



HAL
open science

Modelisation du bilan hydrique des peuplements forestiers

André Granier, Vincent Badeau, Nathalie Bréda

► **To cite this version:**

André Granier, Vincent Badeau, Nathalie Bréda. Modelisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue forestière française*, 1995, 67 (S), pp.59-68. 10.4267/2042/26719 . hal-03444311

HAL Id: hal-03444311

<https://hal.science/hal-03444311v1>

Submitted on 23 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.

MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE DES PEUPLEMENTS FORESTIERS

A. GRANIER - V. BADEAU - Nathalie BRÉDA

Il est souvent démontré que la disponibilité en eau et en éléments minéraux est parmi les principales contraintes pour la croissance des arbres (Zahner, 1968). Ceci est vrai tant en ce qui concerne les variations interannuelles de la croissance qu'à l'échelle de la saison de végétation. La figure 1 (ci-dessous) en donne un exemple, sur des mesures de croissance en circonférence réalisées sur un échantillon de chênes sessiles en forêt de Champenoux (Meurthe-et-Moselle), en relation avec la réserve hydrique du sol mesurée au moyen d'un humidimètre neutronique. On met en évidence un synchronisme étroit entre l'arrêt de la croissance (voire la rétraction des tissus) et la diminution de la réserve en eau du sol au-dessous d'un seuil qui correspond à un état de stress hydrique. La croissance montre une forte variabilité interannuelle liée à celle du climat, notamment de la pluie. Cette constatation s'applique même à la région Lorraine, où les normales de précipitations sont bien réparties sur toute l'année, mais où les fluctuations interannuelles sont très importantes (voir figure 2, p. 60).

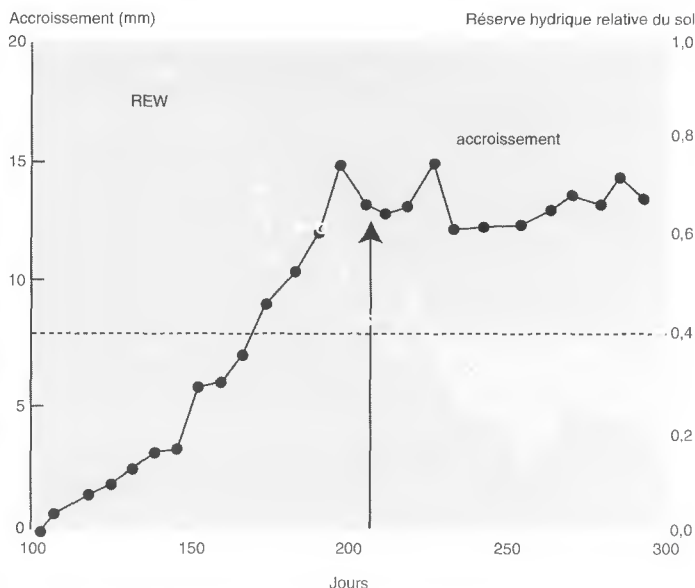


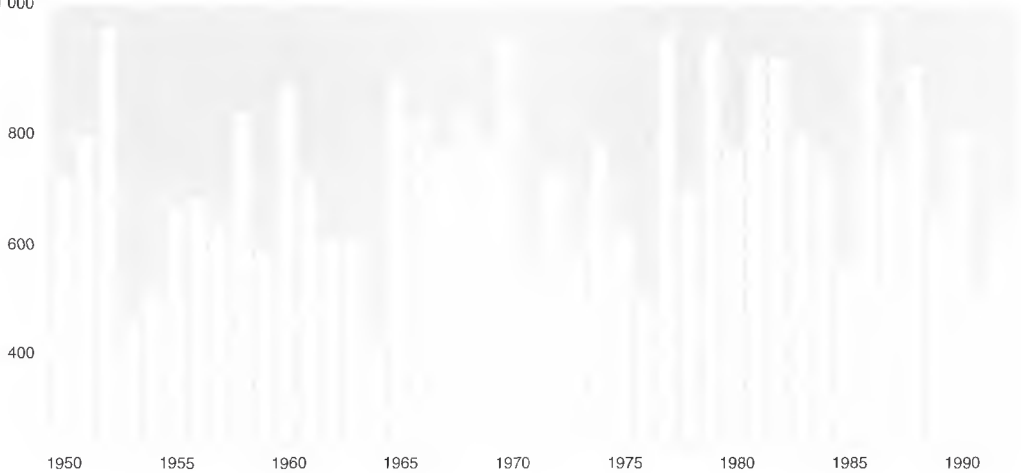
Figure 1
**INFLUENCE DU DESSÈCHEMENT
 DU SOL SUR LA CROISSANCE
 EN CIRCONFÉRENCE DE CHÊNES
 SESSILES (arbres dominants)
 EN CONDITION DE PEUPEMENT
 FERMÉ POUR L'ANNÉE 1989**

La flèche indique le synchronisme entre déficit hydrique (zone hachurée) et rétraction des tissus. Expérimentation réalisée en forêt domaniale de Champenoux (Meurthe-et-Moselle)

Figure 2

**VARIATIONS INTERANNUELLES DES PRÉCIPITATIONS INCIDENTES
MESURÉES AU POSTE MÉTÉO-FRANCE DE TOMBLAINE (MEURTHE-ET-MOSELLE)**

Pluie incidente (mm)
1 000



Il existe différentes méthodes de calcul du bilan hydrique qui diffèrent par le pas de temps et les hypothèses simplificatrices. Le choix d'un modèle de bilan hydrique doit être raisonné en fonction de son adéquation avec le but recherché : caractériser un climat, diagnostiquer des épisodes de sécheresse affectant la croissance ou risquant de provoquer des dysfonctionnements irréversibles, évaluer la consommation en eau d'une culture ou déclencher une irrigation en sont des exemples.

Les modèles les plus simples consistent à calculer des indices climatiques tels que la différence entre la pluie et l'ETP à un pas de temps mensuel. L'avantage essentiel de cette option est la facilité d'accès aux données climatiques. Elle permet en outre de caractériser un climat régional. Toutefois, selon Choissnel (1992), il est impropre de parler ici de bilan hydrique, puisqu'on ne calcule pas "l'évolution au cours du temps de la réserve utile". De plus, cette approche manque de finesse, liée au pas de temps choisi, avec un découpage mensuel arbitraire sans signification phénologique, et à son caractère statistique : on perd la notion de simultanéité des événements météorologiques et d'interdépendance des variables entre elles. Il est préférable de retenir un pas de temps décennaire, ou mieux encore journalier, permettant une bonne prise en compte de la succession des épisodes pluvieux et de leur intermittence.

À l'inverse, il existe des modèles mécanistes basés sur les processus énergétiques et physiologiques qui gouvernent le fonctionnement des couverts végétaux qu'ils soient mono- ou multicouches (cas des peuplements avec sous-étage). Il y a dans ce cas résolution complète du bilan d'énergie de surface. L'avantage est évident, et ces modèles peuvent être interfacés avec des modèles de fonctionnement carboné (Running et Gower, 1991). L'inconvénient majeur est lié à la difficulté de recueil des données et des paramètres d'entrée comme les variables climatiques (pas de temps horaire), les conductances de couvert et aérodynamiques, la structure aérienne et racinaire, etc.

Nous présentons ici un modèle de bilan hydrique simplifié, c'est-à-dire ne comportant pas de résolution explicite du bilan d'énergie de surface, mais utilisant l'ETP, compromis entre ces deux approches, en favorisant :

- l'accessibilité aux données climatiques d'entrée, avec le choix d'un pas de temps journalier, ce qui est compatible avec la structure des fichiers disponibles auprès de Météo-France,
- la simplification des paramètres d'entrée pour faciliter l'extrapolation du modèle à différentes situations d'espèce ou de milieu,
- une approche mécaniste du fonctionnement et de la croissance des arbres.

Ces choix ont l'ambition de permettre à la fois des simulations pluriannuelles rapides sur des séries climatologiques longues et une bonne précision sur l'évaluation de l'ETR et des indices de sécheresse.

Les objectifs de ce travail sont :

- d'effectuer des analyses rétrospectives et prévisionnelles de l'intensité du déficit de réserve en eau du sol,
- de simuler les composantes du bilan hydrique, notamment la transpiration des arbres et le drainage,
- d'expliquer les variations interannuelles de la croissance et de l'état sanitaire des forêts,
- d'une façon plus générale, d'améliorer la connaissance des facteurs qui modulent la production forestière.

DESCRIPTION DU MODÈLE

Il s'agit d'un modèle itératif au pas de temps journalier (voir Bréda, 1994), schématisé sur la figure 3 (p. 62). Pour chaque journée, les variables suivantes sont calculées :

- L'ETP à partir des variables climatiques élémentaires (température de l'air, pression partielle de vapeur d'eau dans l'air, vitesse du vent, durée d'insolation ou mieux rayonnement global), au moyen de la formule de Penman.
- La pluie au sol, par différence entre la pluie incidente et l'interception des précipitations, et en ajoutant l'écoulement le long des troncs (figure 3.1). Ces deux derniers termes ont fait l'objet d'un grand nombre d'études, notamment par Aussenac (1972), et on trouve dans la littérature des relations expérimentales pour les différentes espèces forestières feuillues et résineuses [voir la synthèse de Humbert et Najjar, 1992, ou les travaux de Nizinski et Saugier, 1989, sur la chênaie].
- L'évapotranspiration du sous-étage lorsqu'il existe (ou à défaut l'évaporation du sol), égale à une fraction constante de l'ETP, et qui correspond à l'utilisation de l'énergie qui atteint cette strate. Lorsque le peuplement est fermé, on a fixé ce terme à 2,5 % de l'ETP. Il est possible de modifier cette fraction, si l'on dispose de mesures de rayonnement sous le couvert ou de mesures directes d'évapotranspiration du sous-étage (Loustau et Cochard, 1991).

Le réservoir sol est défini par une tranche de sol d'épaisseur égale à la profondeur utile de sol, c'est-à-dire la profondeur prospectée par le système racinaire.

En début de simulation (1^{er} janvier de la première année de la simulation), la réserve est initialisée à sa valeur maximale (réserve utile observée à la capacité au champ). À la réserve hydrique de la veille sont alors ajoutée la pluie arrivant au sol (figure 3.2) et retranchée l'évapotranspiration du sous-étage. Pour remplir le réservoir sol, on partage la pluie au sol en deux termes : l'un correspond aux écoulements préférentiels *via* la macroporosité structurale (ou fissurale). La seconde fraction remplit les horizons tant qu'ils ne sont pas saturés ; s'ils le sont, toute la lame d'eau part en drainage vertical. Ce calcul est réalisé de façon itérative pour chaque horizon.

- Une nouvelle réserve hydrique $R(j)$ est ainsi calculée pour l'ensemble du réservoir sol, que l'on exprime en réserve hydrique relative REW (Relative Extractable Water) (figure 3.3), pour savoir si la capacité du sol est dépassée (il y a alors drainage, cf. figure 3.4) et pour savoir si les arbres sont soumis à un stress hydrique (figure 3.5) :

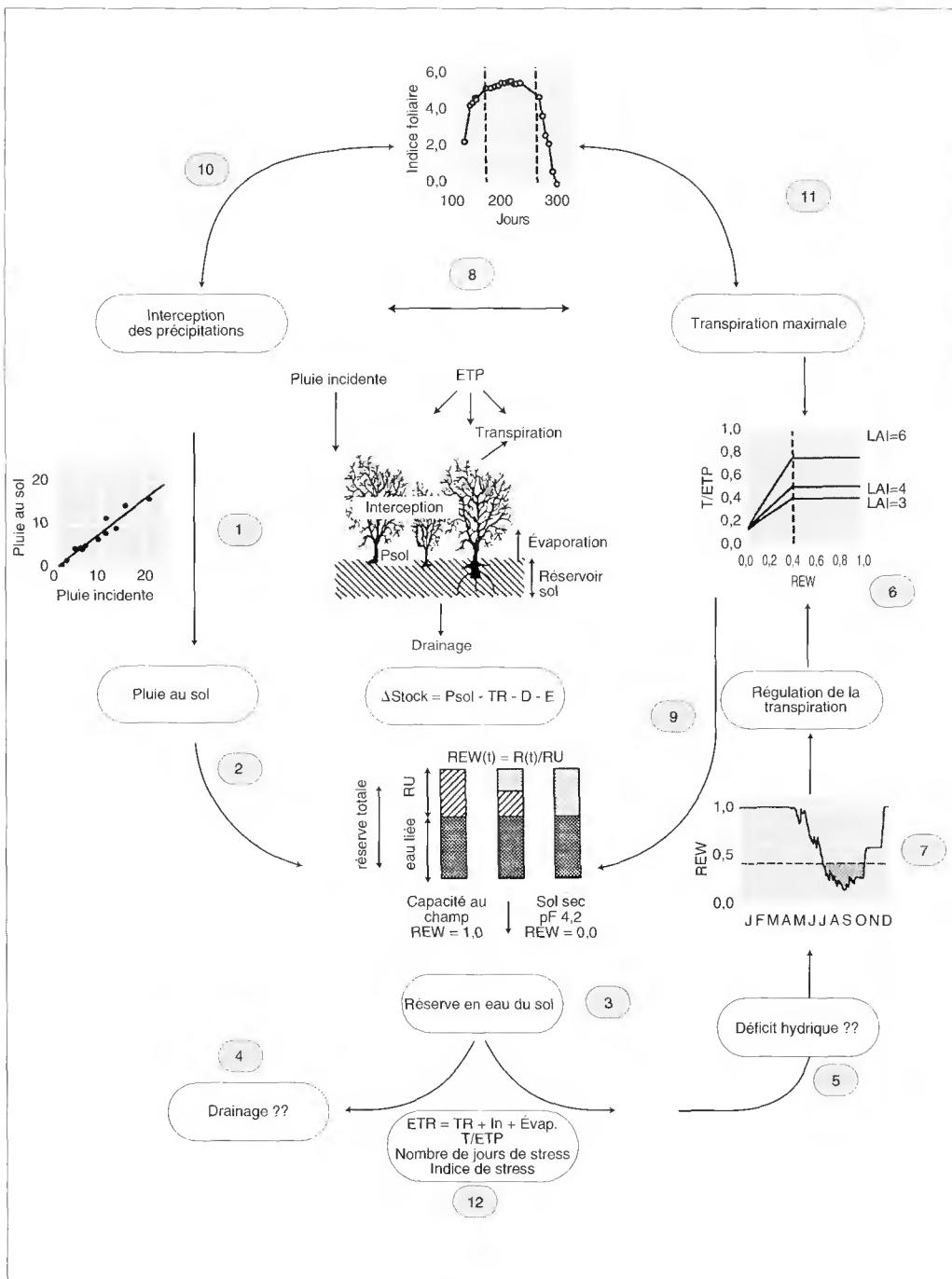
$$REW = \frac{R(j) - R_{\min}}{RU}$$

avec R_{\min} : réserve hydrique minimale, au-dessous de laquelle les arbres ne peuvent plus prélever de l'eau,

RU : réserve utile du sol.

Figure 3

SCHÉMA GÉNÉRAL DU MODÈLE DE BILAN HYDRIQUE JOURNALIER,
d'après Bréda (1994)
Les différentes étapes numérotées de 1 à 12 sont décrites dans le texte (p. 61 et 63).



L'étape suivante consiste à calculer la transpiration du peuplement. Si REW est compris entre 0,4 et 1,0, la transpiration des arbres est proportionnelle à ETP (figure 3.6) ; pour la plupart des espèces étudiées et dans le cas de couverts fermés, il a été montré que le rapport T/ETP était de l'ordre de 0,7 à 0,8 en peuplement fermé, aussi bien pour des feuillus (Aussenac et Granier, 1979 ; Savoie *et al.*, 1988 ; Bouten *et al.*, 1992 ; Bréda *et al.*, 1993) que pour des résineux (Black, 1979 ; Aussenac et Boulangeat, 1980). Nos travaux récents ont aussi montré que les valeurs maximales de T/ETP sont proportionnelles à l'indice foliaire du peuplement (Bréda et Granier, 1996) (figure 3.6).

Différentes expérimentations sur espèces feuillues ou résineuses (Black, 1979 ; Granier, 1987 ; Bréda, 1994) ont montré qu'en dessous d'un seuil de réserve critique (REW égal à 0,4), la transpiration des arbres se réduisait par fermeture stomatique. Ainsi, dans notre modèle (voir figure 3, p. 62) lorsque REW diminue de 0,4 à 0,0 (zone pointillée, figure 3.7), la transpiration est réduite de manière linéaire (figure 3.6).

Lorsqu'une pluie intervient, le modèle calcule la perte par interception, qui correspond au blocage momentané de la transpiration par l'eau libre qui recouvre le feuillage (figure 3.8). Cette perte peut être quantitativement importante (Viville *et al.*, 1993).

La transpiration est finalement déduite de la réserve hydrique du sol (figure 3.9).

Enfin, dans le cas de peuplements feuillus, le modèle prend en compte le développement phénologique : l'interception des précipitations (figure 3.10) et la transpiration des arbres (figure 3.11) sont pondérées pendant les phases d'expansion foliaire après le débourrement et de sénescence avant la chute des feuilles. Les variations du rapport T/ETP au cours de ces périodes extrêmes de la saison de végétation ont été particulièrement étudiées (Nizinski et Saugier, 1989), par mesures simultanées de transpiration des peuplements (flux de sève) et suivi d'indice foliaire (Bréda, 1994 ; Bréda et Granier, 1996). Le paramétrage du modèle pour les feuillus nécessite de connaître les dates de débourrement et de chute des feuilles.

Les sorties du modèle sont les suivantes (figure 3.12) :

- les différents flux hydriques journaliers (transpiration des arbres et du sous-étage, ETR, drainage) et la réserve en eau du sol ;
- le déficit de réserve, journalier ou cumulé sur la saison de végétation ou sur la durée d'une phase phénologique précise (mise en place de l'indice foliaire, du bois initial ou final, croissance radiale des arbres...), calculé par différence entre la réserve critique (lorsque REW = 0,4) et la réserve du sol actuelle (voir zone pointillée figure 3.7) ;
- le nombre de jours où la réserve se situe au-dessous de sa valeur critique.

CALIBRAGE ET VALIDATION DU MODÈLE

Le calibrage a concerné les termes transpiration des arbres (flux de sève) et l'interception des précipitations (mesures directes de pluie au sol), ainsi que la dynamique de l'eau dans le sol (profils en dessèchement et en réhumectation, propriétés hydrodynamiques du sol).

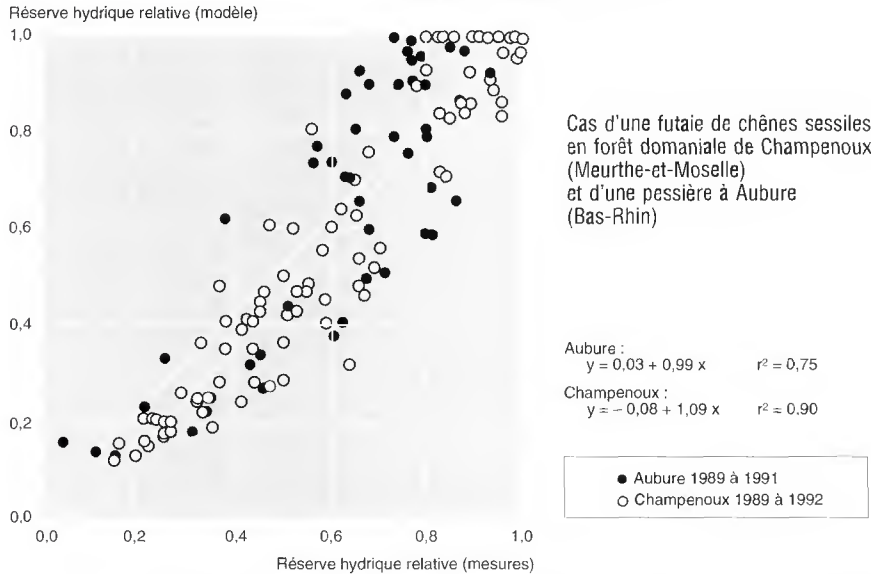
La validation du modèle a été effectuée dans deux parcelles d'espèces différentes dans des milieux contrastés :

- une parcelle de Chênes sessiles en forêt domaniale de Champenoux (Meurthe-et-Moselle). Pour les détails de cette expérimentation, se reporter à Bréda *et al.* (1993),
- une parcelle d'Épicéas en forêt communale d'Aubure (Bas-Rhin), dont le bilan hydrique a fait l'objet d'un travail approfondi sur trois années (Biron, 1994).

Pour chacun de ces deux peuplements, on a comparé les mesures directes (humidimètre neutronique) aux simulations de la réserve hydrique du sol sur plusieurs années à régime climatique contrasté.

Figure 4

VALIDATION DU MODÈLE DE BILAN HYDRIQUE JOURNALIER :
comparaison entre la réserve hydrique relative du sol mesurée par humidimétrie neutronique
et celle simulée par le modèle



La figure 4 (ci-dessus) montre les résultats de cette comparaison ; malgré une certaine dispersion, les points s'alignent de façon satisfaisante autour de la première bissectrice.

QUELQUES SIMULATIONS

L'exemple illustré par la figure 5 (p. 65) permet de comparer l'évolution de la réserve hydrique du sol pour trois années successives, dans le cas de deux peuplements, l'un feuillu (Hêtre) et l'autre résineux (Douglas) qui seraient installés sur un sol identique, à forte réserve hydrique (160 mm), et soumis au même climat. Concernant les paramètres du modèle, les seules différences concernent la phénologie et la fonction interception des précipitations, qui atteint 30 à 40 % des précipitations incidentes dans le cas des résineux, contre environ 25 % chez les feuillus. On constate sur cette figure une plus grande précocité dans la diminution de réserve hydrique du sol au printemps dans le Douglas que dans le Hêtre. Sur ces trois années, on note aussi que les plus fortes différences s'observent lors de l'année 1990, caractérisée par un hiver et un printemps peu pluvieux. Lors des années 1991 (exceptionnellement sèche) et 1989, les simulations montrent que les réserves minimales atteintes dans les deux peuplements au cours de l'été sont relativement voisines.

La réserve utile des sols est évidemment un des paramètres prépondérants du bilan hydrique. Le réservoir "sol" agit comme un tampon entre les entrées et les sorties d'eau dans l'écosystème forestier. On peut s'en rendre compte en examinant la figure 6 (p. 65) qui compare, pour la même essence (ici du Hêtre), l'évolution de la réserve hydrique relative sur deux types de sol : un sol brun lessivé à forte réserve utile (185 mm) et une rendzine brunifiée à faible réserve (63 mm). Quatre années sont ici représentées : 1972, année humide mais à automne relativement sec, 1977 et 1981, années moyennes et 1991, année exceptionnellement sèche. Les plus fortes différences apparaissent lors des années les plus humides, notamment 1972, pour laquelle le modèle fait apparaître une contrainte hydrique ($REW < 0,4$) dans le cas de la rendzine, mais pas pour le sol brun lessivé. Par contre lors des années sèches, comme 1991, la réserve du sol est totalement épuisée dans les deux types de sol. Le faible pouvoir tampon du sol à faible réserve utile se traduit par une plus grande précocité de déficit hydrique, mais aussi de recharge en régime de réhumectation (automne).

Figure 5

**SIMULATION DE LA RÉSERVE HYDRIQUE DU SOL
pour un peuplement feuillu (Hêtres) et résineux (Douglas) lors de trois années successives,
pour une hypothèse de réserve utile de 160 mm**

Données climatiques du poste Météo-France de Tomblaine (Meurthe-et-Moselle)

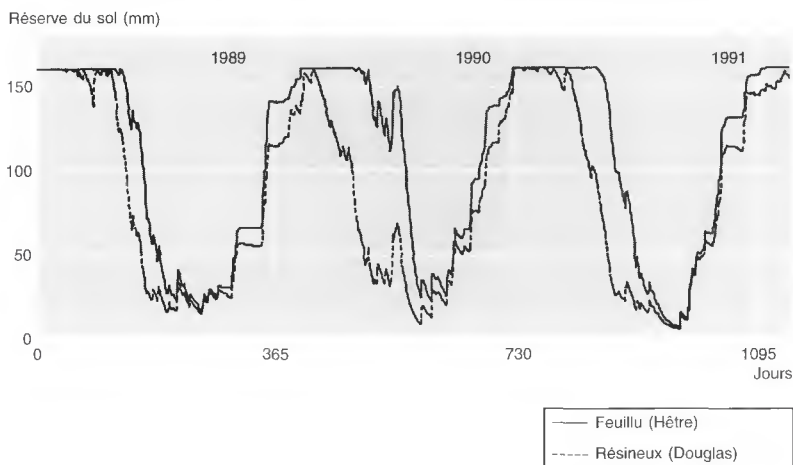
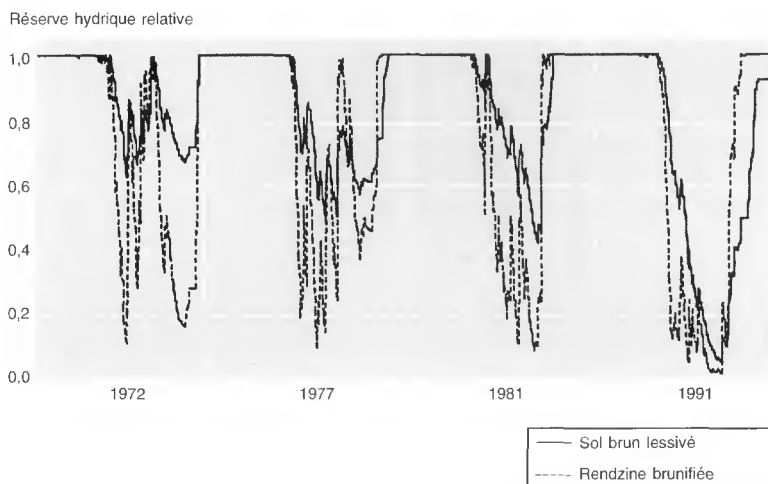


Figure 6

**SIMULATION DE LA RÉSERVE EN EAU RELATIVE POUR DEUX TYPES DE SOL
DE LA FORÊT DE HAYE (MEURTHE-ET-MOSELLE), DANS LE CAS D'UNE HÊTRAIE :
sol brun lessivé à 185 mm de réserve utile et 63 mm pour la rendzine brunifiée.**

Exemple de quatre années à caractéristiques climatiques différentes : 1972, 1977, 1981 et 1991

Données météorologiques du poste Météo-France de Tomblaine (Meurthe-et-Moselle)



Ces simulations ont été réalisées sur l'ensemble des années de 1950 à 1992 et sont reportées sur la figure 7 (p. 66). Il est intéressant de constater que 26 sur ces 43 années ont montré, pour une hypothèse de forte réserve utile (160 mm), des déficits hydriques moyens à forts, c'est-à-dire qui affectent le fonctionnement hydrique, photosynthétique et la croissance des arbres.

Figure 7 **VARIATIONS DU DÉFICIT DE RÉSERVE EN EAU ANNUEL ENTRE 1950 ET 1992**
 dans le cas d'un peuplement fermé de Hêtres sur un sol brun lessivé à forte réserve utile (160 mm)
 Données du poste Météo-France de Tomblaine (Meurthe-et-Moselle)

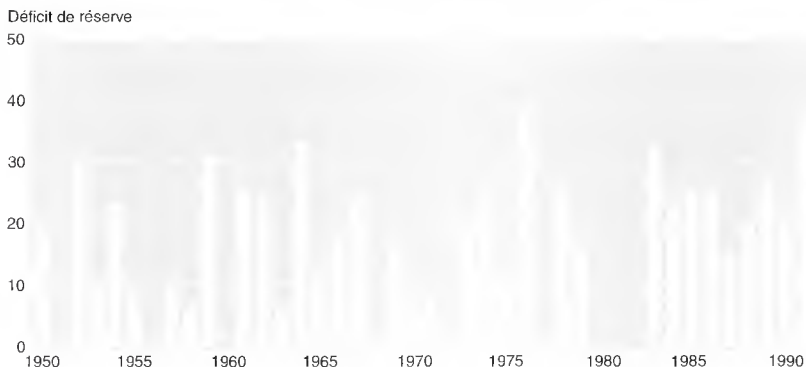


Figure 8 **VARIATIONS INTERANNUELLES DE LA CROISSANCE RADIALE**
 corrigée des effets de l'âge (indice de croissance, IC) du Hêtre sur le plateau de Haye (Meurthe-et-Moselle)
 et du déficit de réserve en eau du sol calculé à partir du modèle de bilan hydrique journalier

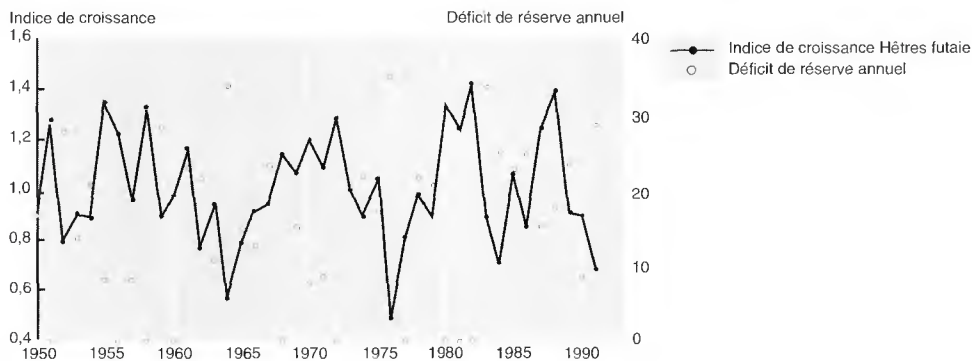
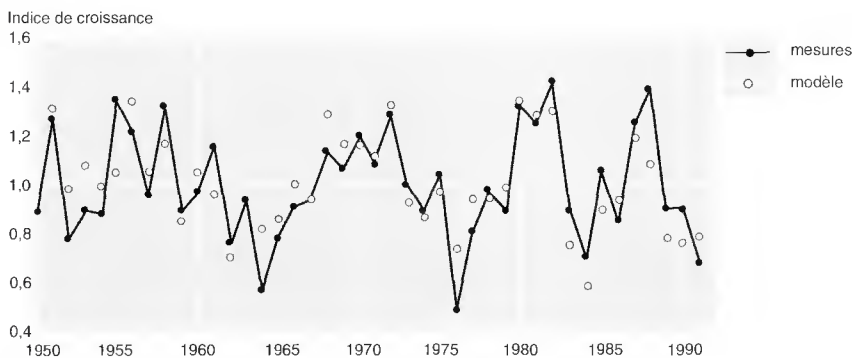


Figure 9 **MODÉLISATION DE LA CROISSANCE RADIALE DU HÊTRE (INDICE DE CROISSANCE CORRIGÉ)**
 à partir du déficit de réserve hydrique annuel du sol. Les effets différés ont été pris en compte



APPLICATION À LA DENDROÉCOLOGIE

Une importante étude dendroécologique a été réalisée sur les hêtraies de la forêt de Haye (Meurthe-et-Moselle) par Badeau (1995). Les carottes d'arbres dominants de différentes stations de taillis et de taillis-sous-futaie ont été analysées, et des indices de croissance en surface terrière ont été calculés, en éliminant les effets de l'âge des arbres et de la date de formation du cerne (tendances à long terme). Le modèle présenté ici a été utilisé pour expliquer les variations interannuelles des indices de croissance. Nous présentons ici les résultats obtenus sur l'ensemble des arbres de futaie. La figure 8 (p. 66) reporte les variations de l'indice de croissance et du déficit de réserve du sol pour les années 1950 à 1992. On met en évidence une bonne concordance entre les forts déficits hydriques et les faibles indices, comme c'est le cas des années 1964, 1976 et 1991, qui sont les trois années les plus sèches des cinquante dernières. À l'inverse, les années sans déficit hydrique estival (1972, 1980, 1981, 1982) correspondent à une forte croissance radiale.

Partant de ces observations, nous avons modélisé la croissance radiale annuelle à partir du déficit hydrique de l'année, et en prenant aussi en compte le déficit de l'année précédente (effets différés). Sur la figure 9 (p. 66), nous avons comparé les indices de croissance mesurés et modélisés. Ce modèle explique plus de 65 % de la variance interannuelle, dont 55 % avec les seuls déficits de l'année. Si l'on rajoute la variable température, dont les effets sont positifs ou négatifs selon la période de l'année, il est possible d'expliquer jusqu'à 85 % de l'accroissement annuel en surface terrière.

CONCLUSIONS

Ce travail est en cours sur plusieurs projets scientifiques ou finalisés. Parmi les perspectives réalistes d'amélioration, les efforts porteront sur les différentes variables du bilan hydrique, notamment :

- la transpiration en prenant en compte de nouvelles conditions d'espèce et de structure des peuplements. Des données sont maintenant disponibles sur les effets des éclaircies sur le bilan hydrique de feuillus et de résineux (Aussenac *et al.*, 1982 ; Savoie *et al.*, 1988 ; Bréda *et al.*, 1995). Des études récentes ont aussi montré qu'il existait des variations interannuelles d'indice foliaire, avec des répercussions directes sur le niveau de transpiration des arbres ;
- le drainage, dont les mécanismes sont relativement mal connus.

Parallèlement, une meilleure compréhension de la croissance radiale intra-annuelle permettra une meilleure connaissance des périodes pendant lesquelles le déficit hydrique affecte la croissance radiale. Les indices de stress pourront alors être affinés.

Enfin, on peut espérer, dans un futur proche, ajouter à ce modèle un module de fonctionnement photosynthétique, par une approche des processus de limitation des échanges de carbone à la même échelle que la transpiration des arbres.

A. GRANIER - V. BADEAU - Nathalie BRÉDA

Unité Écophysiologie forestière

INRA

F-54280 CHAMPENOUX

BIBLIOGRAPHIE

- AUSSENAC (G.). — Étude de l'évaporation réelle de quatre peuplements forestiers dans l'Est de la France. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 29, n° 3, 1972, pp. 369-389.
- AUSSENAC (G.), BOULANGEAT (C.). — Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 37, 1980, pp. 91-107.
- AUSSENAC (G.), GRANIER (A.). — Étude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France. II - Étude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 36, n° 4, 1979, pp. 265-280.
- AUSSENAC (G.), GRANIER (A.), NAUD (R.). — Influence d'une éclaircie sur la croissance et le bilan hydrique d'un jeune peuplement de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 12, n° 2, 1982, pp. 222-231.
- BADEAU (V.). — Étude dendroécologique du Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole. — Nancy : Université Henri-Poincaré - Nancy I, 1995. — 205 p. (Thèse).
- BIRON (P.). — Le Cycle de l'eau en forêt de moyenne montagne : flux de sève et bilans hydriques stationnels (bassin versant du Strengbach à Aubure - Hautes Vosges). — Strasbourg : Université Louis-Pasteur, 1994. — 244 p. (Thèse).
- BLACK (T.A.). — Evapotranspiration from Douglas fir stands exposed to soil water deficits. — *Water Resources Research*, 15, 1979, pp. 164-170.
- BOUTEN (W.), SCHAAP (M.G.), BAKKER (D.J.), VERSTRATEN (J.M.). — Modelling soil water dynamics in a forested ecosystem. I - A site specific evaluation. — *Hydrological Processes*, 6, 1992, pp. 435-444.
- BRÉDA (N.). — Analyse du fonctionnement hydrique des Chênes sessile (*Quercus petraea*) et pédonculé (*Quercus robur*) en conditions naturelles ; effets des facteurs du milieu et de l'éclaircie. — Nancy : Université Henri-Poincaré - Nancy I, 1994. — 59 p. + publications (Thèse).
- BRÉDA (N.), COCHARD (H.), DREYER (E.), GRANIER (A.). — Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*) : seasonal evolution and effects of a severe drought. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 23, 1993, pp. 1136-1143.
- BRÉDA (N.), GRANIER (A.). — Intra- and inter- annual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). — *Annales des Sciences forestières*, n° spécial, 1996 (sous presse).
- BRÉDA (N.), GRANIER (A.), AUSSENAC (G.). — Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). — *Tree physiology*, 15, 1995, pp. 295-306.
- CHASSAGNEUX (P.), CHOISNEL (E.). — Modélisation de l'évaporation globale d'un couvert forestier. II - Calibrage et résultats du modèle. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 44, 1987, pp. 171-188.
- CHOISNEL (E.). — Le Calcul du bilan hydrique du sol : options de modélisation et niveaux de complexité. — *Science du Sol*, vol. 30, 1992, pp. 15-31.
- CHOISNEL (E.). — Les Sécheresses et leurs diagnostics : qualité et rapidité d'information. — *Comptes rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 77, 1991, pp. 65-74.
- GRANIER (A.). — Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. — *Tree Physiology*, vol. 3, 1987, pp. 309-320.
- HUMBERT (J.), NAJJAR (G.). — Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré. Une analyse de la littérature francophone. — Strasbourg : Université Louis-Pasteur, CEREG, 1992. — 85 p.
- LOUSTAU (D.), COCHARD (H.). — Utilisation d'une chambre de transpiration pour l'estimation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de Pin maritime à Molinie (*Molinia coerulea* (L.) Moench). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 48, 1991, pp. 29-45.
- NIZINSKI (J.), SAUGIER (B.). — Dynamique de l'eau dans une chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) en torêt de Fontainebleau. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 46, 1989, pp. 173-186.
- RUNNING (S.W.), GOWER (S.T.). — Forest-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. II - Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. — *Tree Physiology*, vol. 9, 1991, pp. 147-160.
- SAVOIE (J.-M.), COMPS (B.), LETOUZEY (J.). — Bilan hydrique de hêtraies mixtes en relation avec le comportement et la régénération du Hêtre (*Fagus sylvatica* L.). — *Acta Oecologica*, 9, 1988, pp. 285-300.
- VIVILLE (D.), BIRON (P.), GRANIER (A.), DAMBRINE (E.), PROBST (A.). — Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Vosges, France). — *Journal of Hydrology*, 144, 1993, pp. 273-282.
- ZAHNER (R.). — Water deficits and growth of trees. In : Water deficits and plant growth. 3 volumes/T.T. Kozlowski Ed. — New York : Academic Press, 1968. — pp. 191-254.