

Modélisation du bilan hydrique : l'étape clé de la détermination des paramètres et des variables d'entrée

Le bilan hydrique et ses variations interannuelles sont des informations essentielles pour comprendre et interpréter le fonctionnement et les dysfonctionnements des écosystèmes (croissance des arbres, état sanitaire, variations interannuelles de l'état des cimes, bilans minéraux, etc.). Pour la forêt française, la disponibilité en eau est le principal facteur limitant de la production et ceci, quelle que soit la région forestière. Même en Lorraine, les variations interannuelles de croissance radiale du hêtre dépendent à plus de 70 % du niveau de déficit hydrique de l'été en cours et de l'été précédent.

Les éléments du bilan hydrique pour un système forestier

Calculer un bilan hydrique consiste à déterminer, pour une période de temps donnée (le jour, le mois, la saison, l'année), les quantités d'eau :

- interceptée par le couvert ;
- disponible pour la végétation dans les différentes couches de sol ;
- consommée par la végétation (évapotranspiration) ;
- drainée par chaque couche de sol et au-delà de la zone des racines.

Si les trois premières quantités d'eau peuvent être mesurées, ce n'est pas le cas pour le flux d'eau drainé : cette quantité est donc nécessairement obtenue par calcul.

Les évolutions de ces quantités d'eau sont calculées pour un système donné (figure 1). Ce système est limité, en haut, par les houppiers (autrement dit l'interface couvert/atmosphère), et en bas, par le volume de sol colonisé par les systèmes racinaires (l'inter-

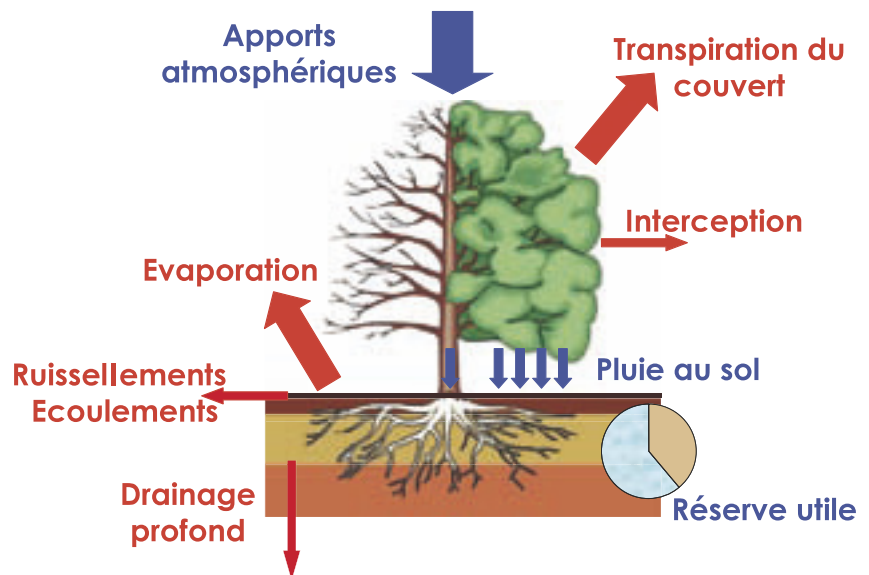


Fig. 1 : le bilan hydrique forestier simplifié

face sol/racines). L'eau qui sort de la zone d'enracinement traverse le sous-sol, recharge les nappes phréatiques et les cours d'eau : elle ne fait alors plus partie du « bilan hydrique » mais du « bilan hydrologique ».

Établir un bilan hydrique consiste à calculer les variations de quantité d'eau disponible dans le sol : à un instant donné, le volume d'eau dans le sol résulte de la différence entre les entrées et les sorties du système. Pour mener ce calcul, il faut connaître les données climatiques locales (ou variables d'entrées) et les caractéristiques du sol et du peuplement considéré.

Caractériser l'eau qui entre, la réserve du sol et l'effet du peuplement

L'eau qui entre dans le système correspond pour l'essentiel aux apports atmosphériques (pluie et neige). Sauf cas particulier, les

remontées capillaires, les eaux de ruissellement ou les écoulements latéraux dans le sol, sont négligés. Les précipitations journalières nécessaires aux calculs proviennent soit du réseau d'observation de Météo-France, soit directement des postes du sous-réseau météorologique forestier RENECOFOR. Plus le poste fournissant la pluviométrie est proche du peuplement considéré, meilleur sera le calcul.

Il faut ensuite connaître la réserve utile du sol, caractéristique pédologique et hydrique définie par différence entre la teneur en eau du sol à deux humidités théoriques caractéristiques : i) la capacité au champ, c'est-à-dire la quantité d'eau maximale qui peut être retenue par le sol une fois toute l'eau gravitaire écoulee et ii) le point de flétrissement permanent, c'est-à-dire au point où les végétaux ne peuvent plus extraire l'eau du sol pour des raisons physiques. La réserve utile du sol (l'eau pouvant

être consommée par la végétation) est alors la différence entre le volume d'eau à la capacité au champ et le volume d'eau au point de flétrissement.

Les caractéristiques indispensables du peuplement concernent sa phénologie : feuilles persistantes ou espèce décidue, date de débourrement et de chute des feuilles (ces observations sont réalisées sur les placettes RENE-COFOR), indice foliaire du peuplement (désigné par LAI = *leaf area index*). Cette caractéristique clé des couverts correspond à la surface projetée de feuilles en m² par m² de sol. Mais ce paramètre n'est pas mesuré en routine sur les placettes RENE-COFOR (voir le poster « Détermination de l'indice foliaire sur les placettes feuillues du réseau » en fin de volume).

Caractériser l'eau qui sort

L'eau qui sort du système est plus difficile à quantifier puisque l'on parle cette fois d'eau transpirée par la végétation, d'eau évaporée par le sol et d'eau drainée. Ces volumes sont calculés à l'aide de fonctions mathématiques plus ou moins élaborées selon les modèles de bilan hydrique et en utilisant là encore des données météorologiques (Météo-France ou RENE-COFOR). Ces données sont les températures minimale et maximale journalières, l'humidité relative ou le déficit de saturation de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Combinées entre elles, ces variables permettent de calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP), une variable synthétique qui estime la quantité d'eau pouvant être évaporée dans l'atmosphère pendant une journée en dehors de tout processus biologique (l'ETP quantifie la demande atmosphérique. Elle n'est que la traduction du fait que le linge sèche mieux en été avec une petite brise qu'en hiver).

Les quantités d'eau consommées par la végétation (transpiration des couverts) dépendent très étroitement de la phénologie. La cinétique de consommation en eau dépend à la fois des conditions climatiques (ETP) et de l'état de développement du feuillage (date de débourrement, indice foliaire et date de chute des feuilles). De plus, la disponibilité en eau dans le sol elle-même peut induire une régulation de la consommation.

Une autre fraction d'eau sort également du système via l'interception. Une part plus ou moins grande des pluies va être piégée par le feuillage des arbres. Cette eau est « perdue » puisqu'elle n'atteindra jamais le sol, elle sera ré-évaporée dans l'atmosphère après l'épisode pluvieux. La quantité d'eau interceptée dépend à la fois de l'intensité et de la nature de la précipitation, du type de végétation (feuillus/résineux) et de la quantité du feuillage, donc de la dynamique saisonnière de l'indice foliaire : en hiver, pour les feuillus, l'interception est très faible ; au printemps, l'interception augmente au fur et à mesure de la mise en place des feuilles ; en été, l'interception est maximale ; en automne l'interception décroît avec la chute des feuilles. Les résineux, feuillés toute l'année, interceptent plus de précipitations que les feuillus. À pluviométrie identique, un peuplement d'épicéa avec un indice foliaire de 10 va piéger sur ses aiguilles beaucoup plus d'eau (et ceci pendant toute l'année) qu'un peuplement de pin dont les indices foliaires sont toujours faibles. Une hêtraie avec un indice foliaire de 8 interceptera une grande partie des précipitations pendant la saison de végétation mais la chute des feuilles à l'automne permettra une réhydratation du sol plus précoce et plus complète que sous la pessière.

Ainsi, l'indice foliaire des peuplements est une variable clé pour un

calcul réaliste des bilans hydriques, de la consommation en eau par les peuplements et des flux d'eau drainés.

Ajuster le modèle

Les variables climatiques et les paramètres du sol et du peuplement étant connus, le calcul quotidien de la réserve en eau du sol est assuré par un modèle de bilan hydrique. Le modèle, développé à l'INRA par A. Granier et N. Bréda, réalise les calculs et génère un fichier de sorties permettant en outre de visualiser jour après jour l'état de la réserve en eau du sol, les quantités d'eau drainées dans les couches profondes, les quantités d'eau interceptées et transpirées par la végétation, etc. (figure 2).

Une étude, commencée en 2000, a permis d'illustrer les points clés de la détermination des paramètres et des variables d'entrée : nous avons calculé des bilans hydriques pour les placettes du sous-réseau météorologique RENE-COFOR après avoir rassemblé les différentes informations nécessaires publiées dans différents rapports descriptifs de l'état initial des sites du réseau. Ce premier travail d'évaluation a été entrepris pour quantifier le poids des différents facteurs (données météorologiques et caractéristiques des peuplements) sur les résultats des calculs de bilans hydriques.

Ne pas mésestimer la variabilité spatiale des précipitations

Le bilan hydrique d'une parcelle forestière est avant tout déterminé par les données climatiques. Ces données peuvent varier considérablement dans l'espace, et même sur de courtes distances. Les valeurs d'ensoleillement varient peu sur de grandes étendues (excepté en zones montagneuses où les effets de confinement peu-



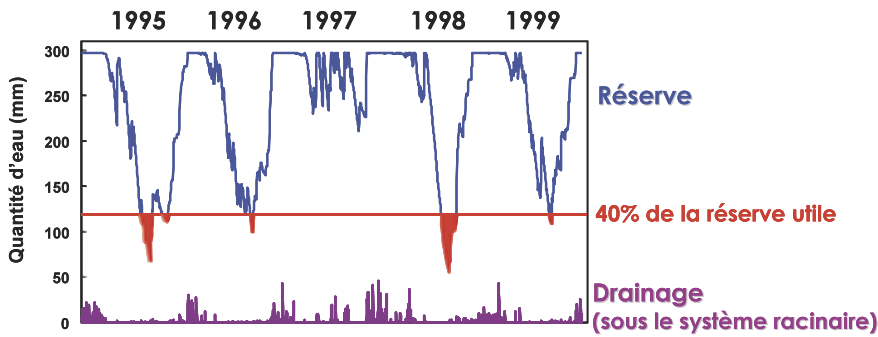


Fig. 2 : exemple d'un calcul de bilan hydrique pour la placette CHP 40 (hypothèse de 300 mm pour la réserve utile, LAI de 5,6 m²/m²)

La réserve en eau du sol, pleine au sortir de l'hiver, se vide progressivement puis se recharge à l'automne. Si l'année est très pluvieuse (1997) les arbres disposent d'une réserve conséquente toute l'année. Lors des années plus sèches, la réserve en eau du sol peut passer en dessous d'un seuil limite qui correspond à 40 % de la réserve utile : les arbres (quelle que soit l'espèce) régulent alors leurs échanges hydriques et carbonés avec l'atmosphère en fermant leurs stomates. La courbe violette présente les quantités d'eau sortant du système et susceptibles de drainer des éléments minéraux.

vent avoir une influence non négligeable). Les températures montrent une plus grande hétérogénéité spatiale surtout sur des gradients altitudinaux. Par contre, les quantités de précipitations peuvent évoluer considérablement sur de courtes distances, à la fois en terme de volume (quantités annuelles des précipitations), et en terme de répartition durant l'année (une pluie de 20 mm n'est pas équivalente à 10 pluies de 2 mm, en particulier en raison de l'interception par le couvert forestier). L'utilisation des données météorologiques RENECOFOR ou Météo-France comme variables d'entrée dans le calcul des bilans hydriques n'est donc pas un choix sans conséquences puisqu'il peut conduire à des résultats très différents, tant du point de vue de la caractérisation des années sèches que du point de vue des quantités d'eau drainée.

Difficultés d'estimation de la réserve du sol et de la profondeur colonisée

Le paramètre du peuplement étudié le plus sensible est la réserve en eau du sol. Cette grandeur, ou les valeurs caractéristiques (capacité au champ et point de flétrissement permanent) permettant de la

calculer, est difficilement accessible sur le terrain puisqu'elle nécessite, soit des campagnes de mesures longues et répétées dans le temps et dans l'espace, à l'aide d'appareils de mesure calibrés spécialement pour chaque site, soit de longues analyses de laboratoire. D'une façon générale, on calcule donc ces réserves à partir de modèles appelés « fonctions de pédotransfert ». Le plus simple de ces modèles, bien connu des forestiers, correspond aux valeurs de Jamagne données selon les 15 classes du triangle des textures. Pour des modèles plus complexes, il est nécessaire de connaître la granulométrie des différents horizons, leur densité apparente et quelques paramètres chimiques comme la quantité de matière organique. Malheureusement, et bien qu'il existe de très nombreuses fonctions de pédotransfert (nous en avons testé une trentaine), aucune n'est pleinement satisfaisante en raison de la spécificité des sols forestiers (sols très acides ou très calcaires, souvent très chargés en éléments grossiers, et contenant beaucoup plus de carbone organique que les sols agricoles). Sur les placettes RENECOFOR, il n'est pas rare que, en fonction de la méthode utilisée, les réserves utiles calculées pour une

placette varient d'un facteur 1 à 4 (figure 3). La notion même de « point de flétrissement permanent », qui a été définie par les agronomes, est sujette à caution dans le cas des peuplements forestiers puisque des études écophysiologiques ont montré que les potentiels hydriques auxquels les arbres peuvent prélever l'eau du sol sont supérieurs à ceux déterminés pour les cultures.

Deux autres paramètres indispensables concernent l'enracinement des arbres. Ce sont, d'une part, la profondeur maximale colonisée par les racines fines des arbres (et non les grosses racines visibles sur les culées de chablis), profondeur qui va directement influencer sur la valeur de la réserve en eau, et, d'autre part, la répartition des racines fines dans chaque horizon du sol. En effet, la densité de racines fines détermine l'absorption d'eau par les arbres, et donc influence directement l'humidité de chaque couche.

Pour paramétriser un modèle de bilan hydrique, on pourrait être tenté de prendre en compte uniquement les premiers décimètres de sol (60 à 80 cm) là où l'on constate en général un très fort enracinement. Cependant, plusieurs études ont montré que ces racines « superficielles » sont insuffisantes pour expliquer les quantités d'eau transpirées par les arbres, et qu'il est nécessaire de considérer la profondeur maximale d'enracinement (il n'est pas rare d'atteindre 2 ou 3 m). Les quantités de racines fines présentes à ces profondeurs sont extrêmement faibles, mais elles assurent la quasi-totalité de l'approvisionnement en eau des arbres pendant l'été. Par exemple, dans un peuplement de frênes près de Nancy, il a été mesuré que l'eau transpirée en juillet et août provenait des seuls horizons profonds (au-delà d'1 m) et que cette eau était captée par seulement 8 % du système racinaire



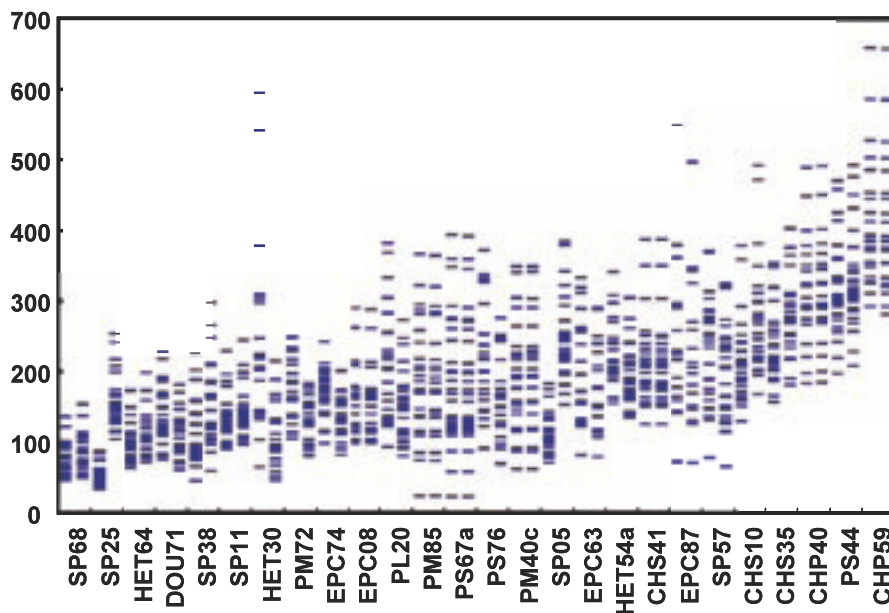


Fig. 3 : réserves utiles en eau (mm) calculées pour les deux fosses de chacune des placettes du sous-réseau météorologique forestier selon plusieurs fonctions de pédotransfert

Par exemple, pour la placette HET 30, les valeurs obtenues sur la fosse 1 varient de 50 mm à 600 mm.

des arbres. En forêt de la Harth, les chênes capables de résister aux sécheresses récurrentes sont ceux dont les racines traversent les horizons caillouteux et peuvent ainsi s'alimenter jusqu'à 2,50 m de profondeur.

Même si des observations pédologiques ont été réalisées sur les placettes du réseau RENECOFOR pour qualifier les propriétés physicochimiques des sols, les données caractérisant les systèmes racinaires sont encore insuffisantes tant du point de vue de la profondeur de sol colonisée par les racines fines que du point de vue

de leur répartition dans les différents horizons. Enfin, la densité du sol qui est nécessaire pour bien reproduire les flux d'eau drainée rapidement, ainsi que les dynamiques de réhydratation à l'automne, n'est pas encore connue avec suffisamment de précision sur les placettes RENECOFOR.

En conclusion

Les résultats de la pré-étude réalisée à partir des données météorologiques acquises sur la période 1995-1999 devront bien entendu être généralisés sur une période de temps plus longue. Mais d'ores

et déjà, nous avons pu mettre en évidence les difficultés et les limites des données disponibles à ce jour pour le paramétrage du compartiment sol/racines nécessaire au calcul de bilans hydriques. Si les observations phénologiques sont maintenant utilisables pour paramétrer la saison de végétation, l'indice foliaire n'est pas mesuré sur RENECOFOR. Nous insistons sur l'importance de ce paramètre, qui détermine non seulement les besoins en eau de la parcelle mais qui contribue également à l'interception des précipitations, donc à la quantité d'eau qui entre dans le sol. Enfin, en ce qui concerne les données météorologiques, il sera nécessaire d'entreprendre dans un avenir proche une intercomparaison des mesures acquises sur le réseau RENECOFOR et par Météo-France. Ces analyses ont déjà motivé des évolutions dans le réseau, et devront encore s'adapter aux questions scientifiques et finalisées auxquelles le réseau souhaite contribuer.

Vincent BADEAU
Nathalie BRÉDA

INRA - Centre de Nancy, UMR INRA
UHP Écologie et Écophysiologie
Forestières
Équipe Phytoécologie
badeau@nancy.inra.fr
breda@nancy.inra.fr

Références disponibles chez les auteurs

