont d'ores et déjà associables pour évaluer les flux d'eau au sein de l'écosystème.

La modélisation du cycle biologique est nécessaire avant tout amendement des modèles dendrométriques. Ces derniers permettent d'estimer le contenu des arbres en éléments minéraux et de quantifier les exportations d'éléments minéraux en fonction des traitements sylvicoles. Cependant, la restitution d'éléments minéraux au sol par les chutes de litière et leur dégradation n'est pas prise en compte. L'ensemble de la chaîne allant de la plante, plus spécifiquement la feuille, passant par la décomposition de la matière organique de la litière jusqu'aux horizons organiques du sol doit être intégrée. Pour atteindre cet objectif, l'association des productions de litières simulées par SLCD, du modèle de décomposition présenté ici et d'un modèle de décomposition des litières (d'Annunzio *et al.*, 2008) permettra d'estimer les entrées de matière organique dans le sol en prenant en compte l'influence du climat, de l'essence et de sa production.

FIGURE 3 SCHEMA MONTRANT LA COMBINAISON DES DIFFERENTS MODELES MENTIONNES



Julien SAINTE-MARIE

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

UMR 7502 CNRS-Université de Lorraine

Institut Elie Cartan BP 70239

F-54506 VANDŒUVRE-LÈS-NANCY CEDEX

et

INRA Centre Nancy-Lorraine

UR Biogéochimie des écosystèmes forestiers

F-54280 CHAMPENOUX

(Julien.Sainte-Marie@univ-lorraine.fr)

Encadrants :

Antoine HENROT, Matthieu BARRANDON — Université de Lorraine, UMR 7502 CNRS-Université de Lorraine — Institut Elie Cartan, BP 70239 — F-54506 VANDŒUVRE-LÈS-NANCY CEDEX
(antoine.henrot@univ-lorraine.fr) (matthieu.barrandon@univ-lorraine.fr)

Laurent SAINT-ANDRÉ — INRA Centre de Nancy-Lorraine, UR Biogéochimie des écosystèmes forestiers — F-54280 CHAMPENOUX (st-andre@nancy.inra.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- ALVETEG (M.). — Dynamics of Forest Soil Chemistry. — Department of Chemical Engineering II, Lund University, Sweden, 1998 (Thèse de doctorat).
- BOSATTA (E.), ÅGREN (G.). — Theoretical analyses of carbon and nutrient dynamics in soil profiles. — *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 28, n° 10-11, 1996, pp. 1523-1531.
- D'ANNUNZIO (R.), ZELLER (B.), NICOLAS (M.), DHÔTE (J.-F.), SAINT-ANDRÉ (L.). — Decomposition of european beech (*Fagus sylvatica*) litter: Combining quality theory and n-15 labelling experiments. — *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 40, n° 2, 2008, pp. 322-333.
- DHÔTE (J.-F.). — A model of even-aged beech stands productivity with process-based interpretations. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, n° 1, 1996, pp. 1-20.
- GRANIER (A.), BRÉDA (N.), BIRON (P.), VILLETTE (S.). — A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. — *Ecological Modelling*, vol. 116, n° 2-3, 1999, pp. 269-283.
- MANZONI (S.), PORPORATO (A.). — Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. — *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 41, n° 7, 2009, pp. 1355-1379.

- SAINT-ANDRÉ (L.). — Intégration des cycles biogéochimiques dans les modèles de croissance à base dendrométrique. Concepts — forces et limites de l'approche. — Habilitation à diriger la recherche — École doctorale RP2E, 2013.
- SAINT-ANDRÉ (L.), LACLAU (J.-P.), BOUILLET (J.-P.), DELEPORTE (P.), MIABALA (A.), OGNUOUBI (N.), BAILLERES (H.), NOUVELLON (Y.), MOUKINI (R.). — Integrative modelling approach to assess the sustainability of the Eucalyptus plantations in Congo. — *Fourth Workshop*, 2002.
- SAINTE-MARIE (J.), HENROT (A.), SAINT-ANDRÉ (L.), BARRANDON (M.), NOUVELLON (Y.), ROUPSARD (O.), LACLAU (J.-P.). — Modeling the environmental and seasonal influence on canopy dynamic and litterfall of even-aged forest ecosystems by a model coupling growth and yield and process-based approaches. *In: Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications*. 2012 IEEE Fourth International Symposium. — Proceedings, 2012, pp. 324-331.
- SAINTE-MARIE (J.), SAINT-ANDRÉ (L.), NOUVELLON (Y.), LACLAU (J.-P.), ROUPSARD (O.), MAIRE (G.L.), DELPIERRE (N.), HENROT (A.), BARRANDON (M.). — A new probabilistic canopy dynamics model (SLCD) that is suitable for evergreen and deciduous forest ecosystems. — *Ecological Modelling*, vol. 290, 2014, pp. 121-133.
- SVERDRUP (H.). — Chemical weathering of soil minerals and the role of biological processes. — *Fungal Biology Reviews*, vol. 23, n° 4, 2009, pp. 94-100.

CONTRIBUTION À L'INTÉGRATION DES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES AUX MODÈLES DE CROISSANCE À BASE DENDROMÉTRIQUE (Résumé)

L'élaboration d'une nouvelle génération de modèles dédiés à l'approche intégrée des écosystèmes forestiers est indispensable pour simuler les effets des changements globaux. Nous proposons des outils permettant de rapprocher les modèles à base dendrométrique, écophysiologicals et biogéochimiques. La modélisation de la dynamique du renouvellement foliaire et de la décomposition de la matière organique du sol permet d'envisager l'introduction du cycle de l'eau et des cycles biogéochimiques aux modèles dendrométriques.

CONTRIBUTION TO THE INTEGRATION OF BIOGEOCHEMICAL CYCLES INTO DENDROMETRIC GROWTH MODELS (Abstract)

The design of a new generation of models dedicated to forest ecosystems is required to simulate the effects of global changes. Our modelling tools are introduced to bridge the gap between dendrometric, ecophysiological and biogeochemical models. The modelling of foliage renewal dynamics and of soil organic matter decomposition makes it possible to integrate water and biogeochemical cycles into dendrometric models.
