

INRA

AFORCE
RMT Adaptation des forêts
au changement climatique



Projets 2009-2010

Raisonner les calculs de flux d'eau et de bilan hydrique à l'échelle du peuplement et formation à la mise en œuvre d'outils de calculs



Rapport final

Novembre 2010

Coordinateur : André Granier¹

Nathalie Bréda², Damien Maurice³, Guillaume Ehinger³

UMR INRA UHP 1137

Ecologie et Ecophysologie Forestières

¹Equipe Fonctionnement intégré de l'arbre et de l'écosystème

²Equipe Phytoécologie forestière

³Plateau technique de systèmes d'informations géographiques & bases de données

54280 Champenoux

Rappel des objectifs

Le projet avait pour objectif de développer un site web dédié au bilan hydrique forestier qui propose :

1. des fiches techniques et pédagogiques autour des concepts clés du fonctionnement hydrique des peuplements forestiers et de leur bilan hydrique
2. un outil de calcul du bilan hydrique des peuplements forestiers utilisable depuis le site.

Conception et réalisation site web

Un travail préalable d'élaboration du cahier des charges, des spécifications fonctionnelles et techniques d'un site internet devant répondre aux objectifs a été réalisé conjointement par un développeur recruté spécifiquement pour ce projet (G. Ehinger), un référent technique (D. Maurice) et les scientifiques concernés (A. Granier et N. Bréda) de l'UMR EEF 1137. Le site a été développé en langage PHP. Il est hébergé sur le serveur web Apache de l'Unité (UMR INRA UHP 1137). Le fonctionnement du site est prévu sous les explorateurs les plus répandus, Firefox et Internet Explorer.

Aspects réglementaires

Le développement du site a été réalisé dans le respect des règles ergonomiques et des normes juridiques relatives aux chartes informatiques, mentions légales des droits et devoirs des utilisateurs en vigueur à l'INRA et encadrées par le service compétent (DISI).

Par ailleurs, conformément aux règles sur les propriétés intellectuelles en vigueur à l'INRA une procédure de protection du logiciel de calcul de bilan hydrique a été réalisée par dépôt à l'Agence de Protection des Programmes (APP). Le logiciel Biljou© est protégé par un copyright (©) et enregistré sous la référence IDN.FR.001.150009.000.R.P.2010.000.30200 en date du 13/04/2010.

Par ailleurs, l'Unité Contrats et Propriété Intellectuelle (UCPI) de l'INRA a demandé la rédaction d'une licence, en cours de finalisation et d'enregistrement. Cette licence, gratuite pour l'enseignement et la recherche, devra être lue et acceptée par chaque utilisateur de l'outil lors de son inscription.

Présentations d'étapes relatives au projet

Une première annonce de l'outil a été réalisée lors du séminaire Typologie du RMT (9 mars 2009) dans l'intervention « Modélisation du bilan hydrique forestier » présentée par V. Badeau. Une présentation relative au projet a été réalisée par A. Granier lors du séminaire de mi-parcours du RMT Aforce à Paris (29 septembre 2010). Une démonstration devant le bureau du RMT était prévue par N. Bréda lors de la réunion du 4 novembre 2010 mais n'a pas pu être présentée faute de temps.

Description du site

La page d'accueil (figure 1) du site présente le projet, le propriétaire du site et du logiciel de calcul (INRA), les financeurs du projet (RMT Aforce, INRA et GIP ECOFOR).



Figure 1 : Page d'accueil du site web Biljou

La page *présentation du projet* rappelle le contexte ayant motivé ce travail de transfert, après plus de 15 ans de développement et d'utilisation en recherche du modèle de bilan hydrique développé à la suite de la thèse de N Bréda et publié en 1999 (Granier et al., 1999). Les objectifs de transfert et d'autoformation des utilisateurs sont précisés.

La page *question des utilisateurs* illustre des exemples d'interrogations concrètes des forestiers, sylviculteurs, aménagistes qui nous sont régulièrement adressées. La structuration des questions concerne : le sol, le peuplement (sa gestion, sa composition), le climat passé (comparaison des années), le climat futur. Une sélection de photographies illustre ces grandes questions.

Les pages *Eau et Forêt* contiennent les fiches techniques pédagogiques, rappelant le principe d'établissement d'un bilan hydrique forestier, les grands flux d'eau entrant et sortant (définitions, méthodes de mesures, ordres de grandeur, unités, ...), le rôle et les caractéristiques des deux interfaces couvert-atmosphère et sol-racines, la quantification de la sécheresse. Neuf fiches sont en ligne, illustrées par des photographies ou graphiques, et documentées par des références bibliographiques, articles à vocation de transfert et rédigés en français, dont les pdf seront téléchargeables *via* le site internet dédié. Les neufs fiches, dont un extrait est présenté en annexe, sont :

- Bilan hydrique
- Evapotranspiration et régulation
- Interception des précipitations
- Réserve en eau du sol
- Indice foliaire et phénologie
- Météorologie
- Drainage

- Indicateurs de sécheresse
- Modélisation

Développement d'un outil de calcul du bilan hydrique des peuplements forestiers disponible sur le web

Du point de vue technique, pour garantir une rapidité d'exécution des calculs sur des séries climatiques de 50 ou 100 ans (scénarios climatiques futurs), il a été décidé de maintenir la routine d'exécution du programme dans son langage initial. Le programme de simulation lui-même a fait l'objet d'une révision en profondeur pour faciliter son interfaçage. Par ailleurs, il a fallu développer toute une chaîne de procédures pour charger et lancer le programme depuis le serveur et réaliser les tests de cohérence sur les données d'entrée et les paramètres (voir ci-dessous). Cette étape est opérationnelle et garantit effectivement la rapidité d'exécution, aussi bien sous Firefox que sous Internet Explorer.

La page *Utiliser l'outil* permet de mettre en œuvre un calcul en ligne. Pour cela, l'inscription préalable en ligne est obligatoire à partir de la page *S'inscrire* en remplissant un formulaire simple. Un mot de passe est délivré à l'utilisateur une fois enregistré. Le site web bénéficie d'une connexion sécurisée (protocole https) garantissant notamment le cryptage des identifiants et mots de passe lors de l'étape d'authentification.

Le lancement d'un calcul nécessite que l'utilisateur fournisse d'une part les paramètres du peuplement et du sol et d'autre part des données météorologiques. Ces informations, sous la responsabilité de l'utilisateur, peuvent être fournies selon les modalités suivantes :

- paramètres indiquant les caractéristiques du peuplement et du sol faisant l'objet de la simulation :
 - saisie en ligne dans un formulaire web dédié. L'aide en ligne explicite chacun des paramètres du peuplement et du sol à saisir.
 - chargement sur le serveur d'un fichier texte adéquat depuis la machine de l'utilisateur *via* l'interface web. Dans ce cas, le formulaire web précédent est rempli à partir des informations lues dans le fichier chargé, autorisant ainsi des modifications directes. Le format du fichier à soumettre est détaillé dans l'aide en ligne
- données météorologiques :

Chargement sur le serveur d'un fichier texte adéquat depuis la machine de l'utilisateur *via* l'interface web. Le fichier doit respecter une structure dont un modèle est présenté dans l'aide en ligne. Les données sont quotidiennes, indiquent l'année, le jour julien, le rayonnement global, la vitesse du vent, la température moyenne (ou minimum et maximum), le déficit de saturation de l'air. Les unités de ces différentes variables sont aussi précisées.

Une fois ces informations fournies, des tests de validation des paramètres de sol et de peuplement sont effectués **côté client** avant le lancement de la simulation (types des données, intervalles de valeurs, contraintes spécifiques).

En cas d'échec à ces tests, des messages d'erreurs contextuels sont affichés. La figure 2 illustre cette première étape de l'utilisation de l'outil.

BILJOU
Modèle de bilan hydrique forestier

INRA UMR Ecologie et Ecophysologie Forestières
Biométrie Forestière Modèles

Accueil
Présentation du projet
Questions des utilisateurs
Forêts et Eau
Bilan Hydrique
ET et Régulation
Interception des précipitations
Reverses ou eau du sol
LAI et Physiologie
Météorologie
Drainage
Modélisation
Démonstration de l'outil
Utiliser l'outil
Contact
Gérer mon compte

Recommandations

L'outil est proposé pour permettre de faire des calculs et simulations de bilans hydriques.

Pour ce faire, vous aurez besoin des caractéristiques du site et du peuplement concernés, ainsi que d'un fichier de données météo. Si vous utilisez Biljou pour la 1ère fois, nous vous invitons à consulter la documentation, et à lire l'avis en ligne.

Vous y trouverez tous les renseignements sur les valeurs attendues, leurs types et leurs unités, ainsi que sur la structure des fichiers nécessaires.

La simulation peut ne pas fonctionner sur les anciens navigateurs. Merci de consulter l'avis pour plus d'informations.

La précision de vos valeurs a une importance sur la qualité des résultats. n'hésitez pas à consulter les autres catégories du site pour des explications sur les différents caractéristiques.

Simulation

Caractéristiques du sol et du peuplement

Vous pouvez charger vos caractéristiques du sol et du peuplement en sélectionnant votre propre fichier. Pour cela, cliquez sur "Parcourir", sélectionnez votre fichier, puis cliquez sur "Charger le fichier".

ou vous pouvez directement renseigner vos données en remplissant le formulaire ci-dessous.

Indiquer des caractéristiques du sol et du peuplement

Parcourir... Charger le fichier...

Formulaire des caractéristiques du sol et du peuplement

Titre de la simulation: []

Type: résineux feuillus

Jour de débourrement: [] Jour de chute des feuilles: []

LAI max: []

Nombre de couches: [] []

| | Profondeur de réserve en la couche (cm) ou (mm) | Proportion de résines | Humidité pondé | Densité apparente |
|----------|---|-----------------------|----------------|-------------------|
| Couche 1 | [] | [] | [] | [] |
| Couche 2 | [] | [] | [] | [] |

Données météo

Fichier météo

Parcourir...

Lancer la simulation

Unité seule de recherche INRA-Montpellier-UMR1137 Ecologie et Ecophysologie Forestières - INRA, 54000 Clermont - tél : +33 (0)3 83 39 40 41 - Realisateur : Guillaume Etienne
© INRA 2009 - tous droits réservés

Figure 2 : Ecran de chargement des informations à fournir par l'utilisateur (paramètres sol et peuplement, fichier météo.)

Lorsque ces premiers tests sur les caractéristiques de sol et de peuplement sont passés avec succès, les informations fournies (formulaire et fichier) sont chargées sur le serveur sur lequel des tests complémentaires sont effectués notamment sur les données météorologiques (types de données, intervalles de valeurs). En cas d'anomalie détectée lors du chargement de l'un ou l'autre de ces fichiers, des messages d'erreur explicites sont affichés renvoyant l'utilisateur à l'aide en ligne.

Lorsque ces informations sont chargées sur le serveur et les tests passés avec succès, la simulation peut être lancée. Durant le chargement des informations, l'exécution des tests et

les calculs, un curseur indique la progression de ces opérations.

L'exécution est rapide puis les résultats s'affichent à l'écran sous forme de représentations graphiques. Les figures illustrent les résultats annuels d'une part, les sorties quotidiennes d'autre part. L'utilisateur peut sélectionner la variable qu'il souhaite visualiser (déficit hydrique ou drainage) ou l'année d'intérêt pour les figures en données quotidiennes. La figure 3 illustre cette page de visualisation de résultats.

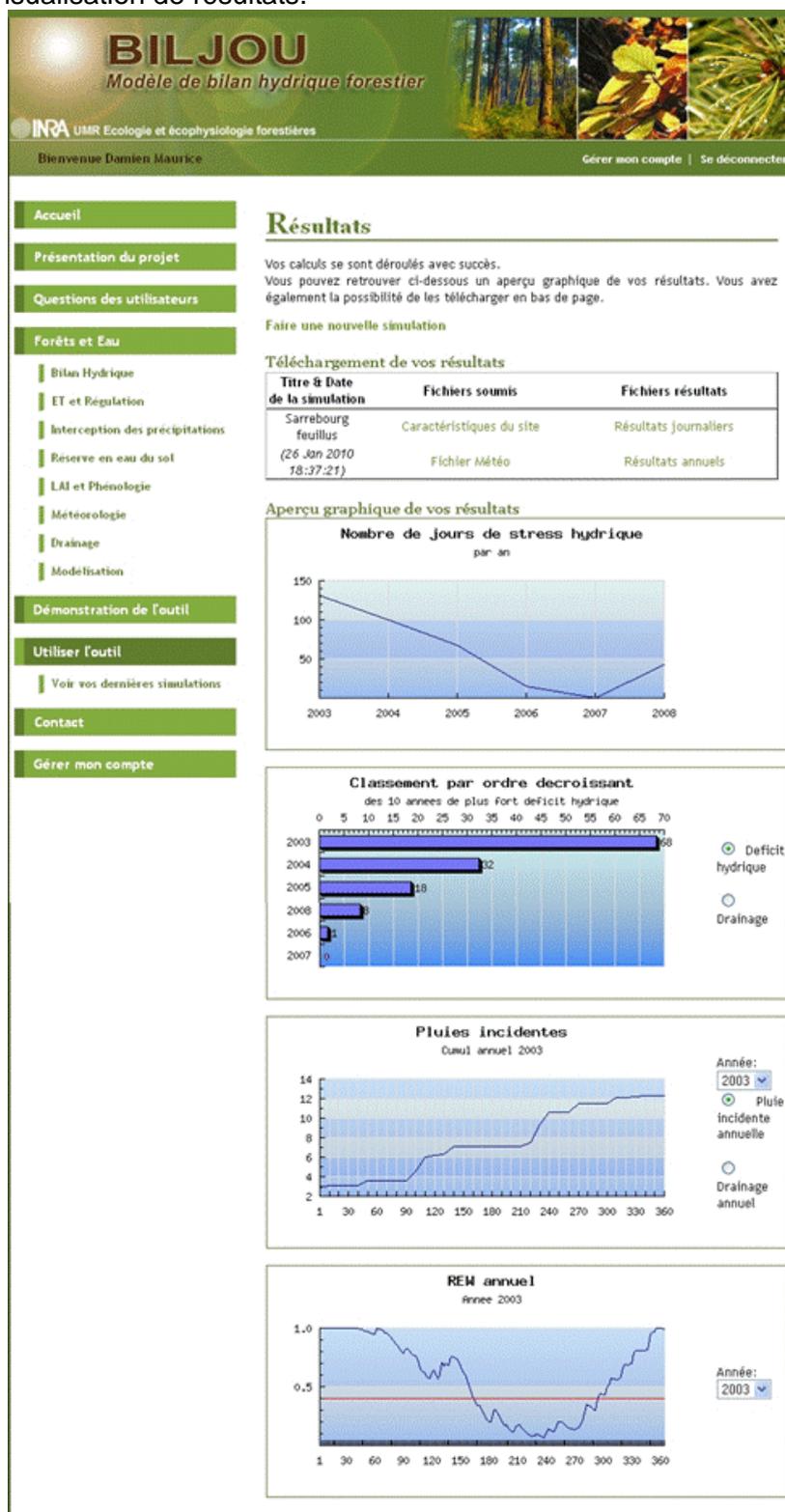


Figure 3 : Exemple de représentation graphique en ligne générée à l'issue d'une simulation

De plus, il est possible de télécharger : les fichiers de paramètres sol & peuplement et météo utilisés pour la simulation, un fichier de sortie journalière et un fichier de sortie annuelle. Les fichiers sont au format texte. Ils sont conservés uniquement le temps de la session ouverte par l'utilisateur sur l'outil afin qu'il puisse accéder à un tableau récapitulatif des simulations effectués lors de sa session. Aucun de ces fichiers n'est conservé plus longtemps sur le serveur, les simulations sont effacées dès lors que l'utilisateur se déconnecte. La figure 4 illustre cette étape de proposition de téléchargement.

The screenshot shows the BILJOU web interface. At the top, there is a header with the logo 'BILJOU Modèle de bilan hydrique forestier' and the INRA logo. Below the header, there is a navigation menu with options like 'Accueil', 'Présentation du projet', 'Questions des utilisateurs', 'Forêts et Eau', 'Démonstration de l'outil', 'Utiliser l'outil', 'Contact', and 'Gérer mon compte'. The main content area is titled 'Vos dernières simulations' and contains a table of simulation results. The table has four columns: 'Titre & Date de la simulation', 'Fichiers soumis', 'Fichiers résultats', and 'Graphiques'. Two simulation entries are shown, each with a 'Caractéristiques du site' and 'Fichier Météo' file, and 'Résultats journaliers' and 'Résultats annuels' files. A link 'Afficher' is provided for each entry. Below the table, there is a warning message: 'Attention! Ces fichiers seront détruits à la fin de votre session! Pensez à les télécharger avant de vous déconnecter.'

| Titre & Date de la simulation | Fichiers soumis | Fichiers résultats | Graphiques |
|---|---|--|------------|
| (26 Jan 2010 18:37:21) | Caractéristiques du site Fichier Météo | Résultats journaliers Résultats annuels | Afficher |
| Masevaux résineux (26 Jan 2010 18:41:29) | Caractéristiques du site Fichier Météo | Résultats journaliers Résultats annuels | Afficher |

Figure 4 : Exemple d'affichage des options de téléchargement des résultats produits.

La page [Contact](#) permet l'envoi d'un message électronique aux responsables scientifiques du projet.

A tout moment, [une aide en ligne](#) est disponible et rappelle en outre le format des fichiers attendus (paramètres du peuplement, fichier météo).

Tout le déroulement de cette procédure a été testé en particulier dans le cadre des travaux menés le programme ANR Dryade (douglas, hêtre, chêne) dans des gammes de situations pédoclimatiques et sylvicoles étendues.

Note : comme annoncé avant le démarrage du projet, il a été décidé de ne pas développer de base de données pour stocker les données des fichiers d'entrée fournis et les données des

fichiers restitués. En effet, les données météorologiques, qui devront le plus souvent être acquises par les utilisateurs auprès de Météo France, ne sont pas libres, et aucun fichier ne sera conservé sur le serveur. Chaque utilisateur peut en revanche récupérer les fichiers issus de ses calculs.

Exemples de simulations déjà réalisées

Quelques exemples d'applications déjà réalisées sont listés ci dessous :

- l'impact en termes de fréquence et d'intensité de l'aléa sécheresse de scénarios climatiques contrastés à 2100 (exemple issu du programme ANR CLIMATOR),
- l'application à l'évaluation des sécheresses dans des tests multi-locaux de comparaisons de provenances de Douglas (exemple issu du programme ANR DRYADE),
- la cartographie à l'échelle d'un massif des variations inter-parcelles de contraintes hydriques selon les caractéristiques édaphiques et phénologiques (espèce, débourrement, indice foliaire) (exemple issu du programme ANR DRYADE, chênaies du Pays des étangs, Moselle)
- la variabilité géographique de l'intensité locale des déficits hydriques sous hêtraie de plaine en limite ouest d'aire de répartition (exemple issu du programme ANR DRYADE)
- les conséquences quantitatives sur la restitution d'eau au milieu (drainage) d'une substitution résineuse à des peuplements feuillus (exemple issu du programme ANR CLIMATOR)
- la comparaison de la consommation en eau de peuplements de douglas conduits selon des itinéraires techniques contrastés (exemple issu du programme ANR DRYADE) ...

Calendrier de mise en production

La mise en production du site est réalisée, l'accès se fait par l'adresse suivante :

<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>

Actuellement, seule la partie pédagogique et libre de consultation est ouverte à tout public (propriétaire, gestionnaire, aménagiste, étudiant, enseignant ...). Un renvoi depuis le cours en ligne CLIMATOR vers le site biljou est prévu en concertation avec les responsables du projet (N Brisson) et plus spécifiquement du cours en ligne (F. Huart, JR Estrade).

L'outil de calcul est opérationnel, mais l'ouverture complète du site ne sera réalisée que pour la formation de la première « promotion » d'utilisateurs. Celle-ci est prévue au premier semestre 2011, à programmer en concertation avec le RMT AFORCE et le GIP ECOFOR. Elle s'adressera à un groupe de 12 personnes maximum. Elle se déroulera à l'INRA Champenoux avec l'appui de la formation permanente, en salle équipée de postes informatiques permettant la mise en œuvre du site et de l'outil simultanément pour plusieurs stagiaires. Le public prioritaire concerne des forestiers ayant suivi l'atelier météo organisé par le RMT en 2009, car ces notions ne seront pas reprises dans la formation. Les personnes ayant également des notions ou ayant déjà bénéficié de nos formations RU et LAI seront également prioritaires. Les responsables du projet s'efforceront lors de la sélection des stagiaires à équilibrer experts forestiers, acteurs de développement de forêt privée et publique, enseignement, chercheurs.

Le programme se déroulera sur deux jours et prévoit :

- des notions de base d'un calcul de bilan hydrique quotidien et des grands flux d'eau entrants et sortant de l'écosystème (compléments aux fiches consultables sur le site web)
- l'explication quant aux paramètres requis et recommandations quant à leur acquisition (*attention, la formation n'inclut pas la mesure de réserve utile ni celle de l'indice foliaire ; ces deux points font l'objet de formations spécifiques qui pourront être envisagées par ailleurs*)
- la préparation des fichiers paramètres sol+peuplement par chaque participant selon les deux modes possibles (saisie en ligne ou préparation externe et téléchargement).
- l'utilisation de l'outil de calcul à partir de fichiers d'exemples
- la récupération des fichiers de simulations et leur interprétation
- l'accompagnement à la traduction des questions des utilisateurs en exercices de simulation.

ANNEXE 1

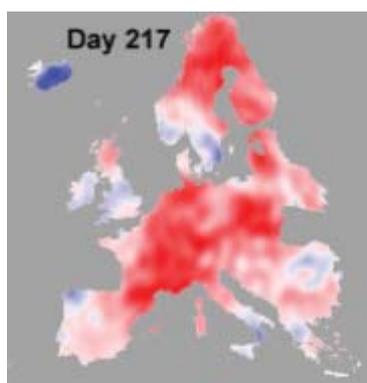
Article à paraître dans Forêt Entreprise, Janvier 2011

Outil pour raisonner les calculs de flux d'eau et de bilan hydrique à l'échelle du peuplement

André Granier et Nathalie Bréda
UMR 1137 INRA-UDL, 54280 Champenoux
agranier@nancy.inra.fr, breda@nancy.inra.fr

Ce projet vise à répondre de façon structurée à des sollicitations récurrentes des forestiers, en particulier depuis les sécheresses de 2003 dans la zone tempérée ouest et centre européenne, ou de 2005 dans la partie sud-ouest de l'Europe. Ces événements climatiques exceptionnels sont, selon les climatologues, une manifestation du changement climatique, qui produit une augmentation de la variabilité climatique interannuelle. Ainsi, certains gestionnaires n'ont pris réellement conscience qu'à l'occasion de ces événements extrêmes du rôle primordial des sécheresses dans la productivité voire la durabilité des peuplements.

L'unité mixte de recherches INRA-UHP Ecologie et écophysologie forestières (EEF) de Nancy développe des recherches sur le fonctionnement hydrique des peuplements forestiers, leurs bilans hydriques, et sur l'impact des contraintes hydriques depuis les années 1970, sous l'impulsion de Gilbert Aussenac. Cette thématique de recherche se poursuit selon plusieurs axes : 1) développement d'approches physiologiques, moléculaires et génétiques de la réponse des arbres à la sécheresse : plasticité des espèces et variabilité interspécifique des réponses, 2) approches *in situ* dans des sites-ateliers instrumentés visant à quantifier et à modéliser les différents flux hydriques, 3) analyse écologique spatio-temporelle des dysfonctionnements et dépérissements forestiers par des approches de dendroécologie et de caractérisation des milieux et des peuplements.



Déficit pluviométrique en Europe lors de l'été 2003 (Reichstein et al. *Global change and Biology*, 2007, 13 (3): 634-651).

Parmi les questions posées par les gestionnaires, les plus récurrentes sont les suivantes : comment quantifier l'intensité et la gravité d'une sécheresse en forêt ? Dans quelle mesure les propriétés du sol peuvent-elles moduler l'intensité des contraintes ? Quelles sont les variations de ce phénomène selon la structure, la composition et les pratiques de gestion des peuplements forestiers ?

Notre unité a, jusqu'à maintenant, répondu au cas par cas à des sollicitations régionales ou individuelles, provenant en particulier des CRPF. Lors de nos échanges avec les gestionnaires tant privés que publics, nous avons relevé la nécessité de trouver de nouveaux modes d'autoformation et de communication, plus concrets et dynamiques que les articles de

vulgarisation que les gestionnaires n'ont pas toujours le temps de lire. Dans le domaine du fonctionnement hydrique des peuplements, nous avons identifié les besoins suivants : (1) une nécessité de réactualiser et corriger les connaissances de base sur les différents flux d'eau et leurs bilans dans les écosystèmes forestiers, (2) une attente de pouvoir manipuler des outils opérationnels pour les aider à réaliser des diagnostics, (3) un besoin de quantifier l'impact respectif du climat, du sol, du peuplement et de sa gestion dans le cycle de l'eau. Le dialogue qui s'est instauré entre les acteurs de la recherche et du développement, notamment à travers le RMT AFORCE, nous a conduit à affiner ces questions, les organiser et les rendre accessibles pour un large public de gestionnaires, mais aussi d'étudiants, d'enseignants et de chercheurs. D'autres actions ont été menées en amont de ce projet, par l'intermédiaire du RMT AFORCE, tel que l'atelier consacré aux données météorologiques (18 juin 2009, Paris) au cours duquel les paramètres climatiques et leur accessibilité, tant en climat passé, présent et futur ont été traités par les plus meilleurs représentants disciplinaires (<http://www.foretpriveefrancaise.com/atelier-donnees-meteo-480103.html>)

Le projet soutenu par le RMT AFORCE a permis de mettre à disposition, de façon conviviale, pédagogique et bien documentée, un site web regroupant deux outils pratiques :

(1) un cours en ligne, comportant 9 fiches pédagogiques sur la définition, la mesure, les ordres de grandeurs et la modélisation de chacun des grands flux d'eau des écosystèmes (transpiration, interception, drainage, évapotranspiration potentielle), les paramètres clés des deux interfaces sol-arbre (enracinement, réserve utile) et couvert – atmosphère (phénologie, indice foliaire). Une présentation détaillée de ce qu'est un bilan hydrique et de la manière dont il peut se modéliser et des indicateurs de sécheresse proposés sont également présentés. Sur chacune des fiches, l'utilisateur est redirigé vers une bibliographie de référence en langue française qu'il est vivement recommandé de lire pour mieux comprendre le contenu de la fiche. Les fichiers en format pdf correspondants sont même téléchargeables sur un simple clic, pour s'assurer que l'utilisateur ne rencontrera pas de difficulté pour s'auto-former.

(2) un outil de calcul de bilan hydrique maintenant largement utilisé par la recherche (BILJOU©). Un développement informatique spécifique a été réalisé pour rendre l'outil convivial et pédagogique. Nous insistons sur le fait que l'autoformation réalisée grâce à la lecture des fiches pédagogiques est un préalable indispensable à la compréhension et à la bonne mise en œuvre de cet outil.

Le public intéressé par l'utilisation de cet outil est composé de gestionnaires et d'experts forestiers, de personnes chargées de développement ou de formation en matière de bioclimatologie, de sylviculture, d'écophysiologie ; au-delà, cet outil est aussi accessible, moyennant une inscription préalable, à la recherche et à l'enseignement.

Pour conduire et réaliser ce projet, un groupe formé de deux chercheurs et deux ingénieurs informaticiens de l'UMR EEF a travaillé de façon coordonnée sur différents aspects :

- rédaction de fiches et sélection de la bibliographie appropriée,
- développement de l'architecture du site, résolution de problèmes informatiques, rédaction de documents d'information,
- tests de l'outil dans différentes configurations de données et de requêtes,
- démarches de protection de la propriété intellectuelle, en relation avec le service juridique de l'INRA, en particulier pour le contrôle de l'utilisation de l'outil et la mise en œuvre des solutions informatiques et organisationnelles adaptées (licences).

Contenu du site web

Ce site, hébergé par un serveur de l'INRA, possède 6 rubriques principales (voir la copie d'écran ci-dessous) :

- la page d'accueil,
- la présentation du projet lui-même et de ses objectifs,
- une liste non exhaustive des questions qui nous sont souvent posées,
- un ensemble de 9 fiches didactiques sur le bilan hydrique et ses facteurs de variation.
- l'outil de simulation qui constitue le « cœur » du site et qui s'accompagne d'une rubrique d'aide à son utilisation,
- une page pour contacter la cellule BILJOU®.



Phénologie et indice foliaire

Comment intervient le couvert dans le bilan hydrique du peuplement ?

L'interface entre le couvert des peuplements et l'atmosphère joue un rôle clé dans le bilan hydrique. Les flux d'eau, entrants et sortants, sont modulés au cours de la saison par le couvert qui :

- contrôle l'interception des précipitations
- conditionne le rayonnement transmis au sous étage et au sol
- détermine la transpiration du couvert



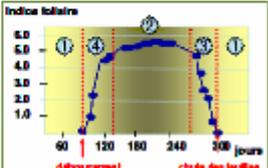
Couvert d'automne, forêt communale de Faulx.
Photo N. Bréda.

Phénologie du couvert et bilan hydrique

Dans le cas des peuplements à feuillage persistant (incluant les résineux et de nombreux feuillus méditerranéens comme le chêne vert), leur indice foliaire peut être considéré en première approximation comme constant tout au long de l'année. C'est en effet le sens du terme qui est donné à ces espèces dites semperviventes : elles conservent un feuillage vert toute l'année. L'apparition de nouveaux éléments foliaires et la chute partielle de feuillage âgé impactent peu l'indice foliaire total du peuplement.

Dans le cas des espèces décidues (c'est-à-dire qui perdent leurs feuilles en automne, comme la plupart des feuillus tempérés et le mélèze), le bilan en eau des peuplements est modulé par leur phénophase :

- Au cours de la période défeuillée (1), l'interception est faible et provoquée par le bois (troncs, branches). Le transfert est nul.



À gauche, la page d'accueil du site BILJOU© version web (concepteurs du site : Guillaume Ehinger et Damien Maurice). Le menu de gauche propose un ensemble de 8 fiches pédagogiques ; à droite, extrait de l'une d'entre elles, chaque fiche comportant de la bibliographie en français, avec les liens permettant de consulter chaque document.

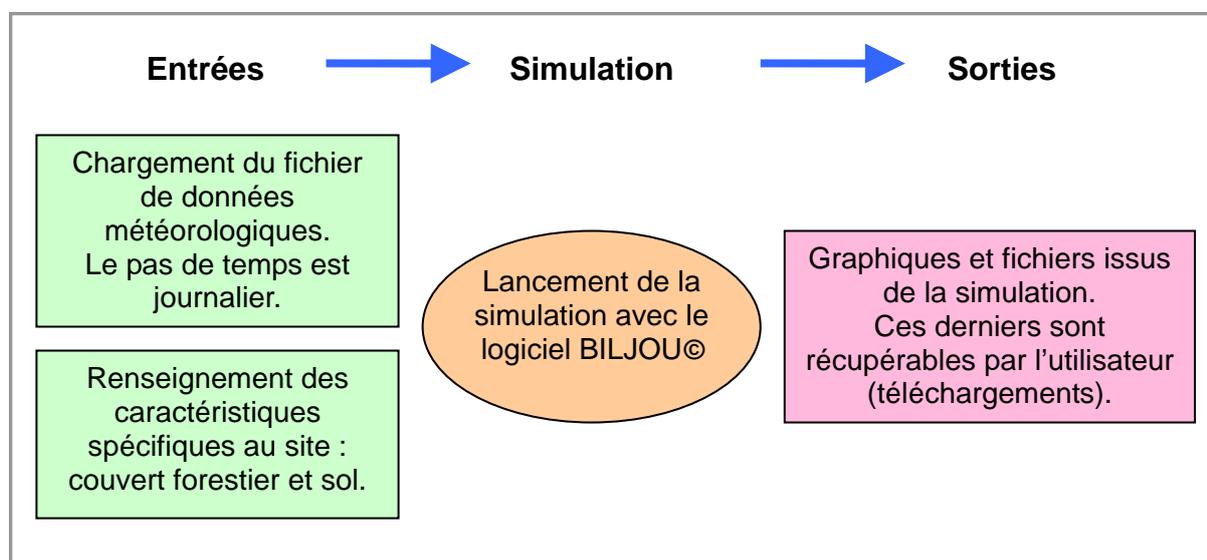


Schéma du déroulement d'une simulation

Accès au site web, conditions d'utilisation de l'outil

La consultation de la partie pédagogique du site sera en libre accès, ouverte à tous sans autorisation préalable. Par contre, pour éviter une utilisation abusive de l'outil de simulation et coordonner au mieux les conseils à son utilisation, ce dernier ne sera accessible qu'après le dépôt d'une demande et son acceptation par le comité ad hoc. Ce comité contrôlera le champ d'application de l'outil, l'activité professionnelle de l'utilisateur et les objectifs de ses calculs de bilan hydrique.

Dès validation et après lecture des fiches d'autoformation, l'utilisateur sera en mesure de réaliser lui-même des simulations de bilan hydrique pour un peuplement d'intérêt. En complément, et pour inciter à l'utilisation optimale et raisonnée de l'outil, 2 sessions de formation, assurées par des chercheurs et des ingénieurs de l'UMR EEF, sont programmées courant 2011. Elles permettront de former un petit noyau d'utilisateurs assez diversifiés et qui seront ensuite personnes ressources pour l'utilisation de l'outil.

Pour la mise en route de la simulation sous Biljou©, l'utilisateur doit fournir, par chargement temporaire¹ en ligne, les informations suivantes :

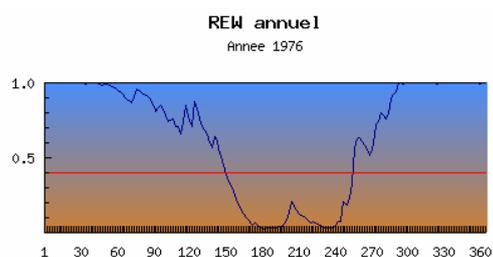
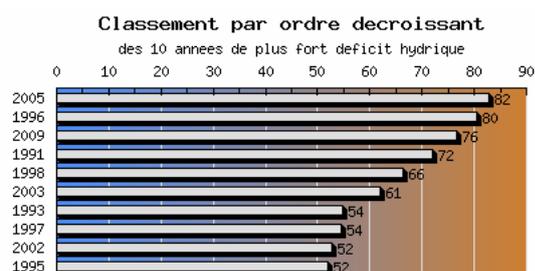
- un fichier de données météorologiques quotidiennes contenant les 5 paramètres requis : pluie, température, rayonnement global, vitesse du vent, déficit de saturation de l'air. Ces données peuvent être acquises, par exemple, auprès de Météo-France ou provenir du réseau Renecofor,
- les caractéristiques du site d'intérêt : paramètres relatifs aux deux interfaces, le couvert (indice foliaire, date de débourrement et chute des feuilles pour les décidus) et le sol (pour chaque couche de sol, RU, proportion de racines fines, densité apparente, humidité à pF 4.2).

¹ Dès la déconnexion de l'utilisateur, les calculs et fichiers météo et paramètres sont automatiquement effacés du serveur.

En sortie, les résultats des simulations sont organisés sous forme de deux fichiers au format texte téléchargeables par l'utilisateur :

- un premier fichier qui récapitule annuellement les principaux flux du bilan hydrique, et surtout trois indicateurs de contrainte hydrique : sa durée (en jours), son intensité et sa précocité,
- un second fichier au pas de temps journalier, qui permet en particulier de suivre l'évolution de la réserve en eau du sol.

De plus, cet outil illustre en direct les sorties du calcul grâce à divers types de graphiques : classement des années sèches pour la période de simulation (si plusieurs années), variations de la réserve en eau du sol pour une année choisie par l'utilisateur, etc.



Exemple de classement des 10 années à plus fort déficit hydrique au cours d'une série temporelle de 25 ans

Exemple d'évolution intra-annuelle de la réserve en eau du sol pour une année choisie par l'opérateur

Cet outil est dérivé d'un modèle plus complexe utilisé en recherche, nécessitant en outre davantage de paramètres (Granier et al. 1995) ; nous avons simplifié son paramétrage, sans altérer ses performances, pour en faciliter l'utilisation par des gestionnaires. Lors de sa conception, le modèle a été testé pour un grand nombre d'espèces, de conditions de climat, de types de sol et de structure de couvert. Il a été validé par comparaison avec des mesures directes de réserve en eau du sol, et pour chaque flux élémentaire (interception, transpiration et évapotranspiration des peuplements et de leur sous-étage). Biljou© fournit des simulations réalistes, notamment car son pas de temps est journalier. Cela le différencie d'autres modèles utilisant des données décennales ou mensuelles et qui ne représentent pas fidèlement les processus écophysologiques de régulation et de dynamique de l'eau dans le sol. Ce pas de temps supprime souvent la représentation des périodes de déficit en eau du sol et n'est donc pas approprié pour un diagnostic sécheresse. De plus, le modèle calcule des formules d'ETP de référence, intégrant en outre la sécheresse atmosphérique de l'air. Enfin, et surtout, le modèle gère l'évolution temporelle du couvert (dans le cas des feuillus) et son incidence sur la consommation en eau du peuplement ; le modèle reproduit enfin la dynamique d'absorption de l'eau par les racines en fonction de leur distribution et de l'état hydrique des différentes couches du sol.

Cet outil est consultable à l'adresse suivante (<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>). Les sessions de formation nécessaires pour une utilisation raisonnée de BILJOU©, seront proposées courant 2011.

Bibliographie

Granier A, Badeau V, Bréda N (1995) Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. Revue Forestière Française, XLVII, 59-68. (Téléchargeable sur le site).

ANNEXE 2

Illustration des pages du site.

Page d'accueil



BILJOU
Modèle de bilan hydrique forestier

INRA UMR Ecologie et écophysioogie forestières

Bienvenue André GRANIER Gérer mon compte | Se déconnecter

Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

- Bilan Hydrique
- Transpiration et régulation
- Interception des précipitations
- Réserve en eau du sol
- Indice foliaire et phénologie
- Météorologie
- Drainage
- Indicateurs de sécheresse
- Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

- Aide à l'utilisation

Contact

Bienvenue...

... sur le site web de **BILJOU**, un **modèle de bilan hydrique forestier** développé par l' UMR Ecologie et Ecophysioogie Forestières.

Ce site a été développé dans le cadre d'un projet du Réseau Mixte Technologique AFORCE et avec un soutien du GIP ECOFOR.



Vous trouverez ici de **nombreuses informations** sur le bilan hydrique des forêts, les différents flux d'eau dans l'écosystème et les facteurs de variations et de contrôle de ce bilan.



Notre site vous propose également un outil en ligne permettant l'utilisation de notre modèle de façon claire et rapide. Cet outil vous permet de calculer et télécharger vos résultats journaliers et annuels.

A ces résultats viennent s'ajouter des graphiques illustrant les variations de différents flux d'eau simulés par le modèle (évapotranspiration, drainage) ainsi que des indicateurs de sécheresse (durée et intensité du déficit hydrique).

Page de présentation du projet

Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

| Bilan Hydrique

| Transpiration et régulation

| Interception des précipitations

| Réserve en eau du sol

| Indice foliaire et phénologie

| Météorologie

| Drainage

| Indicateurs de sécheresse

| Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

| Aide à l'utilisation

Contact

Présentation du projet

Motivations



Sécheresse en forêt d'Orléans.

Les fortes sécheresses, notamment celles de 1976, 1989-1991 et 2003, sont la cause de nombreux dépérissements forestiers.

Objectifs

L'épisode exceptionnel de 2003 a une nouvelle fois mis en exergue le besoin de quantifier l'intensité et la gravité d'un déficit hydrique en forêt. Les grands flux d'eau dans les écosystèmes forestiers sont cependant encore insuffisamment connus par les forestiers qui manquent d'outils de diagnostic pour quantifier l'impact respectif du climat, du sol, du peuplement et de sa gestion.

Ce site web est dédié à la mise à disposition d'informations théoriques et techniques sur le bilan hydrique des écosystèmes forestiers à un noyau d'utilisateurs. Ceux-ci bénéficieront de plusieurs sessions de formation leur permettant de s'approprier un certain nombre de concepts sur le bilan hydrique (les grands flux et les indicateurs de sécheresse) et de prendre en main un outil de modélisation puis de le valoriser auprès d'un public plus large.

Les utilisateurs de cet outil pourront réaliser la simulation du fonctionnement hydrique de peuplements réels, sous conditions climatiques observées. Cet outil leur permettra aussi de tester des scénarios pour des études de sensibilité sylvicole et/ou climatique sur la consommation en eau des peuplements et sur l'intensité et la récurrence des sécheresses. Elle devrait permettre l'intégration progressive du fonctionnement hydrique des peuplements dans les raisonnements sylvicoles.



Dépérissement du chêne en forêt de Tronçais. Sécheresse de 1976. Chêne pédonculé sec et chênes sessile sains.

Page de questions des utilisateurs

Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

- Bilan Hydrique
- Transpiration et régulation
- Interception des précipitations
- Réserve en eau du sol
- Indice foliaire et phénologie
- Météorologie
- Drainage
- Indicateurs de sécheresse
- Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

- Aide à l'utilisation

Contact

Les questions des utilisateurs

Les choix et itinéraires techniques à la disposition des praticiens sont les principaux leviers pour moduler le bilan hydrique des peuplements forestiers, dans la mesure où ce sont des cultures pluviales, c'est à dire sans irrigation. De nombreuses recherches ont démontré l'incidence des modifications du couvert sur les consommations en eau, et par voie de conséquence sur les flux de drainage et sur les contraintes subies par les arbres.

Les praticiens posent divers types de questions :

En lien avec le climat actuel :

- comment comparer le niveau de sécheresse subie par un peuplement donné entre les années ?
- dans ma région, la sécheresse de 1976 a-t-elle été plus sévère que celle de 2003 ?

En lien avec un climat modifié :

- si la phénologie était modifiée par le climat futur, quelles seraient les conséquences sur les bilans hydriques ?
- si le climat change, comment quantifier les modifications de contraintes ou de confort hydrique des peuplements forestiers ?

En lien avec le type de couvert :

- quelle est la consommation en eau d'un peuplement forestier feuillu ou résineux ?
- quelle est la consommation en eau respective des arbres et du sous étage herbacé ?
- comment cette consommation se répartit-elle au cours de l'année ?

En lien avec le sol :

- pour une année climatique donnée, des différences de sol induisent-elles des différences de contraintes hydriques pour les peuplements ?
- quelles sont les périodes dans l'année où les différences de réserve en eau sols sont les plus significatives pour la productivité des peuplements ?



Pages pédagogiques Forêt et Eau

Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

Bilan Hydrique

Transpiration et régulation

Interception des précipitations

Réserve en eau du sol

Indice foliaire et phénologie

Météorologie

Drainage

Indicateurs de sécheresse

Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

Aide à l'utilisation

Contact

Bilan Hydrique

Définition

Etablir un bilan de matière (ici pour l'eau) consiste à :

1. définir un système physique
2. quantifier les flux d'eau qui entrent et qui sortent du système sur un intervalle de temps fixé
3. écrire l'équation de conservation de la matière

$$\text{somme des flux qui entrent} - \text{somme des flux qui sortent} = \text{variation du stock}$$

Le choix du système

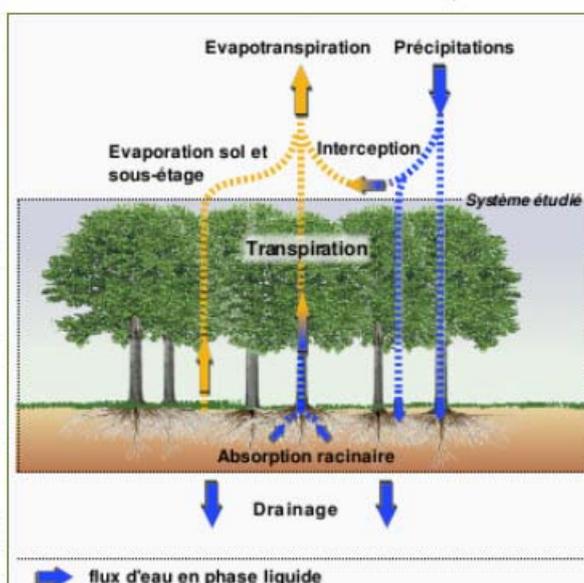
On raisonnera ce bilan pour une surface au sol unitaire et homogène, en général 1 m² ou bien 1 ha. Le système considéré inclut les houppiers des arbres et la partie du sol contenant les systèmes racinaires. On exprime les différents flux en mm d'eau (1 mm = 1 L/m²).

Les flux entrants

Ce sont principalement les **précipitations** ; il peut toutefois y avoir des remontées capillaires, notamment lors de la présence d'une nappe. Des **flux latéraux** (ruissellement, drainages latéraux) peuvent aussi exister, mais on se placera dans des situations où les flux sont égaux entre l'amont et l'aval de la parcelle.

Les flux sortants

- La **transpiration des arbres (T)**, résultant d'un transfert de l'eau du sol depuis l'absorption racinaire vers les feuilles *via* le xylème des arbres,
- L'**interception des précipitations (In)**, qui représente le flux d'eau qui s'évapore à la surface des feuilles lorsque celles-ci sont humectées par la pluie. Il



Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

Bilan Hydrique

Transpiration et régulation

Interception des précipitations

Réserve en eau du sol

Indice foliaire et phénologie

Météorologie

Drainage

Indicateurs de sécheresse

Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

Aide à l'utilisation

Contact

Transpiration et régulation

Qu'est ce que c'est ?

L'évapotranspiration réelle (ETR, en mm) d'un couvert végétal est la somme des différents flux d'eau retournant vers l'atmosphère sous forme de vapeur :

$$\text{ETR} = \text{transpiration des arbres} \\ + \text{évaporation du sol et transpiration du sous-étage} \\ + \text{interception des précipitations}$$

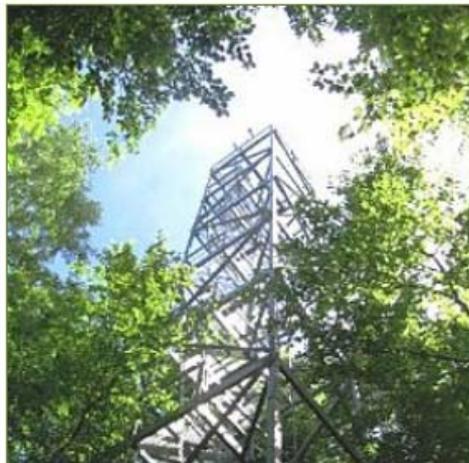
Les variables du climat déterminent l'ETR des surfaces végétales ; ce sont :

- les variables dites de forçage qui imposent la demande climatique (voir [fiche météo](#)),
- les précipitations qui conditionnent la disponibilité en eau du sol et en conséquence la régulation des arbres (régulation stomatique) en situation de contrainte hydrique.

La transpiration des arbres est le plus souvent le terme prépondérant du bilan hydrique. Lorsque le peuplement est fermé, l'évapotranspiration du sol et du sous-étage est faible, voire négligeable, car la demande climatique est très faible au niveau du sol.

Comment mesurer ce flux ? Quelle est l'unité de cette grandeur ?

Il existe maintenant une méthodologie éprouvée qui permet de mesurer le flux de vapeur d'eau au-dessus d'un couvert : c'est la méthode des corrélations turbulentes. Cette méthode associe un anémomètre sonique tridimensionnel et un analyseur de gaz rapide.



Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

Bilan Hydrique

Transpiration et régulation

Interception des précipitations

Réserve en eau du sol

Indice foliaire et phénologie

Météorologie

Drainage

Indicateurs de sécheresse

Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

Aide à l'utilisation

Contact

Interception des précipitations

Qu'est ce que c'est ?

L'interception des précipitations correspond à l'évaporation de l'eau, liquide ou solide, par les houppiers des arbres, aussi bien par les feuilles que par les organes ligneux. Lors d'une précipitation, l'eau suit plusieurs trajets dans l'écosystème :

- une partie arrive directement au sol sans toucher les feuilles
- une autre fraction s'évapore pendant et après l'épisode pluvieux
- lorsque la capacité de stockage de l'eau par les feuilles est dépassée, une fraction retourne vers le sol
- une autre fraction s'écoule le long des troncs vers le sol

Notes : nous ne considérerons pas ici le cas de l'interception de la neige, phénomène mal documenté. Par ailleurs, les couverts peuvent aussi condenser le brouillard dont une partie va s'égoutter sous le couvert.

Comment mesurer ce flux ? Quelle est l'unité de cette grandeur ?

La mesure de l'interception se fait de façon indirecte : on la calcule par différence entre l'eau qui arrive au-dessus du couvert et celle qui arrive à la surface du sol, selon la formule :

$I_n = P_i - P_s - P_t$, où I_n représente l'interception, P_i est la pluie incidente, P_s est la pluie qui arrive directement au sol et P_t est la quantité d'eau qui s'écoule le long des troncs vers le sol.



Ci-dessus : Un système de recueil des pluies s'écoulant le long des troncs (photo UR BEF, INRA-Nancy).

Ci-contre : Mesure de pluie au sol à l'aide d'un réseau de pluviomètres à lecture directe.

Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

Bilan Hydrique

Transpiration et régulation

Interception des précipitations

Réserve en eau du sol

Indice foliaire et phénologie

Météorologie

Drainage

Indicateurs de sécheresse

Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

Aide à l'utilisation

Contact

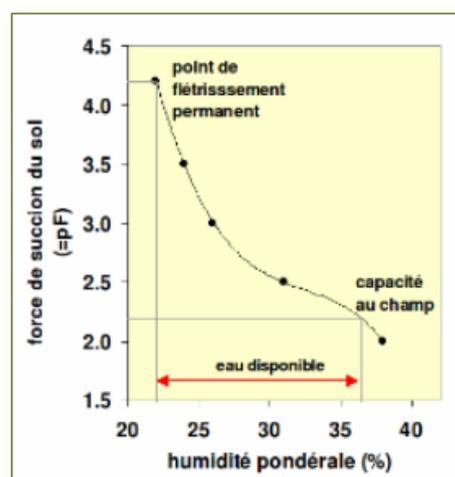
Réserve en eau du sol et mobilisation par les racines

Qu'est ce que la réserve en eau du sol ? Quelle est l'unité de cette grandeur ?

La réserve en eau du sol se définit comme le volume d'eau contenu dans le sol à un instant donné. Ce volume, ou stock d'eau, est généralement exprimé en épaisseur de lame d'eau (en mm), pour être facilement comparées aux pluies et à l'évapotranspiration. C'est une **grandeur dynamique** qui évolue au cours du temps, sous l'action conjointe des précipitations et de l'évapotranspiration. Cependant toute l'eau du sol n'est pas utilisable par la végétation, soit parce que les racines ne colonisent pas tout le volume de sol, soit parce que l'eau est trop fortement retenue par le sol pour être extraite par les racines.

Qu'est ce que la réserve utile d'un sol ?

La réserve utile (RU) correspond à la fraction de la réserve qui est exploitable par la plante, c'est-à-dire la fraction accessible par les racines et absorbable par leur succion. Elle est exprimée en millimètres. C'est une **variable d'état**, qui dépend des propriétés physico-chimiques du sol, de sa composition granulométrique, de l'arrangement des particules de sol et de la distribution de la porosité. L'eau utilisable par les plantes est égale au volume d'eau emmagasiné par la tranche de sol explorée par les racines entre deux états hydriques caractéristiques : la capacité au champ (l'eau que peut retenir le sol après écoulement de l'eau gravitaire, ou ressuyage) et le point de flétrissement permanent (au-delà duquel la végétation ne peut plus extraire l'eau). Cette quantité d'eau disponible par la plante est déterminée rigoureusement par l'établissement de **courbes de rétention en eau**, sur des échantillons du sol. A défaut, il existe des tables de coefficients ou des fonctions permettant d'estimer l'humidité massique du sol à ces états caractéristiques à partir de propriétés plus ou moins complexes (texture, teneur en carbone, densité, capacité d'échange cationique ...)



Un exemple de courbe de rétention d'un horizon argilo-limoneux (appelée aussi courbe pF-humidité). Les fortes valeurs de pF correspondent aux faibles humidités des sols.

Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

Bilan Hydrique

Transpiration et régulation

Interception des précipitations

Réserve en eau du sol

Indice foliaire et phénologie

Météorologie

Drainage

Indicateurs de sécheresse

Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

Aide à l'utilisation

Contact

Phénologie et indice foliaire

Comment intervient le couvert dans le bilan hydrique du peuplement ?

L'interface entre le couvert des peuplements et l'atmosphère joue un rôle clé dans le bilan hydrique. Les flux d'eau, entrants et sortants, sont modulés au cours de la saison par le couvert qui :

- contrôle l'interception des précipitations
- conditionne le rayonnement transmis au sous étage et au sol
- détermine la transpiration du couvert



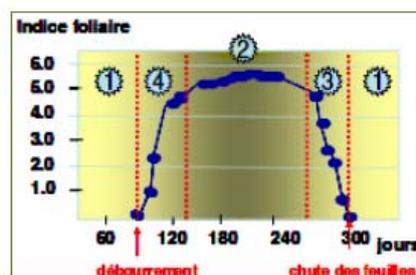
Couvert d'automne, forêt communale de Faulx.
Photo N Bréda

Phénologie du couvert et bilan hydrique

Dans le cas des **peuplements à feuillage persistant** (incluant les résineux et de nombreux feuillus méditerranéens comme le chêne vert), leur indice foliaire peut être considéré en première approximation comme constant tout au long de l'année. C'est en effet le sens du terme qui est donné à ces espèces dites sempervirentes : elles conservent un feuillage vert toute l'année. L'apparition de nouveaux éléments foliaires et la chute partielle de feuillage âgé impactent peu l'indice foliaire total du peuplement.

Dans le cas des **espèces décidues** (c'est-à-dire qui perdent leurs feuilles en automne, comme la plupart des feuillus tempérés et le mélèze), le bilan en eau des peuplements est modulé par leur phénophase :

- Au cours de la période défeuillée (1), l'interception est faible et provoquée par le bois (troncs, branches), la transpiration est nulle, la quantité de lumière atteignant le sol est maximale.



Phénologie des espèces décidues

Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

Bilan Hydrique

Transpiration et régulation

Interception des précipitations

Réserve en eau du sol

Indice foliaire et phénologie

Météorologie

Drainage

Indicateurs de sécheresse

Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

Aide à l'utilisation

Contact

Météorologie

Définitions des différentes variables météorologiques

Les variables climatiques déterminant le bilan hydrique sont mesurées en routine sur le réseau synoptique de Météo-France. Des mesures sont aussi réalisées sur d'autres réseaux (INRA, Renecofor, Agences de bassins...).

Les principales variables sont :

- **le rayonnement global incident (R_g)** qui correspond à l'ensemble du spectre solaire, mais aussi provenant du rayonnement des nuages, aérosols etc. Lorsqu'on s'intéresse au cumul de R_g sur 24 h, il s'agit d'une énergie qui s'exprime en $J\ cm^{-2}$ (unité classiquement utilisée par Météo-France). On peut aussi l'exprimer en unités SI : des $MJ\ m^{-2}$. Le maximum de R_g , atteint fin juin, est de l'ordre de $3000\ J\ cm^{-2}$ (= $30\ MJ\ m^{-2}$). Le couvert végétal n'absorbe qu'une fraction du rayonnement global : une partie est réfléchiée vers l'atmosphère(1). On définit ainsi le rayonnement net qui représente le bilan, établi au-dessus d'un couvert ou sur un sol nu, de tous les rayonnements, incidents et réfléchis par la surface considérée.
- **La température de l'air (T_a en $^{\circ}C$)**. Sur une journée, la température moyenne de l'air peut être issue de mesures horaires ou semi-horaires, ou bien de la moyenne entre le minimum et le maximum de la journée.
La vitesse du vent (u en $m.s^{-1}$). Elle peut être mesurée à 2 m ou à 10 m au-dessus du sol.
- **L'humidité relative de l'air (HR, exprimée en %)** représente le ratio entre la pression partielle de vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante (à la même température). Ainsi, HR varie entre 0 pour un air totalement sec et 100, lorsque l'air est saturé en vapeur d'eau.
- **Le déficit de saturation de l'air (D_{sat} , en Pa, kPa ou hPa)(2)** qui est, pour la température T_a , la différence de pression partielle de vapeur d'eau à saturation et celle qui existe réellement.
- **Les précipitations liquides ou solides (P_i)**, exprimées en mm ($1\ mm = 1\ L/m^2$).

Les agronomes ont développé la notion d'**évapotranspiration potentielle (ETP, en mm)**, qui est un index climatique utilisé pour quantifier la demande transpiratoire. L'ETP est utilisée dans des modèles de bilan hydrique forestiers pour calculer l'évapotranspiration réelle (voir [fiche bilan hydrique](#)).

Il existe une assez grande variété de formules de calcul de l'ETP ; toutes ne sont pas équivalentes :

Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

Bilan Hydrique

Transpiration et régulation

Interception des précipitations

Réserve en eau du sol

Indice foliaire et phénologie

Météorologie

Drainage

Indicateurs de sécheresse

Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

Aide à l'utilisation

Contact

Le drainage

Qu'est ce que c'est ?

Le drainage correspond aux pertes en eau, latérales ou verticales, de l'unité de sol considéré. Nous nous placerons dans l'hypothèse où les entrées et les sorties latérales d'eau sont égales. Le modèle reproduira donc mal les conditions différentes, par exemple le fonctionnement hydrique d'un bas-fond, où l'eau s'accumulera.

Comment mesurer le drainage ? Quelle est l'unité de cette grandeur ?

La mesure du drainage vertical est difficile à réaliser et n'est pas effectuée en routine sur les sites-ateliers. Il existe des équipements comme les plaques lysimétriques (fonctionnant en gravité libre) ou les bougies poreuses (prélèvement d'eau sous une dépression) Ces équipements sont utilisés pour prélever les eaux de drainage à plusieurs profondeurs dans le sol pour leur analyse.



Recueil des eaux du sol au moyen de bougies poreuses (à gauche) et installation de plaques lysimétriques dans le sol (à droite). Les solutions du sol sont recueillies dans les flacons (ci-dessous)



Toutefois, ces équipements ne donnent pas des mesures quantitatives du flux de drainage. En effet, la zone de collecte des plaques lysimétriques n'est pas connue : dans un horizon de sol donné, cette zone peut être plus grande ou plus faible que la surface de la plaque. Notre approche est alors le recours à la modélisation où le drainage est calculé par différence (voir fiche Bilan hydrique) entre la pluie incidente et la somme de l'évapotranspiration réelle et de l'interception des précipitations. Comme les autres flux hydriques, le flux de drainage est exprimé en mm d'eau (1mm = 1 L d'eau/m²).

Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

Bilan Hydrique

Transpiration et régulation

Interception des précipitations

Réserve en eau du sol

Indice foliaire et phénologie

Météorologie

Drainage

Indicateurs de sécheresse

Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

Aide à l'utilisation

Contact

Indicateurs écophysologiques de sécheresse édaphique

Qu'est ce que c'est ?

La sécheresse édaphique concerne la sécheresse du sol, par opposition à la sécheresse atmosphérique (caractérisée par exemple par le déficit de saturation de l'air). Ces deux types de sécheresse affectent le fonctionnement des arbres, en imposant une régulation par les stomates.

La sécheresse édaphique peut se définir de diverses manières, par rapport :

- à l'état hydrique du sol, caractérisé par sa teneur en eau ou son potentiel hydrique,
- au contenu en eau du sol disponible pour la végétation.

Dans ce dernier cas, le déficit hydrique du sol caractérise l'état de la réserve par rapport à son niveau de remplissage maximal ou par rapport à des seuils, définis par référence aux conséquences physiologique du manque d'eau.

Les écophysologistes (forestiers et agronomes) expriment souvent l'état de remplissage du sol en valeur relative, la réserve en eau relative qui est notée REW (pour l'abréviation anglophone de Relative Extractable Water). C'est une grandeur sans dimension, calculée pour le jour j selon la formule :

$$REW_j = (R_j - R_{min}) / RU$$

avec:

- R_j la réserve en eau du sol au jour j en mm calculée sur la profondeur utile (profondeur d'enracinement)
- R_{min} la réserve minimale observée au point de flétrissement permanent ($pF = 4.2$) aussi exprimée en mm et sur la même profondeur
- RU la réserve utile du sol sur la profondeur utile, en mm, elle-même étant la différence entre la réserve en eau du sol à la capacité au champ et celle au point de flétrissement permanent (voir fiche [réserve en eau du sol](#)).

REW est donc une grandeur comprise entre 1, lorsque le sol est à capacité au champ, et 0 lorsque le sol est au point de flétrissement permanent. Les sorties quotidiennes issues d'un calcul de bilan en eau du sol réalisé par Biljou© proposent cette variable REW. La figure ci-dessous illustre un exemple d'évolution de la réserve en eau relative au cours de deux années successives.

Accueil

Présentation du projet

Questions des utilisateurs

Forêts et Eau

Bilan Hydrique

Transpiration et régulation

Interception des précipitations

Réserve en eau du sol

Indice foliaire et phénologie

Météorologie

Drainage

Indicateurs de sécheresse

Modélisation

Utiliser l'outil (accès réservé)

Aide à l'utilisation

Contact

Modélisation du bilan hydrique

Qu'est ce que c'est ?

La modélisation du bilan hydrique est la traduction des phénomènes réels (par exemple la transpiration des arbres, l'interception des précipitations) sous forme d'un ensemble d'équations. Ces équations sont basées sur des mesures, réalisées dans un grand nombre de peuplements forestiers de différentes espèces, dans différentes conditions de climat, d'âge et de gestion des couverts. Le modèle BILJOU fonctionne au pas de temps journalier. Ce pas de temps représente un bon compromis :

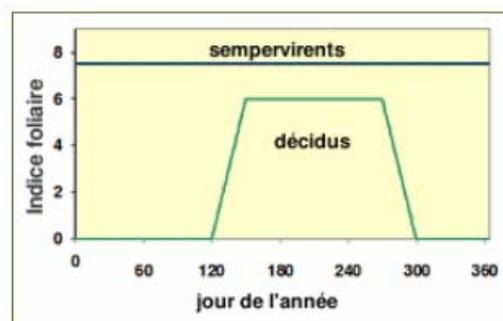
- un pas de temps plus court (l'heure) pose le problème de la difficulté de disposer de telles données météorologiques et alourdi le formalisme pour des phénomènes transitoires,
- un pas de temps plus long (décade voire mois) dégrade un certain nombre de processus et a notamment l'inconvénient de mal reproduire les phénomènes à effet de seuil.

Quelles fonctions ?

La fiche bilan hydrique donne l'organisation générale des flux d'eau échangés dans un écosystème forestier. Le modèle BILJOU utilisé ici traduit chacun de ces flux par une ou plusieurs équations, excepté le drainage, qui est calculé par différence.

Variation de l'indice foliaire

Les espèces sempervirentes, dont les résineux, sont supposées présenter un indice foliaire (LAI) ne variant pas au cours de l'année. Pour les espèces décidues (feuillues et mélèze), le modèle a besoin de la date de débourrement et celle de chute totale des feuilles ou aiguilles. A partir de la date de débourrement, le LAI augmente linéairement jusqu'à sa valeur maximale pendant 30 jours. De la même façon 30 jours avant la chute totale des feuilles, le LAI décroît pendant 30 jours jusqu'à atteindre 0.



Variation de l'indice foliaire.

Transpiration des arbres et sa régulation (T)

Page d'Utilisation de l'outil

Exemple d'un calcul sur une série climatique de 50 ans

Les figures sont générées automatiquement à l'issue de l'exécution du calcul, permettant une visualisation immédiate des résultats.

Résultats

Vos calculs se sont déroulés avec succès.

Vous pouvez retrouver ci-dessous un aperçu graphique de vos résultats. Vous avez également la possibilité de les télécharger en bas de page.

[Modifier vos caractéristiques de sol et de peuplement](#)

[Faire une nouvelle simulation](#)

Téléchargement de vos résultats

| Titre & Date de la simulation | Fichiers soumis | Fichiers résultats |
|----------------------------------|---|--|
| test 7 (09 Nov 2010 15:33:40) | Caractéristiques du site Fichier Météo | Résultats journaliers Résultats annuels |

Aperçu graphique de vos résultats

