

# Le bilan hydrique des peuplements forestiers

État des connaissances scientifiques et techniques  
Implications pour la gestion

## **Coordination**

Sophie BERTIN  
Céline PERRIER

## **Auteurs**

Sophie BERTIN  
Philippe BALANDIER  
Jacques BECQUEY  
Damien BONAL  
Nathalie BRÉDA  
Céline PERRIER  
Philippe RIOU-NIVERT  
Éric SEVRIN



## Aide à la lecture

Afin d'aider la navigation entre les différentes parties et fiches, il est rappelé ici l'organisation générale du document. Les deux tableaux de correspondances au dos de cette page permettent, quant à eux, de visualiser facilement les corrélations entre les *Fiches de synthèses des connaissances scientifiques et techniques*, et les *Implications pour la gestion*.

### Mode d'emploi (page 12)

### Questions posées par les praticiens (page 17)

### PARTIE 1 – Synthèse des connaissances scientifiques et techniques (page 21)

FICHE A - Le bilan hydrique

FICHE B - Le réservoir d'eau du sol

FICHE C - De la surface foliaire de l'arbre à l'indice foliaire du peuplement

FICHE D - Les facteurs de variation de l'indice foliaire

FICHE E - Estimation de l'indice foliaire : méthodes directes

FICHE F - Estimation de l'indice foliaire : méthodes indirectes

FICHE G - Facteurs de variation de la transpiration des arbres et statut social

FICHE H - Évapotranspiration réelle de la strate inférieure d'un peuplement

FICHE I - Bilan hydrique d'un peuplement mélangé

FICHE J - Bilan hydrique d'un peuplement irrégulier

### PARTIE 2 – Implications pour la gestion (page 133)

Implication 1 - Qu'est-ce qui fait varier l'indice foliaire dans un peuplement régulier ?

Implication 2 - Comment évolue l'indice foliaire au cours de la vie d'un peuplement régulier ?

Implication 3 - Quel est l'effet de l'intensité des éclaircies sur le bilan hydrique dans les peuplements réguliers ?

Implication 4 - Quelle est l'influence de la rotation des coupes sur le bilan hydrique des peuplements réguliers ?

Implication 5 - Quelle est l'influence du type d'éclaircie sur le bilan hydrique d'un peuplement régulier ?

Implication 6 - Existe-t-il une relation simple entre la surface terrière et l'indice foliaire ?

Implication 7 - Dans un peuplement régulier, l'effet des éclaircies sur le bilan hydrique n'est-il que temporaire, le temps que le couvert se referme ?

Implication 8 - Deux peuplements réguliers de dimensions différentes mais de même indice foliaire ont-ils le même bilan hydrique ?

Implication 9 - Le seuil de réserve relative en eau extractible du sol de 0,4 est-il universel ?

Implication 10 - Les vieux peuplements réguliers ont-ils un bilan hydrique plus favorable que les jeunes ?

### PARTIE 3 – Glossaire (page 177)

## Tableaux de correspondances

| Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Implications pour la gestion associées |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|  | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | 1                                      | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| A  |   | B | C | D |   |   | G | H | I |   | 1                                      | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| B  | A |   | C |   |   |   | G |   |   |   |  | 2 |   | 4 |   | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| C  | A |   |   |   |   | F |   | H |   | J | 1                                      | 2 | 3 |   | 5 | 6 |   | 8 |   |    |
| D  | A |   | C |   | E | F |   | H |   |   | 1                                      | 2 |   |   |   | 6 | 7 | 8 |   | 10 |
| E  | A |   | C | D |   | F | G |   |   |   | 1                                      | 2 | 3 | 4 |   | 6 | 7 |   |   | 10 |
| F  |   |   | C | D | E |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   | 6 |   |   |   |    |
| G  | A | B | C |   | E |   |   | H |   |   | 1                                      | 2 | 3 | 4 | 5 |   | 7 | 8 | 9 | 10 |
| H  | A | B |   |   |   |   | G |   | I | J | 1                                      | 2 | 3 | 4 | 5 |   |   | 8 |   | 10 |
| I  | A | B | C |   | E |   | G | H |   | J | 1                                      |   |   | 4 |   |   |   |   |   | 10 |
| J  | A | B | C |   |   |   | G | H | I |   | 1                                      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

| Implications pour la gestion associées |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10   | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
| 1                                      |   | 2 | 3 | 4 |   |   | 7 |   |   |  | A |   | C | D | E |   | G | H | I | J |
| 2                                      | 1 |   | 3 | 4 |   |   | 7 |   |   |  | A | B | C | D | E |   | G | H |   |   |
| 3                                      | 1 | 2 |   | 4 | 5 |   | 7 |   |   |  | A |   | C |   | E |   | G | H |   |   |
| 4                                      | 1 | 2 | 3 |   | 5 |   | 7 |   |   |  | A | B |   |   | E |   | G | H | I |   |
| 5                                      | 1 | 2 | 3 | 4 |   |   | 7 |   |   |  | A |   | C |   |   |   | G | H |   |   |
| 6                                      | 1 | 2 |   |   |   |   |   | 8 |   |  | A | B | C | D | E | F |   |   |   |   |
| 7                                      |   | 2 | 3 | 4 | 5 |   |   |   |   |  | A | B |   | D | E |   | G |   |   |   |
| 8                                      | 1 | 2 | 3 | 4 |   |   |   |   |   |  | A | B | C | D |   |   | G | H |   |   |
| 9                                      |   |   | 3 | 4 | 5 |   | 7 |   |   | 10   | A | B |   |   |   |   | G |   |   |   |
| 10                                     | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |   | 7 |   | 9 |  | A | B |   | D | E |   | G | H | I |   |



# **Le bilan hydrique des peuplements forestiers**

**État des connaissances scientifiques et techniques  
Implications pour la gestion**

## **Coordination**

Sophie BERTIN  
Céline PERRIER

## **Auteurs**

Sophie BERTIN  
Philippe BALANDIER  
Jacques BECQUEY  
Damien BONAL  
Nathalie BRÉDA  
Céline PERRIER  
Philippe RIOU-NIVERT  
Éric SEVRIN

Coordination : Sophie BERTIN (EKOLOG)  
Céline PERRIER (CNPf - IDF, animatrice du RMT AFORCE)

Auteurs : Sophie BERTIN (EKOLOG)  
Philippe BALANDIER (IRSTEA)  
Jacques BECQUEY (CNPf - IDF)  
Damien BONAL (INRA)  
Nathalie BRÉDA (INRA)  
Céline PERRIER (CNPf - IDF, animatrice du RMT AFORCE)  
Philippe RIOU-NIVERT (CNPf - IDF)  
Éric SEVRIN (CNPf - CRPF Île-de-France Centre)

Citation du document : BERTIN S. & PERRIER C. (coordination), BERTIN S., BALANDIER P., BECQUEY J., BONAL D., BRÉDA N., PERRIER C., RIOU-NIVERT P. SEVRIN É. (2016). Le bilan hydrique des peuplements forestiers. État des connaissances scientifiques et techniques. Implications pour la gestion. RMT AFORCE. 190 pages.

Ont participé au financement de ce projet :

- le ministère en charge de l'Agriculture et des Forêts
- l'Interprofession France Bois Forêt
- le réseau mixte technologique AFORCE

Conception graphique et mise en page : Léa Chevrier

Imprimeur : Groupe Print Co

Dépôt légal : juin 2016  
ISBN : 978-2-916525-35-8  
© RMT AFORCE, 2016

Cet ouvrage a été réalisé dans le cadre des travaux du Groupe de travail n°2 du RMT AFORCE consacré à la gestion de l'eau dans la sylviculture des peuplements. La coordination de la rédaction a été assurée par Sophie Bertin (EKOLOG) et Céline Perrier (CNPF-IDF), animatrice du RMT AFORCE, sous la direction du RMT AFORCE et des animateurs du groupe de travail : Nathalie Bréda (INRA) et Jacques Becquey (CNPF-IDF).

## Remerciements

AFORCE remercie tout particulièrement les auteurs pour leur investissement dans ce travail d'échange, leur détermination à instaurer un dialogue productif entre science et pratique, et pour leur aptitude à traduire les connaissances en messages simples et accessibles. Un remerciement spécial est adressé à Sophie Bertin, Céline Perrier et aux animateurs du groupe de travail pour avoir coordonné avec efficacité et diplomatie ce projet.

Les auteurs adressent leurs chaleureux remerciements à l'ensemble des relecteurs qui ont contribué à une analyse critique du document et à son évolution vers la version finale qui est proposée ici : Sylvain Gaudin (CNPF-CRPF Champagne-Ardenne), Jean Ladier (ONF), Thierry Sardin (ONF), Ceydric Sédillot-Gasmi (SFDCDC) et plus particulièrement Julien Fiquepron (CNPF-IDF) pour son aide dans la dernière ligne droite. Ils souhaitent également remercier l'ensemble des membres du groupe de travail pour leur contribution à la définition du projet ainsi qu'à l'identification des questions à aborder et tout particulièrement Jérémy Abgrall (CNPF) qui a contribué au montage et au lancement de ce projet.

Enfin, les auteurs remercient toutes les personnes qui ont accepté de mettre à disposition leurs photos pour l'illustration de cet ouvrage : Alexandre Guerrier et Louis-Adrien Lagneau (CNPF - CRPF Bourgogne), Marine Bouvier (CNPF - CRPF Bretagne), Sylvain Gaudin (CNPF - CRPF Champagne-Ardenne), Jérôme Rosa (CNPF - CRPF Île-de-France Centre), Carole Penpoul (CNPF - CRPF Provence-Alpes-Côte-d'Azur), Frédérique Chazal (CNPF - CRPF Rhône-Alpes), Jacques Becquey, Christophe Drénou, Pierre Gonin, Mireille Mouas, Céline Perrier et Philippe Riou-Nivert (CNPF - IDF), Nathalie Bréda (INRA), Philippe Balandier, Christian Ripert et Vincent Seigner (IRSTEA), Michel Bartoli et Gilles Bossuet.



## Préambule

L'alimentation en eau, directement corrélée au climat, est un des facteurs fondamentaux de la croissance des arbres. Cette donnée est une évidence en régions sèches. Les écophysiologistes se sont intéressés à cet aspect depuis bien longtemps (Aussenac, 1973 ; Aussenac, 1993)<sup>1</sup>, en liaison avec la structure du couvert forestier (Aussenac *et al.*, 1995)<sup>2</sup>. Ils ont également mis en évidence la forte influence du déficit hydrique sur le déclenchement des dépérissements forestiers, notamment à la suite d'études sur les chênes après la sécheresse de 1976.

La sécheresse historique de 2003 a relancé l'intérêt pour ces travaux. Outre les mortalités qu'elle a entraînées sur les jeunes plantations et sur les peuplements adultes, elle est intervenue à un moment où les forestiers prenaient pour la première fois conscience de l'évolution inexorable du climat, aujourd'hui très médiatisée. Cette sécheresse a été perçue comme caractéristique de ce qui pourrait se passer en année moyenne dans un demi-siècle : stress hydrique estival intense et températures extrêmes. De nombreux travaux ont alors été initiés pour envisager les conditions d'adaptation des forêts au changement climatique (ONERC, 2015)<sup>3</sup>.

Dans ce contexte nouveau, le forestier est amené à se poser de nombreuses questions concernant l'influence de la sylviculture sur le bilan en eau des peuplements et sur les marges de manœuvre dont il dispose pour atténuer la sévérité des sécheresses. Il était donc indispensable de revisiter les travaux antérieurs sur le sujet, de les synthétiser, d'identifier les réponses pertinentes et de les traduire en recommandations pratiques et applicables par les gestionnaires. Il était également utile de lister les questions restant encore sans réponses afin d'orienter les travaux futurs.

---

1. Aussenac G., 1973. Climat, microclimat et production ligneuse. Ann. Sci. For., vol. 30, n° 2, p. 141-155.

Aussenac G., 1993. Déficit hydriques et croissance des arbres forestiers. Forêt entreprise n° 89, p. 40-47.

2. Aussenac G., Granier A. & Bréda N., 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le cycle hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. RFF vol. XLVII, 1, 1995, p. 54-62.

3. ONERC, 2015. L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change. Rapport au Premier ministre et au Parlement. La Documentation Française. 182 pages.

C'est à cette tâche que s'est attaché le groupe de travail n°2 du réseau mixte technologique AFORCE (RMT AFORCE). Le projet mené dans le cadre de ce groupe entre 2013 et 2015, a consisté en **l'élaboration et la validation de messages sur la gestion de l'eau dans la sylviculture des peuplements, afin d'aider les forestiers à adapter leur sylviculture au changement climatique**. Ces messages sont regroupés dans cet ouvrage et sont consultables en ligne sur le site Internet du réseau AFORCE ([www.reseau-aforce.fr](http://www.reseau-aforce.fr)). La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à un partenariat efficace associant la recherche et les agents de développement. La collaboration mise en place a privilégié les échanges, la mise à profit de l'expertise de chacun, ainsi que la co-construction et la validation conjointe des messages.

Ce projet a été mené en plusieurs étapes :

- **Recensement des questions posées par les praticiens** concernant la gestion de l'eau dans les peuplements (page 17 à 19) ;
- **État des connaissances scientifiques et techniques disponibles** à partir d'analyses bibliographiques et de consultations d'experts. L'objectif était de fournir, lorsqu'elles existent, des réponses aux questions recensées et de préciser les lacunes nécessitant encore des travaux de recherche. Les connaissances ont été rassemblées dans des *Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques* (PARTIE 1). Elles ont été illustrées par des cas concrets extraits de la littérature et mises en relation avec d'autres travaux complémentaires tels que l'outil Biljou<sup>4</sup> ;
- **Apport d'éléments de réponses aux questions posées par les praticiens** en mettant en parallèle les messages délivrés par cette synthèse des connaissances avec les pratiques actuelles de gestion. Ce travail souligne quelles sont les implications concrètes de la prise en compte du bilan en eau des peuplements dans un but d'adaptation des forêts aux impacts du changement climatique. Les réponses formulées sont rassemblées sous forme de fiches intitulées *Implications pour la gestion* (PARTIE 2). Les questions n'ayant pas pu trouver de réponse dans la littérature scientifique et technique actuelle sont recensées page 18.

---

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



© Jacques Becquey - IDF

**Mesure de teneur en eau du sol dans un dispositif d'étude des effets de l'éclaircie sur le bilan hydrique du peuplement et le fonctionnement des arbres.**

*Dispositif installé dans un peuplement de chêne sessile âgé d'une soixantaine d'années (forêt domaniale de Champenoux - Dispositif INRA, responsable scientifique N. Bréda).*



# Sommaire

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| Préambule                           | 5  |
| Mode d'emploi                       | 12 |
| Questions posées par les praticiens | 17 |

## **PARTIE 1 – Synthèse des connaissances scientifiques et techniques** **21**

### **FICHE A – Le bilan hydrique** **22**

|  |    |
|--|----|
| Un système où climat, peuplement et sol sont en interaction    | 23 |
| Le bilan hydrique et ses composantes                           | 24 |
| Définition du bilan hydrique                                   | 24 |
| Les entrées d'eau  | 25 |
| Les sorties d'eau  | 25 |
| Facteurs de variation spatiale et temporelle du bilan hydrique | 27 |
| Le climat  | 27 |
| Le réservoir d'eau du sol                                      | 28 |
| Le peuplement  | 28 |
| Marges de manœuvre du gestionnaire sur le bilan hydrique       | 29 |

### **FICHE B – Le réservoir d'eau du sol** **32**

|   |    |
|---|----|
| Notions de réservoir d'eau du sol et de réserve utile en eau du sol                     | 33 |
| Taille du réservoir d'eau du sol  | 33 |
| Facteurs influençant la profondeur d'enracinement                                       | 33 |
| Définition de la réserve utile en eau du sol (RU)                                       | 34 |
| Notion de réserve relative en eau extractible du sol                                    | 35 |
| Définition de la réserve relative en eau extractible du sol (REW)                       | 35 |
| Pourquoi une quantité d'eau en valeur absolue n'est-elle pas pertinente ?               | 36 |
| Comment le réservoir d'eau du sol se vide-t-il sous l'effet de l'absorption racinaire ? | 36 |
| Un seuil de contrainte hydrique   | 37 |
| Illustration du fonctionnement de deux réservoirs d'eau du sol                          | 39 |

### **FICHE C – De la surface foliaire de l'arbre à l'indice foliaire du peuplement** **44**

|  |    |
|--|----|
| Surface foliaire de l'arbre et indice foliaire du peuplement | 45 |
| Surface foliaire de l'arbre                                  | 45 |
| Surface foliaire du peuplement                               | 45 |
| Indice foliaire du peuplement                                | 45 |
| Ne pas confondre indice foliaire et couvert du peuplement    | 47 |

### **FICHE D – Les facteurs de variation de l'indice foliaire** **50**

|   |    |
|---|----|
| Un indice à forte variabilité spatiale et temporelle                                      | 51 |
| Quelques ordres de grandeur de l'indice foliaire en fonction de la composition en espèces | 52 |
| Variabilité temporelle de l'indice foliaire   | 53 |
| Les variations saisonnières   | 53 |
| Les variations interannuelles   | 54 |
| Hétérogénéité spatiale de l'indice foliaire   | 55 |

### **FICHE E – Estimation de l'indice foliaire : méthodes directes** **58**

|  |    |
|--|----|
| Équilibre fonctionnel entre surface d'aubier et surface foliaire | 59 |
| Intérêt de la mesure de l'indice foliaire                        | 60 |

|  |            |
|--|------------|
| Méthodes directes de mesure de l'indice foliaire                                       | 60         |
| Recueil d'un échantillon de feuilles dans des bacs collecteurs                         | 61         |
| Établissement de relations sur un échantillon d'arbres abattus                         | 64         |
| Facteurs de variation de la relation allométrique                                      | 66         |
| <b>FICHE F – Estimation de l'indice foliaire : méthodes indirectes</b>                 | <b>76</b>  |
| Principe des méthodes indirectes   | 77         |
| Exemple d'instruments commercialisés pour la mesure indirecte de l'indice foliaire     | 79         |
| Analyseur de couvert LAI-2000 (Licor Inc, USA)   | 80         |
| ACCUPAR LP-80 (Decagon devices) ou SunScan (Delta-T Devices)                           | 80         |
| Les capteurs de rayonnement  | 82         |
| L'exploitation de photographies hémisphériques   | 82         |
| Avantages et inconvénients des méthodes indirectes                                     | 83         |
| Utilisation de variables dendrométriques   | 84         |
| <b>FICHE G - Facteurs de variation de la transpiration des arbres et statut social</b> | <b>90</b>  |
| Deux principaux déterminants de la transpiration                                       | 91         |
| La demande climatique  | 91         |
| Les caractéristiques intrinsèques des arbres   | 92         |
| Transpiration de l'arbre et statut social  | 94         |
| Transpiration du peuplement et indice foliaire   | 99         |
| <b>FICHE H – Évapotranspiration réelle de la strate inférieure d'un peuplement</b>     | <b>102</b> |
| Préambule  | 104        |
| Les facteurs de variation de l'évapotranspiration de la strate inférieure              | 104        |
| Le microclimat dans la strate inférieure   | 104        |
| La distribution des racines de la végétation de la strate inférieure                   | 107        |
| Contribution de la strate inférieure à l'évapotranspiration totale du peuplement       | 108        |
| Contribution moyenne   | 108        |
| Contribution maximale  | 109        |
| La strate herbacée peut-elle renforcer les conséquences d'une sécheresse ?             | 110        |
| Effet du contrôle de la végétation de la strate inférieure                             | 111        |
| <b>FICHE I - Bilan hydrique d'un peuplement mélangé</b>                                | <b>114</b> |
| Préambule  | 115        |
| Particularités d'un peuplement mélangé   | 115        |
| Bilan hydrique et productivité   | 115        |
| Les limites d'une comparaison du bilan hydrique entre peuplements purs et mélangés     | 116        |
| Accès à la ressource en eau du sol   | 117        |
| Capacités d'enracinement propres aux espèces   | 117        |
| Accès différencié à la réserve utile au sein du mélange                                | 119        |
| Effets du mélange sur les composantes du bilan hydrique                                | 119        |
| Agencement des houppiers dans l'espace et évapotranspiration                           | 120        |
| Illustration de la diversité d'utilisation de l'eau entre espèces                      | 121        |
| <b>FICHE J - Bilan hydrique d'un peuplement irrégulier</b>                             | <b>126</b> |
| Préambule  | 127        |
| Distribution étagée de la strate peuplement et évapotranspiration                      | 128        |
| Prospection racinaire et réserve en eau  | 130        |

## **PARTIE 2 – Implications pour la gestion**

**133**

|  |            |
|--|------------|
| <b>Implication 1</b> - Qu'est-ce qui fait varier l'indice foliaire dans un peuplement régulier ?   | <b>134</b> |
| <b>Implication 2</b> - Comment évolue l'indice foliaire au cours de la vie d'un peuplement régulier ?  | <b>138</b> |
| <b>Implication 3</b> - Quel est l'effet de l'intensité des éclaircies sur le bilan hydrique dans les peuplements réguliers ?                                   | <b>142</b> |
| <b>Implication 4</b> - Quelle est l'influence de la rotation des coupes sur le bilan hydrique des peuplements réguliers ?                                      | <b>146</b> |
| <b>Implication 5</b> - Quelle est l'influence du type d'éclaircie sur le bilan hydrique d'un peuplement régulier ?   | <b>150</b> |
| <b>Implication 6</b> - Existe-t-il une relation simple entre la surface terrière et l'indice foliaire ?  | <b>154</b> |
| <b>Implication 7</b> - Dans un peuplement régulier, l'effet des éclaircies sur le bilan hydrique n'est-il que temporaire, le temps que le couvert se referme ? | <b>158</b> |
| <b>Implication 8</b> - Deux peuplements réguliers de dimensions différentes mais de même indice foliaire ont-ils le même bilan hydrique ?                      | <b>162</b> |
| <b>Implication 9</b> - Le seuil de réserve relative en eau extractible du sol de 0,4 est-il universel ?  | <b>166</b> |
| <b>Implication 10</b> - Les vieux peuplements réguliers ont-ils un bilan hydrique plus favorable que les jeunes ?  | <b>172</b> |

## **PARTIE 3 – Glossaire**

**177**

Aide à la lecture

Tableaux de correspondances

rabat de couverture

rabat de couverture

# Mode d'emploi

Ce travail a pour ambition d'aider les forestiers à mieux comprendre le fonctionnement hydrique des peuplements forestiers, de manière à ce qu'ils puissent progressivement en tenir compte dans leurs décisions de gestion. Il fait état des connaissances scientifiques et techniques actuelles dans ce domaine et propose des éléments de réponse aux questions posées à ce jour par les praticiens. L'objectif est de les aider à orienter et à raisonner leurs choix techniques adaptés à chaque contexte pédo-climatique, actuel et futur. Lors de l'établissement du diagnostic de gestion d'un peuplement, d'autres critères doivent être pris en compte.

Les orientations sylvicoles retenues dans ces pages sont donc issues d'un compromis dont le bilan hydrique est seulement une des composantes. En cas de doute, il est recommandé de se référer à un conseiller forestier local qui pourra adapter les messages diffusés ici aux conditions de la forêt concernée, en tenant compte des autres enjeux existants.

## À qui s'adresse ce travail ?

Il s'adresse aux conseillers forestiers, aux agents de développement et aux enseignants. C'est un ouvrage de synthèse et de réflexion qui pourra être utilisé comme support pour élaborer des présentations adaptées à leurs interlocuteurs (gestionnaires, propriétaires, politiques, décideurs, étudiants, etc.) dans le cadre de formations, de journées d'information ou de réunions. Il s'adresse également aux chercheurs intéressés par les questions que soulève le changement climatique sur le terrain. Enfin, ce travail peut intéresser les décideurs publics qui souhaitent disposer d'un état d'avancement des connaissances et des questions restant en suspens.

## Comment l'aborder ?

Il est conçu pour une lecture dynamique et possède donc de nombreux renvois. Le lecteur peut l'aborder pour trouver réponse à des questions de gestion, pour se remémorer certaines notions fondamentales ou enfin, pour mettre à jour ses connaissances sur les résultats scientifiques et techniques relatifs au fonctionnement hydrique des peuplements.

## Comment s'articule t-il ?

### Question posées par les praticiens

Les pages 17 et 18 répertorient un ensemble de questions posées par les praticiens sur le fonctionnement hydrique des peuplements.

- **Questions 1 à 10** : questions qui trouvent des réponses aujourd'hui dans la littérature et pour lesquelles les connaissances assemblées dans ce document permettent la formulation d'implications pour la gestion (pages 133 à 175). Une même question ne renvoie qu'à une seule *Implication pour la gestion*.

- **Questions 11 à 18** : questions pour lesquelles il n'est possible de formuler que des réponses partielles compte tenu de l'état des connaissances. Les éléments de réponse à ces questions sont consignés dans les *Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques* H, I et J (pages 102 à 131).

- **Questions 19 à 23** : questions dites "orphelines", adressées à la recherche, pour lesquelles les connaissances ne permettent pas encore de formuler des réponses.

Plusieurs tableaux de correspondances permettent également de visualiser rapidement les liens et renvois entre questions (page 19), *Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques*, et *Implications pour la gestion* (rabat de couverture).

#### Conseil de lecture n°1

Une même *Implication pour la gestion* peut renvoyer à plusieurs *Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques*. Il est vivement recommandé de les consulter afin de mieux comprendre les connaissances et mécanismes qui ont servi à les élaborer.

### Synthèse des connaissances scientifiques et techniques – Partie 1

Afin de répondre aux questions posées par les praticiens, une synthèse de la littérature scientifique et technique disponible en 2015 est résumée sous forme de fiches.

- **Fiches A à G** : fiches pour lesquelles on dispose d'informations dans la littérature scientifique et technique. Elles contiennent des rappels des connaissances fondamentales avec références bibliographiques associées et des exemples concrets et illustrés. Les connaissances regroupées dans ces fiches sont la base des éléments de réponse aux questions n°1 à 10 regroupés dans les *Implications pour la gestion* (pages 133 à 175).

- **Fiches H à J** : fiches conçues à partir de travaux de synthèse récents ou en cours. Elles ont vocation à fournir un état des lieux sur des sujets pour lesquels la recherche ne dispose encore que d'éléments très incomplets. Elles constituent notamment une aide pour aborder les questions n°11 à 18.

#### Conseil de lecture n°2

L'ensemble des exemples fournis dans ces fiches sont extraits de la littérature. Ils s'appliquent à des cas bien précis (situation géographique, type d'essence ou de peuplement, mode de sylviculture, etc.). Il convient par conséquent de ne pas généraliser à partir de ces exemples. Les concepts génériques sont distingués et présentés dans le corps du texte de ces fiches.

## Implications pour la gestion – Partie 2

Pour chacune des questions formulées par les praticiens, les conséquences des pratiques courantes de gestion sur le fonctionnement hydrique des peuplements sont explicitées. Cet éclairage incite et aide les forestiers à mieux intégrer la composante hydrique dans leurs raisonnements de gestion. Les pratiques à privilégier et celles à éviter sont mises en évidence.

### Conseil de lecture n°3

**Les *Implications pour la gestion* ne sont en aucun cas des recommandations ou des itinéraires sylvicoles clefs en mains !** Il s'agit d'une synthèse des différents éléments de réponse qu'apporte la littérature à des questions de gestion. Elles sont générales et ne peuvent de ce fait pas s'appliquer sans prendre en compte les caractéristiques de chaque peuplement dans son environnement pédo-climatique. Par ailleurs, dans ce document, seule la question de l'amélioration du bilan hydrique dans les peuplements a été prise en considération. Pour un passage à la pratique, il faudra intégrer simultanément dans la décision la prise en compte des objectifs du propriétaire, les autres risques (sanitaires, tempêtes, etc.), les composantes économiques, etc.

## Glossaire – Partie 3

Les termes techniques utilisés dans le document sont définis dans cette partie. Ils sont signalés dans le texte par un astérisque lorsqu'ils sont cités pour la première fois dans une *Fiche de synthèse des connaissances scientifiques et techniques* ou dans une *Implication pour la gestion*.

### Conseil de lecture n°4

**Des différences d'usage pour certains termes techniques ont été constatées entre chercheurs, agents de développement et praticiens, lors de la conception des documents.** Par conséquent, pour éviter tout risque de mauvaise interprétation, les termes les plus indispensables à la compréhension de l'ouvrage ont été redéfinis. C'est le cas notamment des mots suivants pour lesquels nous vous invitons à consulter la définition avant d'engager votre lecture : couvert, peuplement forestier, sous-étage, stade juvénile, strate arborée, strate arbustive, strate feuillée, strate herbacée, strate inférieure, strate peuplement.

## Repères pour la lecture des Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques

Lettre permettant de distinguer plus facilement les fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques.

Intitulé de la fiche.

Nouvelles connaissances pouvant être acquises après la lecture de la fiche.



Rappel de ce qu'il est préférable de connaître avant de s'engager dans la lecture.

Onglets permettant de naviguer d'une fiche à une autre.

Coups de pouce permettant de naviguer d'une partie à une autre.



Rappel des messages à retenir pour un chapitre.

Exemples référencés dans le texte grâce à la numérotation.

Illustrations référencées dans le texte grâce à la numérotation.

Encadrés permettant un approfondissement ou un rappel. Chaque encadré est numéroté de manière à permettre des liens avec le texte.



Rappel des principaux messages à retenir pour une fiche.

Liste des références bibliographiques citées dans la fiche.

Références bibliographiques recommandées pour approfondir sur le sujet.



Liens vers les autres Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques complémentaires à celle-ci.

Renvoi vers les Implications pour la gestion auxquelles la fiche contribue à répondre.

## Repères pour la lecture des Implications pour la gestion

Éclairage sur les pratiques courantes de gestion relatives à la question posée. Il s'appuie sur des avis de praticiens, et reflète les pratiques hors contexte de changement climatique.



Éclairage sur le fonctionnement hydrique des peuplements forestiers en lien avec la question posée. Il s'appuie sur le contenu des *Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques*.

Mise en parallèle pour la question posée, des pratiques de gestion courante et de leurs impacts sur le fonctionnement hydrique des peuplements forestiers. Des implications possibles sur la gestion en sont déduites. Elles visent à améliorer le bilan hydrique d'un peuplement.



Mises en garde sur les mauvaises interprétations ou les fausses bonnes idées de gestion que l'on pourrait avoir après lecture des fiches A à J.

Lien vers les *Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques* qui contribuent à répondre à la question posée.

Correspondance avec des questions proches.

## Questions posées par les praticiens

### Lot I – Questions faisant l'objet d'une réponse complète sous forme d'une implication pour la gestion

**Question n°1** - Qu'est-ce qui fait varier l'indice foliaire dans un peuplement régulier ?

**Question n°2** - Comment évolue l'indice foliaire au cours de la vie d'un peuplement régulier ?

**Question n°3** - Quel est l'effet de l'intensité des éclaircies sur le bilan hydrique dans les peuplements réguliers ?

**Question n°4** - Quelle est l'influence de la rotation des coupes sur le bilan hydrique des peuplements réguliers ?

**Question n°5** - Quelle est l'influence du type d'éclaircie sur le bilan hydrique d'un peuplement régulier ?

**Question n°6** - Existe-t-il une relation simple entre la surface ferrière et l'indice foliaire ?

**Question n°7** - Dans un peuplement régulier, l'effet des éclaircies sur le bilan hydrique n'est-il que temporaire, le temps que le couvert se referme ?

**Question n°8** - Deux peuplements réguliers de dimensions différentes mais de même indice foliaire ont-ils le même bilan hydrique ?

**Question n°9** - Le seuil de réserve relative en eau extractible du sol de 0,4 est-il universel ?

**Question n°10** - Les vieux peuplements réguliers ont-ils un bilan hydrique plus favorable que les jeunes ?

### Lot II – Questions faisant l'objet d'une réponse partielle distillée dans les fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques

**Question n°11** - Après une intervention sylvicole ouvrant le couvert d'un peuplement, quelle serait l'incidence du développement d'une végétation herbacée (voire arbustive) sur son bilan hydrique global ?

**Question n°12** - Un peuplement clair avec une importante strate herbacée présente-t-il un bilan hydrique global moins favorable qu'un peuplement à couvert fermé sans strate herbacée ?

En est-il de même si c'est la strate arbustive qui est importante ?

**Question n°13** - Est-il vrai que les peuplements mélangés favorisent une distribution des racines dans différents horizons du sol ? Cela a-t-il un effet sur la transpiration du peuplement ? Un peuplement monospécifique équienne avec les systèmes racinaires des arbres explorant les mêmes horizons de sol est-il plus exposé à la sécheresse qu'un peuplement mélangé ?

**Question n°14** - Quelles sont les associations d'essences qui permettent d'obtenir les bilans hydriques les plus favorables ?

**Question n°15** - Les flux d'eau qui composent le bilan hydrique sont-ils répartis différemment entre un peuplement pur et un peuplement mélangé ? L'un transpire-t-il plus que l'autre ?

**Question n°16** - Un peuplement mélangé feuillus-résineux a-t-il un bilan hydrique plus favorable qu'un peuplement pur de résineux ?

**Question n°17** - Est-il vrai que les peuplements irréguliers ou étagés favorisent l'exploration de couches de sol différentes et étagées ? Cela a-t-il un effet sur la transpiration totale du peuplement ? Un peuplement monospécifique équienne avec les systèmes racinaires des arbres explorant les mêmes horizons de sol est-il plus exposé à la sécheresse ?

**Question n°18** - Dispose-t-on d'éléments probants pour préciser si les peuplements irréguliers ou étagés (purs ou mélangés) ont un bilan hydrique plus favorable que les peuplements réguliers ?

### Lot III – Questions dites “orphelines”, pour lesquelles il n'est pas encore possible de formuler des réponses

**Question n°19** - Une éclaircie systématique en ligne, qui abaisserait brutalement l'indice foliaire, permettrait-elle d'amener au sol plus de pluie incidente qu'une éclaircie sélective, davantage par le bas ?

**Question n°20** - Raccourcir les révolutions implique de plus fréquentes exportations minérales pouvant épuiser la fertilité des sols. Cela peut-il avoir des conséquences sur la sensibilité des arbres au stress hydrique ?

**Question n°21** - Les résineux, dans leur globalité, ont la réputation de mieux résister au stress hydrique (par rapport aux grands feuillus sociaux, notamment). Comment expliquer cela ? Ont-ils une meilleure régulation de la transpiration des feuilles aciculaires en cas de stress hydrique important ?

**Question n°22** - Quels sont, essence par essence, à stress hydrique équivalent, les atouts et faiblesses pour résister aux sécheresses : mode de régulation stomatique (évitement par exemple), résistance à la cavitation, particularité du système racinaire (racines plongeantes par exemple), particularités de l'architecture du houppier (plus ou moins forte interception), etc. ?

**Question n°23** – À la suite d'une plantation, comment évolue le bilan hydrique avec le développement des plants (en fonction des densités initiales par exemple), lorsque le couvert commence à se fermer (entre 8 et 12-14 m de hauteur pour des densités standard) ?

## Où trouver la réponse à ces questions dans ces travaux ?

|                            |      | Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Implications pour la gestion associées |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------------------------|------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|                            |      | A  | B | C | D | E | F | G | H | I | J | 1                                      | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| <b>Questions du LOT I</b>  | n°1  | ●  |   | ● | ● | ● |   | ● | ● | ● | ● |  | ● | ● | ● |   |   | ● |   |   |    |
|                            | n°2  | ●  | ● | ● | ● | ● |   | ● | ● |   |   | ●                                      |   | ● | ● |   |   | ● |   |   |    |
|                            | n°3  | ●  |   | ● |   | ● |   | ● | ● |   |   | ●                                      | ● |   | ● | ● |   | ● |   |   |    |
|                            | n°4  | ●  | ● |   |   | ● |   | ● | ● | ● |   | ●                                      | ● | ● |   | ● |   | ● |   |   |    |
|                            | n°5  | ●  |   | ● |   |   |   | ● | ● |   |   | ●                                      | ● | ● | ● |   |   | ● |   |   |    |
|                            | n°6  | ●  | ● | ● | ● | ● | ● |   |   |   |   | ●                                      | ● |   |   |   |   |   | ● |   |    |
|                            | n°7  | ●  | ● |   | ● | ● |   | ● |   |   |   |  | ● | ● | ● | ● |   |   |   |   |    |
|                            | n°8  | ●  | ● | ● | ● |   |   | ● | ● |   |   | ●                                      | ● | ● | ● |   |   |   |   |   |    |
|                            | n°9  | ●  | ● |   |   |   |   | ● |   |   |   |  |   | ● | ● | ● |   | ● |   |   | ●  |
|                            | n°10 | ●  | ● |   | ● | ● |   | ● | ● | ● |   | ●                                      | ● | ● | ● | ● |   | ● |   | ● |    |
| <b>Questions du LOT II</b> | n°11 | ●  |   |   | ● |   |   | ● |   |   |   | ●                                      | ● |   |   |   | ● |   |   |   |    |
|                            | n°12 | ●  |   |   |   |   |   | ● |   |   |   |  | ● |   |   |   | ● |   |   |   |    |
|                            | n°13 | ●  | ● |   |   |   |   | ● | ● | ● |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|                            | n°14 | ●  |   |   |   |   |   |   | ● |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|                            | n°15 | ●  |   |   | ● |   |   | ● |   | ● |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|                            | n°16 | ●  |   |   | ● |   |   |   |   | ● |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|                            | n°17 | ●  | ● |   |   |   |   |   | ● |   | ● |  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|                            | n°18 | ●  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |    |



**Partie**



**Synthèse  
des connaissances  
scientifiques  
et techniques**



# **Le bilan hydrique**

## **Objectifs généraux**

**Appréhender les éléments fondamentaux  
qui entrent dans le calcul du bilan hydrique  
d'un peuplement forestier.**

**Comprendre pourquoi l'indice foliaire du peuplement  
est considéré comme un paramètre essentiel  
pour orienter les actions sylvicoles.**

## Un système où climat, peuplement et sol sont en interaction

Pour raisonner le **bilan hydrique\***, il faut considérer le peuplement forestier\* dans son ensemble, c'est-à-dire comme un système (système étudié\* ; cf. Figure A2) composé :

- d'un **niveau aérien**, occupé par la strate peuplement\*, où se fait l'interface avec l'atmosphère ;
- d'un **niveau souterrain**, occupé par les systèmes racinaires des arbres de la strate peuplement, où se fait l'interface entre le sol et les racines.

Les arbres qui composent le peuplement forestier sont ainsi en interaction avec le climat et avec le sol (cf. Figure A1).

Ce peuplement forestier, par la structure\* de sa strate peuplement, sa composition\* et son âge, et par sa situation topographique et géologique (pente, exposition, roche-mère, etc.) peut moduler localement les conditions climatiques et produire ce qu'on appelle un **microclimat\*** (Aussenac, 2000). Ainsi, en intervenant sur le peuplement, le gestionnaire intervient aussi indirectement sur le microclimat (cf. § "Marges de manœuvre du gestionnaire sur le bilan hydrique").

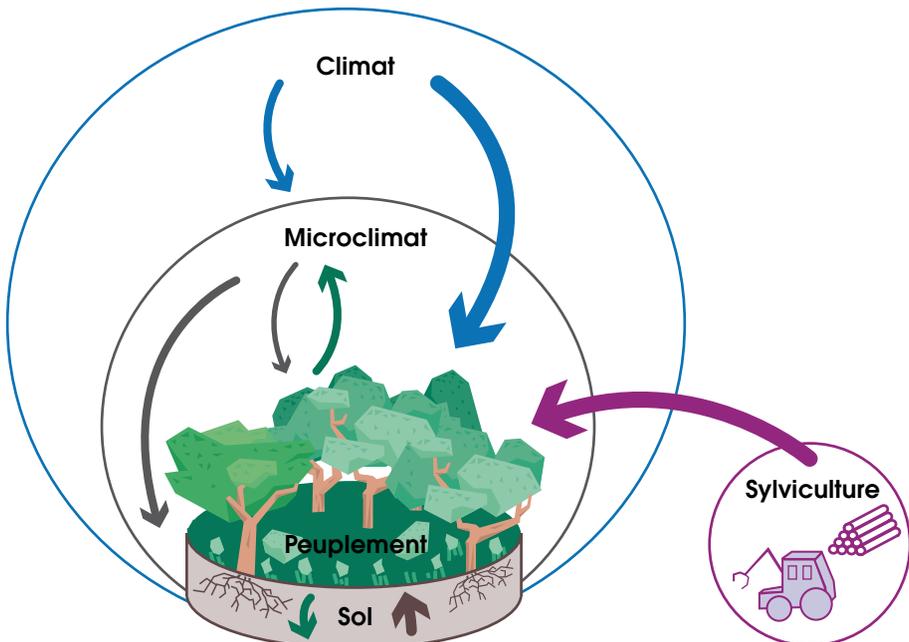


Figure A1 : Interactions entre climat, peuplement et sol (d'après Aussenac, 2000).

## Le bilan hydrique et ses composantes

### Définition du bilan hydrique

Établir un bilan hydrique dans un peuplement forestier revient à calculer les variations de la quantité d'eau disponible dans le sol entre deux dates (cf. Fiche B). Le stock d'eau dans le sol à la date  $t$  est égal au stock d'eau à la date  $t-1$  auquel on ajoute les flux d'eau entrants et auquel on soustrait les flux d'eau sortants (cf. Figure A2).

$$R_t = R_{t-1} + P - T - In - E - D - X$$

$R_t$  : réserve en eau du sol à la date  $t$ .

$R_{t-1}$  : réserve en eau du sol à la date  $t-1$ .

$P$  : précipitations.

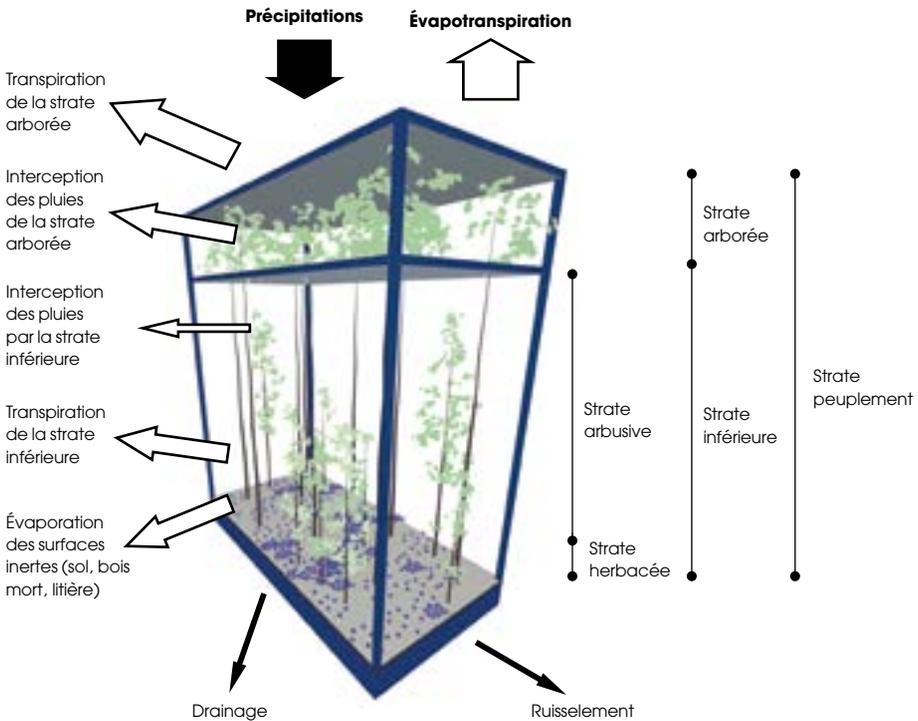
$T$  : transpiration\* de la strate peuplement.

$In$  : interception\* des précipitations par la strate peuplement.

$E$  : évaporation du sol.

$D$  : drainage\*.

$X$  : ruissellement.



**Figure A2 : Les flux d'eau à prendre en compte pour établir le bilan hydrique d'un peuplement forestier : entrées d'eau dans le système et flux sortants (d'après INRA Biljou©, 2010 et Karine Porte Architecte © pour EKOLOG).**

Les flèches représentent les flux. Leur taille illustre des ordres de grandeurs respectifs mais ne représente pas la généralité des situations qui peuvent être rencontrées dans les différents types de peuplements. Les points violets au sol représentent la strate herbacée. Tous les flux sortants aériens constituent l'évapotranspiration.

## Les entrées d'eau

L'eau qui entre dans le système correspond pour l'essentiel à une fraction des **précipitations**, sous forme de pluie ou de neige (cf. *Figure A2*). Seule une partie atteint le sol, soit directement à travers le feuillage soit après égouttement ou écoulement le long des troncs, et contribue à la recharge de la réserve en eau du sol\* (cf. *Fiche B*). L'autre partie, proportion non négligeable, est **interceptée** par le feuillage des différentes strates du peuplement. Elle devient alors un flux sortant qui quitte le système par évaporation.

## Les sorties d'eau

L'eau qui sort du système est plus difficile à quantifier que celle qui y entre puisque l'on parle cette fois de (cf. *Figure A2*) :

- l'eau **transpirée** par la végétation de la strate peuplement (arborée\* et inférieure\*),
- l'eau **évaporée** par le sol,
- l'eau **interceptée** par la végétation de la strate peuplement,
- l'eau **drainée et ruisselée**, au niveau du sol.

Les volumes de ces différents flux sont mesurés directement ou calculés à l'aide de fonctions mathématiques et en utilisant des données météorologiques. Pour ces calculs, outre les précipitations, il est nécessaire de connaître le rayonnement solaire, la température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent. Combinées entre elles, ces variables météorologiques permettent notamment de calculer l'**évapotranspiration potentielle\*** (ETP). Il s'agit d'une variable synthétique qui estime la quantité d'eau pouvant être évaporée dans l'atmosphère pendant une journée, en dehors de tout processus biologique de régulation (Badeau & Bréda, 2008). Elle quantifie la **demande climatique\***. "Elle n'est que la traduction du fait que le linge sèche mieux en été avec une petite brise qu'en hiver" (Badeau & Bréda, 2008 ; cf. *Fiche G*).

## Transpiration et feuillage

La quantité d'eau transpirée par la végétation de la strate peuplement (*Figure C1* de la *Fiche C*) dépend très étroitement

### Peuplement de douglas instrumenté pour la mesure de pluie sous couvert (forêt des Potées, Ardennes).

L'écoulement le long du tronc est mesuré avec les gouttières autour des troncs puis l'eau est stockée dans les bidons. La pluie arrivant sous couvert est collectée avec les entonnoirs pour analyser sa composition minérale. Un bac recueille les retombées d'aiguilles.



© Nathalie Bréda - INRA

de sa surface foliaire\*, de sa distribution dans l'espace (caractérisées par la variable indice foliaire\*) et du contrôle de ce flux effectué par les végétaux la constituant (régulation stomatique). Le sol, la plante et l'atmosphère forment un continuum pour l'eau sous forme liquide ou gazeuse : l'eau dans le sol est absorbée au niveau des racines, elle transite par la plante avant de rejoindre l'atmosphère en sortant sous forme gazeuse au niveau des feuilles (stomates\*).

**La dynamique de consommation en eau dépend à la fois de la demande climatique (ETP) et de la disponibilité en eau du sol.** Elle est modulée par l'état de développement du feuillage (phénologie\*) : date de débourrement, indice foliaire et date de chute des feuilles (cf. Encadré A1). À noter que les feuilles

ne transpirent généralement pas la nuit (absence de rayonnement solaire et stomates généralement totalement fermés).

### Interception des précipitations par le feuillage

Une fraction d'eau de pluie ou de neige ressort du système *via* l'interception\*. Une part plus ou moins grande des précipitations est en effet interceptée par le feuillage. Cette eau n'atteint jamais le sol car **elle est directement 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, de l'évapotranspiration, du type de végétation (feuillus/résineux) et de la quantité du feuillage, donc de la dynamique saisonnière de l'indice foliaire [...] » (Badeau & Bréda, 2008 ; cf. Fiche D).



**Interception de la pluie par le feuillage d'un tremble.**

## Rôle majeur du type de phénologie dans l'interception des pluies

A1

Pour les **espèces décidues\***, l'interception :

- est quasi-nulle en hiver ; seuls les branches et les troncs interceptent à cette période.
- augmente au printemps, au fur et à mesure du déploiement des feuilles ;
- est maximale en été ;
- décroît en automne, avec la chute des feuilles (Badeau & Bréda, 2008).

Pour les **espèces sempervirentes\***, l'interception des précipitations intervient toute l'année et est plus importante que pour les feuillus à l'échelle annuelle.

Au final, la **quantité de pluie atteignant le sol**, paramètre essentiel à la recharge de la réserve en eau du sol, dépend avant tout de l'intensité de la pluie, mais **décroît** lorsque l'indice foliaire **augmente** (Bréda, 1999). De façon très générale, l'ordre de grandeur de l'interception est de 10 à 15% des précipitations totales pour les **essences décidues** et jusqu'à 40% pour les **essences sempervirentes** à fort indice foliaire (Aussenac, 1968).

## Facteurs de variation spatiale et temporelle du bilan hydrique

Une bonne alimentation en eau du peuplement forestier résulte d'un ensemble de flux tels que ceux décrits précédemment, mais il dépend aussi des propriétés des différents éléments qui composent le système : climat, microclimat, sol et peuplement (cf. Exemples A1 et A2).

### Exemple A1

*Un climat favorable (pluies bien réparties sur l'année et ensoleillement important) n'est pas toujours synonyme de bonne croissance des arbres. Elle peut par exemple être limitée si le sol est très peu épais (cf. Fiche B). Cela met en évidence la difficulté de raisonner l'alimentation en eau par grandes régions écologiques telles que les sylvo-écorégions (SER) de l'IGN<sup>1</sup>. Il faut préférer des analyses au cas par cas qui intègrent à la fois le peuplement, le sol et le climat.*

### Exemple A2

*Un sol profond n'est pas toujours synonyme d'une bonne croissance des arbres. Elle peut être limitée si les pluies et la recharge du réservoir d'eau du sol\* sont réduites ou mal distribuées dans la saison par rapport aux besoins de la végétation (cf. Fiche B). Cela met en exergue l'importance en matière d'alimentation en eau des arbres, de la complémentarité entre d'une part, la taille et l'état de remplissage du réservoir d'eau du sol, et d'autre part, le climat et les caractéristiques du peuplement.*

## Le climat

Le bilan hydrique d'un peuplement forestier (système étudié) est en premier lieu déterminé par le climat, et en particulier par la pluie. Les composantes de ce climat peuvent varier considérablement dans le temps et l'espace, y compris sur de courtes distances (Badeau & Bréda, 2008) :

- l'**ensoleillement, quantifié par le rayonnement global**, varie peu sur de grandes étendues (excepté en zones montagneuses où les effets topographiques et l'orientation adret/ubac peuvent avoir une influence non négligeable) ;

<sup>1</sup><http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article773>

- « les **températures** montrent une plus grande hétérogénéité spatiale, surtout sur des gradients altitudinaux » (Badeau & Bréda, 2008) ;
- les **précipitations** peuvent varier considérablement sur de courtes distances, à la fois en volume (quantités annuelles) et en répartition durant l'année. Or, une pluie de 20 mm n'est pas équivalente à dix pluies de 2 mm, en particulier en raison de l'interception par le feuillage ou de l'évaporation au niveau du sol (Badeau & Bréda, 2008).

### Le réservoir d'eau du sol

La strate peuplement puise son eau dans le volume de sol prospecté par ses racines fines. Ce volume correspond au réservoir d'eau du sol. Il est déterminé par la profondeur d'enracinement. Il contient notamment la réserve utile en eau\* extractible par la végétation, soit le volume d'eau accessible et absorbable par la végétation.

La taille de ce réservoir d'eau du sol présente parfois à l'échelle d'un peuplement forestier une **forte variabilité spatiale**. De plus, le remplissage de ce réservoir d'eau du sol **varie fortement et rapidement au cours du temps**. Tous ces aspects sont présentés en détail dans la *Fiche B*.

### Le peuplement

Les caractéristiques du peuplement qui influencent le bilan hydrique sont, au niveau aérien, le **système foliaire\*** et son agencement dans l'espace et, au niveau souterrain, le **système racinaire fin** et sa distribution dans le sol. Ces caractéris-



Alexandre Guertier - CRPF Bourgogne © CNPF

**Prospection par les racines fines d'un sol caillouteux des plateaux calcaires du Nord-est.**

tiques sont modulées essentiellement par les propriétés physiques et chimiques du sol, par l'essence considérée, par sa phénologie, et par la compétition entre arbres pour les ressources\* (cf. *Fiche H et J*).

Il est important de noter que la quantité de feuilles joue un double rôle sur la quantité d'eau qui entre ou sort du système. Elle est caractérisée par l'indice foliaire du peuplement forestier qui commande les principaux flux d'eau déterminant le bilan hydrique (cf. *Fiche C*) : la transpiration et l'interception des précipitations par la strate peuplement, de même que l'évaporation du sol et la transpiration de la strate inférieure (cf. *Fiche G*). Il contrôle donc à la fois des flux entrants (la quantité de précipitations qui arrive au sol après interception)

et sortants (transpiration des strates supérieure et inférieure). Il présente une forte variabilité, à la fois temporelle et spatiale, dont les aspects sont analysés en détail dans la *Fiche D*.

## Marges de manœuvre du gestionnaire sur le bilan hydrique

Chaque peuplement (régulier\* ou irrégulier\*, monospécifique ou mélangé\*) a un indice foliaire qui lui est propre et qui contribue à un partitionnement\* différent des flux d'eau déterminant son bilan hydrique : plus ou moins de transpiration des arbres et de la strate inférieure, d'interception des précipitations et d'évaporation du sol. **Ce partitionnement peut se travailler par la sylviculture** : l'objectif est d'allouer la plus grande partie de la consommation d'eau au profit des arbres de la strate arborée afin d'améliorer leur productivité\*. Les interventions

sylvicoles doivent bien entendu se faire en adéquation avec le contexte pédo-climatique\* du site.

Voici quelques exemples d'opérations que le gestionnaire peut mettre en œuvre :

- il ne peut pas modifier le climat mais il peut **moduler le microclimat**, par exemple avec des éclaircies, en particulier pour atténuer l'évapotranspiration potentielle (Aussenac, 1984) ;
- il peut légèrement **améliorer les caractéristiques du réservoir d'eau du sol** d'un peuplement existant, mais c'est au prix de travaux lourds de drainage, de sous-solage ou de scarification ;
- il peut intervenir, notamment par des éclaircies, facilement et de manière très significative sur la **quantité de feuillage**, caractérisée ici par l'indice foliaire, et modulable par la sylviculture (Aussenac *et al.*, 1995). Cet indice constitue un levier important pour améliorer le bilan hydrique.



Opération d'éclaircie et de débardage dans un peuplement de mélèze (plateau de Millevaches).

Ainsi, les marges de manœuvre du gestionnaire forestier sur le bilan hydrique sont bien réelles. Elles impliquent cependant une bonne connaissance des interactions existant entre les conditions microclimatiques, le peuplement forestier et le sol. Une meilleure connaissance

de l'écophysiologie des essences en place (morphologie et anatomie des feuilles, architecture des racines et des branches, phénologie et croissance, etc.) et de son influence sur le fonctionnement global du système est aussi indispensable (Aussenac, 2000).

### Principaux enseignements de la fiche

- Le bilan hydrique\* d'un peuplement forestier\* résulte d'un ensemble de flux d'eau entrants et sortants du système\*. Il est influencé par le sol, le climat, le réservoir d'eau du sol\* et par le peuplement avec ses caractéristiques (identité des espèces, indice foliaire\*, phénologie\*).
- La sylviculture permet de travailler le partitionnement\* des flux d'eau entre les différentes strates, déterminant le bilan hydrique de la strate peuplement\*.
- On se focalise dans la majorité des autres fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques sur l'indice foliaire, car c'est la variable sur laquelle la sylviculture est un levier immédiat pour améliorer le bilan hydrique des peuplements existants.

### Références bibliographiques

- AUSSENAC G. (1968). Interception des précipitations par le couvert forestier. *Annales des Sciences forestières*, 25(3), 135-156.
- AUSSENAC G. (1984). Rôle de la microclimatologie et de la bioclimatologie en sylviculture. *La Météorologie*, 7, 11-17.
- AUSSENAC G., GRANIER A. & BRÉDA N. (1995). Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Revue Forestière Française* 47(1), 54-62.
- AUSSENAC G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science*. 57: 287-301.
- BADEAU V. & BRÉDA N. (2008). Modélisation du bilan hydrique : l'étape clé de la détermination des paramètres et des variables d'entrée. *Rendez-vous Techniques ONF hors-série n°4*, 111-114.
- BRÉDA N. (1999). L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française*, LI-2, 135-150.

INRA (2010). Biljou© – Modèle de bilan hydrique forestier. Fiche pédagogique « **Bilan hydrique** » <<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fiche/bilan-hydrique>>. INRA, UMR Écologie et écophysologie forestières.

### Pour en savoir plus

AUSSENAC G., GRANIER A. & NAUD R. (1984). Éclaircie systématique dans un jeune peuplement de douglas. Modifications microclimatiques et influences sur la croissance. *Revue Forestière Française*, 36(4), 279-287.

CRUIZIAT P. (2008). Comment les plantes utilisent l'eau : mécanismes et régulations. Journée à thème de la SNHF : « Mieux Arroser ». Paris, janvier 2008.

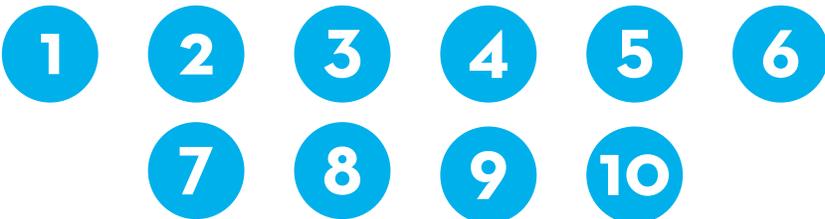
INRA (2010). Biljou© – Modèle de bilan hydrique forestier. Fiche pédagogique « **Bilan hydrique** » <<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fiche/bilan-hydrique>>. INRA, UMR Écologie et écophysologie forestières.

Pour rappel, les différentes illustrations de cette fiche sont données à titre d'exemple. Elles sont dépendantes du contexte. Il convient par conséquent de ne pas en déduire des généralités.

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implications pour la gestion associées



Cette fiche apporte également des éléments de réponse aux questions n° 11 à 18 (cf. pages 17 à 19).



## **Le réservoir d'eau du sol**

### **Objectifs généraux**

**Appréhender les liens et interactions entre la taille du réservoir d'eau du sol, le système racinaire et les propriétés du sol.**

**Comprendre la notion de réserve relative en eau extractible du sol (REW), notion fondamentale quand on s'intéresse à la croissance des arbres.**

## Prérequis

- Connaître les critères utilisés pour décrire les propriétés des sols (texture, structure, etc.).
- Savoir distinguer la transpiration\* des autres flux du bilan hydrique\* (cf. Fiche A).
- Savoir ce qu'est l'indice foliaire\* (cf. Fiche C).

## Notions de réservoir d'eau du sol et de réserve utile en eau du sol

### Taille du réservoir d'eau du sol

La strate peuplement\* puise son eau dans le volume de sol prospecté par ses racines fines. Ce volume de sol correspond au **réservoir d'eau du sol\***. Le déploiement du système racinaire de la strate peuplement, et en particulier la profondeur d'enracinement, définit donc la taille du réservoir d'eau du sol du système étudié\*.

### Facteurs influençant la profondeur d'enracinement

Le développement du système racinaire de la végétation, et donc ses capacités à explorer un volume de sol plus ou moins grand, est **contraint par les propriétés physiques du sol et varie selon les caractéristiques intrinsèques de l'espèce**. Généralement, ce développement est rapide et l'intégralité du volume de sol disponible est souvent colonisée bien avant le stade adulte, surtout si ce volume de sol est limité par une contrainte

physique (roches proches de la surface, plancher argileux, etc.). **Le volume prospecté par le système racinaire n'est donc généralement pas (ou peu) dépendant de l'âge**, sauf dans le stade juvénile\* non considéré ici. Il existe cependant des cas particuliers : une forte hydromorphie, par exemple, engendre une mortalité saisonnière d'une partie des racines fines liée à l'engorgement et oblige les arbres à une recolonisation annuelle de la partie du volume de sol soumise à cette contrainte. Il faut aussi noter que le renouvellement des racines fines, même en l'absence de contraintes, est rapide et intense.



© Nathalie Bréda - INRA

**Grille utilisée pour cartographier la distribution des racines par catégories de diamètre sur un front de fosse pédologique.**

*Observation sous un peuplement de hêtre. Les racines sont comptées dans chaque carré de 10 x 10 cm jusqu'à la profondeur où il n'y a plus de racines fines.*

## Définition de la réserve utile en eau du sol (RU)

L'eau contenue dans le réservoir d'eau du sol n'est pas mobilisable dans sa totalité par la végétation car une partie est trop fortement liée au sol (cf. Figure B1). Ainsi la quantité d'eau réellement mobilisable par la strate peuplement au sein du réservoir d'eau du sol est directement dépendante des propriétés physiques du sol : texture, structure, porosité et pierrosité (ONF, 1999).

La réserve utile en eau du sol\* (RU, en mm) correspond à la quantité d'eau totale accessible et extractible par la végétation. Elle est comprise entre deux limites (cf. Encadré B1) :

- la réserve en eau à la capacité au champ\* ( $R_{cc}$ ), qui correspond à la quantité maximale d'eau que peut retenir le réservoir d'eau du sol après écoulement de l'eau gravitaire\* ou resuyage par drainage\* ;
- la réserve en eau au point de flétrissement permanent\* ( $R_{ptp}$ ) qui correspond à la quantité d'eau du réservoir d'eau du sol que les racines ne sont pas capables d'extraire car elle est trop fortement liée aux particules de sol (eau liée\*). C'est un état que les agronomes appellent le point de flétrissement permanent (pfp) de la plante.

### Calcul de la réserve utile en eau du sol (RU)

B1

$$RU = R_{cc} - R_{ptp}$$

$R_{cc}$  = réserve en eau à la capacité au champ (en mm).

$R_{ptp}$  = réserve en eau au point de flétrissement permanent (en mm).

## Important

Dans toutes les fiches et dans celle-ci en particulier, la quantité d'eau accessible et extractible par la végétation est appelée Réserve utile en eau du sol (RU). Ce terme est équivalent à la Réserve Utile Maximale (RUM) utilisée aussi par les praticiens. Ils ont fait cette distinction dans le but d'éviter des confusions avec la réserve en eau du sol\* ( $R_s$ ) qui correspond à l'eau contenue dans le réservoir d'eau du sol à un instant donné. Ces deux notions sont pourtant très différentes : la réserve utile en eau du sol (RU) caractérise la taille du réservoir accessible pour la végétation, tandis que la réserve en eau du sol ( $R_s$ ) renseigne sur le niveau de remplissage du réservoir sol, indépendamment de toute végétation.



© Nathalie Bréda - INRA

### Fosse utilisée pour estimer la réserve utile en eau du sol d'une chênaie.

On observe les épaisseurs d'horizons, leur texture, leur compacité et leur charge en éléments grossiers. La distribution de l'enracinement fin a également été décrite (forêt domaniale de la Harth, Haut-Rhin).

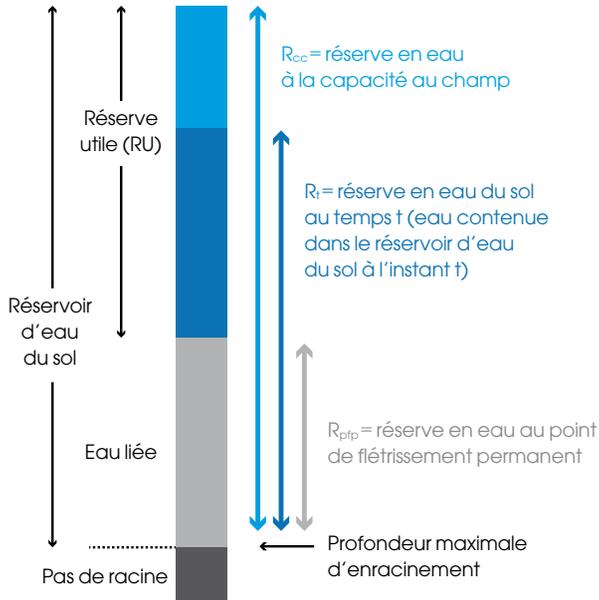


Figure B1 : Représentation schématique des différentes fractions de la réserve et états possibles de remplissage du réservoir d'eau du sol.

## Notion de réserve relative en eau extractible du sol

### Définition de la réserve relative en eau extractible du sol (REW)

L'état de remplissage du réservoir d'eau du sol à un instant  $t$  donné est appelé la **réserve en eau du sol** ( $R_t$ , en mm). Il s'agit de la quantité d'eau du réservoir d'eau du sol à un instant  $t$ .

$R_t$  est une grandeur dynamique car elle évolue au cours du temps sous l'action conjointe des entrées et des

sorties d'eau du système étudié (INRA, 2010 ; cf. Fiche A). En raison de cette dynamique, la réserve en eau du sol est, du point de vue de la végétation, à chaque instant comprise entre un état «rempli» (= capacité au champ) et un état «vide» (= point de flétrissement permanent). C'est pour cela que l'on définit un **état relatif de remplissage en eau du réservoir d'eau du sol**, quantifié par la **réserve relative en eau extractible du sol\*** (Relative Extractable Water ou REW en anglais) (cf. Encadré B2).

### Calcul de la réserve relative en eau extractible du sol (REW)

B2

Pour un peuplement forestier avec un réservoir d'eau du sol donné, à un instant  $t$ , on considère :

$$REW = (R_t - R_{\text{ptp}}) / RU$$

$R_t$  = réserve en eau du sol (en mm).

$R_{\text{ptp}}$  = réserve en eau au point de flétrissement permanent (en mm).

$RU$  = réserve utile en eau du sol (en mm).

REW est une grandeur sans dimension comprise à chaque instant entre 0 et 1 :

#### REW=0

lorsque le réservoir d'eau du sol ne contient plus qu'une quantité d'eau qui ne peut pas être absorbée par les racines.

=> Point de flétrissement permanent ;  $R_t = R_{\text{ptp}}$

#### REW=1

lorsque le réservoir d'eau du sol contient la quantité maximale d'eau qu'il peut retenir.

=> Capacité au champ ;  $R_t = R_{\text{cc}}$

REW se calcule de la même manière, quels que soient le type de sol et sa texture.

### Pourquoi une quantité d'eau en valeur absolue n'est-elle pas pertinente ?

La quantité d'eau en valeur absolue correspondant à ces deux états «rempli» et «vide» peut être très différente en fonction de la texture du sol. **Une quantité d'eau en valeur absolue ne renseigne donc pas sur la quantité d'eau réellement disponible pour la plante.** C'est pourquoi les écophysiologistes ont travaillé depuis très longtemps sur cette valeur relative

(REW) qui indique directement ce qui est encore disponible pour la végétation.

Un intérêt majeur de REW est de pouvoir comparer les dynamiques saisonnières de disponibilités en eau pour la végétation sur des sols très contrastés, dont les valeurs de réserve utile en eau et les dynamiques de remplissage/vidage du réservoir sont différentes.

### Comment le réservoir d'eau du sol se vide-t-il sous l'effet de l'absorption racinaire ?

Entre les deux états de réservoir d'eau du sol «rempli» et «vide», les racines des arbres exercent une succion pour absorber l'eau et les nutriments en quantité équivalente à la transpiration afin de maintenir l'équilibre hydrique de l'arbre (cf. Fiches A et G). **Tant que le sol est humide, les arbres extraient l'eau du sol d'abord dans les horizons superficiels où la densité racinaire est la plus forte.** Au fur et à mesure que le sol se dessèche et qu'elle devient plus difficile à extraire, l'eau est alors progressivement absorbée dans des horizons de plus en plus profonds, sauf si la surface du sol se réhumecte entre temps sous l'effet de pluies.

La Figure B2 illustre ces changements de répartition des prélèvements d'eau au cours d'une saison, ici sous une frênaie. Dans cet exemple, les frênes s'alimentent en eau au printemps dans les 70 premiers centimètres du sol. Entre juin et juillet, l'eau absorbée provient de l'en-

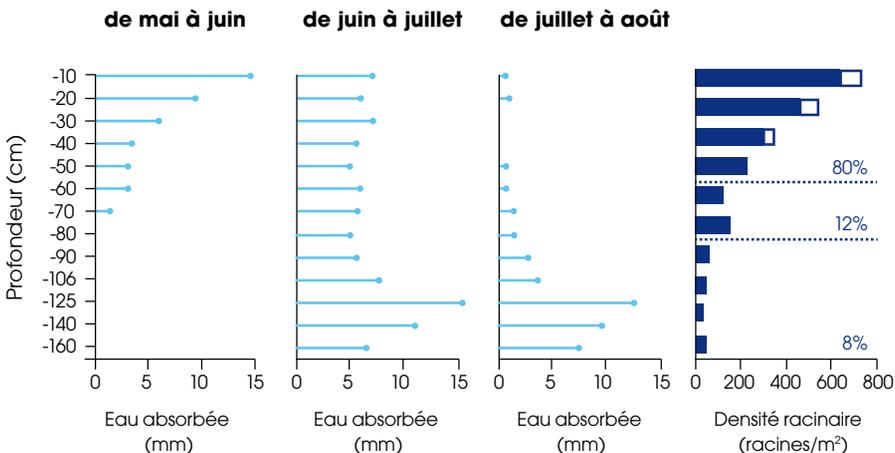
semble du profil colonisé par les racines fines. En fin d'été, l'absorption racinaire est limitée aux horizons profonds, les derniers à contenir une fraction d'eau extractible à cette période. Ce qui est notable, c'est que ces horizons profonds ne contiennent que des racines fines (efficaces pour l'absorption et ce malgré leur densité faible). Dans cet exemple, **8 % des racines fines assurent quasiment 100 % de l'absorption en juillet-août.**

Cette dynamique au cours de la saison d'extraction d'eau dans les différentes couches de sol est très générale car, selon les lois de la thermodynamique, **les racines prélèvent toujours l'eau dans les couches de sols où la succion à exercer est la plus faible.**

D'autres études ont décrit cette dynamique de prélèvement d'eau par les racines de plus en plus bas dans le réservoir d'eau du sol\* au cours de la saison : sous chêne sessile, en contexte continental, jusqu'à 2 m d'épaisseur (Bréda *et al.*, 1995) ou sous chêne kermès, en contexte méditerranéen, sur des profils de plus de 3 m d'épaisseur (Rambal, 1984).

## Un seuil de contrainte hydrique

Depuis les études de Black sur le douglas (Black, 1979), de nombreux travaux scientifiques internationaux réalisés sur différentes espèces d'arbres (décidues\* et sempervirentes\*), sur de nombreux types



**Figure B2 : Distribution des prélèvements d'eau par les racines de frênes et évolution au cours d'un dessèchement estival du sol** (d'après Bréda *et al.*, 2002).

La quantité d'eau absorbée par les racines est calculée à partir des variations d'humidité volumique par couches de 10 cm de sol, mesurées à l'aide d'une sonde à neutrons. La répartition des densités racinaires décrites sur fosses distingue les racines de 0,2 mm en bleu foncé des racines de diamètre supérieur. Les pourcentages de racines fines sont indiqués pour chaque grand horizon pédologique.

de sols et dans des conditions climatiques très contrastées, montrent qu'il existe un seuil de REW égal à 0,4 en dessous duquel s'opère une contrainte hydrique pour les arbres, induisant une régulation de la transpiration\* et donc une réduction de croissance. Ces résultats ont été acquis avec diverses méthodes de mesure de la transpiration des arbres. Ce seuil de contrainte hydrique correspond à un état de liaison de l'eau dans le sol

à partir duquel l'absorption de l'eau par les racines devient plus difficile, quels que soient l'essence et le type de sol (cf. Encadré B3).

Il faut bien comprendre que cette grandeur REW varie constamment dans la fourchette de 1 à 0, mais que la distance entre ces bornes est parcourue à des vitesses très différentes selon les propriétés du sol et selon l'indice foliaire (cf. Exemple B1).

### Un seuil de régulation de la transpiration

À partir d'un seuil de réserve relative en eau extractible du sol (REW) de 0,4, on observe :

- une diminution progressive de la transpiration des arbres. Elle est d'autant plus importante que REW chute en dessous de ce seuil de 0,4. Cette diminution de transpiration est induite par régulation stomatique (cf. Figure B3) ;
- un ralentissement de leur croissance qui peut aller jusqu'à son arrêt total (INRA, 2010).

Ce seuil n'est donc pas un seuil de vulnérabilité mais un seuil de régulation, à partir duquel la régulation stomatique se met en place, comme l'ont démontré de nombreuses mesures de flux de sève, d'échanges gazeux ou de flux de vapeur d'eau au-dessus de la strate peuplement. Conjointement à cette mise en place de régulation stomatique, il a été observé que la vitesse de croissance des arbres ralentit fortement. Cela a été mesuré notamment sur les chênes, sur le hêtre et sur le douglas (Granier *et al.*, 1995 ; Granier *et al.*, 1999 ; INRA, 2010).

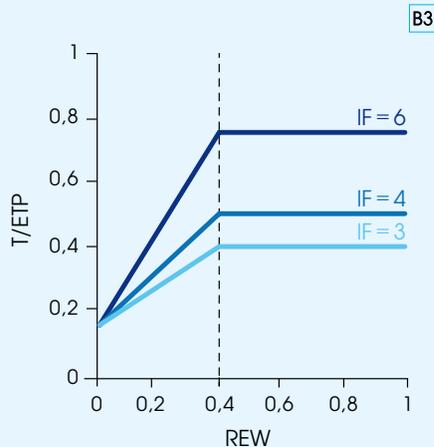


Figure B3 : Relation entre REW et la transpiration (T) des arbres rapportée à l'évapotranspiration potentielle\* (ETP), pour différents indices foliaires (IF) du peuplement (d'après Granier *et al.*, 1995).

En dessous du seuil de REW de 0,4, on observe une baisse progressive de T/ETP et donc de la transpiration (cf. Figure B3). Cette diminution intervient quel que soit l'indice foliaire du peuplement (cf. Fiches C et G). La vitesse à laquelle ce seuil est atteint au cours de la saison diffère en revanche selon l'indice foliaire (non visible sur la Figure B3).

**Exemple B1**

Le seuil de REW de 0,4 peut être atteint plus ou moins rapidement selon les cas. Sur un sol à faible réserve utile en eau, par exemple, le seuil sera atteint plus tôt dans la saison que sur un sol à réserve utile élevée. Dans d'autres cas, pour une réserve utile en eau donnée, si l'indice foliaire du peuplement est très élevé, le seuil sera franchi à une date plus précoce que si l'indice foliaire du peuplement est faible.

## Illustration du fonctionnement de deux réservoirs d'eau du sol

L'exemple présenté dans ce chapitre a pour objectif d'illustrer la notion de REW pour deux peuplements identiques installés sur deux sols différents, l'un sableux et l'autre argileux (tous deux non caillouteux). Il s'agit d'un exemple théorique.

Les Figures B4 et B5 présentent pour chacun des deux réservoirs d'eau du sol de cet exemple les valeurs correspondantes pour :

- $R_{cc}$  : réserve en eau à la capacité au champ ;
- $R_{ptp}$  : réserve en eau au point de flétrissement permanent ;
- RU : réserve utile en eau du sol ;
- $R_{seuil}$  : réserve en eau du sol au seuil de contrainte hydrique équivalent à  $REW = 0,4$ .

L'extraction de l'eau par la végétation devient difficile à partir de  $R_{seuil}$  valeur en dessous de laquelle on observe la mise en place d'une régulation stomatique et d'un ralentissement, voire d'un arrêt de la croissance des arbres. Dans le cas du

|   | Réservoir Sol 1 | Réservoir Sol 2 |
|---|-----------------|-----------------|
| Classe de texture                         | Sable (S)       | Argile (A)      |
| Profondeur d'enracinement (cm)            | 150             | 35              |
| $R_{ptp}$ (mm)                            | 60              | 128             |
| $R_{cc}$ (mm)                             | 165             | 189             |
| $RU$ (mm) = $R_{cc} - R_{ptp}$            | 105             | 61              |
| $R_{seuil}$ (mm) = $(0,4 * RU) + R_{ptp}$ | 102             | 152             |

### Figure B4 : Réserves en eau et profondeurs d'enracinement d'un sol sableux et d'un sol argileux.

Le sol argileux présente une plus forte teneur en eau à la capacité au champ, c'est-à-dire qu'il sera capable de retenir une plus grande quantité d'eau que le sol sableux. À l'inverse, la quantité d'eau au point de flétrissement permanent est plus élevée dans le sol argileux que dans le sol sableux car les argiles retiennent fortement l'eau, de sorte que cette eau est impossible à extraire par les plantes, même pour des quantités encore importantes.



Sylvain Gaudin - CRPF CA © CNPF

Représentation du sol 1 (sable).

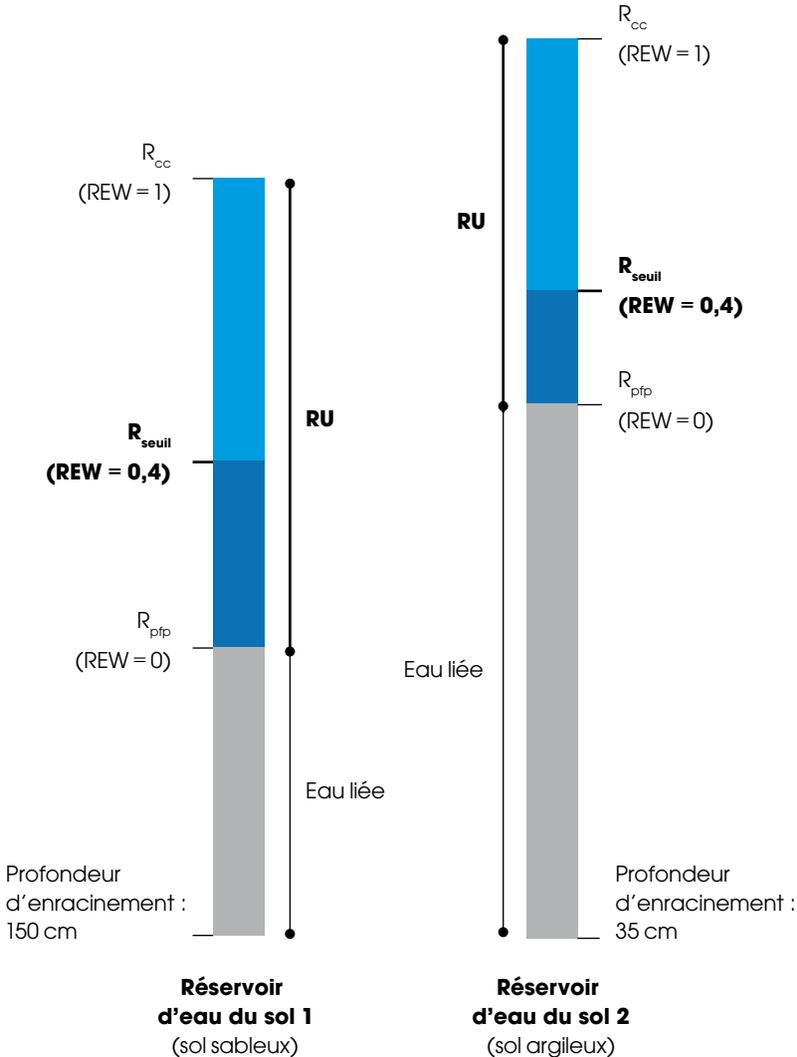


© Pierre Gonin - IDF

Représentation du sol 2 (argile).

réservoir d'eau du sol 1 (sable), la différence entre  $R_{cc}$  et  $R_{seuil}$  est plus importante que dans le cas du réservoir d'eau du sol 2 (argile). À partir d'un réservoir d'eau du sol plein (à la capacité au champ), le

temps mis pour arriver à  $R_{seuil}$  sera donc plus important pour le réservoir d'eau du sol 1 (sable) que pour celui du sol 2 (argile) car il y a plus d'eau disponible pour la végétation.



**Figure B5 : Illustration de deux états hydriques pour deux réservoirs d'eau du sol contrastés.** Dans cet exemple, les réservoirs diffèrent à la fois en raison de la profondeur d'enracinement et de la texture du sol. Cette illustration est réalisée d'après les caractéristiques fournies dans la Figure B4. Les proportions ont été conservées.

### Principaux enseignements de la fiche

- La profondeur de sol prospecté par les racines fines de la strate peuplement\* détermine la profondeur du **réservoir d'eau du sol\***. Ce réservoir contient plus d'eau que la végétation ne peut en extraire.
- La quantité d'eau accessible par les arbres de la strate peuplement dans le **réservoir d'eau du sol** s'appelle la **réserve utile en eau du sol\*** (**RU**). Les propriétés physiques du sol, dont la texture, déterminent la valeur absolue de la teneur en eau du sol à la capacité au champ\* ( $R_{cc}$ ) et au point de flétrissement permanent\* ( $R_{pfp}$ ) et donc la RU.
- L'état de remplissage du réservoir, c'est à dire la **réserve en eau du sol\*** ( $R_s$ ), varie en permanence entre un état «rempli» et un état «vide». Il s'agit donc d'une grandeur dynamique. C'est pour cette raison qu'on l'exprime en valeur relative avec une grandeur sans dimension nommée la **réserve relative en eau extractible du sol\*** (**REW**, Relative Extractable Water).
- Lorsque cette grandeur REW descend en dessous du **seuil de 40%** de la réserve utile en eau du sol (soit  $REW = 0,4$ ), l'eau devient plus difficilement extractible par les racines des arbres, ce qui déclenche des mécanismes de régulation stomatique. La force de succion par les racines doit augmenter pour extraire l'eau : l'arbre n'est pas "en péril" mais il commence à s'adapter à un déficit en eau. Son fonctionnement n'est plus optimal, ce qui impacte sa photosynthèse et sa croissance. Ce seuil de 0,4 a été validé pour des contextes pédologiques et climatiques variés et pour différentes essences.

### Références bibliographiques

- BLACK A. (1979). Evapotranspiration from Douglas fir stands exposed to soil water deficits. *Water Resources Research*, 15 (1), 164-170.
- BRÉDA N., GRANIER A., BARATAUD F. & MOYNE C. (1995). Soil-water dynamics in an oak stand .I. Soil-moisture, water potentials and water-uptake by roots. *Plant and Soil*, 172(1): 17-27.
- BRÉDA N., LEFÈVRE Y. & BADEAU V. (2002). Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificités et difficultés d'évaluation. *Houille Blanche-Revue Internationale de L'Eau*, 3, 24-32.
- GRANIER A., BADEAU V. & BRÉDA N. (1995). Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, XLVII, 59-68.
- GRANIER A., BRÉDA N., BIRON P. & VILLETTE S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, 269-283.

INRA (2010). Biljou© – Modèle de bilan hydrique forestier <<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>>. INRA, UMR Écologie et écophysiologie forestières.

ONF – DIRECTION TECHNIQUE ET COMMERCIALE (1999). L'eau et la forêt. Synthèse bibliographique réalisée par Christine FORT. Bulletin technique ONF, n°37. 240 pages. ISBN 2-84207-165-4.

RAMBAL S. (1984). Water balance and pattern of root water uptake by a *Quercus coccifera* L. evergreen scrub. *Oecologia*, 62, 18-25.

### Pour en savoir plus

INRA. (2010). Biljou© – Modèle de bilan hydrique forestier. Fiche pédagogique « **Indicateurs écophysologiques de sécheresse édaphique** » <<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fiche/indicateurs-de-secheresse>>. INRA, UMR Écologie et écophysiologie forestières.

INRA. (2010). Biljou© – Modèle de bilan hydrique forestier. Fiche pédagogique « **Réserve en eau du sol et mobilisation par les racines** » <<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fiche/reserve-en-eau-du-sol>>. INRA, UMR Écologie et écophysiologie forestières.



Sylvain Gaudin – CRPF CA © CNPF

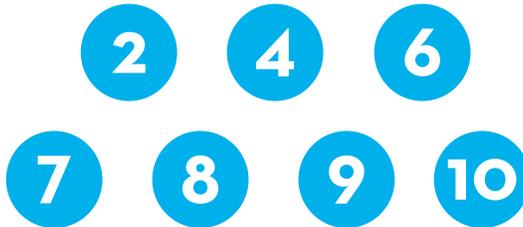
**Fosse pédologique en forêt sous chênaie pédonculée - frênaie pour l'observation des caractéristiques du sol et de l'enracinement.**

Pour rappel, les différentes illustrations de cette fiche sont données à titre d'exemple. Elles sont dépendantes du contexte. Il convient par conséquent de ne pas en déduire des généralités.

Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



Implications pour la gestion associées



Cette fiche apporte également des éléments de réponse aux questions n°13 et 17 (cf. pages 17 à 19).



# **De la surface foliaire de l'arbre à l'indice foliaire du peuplement**

## **Objectifs généraux**

**Distinguer la notion de couvert  
et celle d'indice foliaire du peuplement.**

**Comprendre comment on procède au changement  
d'échelle, de l'arbre au peuplement, de manière  
à calculer l'indice foliaire d'un peuplement.**

**Identifier pourquoi l'indice foliaire est l'un  
des paramètres clé pour analyser le fonctionnement  
d'un peuplement et son bilan hydrique.**

## Prérequis

- Savoir comment s'établit le bilan hydrique\* d'un peuplement forestier\* et quels sont les différents flux qui le composent (cf. Fiche A).
- Distinguer les différentes strates\* d'un peuplement forestier (cf. Figure C1).

## Surface foliaire de l'arbre et indice foliaire du peuplement

Le système étudié\* dans le cadre du bilan hydrique est le peuplement forestier (cf. Fiche A). Son indice foliaire\* est directement relié à la surface foliaire\* des arbres qui le composent.

### Surface foliaire de l'arbre

Au niveau individuel, la surface du feuillage qu'un arbre porte pendant la saison de végétation peut se mesurer



Aperçu du feuillage d'un hêtre.

Sylvain Gaudin – CRPF CA © CNPF

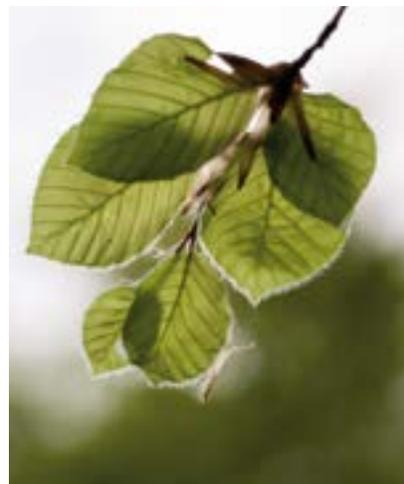
(cf. Fiche E) : il s'agit de sa **surface foliaire** (en  $m^2$ ). Elle correspond à la **somme des surfaces de chaque feuille de l'arbre**. Elle résulte à la fois du nombre de feuilles et de leur surface élémentaire.

### Surface foliaire du peuplement

Lorsqu'on s'intéresse au bilan hydrique du peuplement, il faut considérer la **surface foliaire totale du peuplement** (en  $m^2$ , ha ou  $km^2$ ). Elle correspond à la **somme des surfaces foliaires de l'ensemble des plantes le constituant, toutes strates\* confondues** (cf. Figure C1). Une mesure de cette surface consisterait à mesurer la surface couverte par toutes les feuilles de toutes les plantes du peuplement, posées à plat sur le sol (cf. Fiche F).

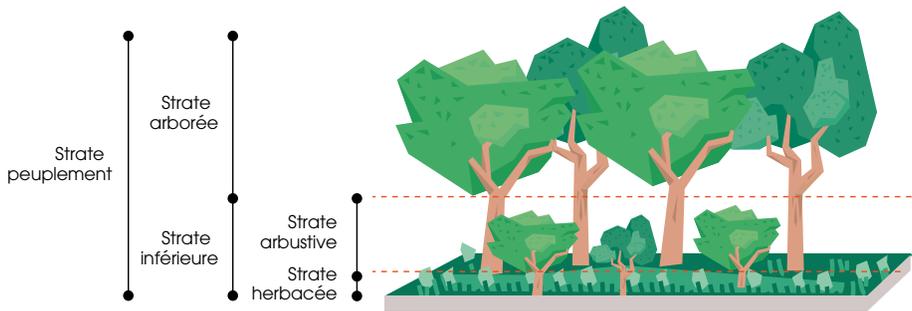
### Indice foliaire du peuplement

L'indice foliaire (IF ou Leaf Area Index ou LAI, en anglais) n'est pas un concept nouveau, puisqu'il a été défini par



Jeunes feuilles de hêtre.

Sylvain Gaudin – CRPF CA © CNPF



**Figure C1 : Les différentes strates du peuplement forestier.**

Pour rappel, la strate peuplement est composée de plusieurs strates : la strate arborée\* et la strate inférieure\* qui comprend les strates arbustive\* et herbacée\*.

Watson, en 1947 (Bréda, 2003) comme étant la surface projetée (une face) des feuilles par unité de surface de sol. L'indice foliaire du peuplement correspond donc à la **surface foliaire contenue dans la strate feuillée\* du peuplement rapportée à une unité de surface au sol**. Il se calcule en divisant la surface foliaire totale du peuplement (S) par la surface occupée par le peuplement (A) (Bréda *et al.*, 2002 ; cf. Encadré C1).

L'indice foliaire exprime donc des m<sup>2</sup> de feuilles par m<sup>2</sup> de sol. Il s'agit ainsi d'une grandeur sans dimension.

Attention, la surface foliaire du peuplement (S) est beaucoup plus grande que A. Pour donner un ordre de gran-

#### Calcul de l'indice foliaire d'un peuplement (IF)

C1

$$IF = S / A$$

S = surface foliaire totale du peuplement (en m<sup>2</sup>).

A = surface qu'occupe le peuplement (en m<sup>2</sup>).

deur, l'indice foliaire varie couramment entre 3 et 9 : cela signifie que, pour un hectare de parcelle, toutes les feuilles étalées sur le sol couvriraient entre 3 ha (IF = 3) et 9 ha (IF = 9).

Par définition, l'indice foliaire du peuplement intègre toutes les surfaces foliaires, quelque soit le niveau, sans distinction de strates.

## Ne pas confondre indice foliaire et couvert du peuplement

Le forestier ou le phytosociologue est parfois plus familier avec la notion de couvert\*, une notion différente de celle d'indice foliaire. Les trois exemples théoriques qui suivent illustrent les différences et l'absence de corrélation entre indice foliaire et couvert du peuplement (= surface de sol occupée par la projection

verticale de l'ensemble des feuillages des arbres) (cf. Figures C2 et C3). Il s'agit de trois peuplements a, b et c, pour lesquels :

- une des deux caractéristiques de l'arbre moyen change (diamètre de houppier moyen par arbre (Dh) et/ou surface foliaire moyenne par arbre (Sf), selon le cas) ;
- la surface occupée par le peuplement (A = 1 ha) et la densité (N = 542 tiges/ha) sont les mêmes pour chaque cas.

Feuillage de la strate arborée vu depuis l'intérieur du peuplement.



Mireille Moudas – IDF © CNPF

Peuplement mélangé de hêtre, sapin et pin sylvestre dans la strate arborée, avec du sapin, de l'épicéa et du hêtre dans la strate arbustive.

L'indice foliaire de ce peuplement intègre toutes les surfaces foliaires de toutes les essences et de toutes les strates (cf. Fiches H et J).



Gilles Bossuet - CRPF PACA © CNPF

**Peuplement a**

Dh = 4 m

Sf = 55 m<sup>2</sup>

→ IF = 3

→ Couvert = 68%



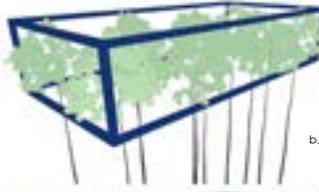
**Peuplement b**

Dh = 4 m

Sf = 74 m<sup>2</sup>

→ IF = 4

→ Couvert = 68%



**Peuplement c**

Dh = 5 m

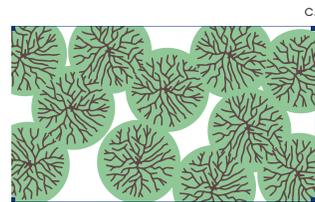
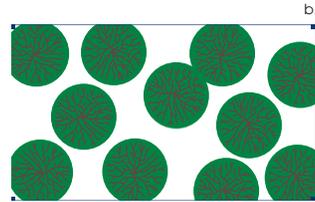
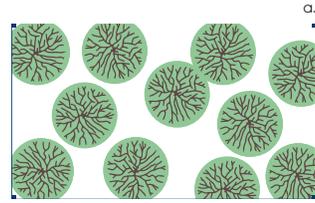
Sf = 74 m<sup>2</sup>

→ IF = 4

→ Couvert = 106%



**Figure C2 : Représentation schématique en 3D des trois peuplements a, b et c** (Karine Porte Architecte © pour EKOLOG).  
*Les proportions des peuplements forestiers ont été conservées.*



**Figure C3 : Représentation schématique en 2D du couvert pour les trois peuplements a, b et c** (Karine Porte Architecte © pour EKOLOG).

Dans ces 3 exemples, il pourrait s'agir du même peuplement (b) initialement en bonne santé, qui viendrait d'être éclairci et qui :

- la même année, aurait subi un stress (sécheresse, parasites, etc.) ayant provoqué une perte partielle de feuillage (correspond à la situation a) ;
- après quelques années, aurait commencé à se refermer (houppiers plus larges), mais aurait été à nouveau soumis à un stress (feuillage peu dense, correspond à la situation c).

Ces exemples mettent en évidence qu'il est possible :

- d'avoir un indice foliaire du peuplement différent pour des peuplements ayant un même couvert ;
- qu'une augmentation de l'indice foliaire ne se traduit pas nécessairement par une augmentation du couvert ;
- qu'à indice foliaire identique, le couvert peut être sensiblement différent.

### Principaux enseignements de la fiche

- La surface foliaire\* totale d'un peuplement résulte de la somme des surfaces foliaires de tous les éléments du feuillage qui le composent.
- L'indice foliaire\* du peuplement exprime la surface foliaire totale du peuplement rapportée à la surface au sol de la parcelle forestière correspondante. Il ne s'agit donc pas d'une simple projection au sol des houppiers\*. Il ne distingue pas les strates\*.

### Références bibliographiques

BRÉDA N. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54 (392), 2403-2417.

BRÉDA N., SOUDANI K. & BERGONZINI J.-C. (2002). Mesure de l'indice foliaire en forêt. GIP ECOFOR éd. 157 pages. ISBN 2-914770-02-2.

WATSON D. J. (1947) Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11, 41-76.

### Pour en savoir plus

INRA (2010). Biljou© – Modèle de bilan hydrique forestier. Fiche pédagogique « **Phénologie et indice foliaire** » <<https://ap-pgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fiche/indice-foliaire-et-phenologie>>. INRA, UMR Écologie et écophysiologie forestières.

**Pour rappel, les différentes illustrations de cette fiche sont données à titre d'exemple. Elles sont dépendantes du contexte. Il convient par conséquent de ne pas en déduire des généralités.**

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implications pour la gestion associées





# **Les facteurs de variation de l'indice foliaire**

## **Objectifs généraux**

**Définir les facteurs susceptibles de faire varier l'indice foliaire d'un peuplement forestier.**

**Disposer d'un ordre de grandeur des valeurs que peut prendre l'indice foliaire.**

## Prérequis

- Identifier pourquoi l'indice foliaire\* est l'un des paramètres clé pour analyser le fonctionnement d'un peuplement et son bilan hydrique\* (cf. Fiche A).
- Savoir ce qu'est l'indice foliaire et comment il se mesure (cf. Fiches C, E et F).

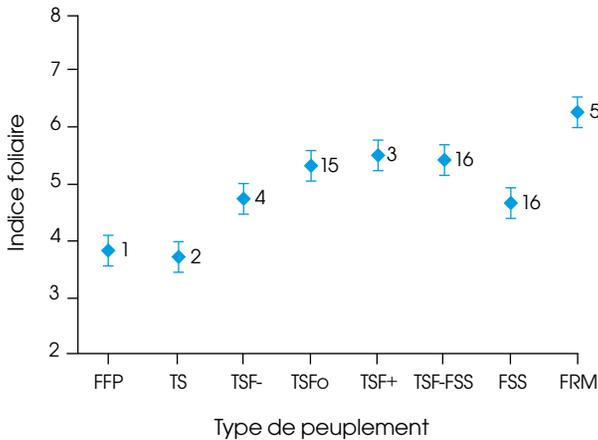
## Un indice à forte variabilité spatiale et temporelle

Pour rappel, l'indice foliaire d'un peuplement forestier\* est un paramètre essentiel du fonctionnement des peuplements. Il conditionne en particulier les flux d'eau à considérer pour établir leur bilan hydrique (cf. Fiches A et C). Il correspond au rapport entre la surface foliaire totale du

peuplement\* (c'est-à-dire la surface de l'ensemble des feuilles du peuplement) et la surface de sol occupée par le peuplement (cf. Fiche C). Cette grandeur est une caractéristique du peuplement : on ne s'intéresse pas à l'arbre individuellement mais à l'ensemble des plantes, dans toutes les strates\* du peuplement.

L'indice foliaire présente une forte variabilité à la fois temporelle et spatiale (Bréda, 2003). Il dépend essentiellement des facteurs suivants (Bréda, 1999) :

- la composition\* en espèces (en particulier leur architecture aérienne) ;
- la structure\* de la strate peuplement (densité de tiges, degré de fermeture\* de la strate arborée\*, stratification verticale du feuillage, etc.), souvent liée à son traitement\* sylvicole (cf. Figure D1) ;
- l'état sanitaire des arbres ;



**Figure D1 : Exemple de variations de l'indice foliaire en fonction du type de peuplement pour une espèce et un massif forestier donnés (étude de 57 chênaies en forêt domaniale de la Harth, Haut-Rhin)** (d'après Bréda, 1999).

Chaque point est une moyenne de  $n$  placettes,  $n$  étant indiqué à côté de chaque point. L'écart-type est représenté. Les types de peuplements étudiés sont : FFP : futaie feuillue pure ; TS : taillis simple ; TSF- : taillis sous futaie pauvre ; TSFo : taillis sous futaie moyen ; TSF+ : taillis sous futaie riche ; TSF-FSS : intermédiaire entre taillis sous futaie et futaie sur souche ; FSS : futaie sur souche ; FRM : futaie résineuse mélangée.

- les facteurs climatiques ;
- la période de l'année (lien à la phénologie\*) ;
- les conditions édaphiques, en particulier l'alimentation hydrique et la disponibilité en éléments minéraux dans le sol.

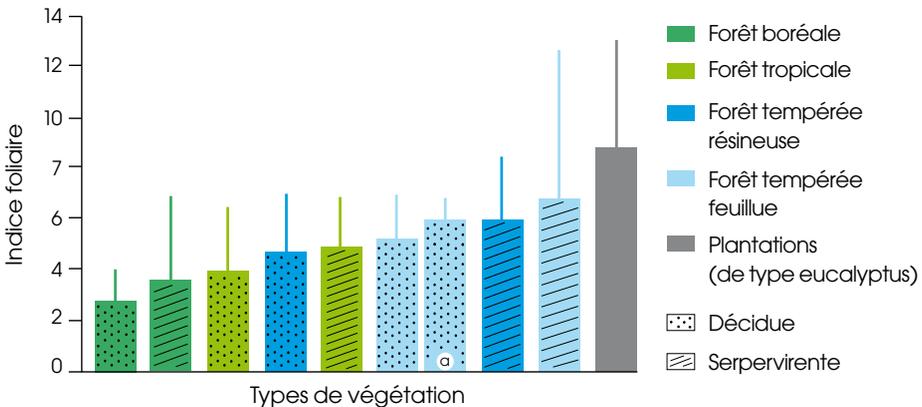
- de la capacité des feuilles à survivre à l'ombre ;
- de l'architecture de la strate arborée qui contient le feuillage du peuplement, et en particulier de l'arrangement spatial des feuilles (cf. Fiche C).

### Quelques ordres de grandeur de l'indice foliaire en fonction de la composition en espèces

L'indice foliaire des peuplements forestiers en zone tempérée **varie en moyenne de 1 à 9**. Cette variation est fonction :

- des essences qui composent le peuplement ;

Au début de l'été, en zone tempérée, l'indice foliaire atteint son développement maximal. Il est alors généralement de l'ordre de 3 à 6 dans les peuplements feuillus décidus\* et peut atteindre des valeurs de 10 à 12 dans certains peuplements résineux (Bréda, 1999 ; Waring & Schlesinger, 1985). C'est le cas par exemple de certains peuplements de sapin ou d'épicéa (Bréda, 1999). Cette différence est due au fait que leurs aiguilles supportent très bien des rayonnements très faibles. Or, la **valeur maximale** que



**Figure D2 : Gamme de variation des indices foliaires en fonction des grands types de végétation forestiers** (d'après Scurlock *et al.*, 2001 enrichi avec des données sur les hêtraies du réseau RENECOFOR (α), extraites de Bréda, 2003).

l'indice foliaire d'un peuplement peut atteindre est délimitée par le fait que les feuilles les plus basses dans la strate peuplement reçoivent un peu plus que le rayonnement minimum vital (Bréda, 1999). Les peuplements de hêtre, espèce d'ombre, présentent fréquemment des indices foliaires de l'ordre de 8. Des ordres de grandeur d'indices foliaires sont présentés dans les Figures D2 et D3.

## Variabilité temporelle de l'indice foliaire

La variabilité temporelle intègre différentes échelles de temps : saisonnières et interannuelles.

### Les variations saisonnières

L'indice foliaire d'un peuplement varie au cours de l'année, en relation avec la phénologie des espèces (débourrement, expansion foliaire, polycyclisme, chute des feuilles).

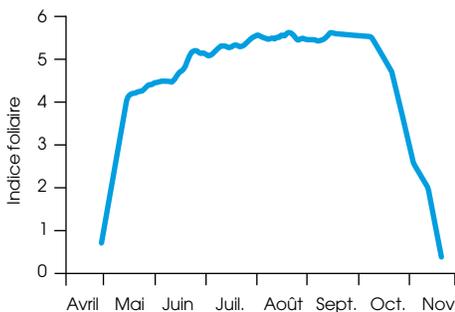


Figure D4 : Exemple de variations saisonnières d'indice foliaire dans une chênaie sessiliflore (espèce décidue) (d'après Bréda, 1999).

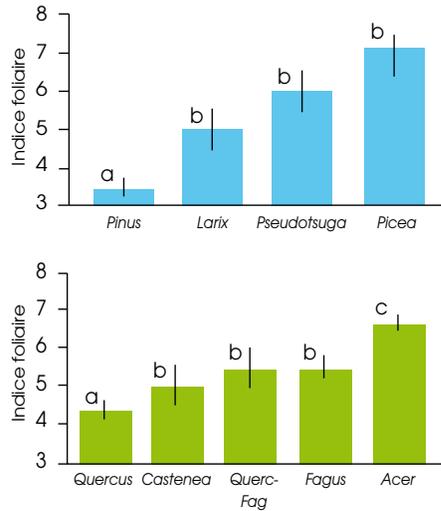


Figure D3 : Exemples d'indices foliaires moyens dans différents peuplements monospécifiques de résineux et de feuillus (d'après Bréda, 2003). Les mesures de l'indice foliaire ont été effectuées à partir des méthodes directes (cf. Fiche E).

Cette dynamique saisonnière est particulièrement évidente pour les espèces décidues (cf. Figure D4) : le peuplement passe d'une phase hivernale défeuillée (indice foliaire égal à 0) à une phase progressivement feuillée au printemps (pendant environ un mois), jusqu'à atteindre un indice foliaire maximum en fin de printemps (Bréda, 1999 ; Bréda, 2008). Au début de l'automne, la chute des feuilles, qui produit la litière\*, engendre une baisse rapide de l'indice foliaire. Cette dynamique intra-annuelle est faiblement marquée (moins de 10% de variation) chez les peuplements d'espèces sempervirentes\*, en raison du renouvellement relativement progressif des aiguilles ou des feuilles (Bréda, 1999 ; Bréda, 2008).



© Sylvain Gaudin – CRPF CA

**Houppiers de chêne sans feuilles durant l'hiver.**



© Céline Perrier – IDF

**Houppiers de chêne avec jeunes feuilles au printemps.**

## Les variations interannuelles

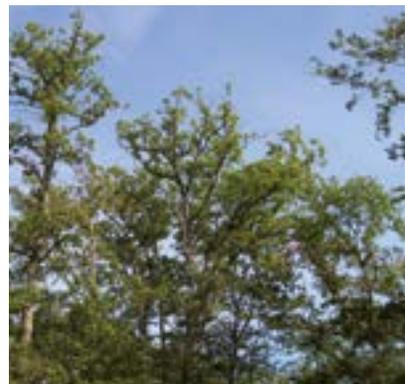
L'indice foliaire maximum atteint chaque année par un peuplement **peut être différent d'une année à l'autre**, en raison notamment de perturbations naturelles et/ou artificielles. Des variations, d'amplitudes souvent modérées, sont observées au travers d'**accidents naturels**, qu'ils soient **climatiques** (tels que le gel de printemps, les conséquences d'une tempête ou un épisode de sécheresse) ou **biotiques** (tels que la défoliation par les insectes ou les maladies). Les conséquences de ces événements peuvent être directes (diminution instantanée du nombre de feuilles) et/ou différées (diminution de quelques semaines à un an après) (cf. *Figure D5*).

Les variations observées après l'événement peuvent :

- être causées par l'événement lui-même (suppression physique de feuilles) ;
- résulter d'une réaction physiologique des arbres à ces événements (abscission prématurée des feuilles suite à une très forte sécheresse, par exemple).

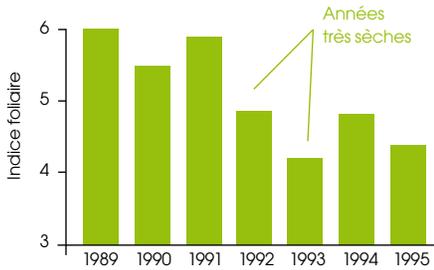
**Dans tous les cas, ces modifications sont réversibles et constituent pour les arbres et le peuplement un mode de régulation à moyen terme (Bréda, 1999), essentielle- ment de la surface transpirante.**

Les variations peuvent aussi être la conséquence de perturbations **artificielles**. Les interventions sylvicoles, telles que les éclaircies\*, réduisent par exemple temporairement l'indice foliaire du peuplement (cf. *Figure D6*). Ces perturbations sont alors en général d'amplitude plus forte que les perturbations naturelles. La dynamique de fermeture de la strate peuplement à la suite d'une intervention sylvicole est fonction de divers paramètres discutés plus en détail dans la *Fiche F*.

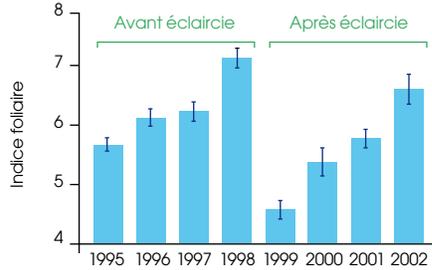


Jérôme Rosa - CRPF Île de France-Centre © CNPF

**Défoliation sur chêne sessile, en forêt domaniale de Vierzon.**



**Figure D5 : Exemple de variations interannuelles d'indice foliaire observées avant et après deux années très sèches dans une jeune futaie de chêne sessile (Lorraine) (d'après Bréda, 1999).**  
 Ces variations interannuelles atteignent presque 2 points d'indice foliaire et sont réversibles avec le temps.

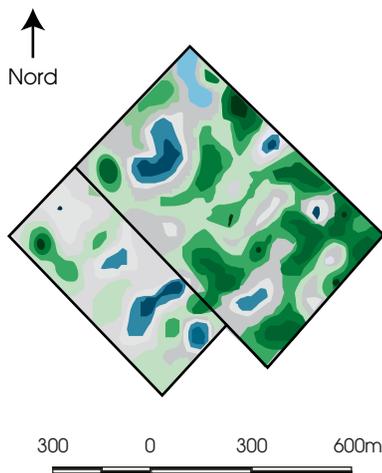


**Figure D6 : Exemple de variations interannuelles d'indice foliaire observées après l'ouverture\* d'une jeune futaie régulière de hêtre, suite à une éclaircie (d'après Bréda, 2008).**  
 L'indice foliaire maximum varie d'une année à l'autre. Dans cette situation, cinq ans sont nécessaires après l'intervention pour que l'indice foliaire retrouve la valeur qu'il avait avant l'éclaircie.

## Hétérogénéité spatiale de l'indice foliaire

L'hétérogénéité spatiale de l'indice foliaire au sein d'un même peuplement forestier\* peut être considérable (cf. Figure D7). Sa valeur peut varier localement du simple au triple, même sur de

courtes distances. Cela peut être dû à des hétérogénéités de traitement sylvicole, à une trouée, à un changement dans la strate inférieure\*, à un bouquet plus dense, mais aussi provenir d'une hétérogénéité des conditions stationnelles (Bréda et al., 2002 ; cf. Fiche H).



**Figure D7 : Exemple de variabilité spatiale de l'indice foliaire au sein de 4 parcelles de hêtraie (forêt domaniale de Hesse, Moselle) (d'après Bréda, 2008).**  
 Dans cet exemple, le petit rectangle représente deux parcelles âgées d'environ 120 ans : l'indice foliaire y varie entre 3 et 7. Le grand rectangle représente deux autres parcelles âgées d'environ 40 ans, avec des dates d'éclaircies décalées : la parcelle plus au nord a été éclaircie récemment ce qui a amplifié la variabilité spatiale.

|         |
|---------|
| 3 - 3,5 |
| 3,5 - 4 |
| 4 - 4,5 |
| 4,5 - 5 |
| 5 - 5,5 |
| 5,5 - 6 |
| 6 - 6,5 |
| 6,5 - 7 |
| 7 - 7,5 |
| 7,5 - 8 |
| 8 - 8,5 |
| 8,5 - 9 |
| 9 - 9,5 |



### Principaux enseignements de la fiche

- L'**indice foliaire\*** du peuplement est un paramètre clef pour étudier le fonctionnement des peuplements forestiers\* du point de vue du bilan hydrique\*, car c'est le moteur essentiel de la transpiration\* et de l'interception des précipitations\*.
- En zone tempérée, sa valeur varie de 1 à 9, notamment en fonction des essences qui composent le peuplement, de la capacité des feuilles à survivre à l'ombre et de l'architecture de la strate arborée\*.
- Il varie aussi dans le temps et dans l'espace, en fonction des caractéristiques du peuplement, de la phénologie\* des espèces, de la sylviculture et du contexte pédo-climatique\* du site.
- La caractérisation précise de cet indice dans un peuplement et son suivi dans le temps permettent de comprendre l'évolution de son état sanitaire et les conséquences de la sylviculture ou de perturbations (Bréda *et al.*, 2002).

### Références bibliographiques

- BRÉDA N. (1999). L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française*, LI-2, 135-150.
- BRÉDA N. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54 (392), 2403-2417.
- BRÉDA N. (2008). Leaf Area Index. *Encyclopedia of Ecology*, 3, 2148-2154.
- BRÉDA N., SOUDANI K. & BERGONZINI J.-C. (2002). Mesure de l'indice foliaire en forêt. GIP ECO-FOR éd. 157 pages. ISBN 2-914770-02-2.
- SCURLOCK J.M.O., ASNER G.P. & GOWER S.T. (2001). Worldwide Historical Estimates and Bibliography of Leaf Area Index, 1932–2000. ORNL Technical Memorandum TM-2001/268. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.
- WARING R.H. & SCHLESINGER W.H. (1985). *Forest ecosystems: concept and management*. Academic Press, London. 340 pages. ISBN 0-12-735441-7.

### Pour en savoir plus

- BRÉDA N. (1999). L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française*, LI-2, 135-150.
- BRÉDA N., SOUDANI K. & BERGONZINI J.-C. (2002). Mesure de l'indice foliaire en forêt. GIP ECO-FOR éd. 157 pages. ISBN 2-914770-02-2.
- INRA (2010). Biljou© – Modèle de bilan hydrique forestier. Fiche pédagogique « **Phénologie et indice foliaire** » <<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fiche/indice-foliaire-et-phenologie>>. INRA, UMR Écologie et écophysio­logie forestières.

Pour rappel, les différentes illustrations de cette fiche sont données à titre d'exemple. Elles sont dépendantes du contexte. Il convient par conséquent de ne pas en déduire des généralités.

Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



Implications pour la gestion associées



Cette fiche apporte également des éléments de réponse aux questions n°11, 15 et 16 (cf. pages 17 à 19).

D



# **Estimation de l'indice foliaire : méthodes directes**

## **Objectifs généraux**

**Proposer une synthèse des principales méthodes  
utilisées pour mesurer directement l'indice  
foliaire d'un peuplement.**

**Illustrer les limites de ces méthodes.**

## Prérequis

- Savoir ce qu'est l'indice foliaire\* et comment il varie dans l'espace et dans le temps (cf. Fiches C et D).
- Faire la distinction entre surface foliaire\* et indice foliaire du peuplement (cf. Fiche C).
- Savoir distinguer la transpiration\* des autres flux du bilan hydrique\* (cf. Fiche A).

## Équilibre fonctionnel entre surface d'aubier et surface foliaire

Pour rappel, la **sève brute** est constituée d'eau et d'éléments minéraux absorbés dans le sol par les racines fines. Ils circulent ensuite jusqu'aux feuilles de l'arbre où l'eau est évaporée ; il s'agit d'un **flux d'eau ascendant qui alimente la transpiration\*** au niveau des feuilles (cf. Fiches A et G).

Chaque année, le **diamètre des troncs** augmente grâce à la mise en place de nouveaux tissus (cernes) entre l'écorce et l'aubier\*. Ces tissus apportent de nouveaux **éléments conducteurs** de la sève à l'aubier, tandis que l'aubier adjacent au duramen\* se convertit progressivement en duramen non conducteur (cf. Figure E1). La quantité d'éléments conducteurs ainsi renouvelée régulièrement conditionne le nombre de feuilles pouvant être alimentées en eau *via* la sève brute. La **surface de feuilles d'un arbre est donc dépendante de sa surface d'aubier** (et par conséquent du diamètre de son tronc).

Les proportions d'aubier et de duramen varient essentiellement selon l'essence, l'âge, et la sylviculture (cf. Figure E2). Certaines essences à pores diffus comme le hêtre ne forment pas de duramen délimité, la sève brute peut alors circuler sur toute la section du tronc, mais à des intensités décroissantes de la périphérie vers le centre du tronc.

**Duramen**  
Contient des éléments conducteurs qui ne sont plus fonctionnels du fait de l'accumulation de diverses substances dans les parois et cavités cellulaires (ONF, 1999). Il joue un rôle mécanique de soutien de l'arbre. À l'échelle macroscopique, le duramen se distingue de l'aubier chez de nombreuses espèces (mais pas de façon systématique) par une coloration différente, en général plus foncée (Granier, 1977).

**Aubier**  
Contient les éléments conducteurs fonctionnels à travers lesquels s'effectue le transport de la sève brute et donc de l'eau. On mesure la surface d'aubier sur une section transversale du tronc (en général à 1,30 m du sol).

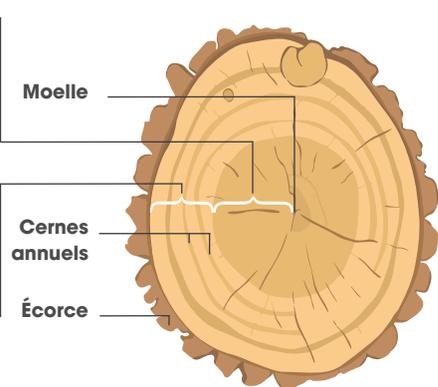
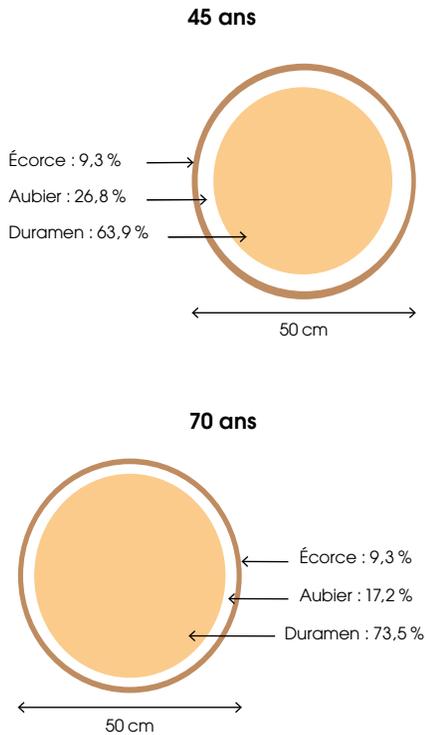


Figure E1 : Anatomie d'un tronc d'arbre avec un bois de cœur délimité.



**Figure E2 : Coupes transversales de deux troncs de mélèze du Japon soumis à des sylvicultures différentes (diamètre de 50 cm atteint respectivement à 45 et 70 ans) avec les proportions estimées d'écorce, d'aubier et de duramen (d'après Pauwels *et al.*, 2003). Chez cette espèce qui forme un duramen délimité, l'eau véhiculée par la sève brute ne circule que dans l'aubier.**

## Intérêt de la mesure de l'indice foliaire

L'indice foliaire d'un peuplement forestier\* est largement reconnu au niveau scientifique comme étant un paramètre clé du fonctionnement de la strate peu-

plement\*. Il n'est pourtant pas mesuré en routine, que ce soit en France ou dans les autres pays européens (Bréda *et al.*, 2002). C'est un paramètre fonctionnel du couvert\* qui reflète son état sanitaire, l'effet de la sylviculture, ou les conséquences d'une perturbation subie par le peuplement (Bréda *et al.*, 2002 ; cf. Fiches C et D).

L'indice foliaire se mesure par différentes approches. Depuis le sol, deux approches complémentaires sont possibles :

- les **méthodes directes** qui se basent sur une mesure réelle de la surface d'un échantillon de feuilles ; ces méthodes sont développées dans la présente fiche ;
- les **méthodes indirectes** qui n'utilisent pas de mesure de surface de feuilles. Celles aujourd'hui éprouvées se basent sur des processus optiques ; elles sont développées dans la Fiche F.

## Méthodes directes de mesure de l'indice foliaire

Le choix de la méthode utilisée varie en fonction des essences :

- pour les **essences décidues\*** (feuilles caduques), la méthode la plus simple consiste à recueillir un échantillon de feuilles lors de leur chute ;
- pour les **essences sempervirentes\*** (feuilles persistantes), une relation allométrique\* est établie sur la base d'un échantillon d'arbres abattus. Elle est aussi opérante pour les essences décidues.

## Recueil d'un échantillon de feuilles dans des bacs collecteurs

Cette méthode consiste à recueillir un échantillon de feuilles sénescentes dans des réseaux de bacs répartis dans le sous-bois. Ces bacs, de surface collectrice connue et constante, sont disposés juste au-dessus du sol, à des endroits fixes au sein du peuplement, pendant toute la période de chute foliaire (Bréda *et al.*, 2002).



© Nathalie Bréda - INRA

Le nombre de bacs requis est variable selon leur surface collectrice et selon la variabilité spatiale au sein du peuplement (composition\*, densité, etc.). À titre d'exemple, sur les placettes RENECOFOR de 0,5 ha, les collectes sont réalisées avec 10 bacs de 1 m<sup>2</sup> de surface collectrice. Le positionnement des bacs recommandé est établi selon une grille systématique pour garantir un échantillonnage représentatif de la variabilité spatiale. Pour plus d'information, se référer à Pitman *et al.*, 2010.



© Nathalie Bréda - INRA

### Exemples de bacs utilisés pour la collecte de feuilles sénescentes :

- 1 - Bac proche du sol avec pluviomètre à lecture directe.
- 2 - Bac surélevé conçu en bois et tissu (réseau RENECOFOR).
- 3 - Bac surélevé conçu en bois et grillage (dispositif expérimental sous hêtraie régulière).



Sylvain Gaudin - CRPF CA © CNPF



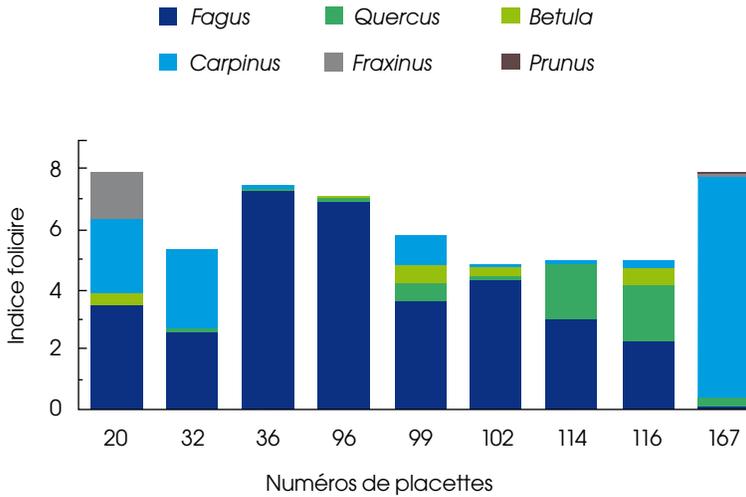
Les feuilles contenues dans les bacs sont récoltées périodiquement (fréquence hebdomadaire à mensuelle). **Pour établir l'indice foliaire total du peuplement avec cette méthode, seule la surface individuelle d'un échantillon de feuilles est déterminée.** Mesurer l'ensemble de la surface de toutes les feuilles serait en pratique impossible. Un échantillon des feuilles contenues dans les bacs est donc prélevé à plusieurs dates au cours de la période de récolte et sa surface est mesurée. L'échantillon de feuilles est alors séché. La surface spécifique est calculée comme le rapport entre surface et poids sec. L'ensemble des autres feuilles collectées dans les bacs est ensuite séché puis pesé. Disposant de la surface et de la masse sèche de l'échantillon de feuilles, la surface foliaire totale

récoltée dans les bacs est obtenue en multipliant le poids sec total de feuilles par la surface spécifique. Cette surface foliaire récoltée est ensuite rapportée à l'unité de surface échantillonnée ( $m^2$ ) correspondant à la surface totale de l'ensemble des bacs (Bréda *et al.*, 2002).

**Pour obtenir l'indice foliaire total** du peuplement, il faut additionner après la chute totale des feuilles, les indices foliaires partiels obtenus lors de chaque récolte des bacs. L'analyse des récoltes successives permet de décrire la dynamique de diminution de l'indice foliaire. Un tri des feuilles avant mesure, en fonction de l'essence, permet de distinguer la contribution de chaque espèce à l'indice foliaire total (Bréda *et al.*, 2002 ; cf. Figure E3).



**Planimètre à bande utilisé pour la mesure de la surface foliaire de feuilles de chêne au laboratoire.**



**Figure E3 : Exemple de contribution de différentes espèces à l'indice foliaire total du peuplement** (d'après Bréda, 2008).

Étude réalisée dans un peuplement dominé par le hêtre, à partir d'un recueil de feuilles au cours de l'automne et du tri de ces feuilles par espèce.

### Particularité de la méthode du recueil d'un échantillon de feuilles dans des bacs collecteurs

- Cette méthode est la plus exacte pour déterminer l'indice foliaire au sens strict, puisque seules les surfaces des feuilles sont mesurées (pas d'éléments bois).
- Elle n'est pas destructive.
- Elle n'est appropriée que pour les espèces décidues, car l'ensemble des feuilles retourne au sol à l'automne chaque année. Elle ne l'est pas pour les espèces sempervirentes pour lesquelles la collecte des feuilles sénescentes donne accès uniquement à la fraction renouvelée chaque année de l'indice foliaire (Bréda *et al.*, 2002).
- Elle permet de distinguer l'indice foliaire par essence au sein d'un même peuplement. Elle prend en compte les essences de la strate arborée\* mais aussi éventuellement celles de la strate arbustive\* (cf. Fiche C).

- Elle implique d'installer au moins une dizaine de bacs par hectare pour obtenir une estimation fiable et représentative de l'indice foliaire total d'un peuplement. Ce nombre dépend de la surface collectrice des bacs, de l'hétérogénéité spatiale du peuplement (plus il est variable, plus le nombre sera important), de l'hétérogénéité spatiale de la composition en espèces. Il peut être défini statistiquement par une expérience préliminaire.
- Elle est peu coûteuse en terme de matériel, mais le temps de travail nécessaire pour récolter, trier, peser les feuilles et déterminer la surface foliaire spécifique est élevé.
- Elle peut être appliquée à une strate arbustive ou herbacée\* (ex : échantillonnage par fauchage de la strate herbacée sur plusieurs surfaces connues distribuées dans la parcelle, détermination de la biomasse sèche, de la surface spécifique des herbacées et calcul de l'indice foliaire).

## Établissement de relations sur un échantillon d'arbres abattus

Cette méthode est basée sur l'existence de relations d'équilibre, dites relations allométriques, entre **la surface foliaire d'un arbre et certaines de ses caractéristiques** plus faciles à mesurer : diamètre moyen des arbres, surface terrière du tronc, surface totale de l'aubier du tronc (Bréda *et al.*, 2002).

Il est possible d'établir de telles relations en raison du fait que l'arbre ne peut fonctionnellement alimenter en eau qu'un nombre restreint de feuilles, proportionnel à la quantité de tuyaux disponibles (éléments conducteurs) entre les racines où l'eau est absorbée, et les feuilles où l'eau est évaporée (cf. Fiche G). Il s'ensuit que **le diamètre du tronc d'un arbre, ou mieux, sa surface d'aubier, est une variable pertinente pour prédire la surface foliaire portée par cet arbre** (cf. Figure E1). Le principe de cette méthode est donc de couper un échantil-

lon d'arbres dans le peuplement et de mesurer leur surface foliaire, ou tout au moins, un échantillon de leur surface foliaire (cf. § "Recueil d'un échantillon de feuilles dans des bacs collecteurs").

Pour mettre en œuvre cette méthode, un échantillon d'arbres est sélectionné de manière à être réparti dans tout l'histogramme de distribution des surfaces terrières des tiges du peuplement (ou mieux, distribution en surface d'aubier). Il est ensuite abattu. La circonférence et la largeur de l'aubier sont mesurées à 1,30 m ou à la base du houppier\*. Sur chaque arbre, l'ensemble des feuilles est récolté puis pesé pour obtenir la biomasse totale de feuilles et, comme dans le chapitre précédent, des échantillons sont prélevés dans différentes positions au sein de la couronne pour déterminer **la surface spécifique moyenne des feuilles**. La surface foliaire totale de chaque arbre est alors obtenue en multipliant le poids sec de toutes les feuilles de l'arbre par la surface spécifique moyenne. Sur l'échan-



Section de grume de douglas mettant en évidence la largeur d'aubier de l'arbre, correspondant à la zone claire sous l'écorce.

tillon d'arbres considéré, les surfaces foliaires calculées sont alors mises en relation avec les surfaces d'aubier, ou avec les surfaces terrières des troncs, ou avec les diamètres des troncs correspondants. Une régression surface foliaire/surface d'aubier ou surface foliaire/diamètre du tronc est construite et permet de prédire la surface foliaire d'un arbre de diamètre connu. L'indice foliaire total du peuplement est alors obtenu en appliquant cette relation à l'ensemble des tiges dans le peuplement. L'intégralité de la procédure est décrit dans Bréda *et al.*, 2002.

La difficulté de la méthode repose sur le fait que, outre qu'il faille prélever l'ensemble des feuilles des arbres abattus, **le choix des arbres à prélever est fondamental**. Un inventaire précis des diamètres des tiges est nécessaire et **le choix de l'échantillon d'arbres utilisé**

**pour établir la relation surface foliaire/surface d'aubier doit être représentatif du peuplement considéré.**

Pour une essence donnée, et bien qu'il n'existe pas de protocole "standardisé", il est conseillé de sélectionner des arbres répartis dans toutes les classes de diamètre présentes dans le peuplement (Bréda *et al.*, 2002).

### Exemple E1

(d'après Burton *et al.*, 1991)

*Dans leurs travaux, Burton et al. (1991) sélectionnent, dans des peuplements purs d'érable, huit arbres par parcelle de 5 à 6 ha, soit deux arbres pour chacune des quatre classes de diamètre présentes sur les parcelles (classes de diamètre de 10 cm). En cas de peuplement mélangé, il faut échantillonner des arbres dans ces classes pour chaque essence, car les relations allométriques sont fortement dépendantes du type d'essence.*

### Particularités de la méthode consistant en un échantillonnage d'arbres abattus

- L'établissement de relations entre surface foliaire et caractéristiques de l'arbre abattu se base sur la mesure directe de la surface foliaire. Ces relations sont applicables aussi bien pour les espèces décidues que sempervirentes.
- Cette méthode est destructive et doit respecter des contraintes d'échantillonnage strictes.
- L'équilibre fonctionnel entre section d'aubier et surface foliaire n'est vrai que pour des arbres en bon état physiologique.
- Parmi les variables corrélées à la surface foliaire, c'est la surface d'aubier d'un arbre

qui apparaît comme étant le meilleur prédicteur de la surface foliaire de cet arbre.

Cette surface d'aubier peut être appréhendée par carottage du peuplement d'intérêt. Il est nécessaire de la vérifier avant d'appliquer une relation allométrique déjà publiée. L'utilisation d'une relation établie par ailleurs (dans une autre région, ou un autre dispositif) doit en effet être faite avec beaucoup de prudence car elle peut être une source d'erreur importante.

- Les relations allométriques ne sont pas généralisables à tout peuplement ou à toutes conditions pédo-climatiques\*. Il faut veiller à ne pas les appliquer en dehors de leur domaine de validité tel que décrit dans le prochain paragraphe.

## Facteurs de variation de la relation allométrique

On pourrait être tenté d'appliquer ces relations de manière générique ou de formuler des équations qui auraient une application sur de larges zones biogéographiques telles que les sylvo-écorégions (SER) de l'IGN<sup>1</sup>. Cependant, il existe de nombreux facteurs de variation entre les espèces, mais aussi intra-spécifiques en fonction de l'âge, de la station, des conditions climatiques et de la sylviculture, notamment du régime d'éclaircies\* (Albrektsen, 1984 ; Bréda *et al.*, 2002 ; Köstner *et al.*, 2002 ; Marshall & Waring, 1986 ; Mencuccini & Grace, 1995 ; Sellin, 1994 ; Shelburne *et al.*, 1993 ; Waring *et al.*, 1982). Il est donc recommandé de construire sa propre relation pour une prédiction précise pour un peuplement d'intérêt ou *a minima*, de vérifier la pertinence de la relation choisie par rapport au contexte climatique, à l'âge des arbres, à la gamme de diamètres ou de largeur de l'aubier.

La relation allométrique traduit un état d'équilibre entre les surfaces conductrices (aubier) et les surfaces évaporantes (feuilles). Tout déséquilibre introduit dans le peuplement (par exemple, lors de la phase transitoire de refermeture\* de la strate peuplement après l'éclaircie ou après une attaque d'un quelconque parasite) s'accompagne d'une déviation par rapport à la relation allométrique qui aurait été établie avant perturbation (par exemple, avant

l'éclaircie). Cela signifie que l'utilisation de la même relation allométrique avant et après perturbation peut être une source d'erreurs. Il convient donc de toujours contrôler la pertinence de la relation utilisée par l'abattage d'un minimum d'arbres.

## Âge du peuplement

Pendant les premières phases d'évolution des peuplements réguliers, les houppiers des arbres se développent et utilisent l'espace disponible ; l'indice foliaire augmente ainsi rapidement avec l'âge du peuplement, jusqu'à atteindre un maximum. Il se stabilise alors et a parfois tendance ensuite à diminuer au cours du vieillissement et de la maturation du peuplement (jusqu'à plus de 20 % de réduction par rapport à l'indice foliaire maximum) (*cf. Exemple E2*).

Cette tendance de baisse de l'indice foliaire avec l'âge n'est cependant pas généralisable à tous types de peuplements, surtout s'ils sont gérés (*cf. Exemple E3*). Cette baisse peut en effet intervenir plus ou moins tôt notamment en fonction d'effets cumulés liés d'une part au vieillissement physiologique à l'échelle de l'arbre et à la maturation du peuplement, et d'autre part à l'évolution de sa structure influencée par la gestion. C'est pour cette raison que bon nombre d'études concluent que la variabilité de l'indice foliaire entre peuplements gérés de même âge rend très rarement significative la relation indice foliaire/âge (Genet *et al.*, 2009).

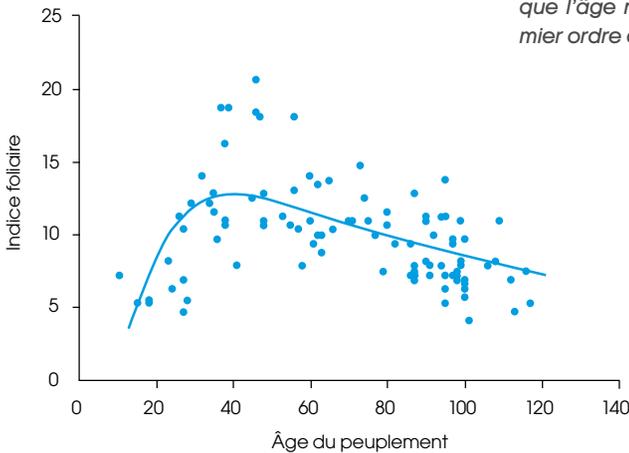
---

1. <http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article773>

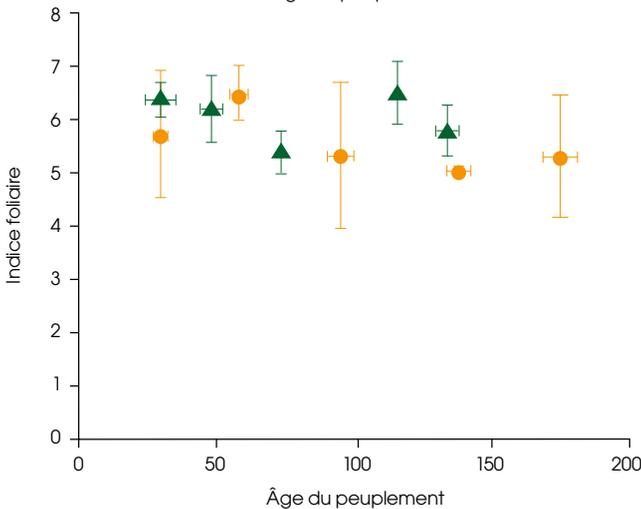
### Exemple E2

(d'après Vose et al., 1994)

Vose et al. (1994) ont évalué l'indice foliaire de différents peuplements de pin de Murray (*Pinus contorta*) aux États-Unis (cf. Figure E4). L'étude a porté sur une large gamme de peuplements ayant des densités différentes. Les résultats indiquent que l'indice foliaire du peuplement atteint une valeur maximale de 12 vers 40 ans. Il est ensuite relativement stable pendant 30 ans puis décline graduellement jusqu'à l'âge de 120 ans où il est environ 25 % moins élevé que l'indice foliaire maximum.



**Figure E4 : Évolution de l'indice foliaire du pin de Murray en fonction de l'âge du peuplement (États-Unis)** (d'après Vose et al., 1994).



**Figure E5 : Indice foliaire de chênaies et de hêtraies mesurés sur des chronoséquences installées en forêt de Fougères (hêtraies en bleu) et en forêt d'Amance (chênaies en vert)** (d'après Genet et al., 2009). Aucune tendance significative en fonction de l'âge n'est mise en évidence dans ces parcelles en gestion.



### Que faut-il retenir ?

- L'âge d'un peuplement n'est pas une caractéristique suffisante pour prédire son l'indice foliaire.
- Dans les peuplements gérés, du fait de la sylviculture appliquée, la relation entre l'âge du peuplement et son indice foliaire ne peut pas être considérée comme générique. En effet, l'indice foliaire dans une même classe d'âge varie alors fortement en fonction de la sylviculture appliquée (Bréda, 1999 ; Bréda, 2008 ; Sonohat *et al.*, 2004, Genet *et al.*, 2009).

### Caractéristiques des éclaircies

L'éclaircie diminue la densité du peuplement et réduit temporairement sa surface terrière. Son influence sur l'indice foliaire dépend à la fois de son intensité (pourcentage de bois prélevé), de sa nature (type d'arbres récoltés) et de sa cinétique (temps de refermeture du couvert).

### Intensité de l'éclaircie

L'intensité\* de l'éclaircie peut être exprimée à partir du ratio : **surface terrière prélevée/surface terrière initiale**. Étudier l'influence de l'éclaircie sur l'indice foliaire

revient alors à examiner la relation entre la nature de l'éclaircie, la variation de surface terrière et la variation de l'indice foliaire. Dans certains rares cas, il peut exister une relation - souvent linéaire mais pas de façon systématique - entre la variation d'indice foliaire et le pourcentage de surface terrière prélevé à un instant t (cf. Exemples E4 et E5), lorsque l'éclaircie est pratiquée (Bréda, 2008).

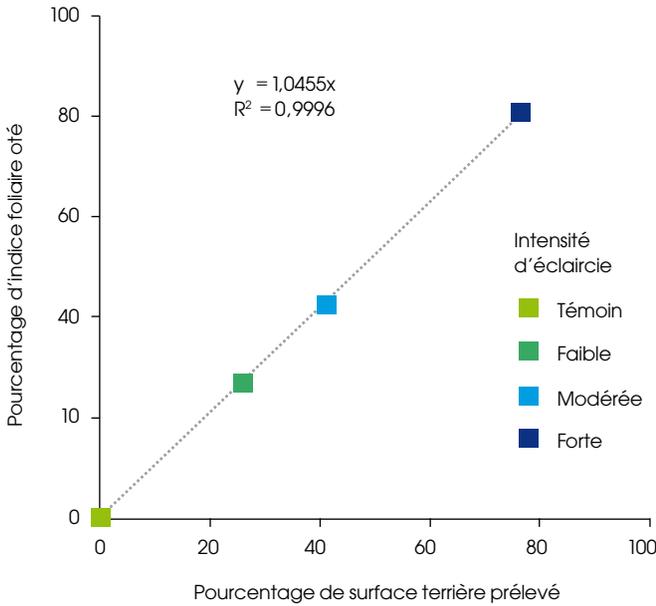
### Exemple E4

(d'après Molina & Del Campo, 2012)  
Molina & Del Campo (2012) ont étudié l'influence de l'intensité de l'éclaircie (absence d'éclaircie, éclaircie faible\*, éclaircie modérée et éclaircie forte\*) sur l'indice foliaire dans une plantation régulière de pin d'Alep (*Pinus halepensis*) établie à la fin des années 40 dans la province de Valence, à l'est de l'Espagne (climat méditerranéen). Cette plantation n'a subi aucune intervention sylvicole jusqu'à la date de l'étude. Le choix des arbres prélevés lors de l'éclaircie a été fait de manière à garder une distribution relativement homogène des arbres au sein du peuplement. Dans ce cas spécifique, une relation linéaire est observée entre le pourcentage de surface terrière prélevée et le pourcentage de réduction d'indice foliaire (cf. Figures E6 et E7).

| Traitement        | Indice foliaire | Couvert (%)  | Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha) | Densité (tiges/ha) |
|-------------------|-----------------|--------------|---------------------------------------|--------------------|
| Témoin            | 2,6 ± 0,1 a     | 83,3 ± 1,1 a | 35,6 ± 5,1 a                          | 1289 ± 173,6 a     |
| Éclaircie faible  | 1,9 ± 0,1 b     | 64 ± 6,9 b   | 26,3 ± 1,6 b                          | 688,7 ± 77,6 b     |
| Éclaircie modérée | 1,5 ± 0,3 b     | 46 ± 5,6 b   | 20,9 ± 3,8 b                          | 478 ± 15,0 b       |
| Éclaircie forte   | 0,5 ± 0,1 c     | 16 ± 5,3 c   | 8,3 ± 1,0 c                           | 177,7 ± 33,5 c     |

**Figure E6 : Statistiques descriptives (moyenne et écart-type) d'un peuplement de pin d'Alep pour différents traitements (Espagne)** (d'après Molina & Del Campo, 2012).

Les lettres indiquent des différences significatives entre les traitements ( $p < 0,05$ ). Par exemple pour l'indice foliaire (IF), les lettres indiquent que l'IF du témoin est significativement plus fort que ceux des éclaircies faible et modérée (non différents l'un de l'autre : b, b), eux-mêmes supérieurs à celui de l'éclaircie forte.



**Figure E7 : Relation entre le pourcentage d'indice foliaire ôté et le pourcentage de surface terrière prélevé dans une expérience d'éclaircie, dans une plantation de pin d'Alep (Espagne)** (d'après Molina & Del Campo, 2012).

© Christian Ripert - IRSTEA



1

© Christian Ripert - IRSTEA



2

© Christian Ripert - IRSTEA

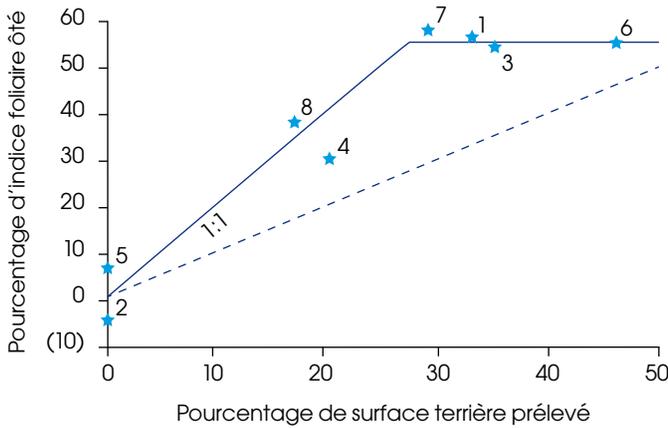


3

**Illustration de différents traitements de la canopée dans des peuplements de pin d'Alep (Saint-Mitre, Bouches-du-Rhône).**

- 1 - Couvert fermé (témoïn)
- 2 - Couvert moyen (éclaircie moyenne)
- 3 - Couvert léger (éclaircie forte)





**Figure E8 : Relation entre la variation de surface terrière et la variation d'indice foliaire dans une expérience INRA/ONF d'éclaircie (forêt domaniale de la Harth, Haut-Rhin). (d'après Bréda & Roman-Amat, 2002).**

### Exemple E5

(d'après Bréda & Roman-Amat, 2002)  
Cet exemple illustré par la Figure E8 est issu d'un essai d'éclaircie réalisé par l'Office National des Forêts, en chênaie mélangée (charme, tilleul, érable), en forêt domaniale de la Harth (Haut-Rhin). Contrairement à l'Exemple E4, la relation obtenue entre variation de surface terrière et variation d'indice foliaire n'est pas linéaire ; elle montre un plafonnement pour les fortes valeurs de surface terrière.

Il est important de noter que l'ouverture de la strate peuplement lors de l'éclaircie peut induire un **déséquilibre temporaire les années qui suivent l'intervention**, avec un accroissement des surfaces d'aubier des arbres et une augmentation des surfaces foliaires plus importante que dans le même peuplement non éclairci. La dynamique de ce phénomène reste difficile à prévoir et à maîtriser (Granier, 1981 ; Bréda *et al.*, 2002 ; cf. Fiche D). Il en résulte une difficulté réelle à utiliser ces relations allométriques dans la pratique.

### Temps de réaction du peuplement à l'éclaircie

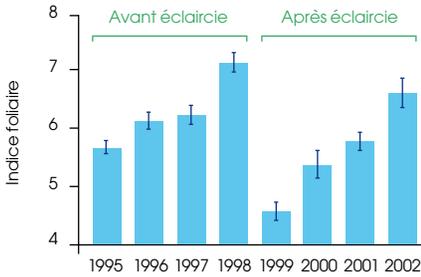
La vitesse de retour du peuplement à un indice foliaire similaire à la valeur avant éclaircie est nommée **vitesse de refermeture** de la strate peuplement. Elle est essentiellement fonction :

- des caractéristiques de l'éclaircie ;
- de l'espèce ;
- de l'âge des arbres ;
- des conditions édaphiques ;
- des facteurs climatiques intervenant après l'intervention.

### Exemple E6

Les dynamiques de refermeture de la strate peuplement suite à une éclaircie sont illustrées dans les 2 cas d'études ci-après (cf. Figures E9 et E10). Dans ces exemples, la vitesse de refermeture de la strate peuplement est relativement rapide, entre 3 et 5 ans.

**Cas n°1 :**



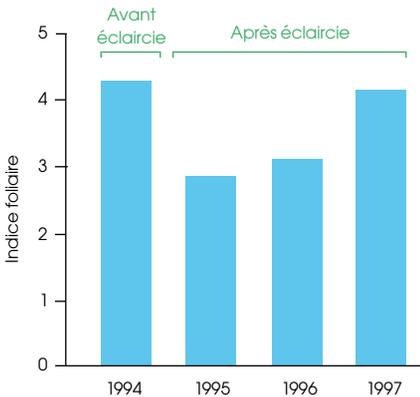
**Figure E9 : Exemple d'une dynamique pré- et post-éclaircie dans une jeune futaie régulière de hêtre dans l'Est de la France** (d'après Bréda, 2008).

Dans cette hêtraie située sur une bonne station, 5 ans sont nécessaires pour que le couvert se referme et atteigne un indice foliaire équivalent à celui d'avant éclaircie.

**Que faut-il retenir ?**

- La dynamique de refermeture de la strate peuplement après une intervention dépend des caractéristiques de l'éclaircie (intensité et type), de l'essence, de l'âge du peuplement, du type de peuplement (taillis ou futaie) et des conditions stationnelles. Elle peut aussi être largement modulée par les conditions climatiques des années consécutives (mais également antérieures) à l'intervention (Bréda, 1999).
- Il n'existe pas encore de modèle générique pour prédire la vitesse de refermeture de la strate peuplement.

**Cas n°2 :**



**Figure E10 : Exemple d'une dynamique post-éclaircie dans une futaie régulière de hêtre en France (Fontainebleau)** (d'après Le Dantec et al., 2000).

Dans cette hêtraie mature avec 29,3 m<sup>2</sup>/ha de surface terrière, 33 % de l'indice foliaire a été ôté lors de l'éclaircie. Après trois ans, l'indice foliaire du peuplement a atteint 90 % de l'indice foliaire avant éclaircie.

**Autres facteurs de variation**

La densité du peuplement est souvent considéré par les gestionnaires comme un facteur de variation de l'indice foliaire. On dispose cependant de peu de publications permettant de représenter l'évolution de cette relation sur la durée d'un cycle sylvicole\* et qui viendraient confirmer cette hypothèse. En réalité, la densité n'est pas un bon paramètre prédictif (Bréda, 1999). La relation entre densité et indice foliaire varie par exemple selon les espèces : « chez un sapin (*Abies lasiocarpa*), l'indice foliaire augmente avec la densité, alors que chez un pin (*Pinus contorta*), il reste constant dans une large gamme de densités » (Jack & Long, 1991).



### Principaux enseignements de la fiche

- Les méthodes directes de mesure de la surface foliaire\* sont celles qui fournissent les meilleures estimations de l'indice foliaire\* du peuplement.
- Pour préciser les critères de coût et de temps à investir dans les mesures, on se réfèrera à Bréda *et al.*, 2002.
- Il convient de préciser à quelle période correspond l'indice foliaire mesuré, compte-tenu de sa variabilité saisonnière (cf. Fiche D). Classiquement, la comparaison d'indices foliaires entre peuplements est réalisée sur la valeur maximale observée au cours de la saison.

### Références bibliographiques

- ALBREKTSON A. (1984). Sapwood basal area and needle mass of scots pine (*Pinus sylvestris*) trees in central Sweden. *Forestry*, 57 (1), 35-43.
- BRÉDA N. & ROMAN-AMAT B. (2002). Impact of forest stand management on water resources. *Houille Blanche-Revue Internationale de l'Eau*, (3): 78-84.
- BRÉDA N. (1999). L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française*, LI-2, 135-150.
- BRÉDA N. (2008). Leaf Area Index. *Encyclopedia of Ecology*, 3, 2148-2154.
- BRÉDA N., SOUDANI K. & BERGONZINI J.-C. (2002). Mesure de l'indice foliaire en forêt. GIP ECO-FOR éd. 157 pages. ISBN 2-914770-02-2.
- BURTON A.J., PREGITZER K.S. & REED D.D. (1991). Leaf area and foliar biomass relationships in northern hardwood forests located along an 800 km acid deposition gradient. *Forest Science*, 37 (4), 1041-1059.
- GENET H., BRÉDA N. & DUFRÈNE E. (2009). Age-related variation in carbon allocation at tree and stand scales in beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) using a chronosequence approach. *Tree Physiology*, 30 (2) : 177-192.
- GRANIER A. (1977). Transfert de sève brute dans le tronc des arbres, aspects méthodologiques et physiologiques. *Annales des Sciences Forestières*, 34 (1), 17-45.
- GRANIER A. (1981). Étude des relations entre la section du bois d'aubier et la masse foliaire chez le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco). *Annales des Sciences Forestières*, 38 (4), 503-512.
- JACK S.B. & LONG J.N. (1991). Response of leaf area index to density for two contrasting tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 21, 1760-1764.

KÖSTNER B., FALGE E. & TENHUNEN J.D. (2002). Age-related effects on leaf area/sapwood area relationships, canopy transpiration and carbon gain of Norway spruce stands (*Picea abies*) in the Fichtelgebirge, Germany. *Tree Physiology*, 22, 567-574.

LE DANTEC V., DUFRÈNE E. & SAUGIER B. (2000). Interannual and spatial variation in maximum leaf area index of temperate deciduous stands. *Forest Ecology and Management*, 134, 71-81.

MARSHALL J.D. & WARING R.H. (1986). Comparison of methods of estimating leaf area index in old-growth Douglas-Fir. *Ecology*, 67 (4), 975-979.

MENCUCCINI, M. & GRACE J. (1995). Climate influences the leaf area/sapwood area ratio in Scots pine. *Tree Physiology*, 15, 1-10.

MOLINA A. & DEL CAMPO A.D. (2012). The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 269, 206-213.

ONF – DIRECTION TECHNIQUE ET COMMERCIALE (1999). L'eau et la forêt. Synthèse bibliographique réalisée par Christine FORT. ONF, Bulletin technique n°37. 240 pages. ISBN 2-84207-165-4.

PAUWELS D., LEJEUNE P., PÂQUES L.E. & RONDEUX J. (2003). Développement de modèles prédictifs des proportions de duramen et d'écorce des espèces de mélèze cultivées en zones de basse altitude en Europe de l'Ouest (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr., *Larix decidua* Miller et *Larix eurolepis* Henry). *Annales des Sciences Forestières*, 60, 227-235.

PITMAN R., BASTRUP-BIRK A., BRÉDA N. & RAUTIO P. (2010). Sampling and Analysis of Litterfall. 16 pp. Part XIII. In: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre, Hamburg. ISBN: 978-3-926301-03-1. (<http://www.icp-forests.org/Manual.htm>).

SELLIN A. (1994). Sapwood heartwood proportion related to tree diameter, age, and growth rate in *Picea abies*. *Canadian Journal of Forest Research*, 24, 1022-1028.

SHELBURNE V.B., HEDDEN R.L. & ALLEN R.M. (1993). The effects of site, stand density, and sapwood permeability on the relationship between leaf area and sapwood area in loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Forest Ecology and Management*, 58, 193-209.

SONOHAT G., BALANDIER P. & RUCHAUD F. (2004). Predicting solar radiation transmittance in the understory of even-aged coniferous stands in temperate forests. *Annales des Sciences Forestières*, 61, 629-641.

VOSE J.M., DOUGHERTY P.M., LONG J.N., SMITH F.W., GHIOLZ H.L. & CURRAN P.J. (1994). Factors influencing the amount and distribution of leaf area of pine stands. *Ecological Bulletins*, 43, 102-114.

WARING R.H., SCHROEDER P.E. & OREN R. (1982). Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Canadian Journal of Forest Research*, 12, 556-560.

### Pour en savoir plus

BRÉDA N., SOUDANI K. & BERGONZINI J.-C. (2002). Mesure de l'indice foliaire en forêt. GIP ECOFOR éd. 157 pages. ISBN 2-914770-02-2.

INRA (2010). Biljou© – Modèle de bilan hydrique forestier. Fiche pédagogique « **Phénologie et indice foliaire** » <<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fiche/indice-foliaire-et-phenologie>>. INRA, UMR Écologie et écophysiole forestières.





Michel Bartoli © Photothèque CNPF

**Accumulation de feuilles à l'automne dans les bacs collecteurs, avant mesure des surfaces foliaires pour caractérisation de l'indice foliaire.**

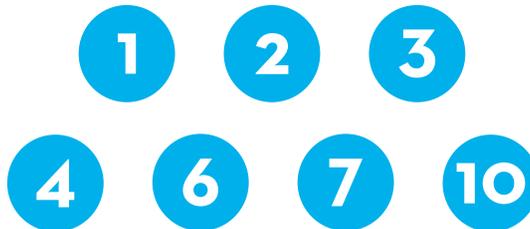
Pour rappel,  
les différentes  
illustrations de cette  
fiche sont données à  
titre d'exemple. Elles  
sont dépendantes du  
contexte. Il convient  
par conséquent de ne  
pas en déduire des  
généralités.

Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



E

Implications pour la gestion associées





# **Estimation de l'indice foliaire : méthodes indirectes**

## **Objectifs généraux**

**Proposer une synthèse des principales  
méthodes utilisées pour mesurer indirectement  
l'indice foliaire d'un peuplement.**

**Illustrer les limites de ces méthodes.**

## Prérequis

- Savoir ce qu'est l'indice foliaire\* et comment il varie dans l'espace et dans le temps (cf. Fiches C et D).
- Comprendre l'intérêt de la mesure de l'indice foliaire (cf. Fiche E).
- Connaître les méthodes directes d'estimation de l'indice foliaire (cf. Fiche E).

La mesure directe de la surface foliaire\* d'un peuplement pour en évaluer l'indice foliaire représente un travail trop lourd pour être effectué en routine (cf. Fiche E). Il peut cependant être estimé indirectement à partir de mesures, souvent optiques, basées sur la quantité de rayonnement solaire transmis sous le peuplement.

## Principe des méthodes indirectes

Les méthodes indirectes reposent sur le fait qu'il existe un lien entre la quantité de surface foliaire (accessoirement des troncs et des branches) et l'interception\* du rayonnement solaire. Dans la plupart des cas, l'indice foliaire est alors calculé par inversion de la loi de Beer-Lambert. Cette loi exprime la décroissance exponentielle d'un rayon lumineux traversant un milieu trouble composé de fines particules en suspension. Par analogie, cette loi est appliquée aux peuplements forestiers\*, en considérant la strate feuillée\* comme étant remplie uniformément et aléatoirement de petites particules de feuilles (Balandier, 2010). Le calcul se fait alors de



Illustration de conditions de rayonnement diffus sous douglas (forêt des Potées, Ardennes). L'indice foliaire de ce peuplement, mesuré au LAI-2000, est de 4,1

© Nathalie Bréda - INRA

### Analogie à la loi de Beer-Lambert

F1

La relation de Beer-Lambert en forêt s'écrit :

▪ **Calcul du rayonnement non intercepté, transmis sous la strate feuillée (I) :**

$$I = I_0 * e^{-k * IF}$$

▪ **Calcul de la proportion de rayonnement parvenant au sol, ou transmittance (T) :**

$$T = I / I_0 = e^{-k * IF}$$

(e : fonction exponentielle)

*I* : rayonnement transmis par la strate feuillée.

*I<sub>0</sub>* : rayonnement incident parvenant à la surface du feuillage de la strate feuillée.

*T* : transmittance\* de la strate peuplement, c'est-à-dire la proportion de rayonnement parvenant au sol.

*IF* : indice foliaire de la strate peuplement.

*k* : coefficient d'extinction du rayonnement dépendant de l'essence, de la structure de la strate peuplement et de la longueur d'onde dans laquelle *I* et *I<sub>0</sub>* sont mesurés.

En pratique, la **transmittance** peut ainsi s'estimer par la mesure simultanée de *I* sous la strate feuillée et de *I<sub>0</sub>* dans un lieu à découvert proche du peuplement forestier (par exemple au sommet d'une tour dépassant de la canopée\* ou dans une grande clairière à proximité du peuplement étudié).

▪ **Calcul de l'indice foliaire à partir de la transmittance :**

$$IF = - \ln (T) / k$$

(ln : logarithme népérien)

Le passage de la transmittance à l'indice foliaire dépend du coefficient d'extinction *k* qui varie en fonction de l'essence et de la structure\* de la strate peuplement\*. Ainsi *k* dépend de la distribution spatiale des feuilles dans la strate feuillée, plus ou moins régulière, et de leur plus ou moins forte agrégation. Il dépend aussi fortement de la longueur d'onde considérée lors de la mesure de *I* et de *I<sub>0</sub>* (rayonnement global ou photosynthétiquement actif par exemple, tel que décrit dans Balandier *et al.*, 2006, dépendant de l'équipement utilisé).

Une autre approche consiste à mesurer la **fraction de trous présents dans la canopée** (ce qui est en quelque sorte l'inverse de l'indice foliaire) pour évaluer la transmittance. Cette fraction de trous appelée *P<sub>0</sub>* est liée à la transmittance, par la relation :

$$T_\lambda = P_0 \sqrt{\alpha_\lambda}$$

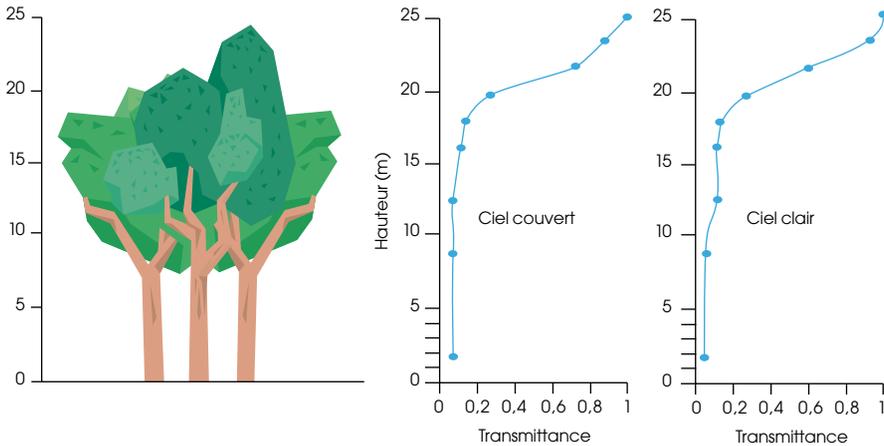
*T<sub>λ</sub>* : transmittance pour une longueur d'onde *λ* donnée.

*α<sub>λ</sub>* : coefficient d'absorption de Goudriaan (environ 0,8 dans le PAR (gamme de longueurs d'ondes utilisées par la photosynthèse), il exprime le fait que les feuilles transmettent une partie du rayonnement absorbé en fonction de *λ*).

*P<sub>0</sub>* : fraction de trous.

la manière suivante : soit un rayon *I<sub>0</sub>* parvenant à la surface du feuillage dans la strate feuillée, sa probabilité d'interception par le feuillage est directement proportionnelle, selon une loi exponentielle, à l'indice foliaire de cette strate (cf. Enca-

dré F1 et Figure F1). Le coefficient de proportionnalité *k* est appelé le coefficient d'extinction. *I* est le rayon non intercepté et transmis sous la strate feuillée. Si *k* est connu, la mesure simultanée de *I* et de *I<sub>0</sub>* permet de calculer l'indice foliaire.



**Figure F1 : Illustration d'extinction du rayonnement selon une loi exponentielle décroissante (analogie à la loi de Beer-Lambert) dans le cas d'une futaie feuillue de l'Est de la France (hêtraie-chênaie, âge 80 ans, hauteur 23 m)** (d'après Aussenac & Ducrey, 1977).

Le rayonnement a été mesuré à différentes hauteurs dans le couvert et lors de plusieurs journées avec deux conditions de rayonnement (ciel clair, rayonnement direct majoritaire, et ciel couvert, rayonnement diffus majoritaire) : la forme du profil d'extinction du rayonnement est plus marquée lors des journées de temps clair où le rayonnement solaire direct est prépondérant. L'extinction du rayonnement est rapide au niveau des couronnes entre 18 et 23 m.

Un développement théorique considérable a été réalisé à partir de cette loi et de la mesure de pénétration de la lumière. Cela a ainsi permis de concevoir des modèles de calcul complexes qui reposent sur de nombreuses hypothèses (cf. Encadré F2). Ces modèles sont utilisés par les divers instruments de mesure de l'indice foliaire actuellement commercialisés (Bréda *et al.*, 2002). Ils reposent tous soit sur la mesure du rayonnement transmis, soit sur la mesure de la fraction de trous, soit sur une estimation de cette dernière (photographies hémisphériques par exemple).

Il faut souligner qu'en pratique, l'utilisation de l'analogie à la loi de Beer-Lambert ou à ses dérivés, suppose que le coefficient d'extinction  $k$  soit connu. Il peut être déterminé lors de mesures conjointes à la fois de l'indice foliaire par des méthodes

directes (cf. Fiche E) et du rayonnement transmis. Dans le cas contraire, il est déterminé mathématiquement en faisant des hypothèses sur la distribution du feuillage et sur son coefficient d'agrégation (cf. Encadrés F1 et F2) ; la précision de sa détermination est alors fonction de la véracité de ces hypothèses. Elles ont fait l'objet de nombreuses publications au cours de ces dernières décennies ; pour plus de détails le lecteur se reportera par exemple à Bréda *et al.* (2002).

## Exemples d'instruments commercialisés pour la mesure indirecte de l'indice foliaire

Les méthodes indirectes optiques ont fait l'objet de nombreux développements techniques et méthodologiques. L'objec-

tif ici n'est pas d'en donner une description exhaustive, que l'on trouvera par ailleurs dans Bréda *et al.* (2002) et Bréda (2003), mais plutôt d'en décrire le principe et d'en situer les limites d'utilisation en forêt, car les instruments ont été initialement conçus pour des cultures.

### Les conditions d'utilisation de la loi de Beer-Lambert

F2

L'analogie à la loi de Beer-Lambert dans le cas de la strate feuillée suppose que l'on puisse la considérer comme un milieu trouble homogène, composé de fines particules (les feuilles ou aiguilles). Cette hypothèse est relativement réaliste pour un peuplement régulier\* à couvert\* continu mais s'en éloigne fortement lorsque le peuplement devient plus ouvert ou plus irrégulier\*. Divers raffinements mathématiques permettent dans une certaine mesure de tenir compte des violations de ces hypothèses. Ils ne seront pas développés dans cette fiche mais le lecteur pourra se rapporter à Bréda *et al.* (2002) pour plus de détails.

### Analyseur de couvert LAI-2000 (Licor Inc, USA)

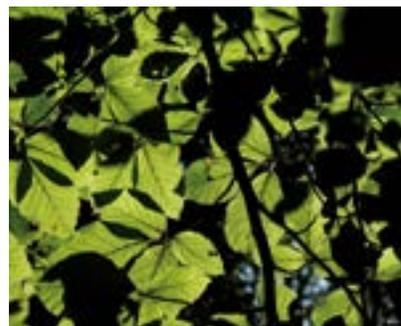
L'analyseur mesure de la lumière sous forme d'un signal électrique à partir de cellules au silicium arrangées en anneaux concentriques. Pour éviter des problèmes de réflexion et de transmittance du rayonnement par les feuilles, il opère dans la gamme spectrale du bleu. À partir de ces mesures, le LAI-2000 calcule la probabilité de « voir le ciel à travers la canopée », et cela dans différentes directions, par application d'un dérivé mathématique de la loi de Beer-

Lambert (cf. Encadré F2). Comme pour l'ensemble des méthodes optiques, la mesure requiert l'absence du disque solaire sur la zone de mesure qui conduit à une surestimation de la fraction de trous (phénomène d'éblouissement).

Le calcul de l'indice foliaire nécessite également la mesure du rayonnement incident ( $I_0$ ) au-dessus de la canopée, ce qui en forêt est généralement impossible et donc, à défaut, du rayonnement dans une zone à découvert proche de la parcelle forestière considérée. Il faut noter que si la zone à découvert est relativement éloignée, cela nécessite l'utilisation simultanée de deux appareils intercalibrés. Ce type d'instrument est en général relativement coûteux. Le signal électrique mesuré par chaque cellule au silicium n'est pas calibré en flux d'énergie car il n'est utilisé qu'en transmittance, c'est-à-dire en rapport entre  $I$  et  $I_0$ .

### ACCUPAR LP-80 (Decagon devices) ou SunScan (Delta-T Devices)

Ces instruments mesurent le rayonnement photosynthétiquement actif le long



Feuillage d'un hêtre.

Michel Barthelemy © Photothèque CNPF

© Philippe Balandier – IRSTEA



**Deux modèles de ceptomètres (ACCUPAR LP-80, Decagon device, USA) utilisables en forêt pour mesurer le rayonnement.**

*La longue barre blanche contient 80 cellules de mesure du rayonnement réparties tous les cm, prolongée par un boîtier de commande et de programmation des mesures.*

d'une barre linéaire d'environ 1 m de long et comportant 80 cellules au silicium alignées. L'indice foliaire est déterminé à partir du calcul de la fraction de trous basé sur les mesures des cellules, selon le principe qu'à chaque mesure il y a toujours au moins une cellule entièrement ombrée (référence de l'interception complète du rayonnement) et une autre entièrement éclairée (référence de la non-interception du rayonnement) permettant de classer les autres cellules. En théorie, cette méthode ne requiert pas de mesure du rayonnement incident ( $I_0$ ) puisqu'une des 80 cellules est théoriquement dédiée à cela, mais en pratique la mesure de  $I_0$  permet d'améliorer considérablement le calcul de l'indice foliaire. Comme pour le LAI 2000, la mesure requiert l'absence

© Jacques Becauey - IDF



**Prise de mesure avec l'analyseur de couvert LAI-2000.**



**Calibration de deux analyseurs de couvert LAI-2000 avant mesure simultanée sous couvert et hors forêt.**

© Marine Bouvier – CRPF Bretagne



du disque solaire dans la zone de prise de vue. À la différence du LAI 2000, la mesure est unidirectionnelle et requiert donc de nombreuses mesures dans différentes directions pour une estimation correcte de l'indice foliaire à l'échelle du peuplement. Ce type d'instrument est généralement relativement coûteux. Il a l'avantage de fournir une mesure de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) calibré, qui peut être utile indépendamment du calcul d'indice foliaire.

### Les capteurs de rayonnement

Des capteurs non spécifiquement dédiés à la mesure de l'indice foliaire peuvent être aussi utilisés, comme par exemple les capteurs de rayonnement ponctuels ou, mieux, linéaires pour une meilleure intégration de la variabilité spatiale. Cependant, il en faut beaucoup pour appréhender correctement la variabilité spatiale du rayonnement et donc estimer correctement l'indice foliaire, ce qui peut représenter un coût non négligeable, en plus du temps de déploie-

ment sous la strate feuillée. Il est également nécessaire d'acquérir par le même type de capteur le rayonnement incident ( $I_0$ ) afin de calculer la transmittance. Le calcul de l'indice foliaire, à partir des mesures de rayonnement, reste alors à la charge du praticien et n'est pas intégré à l'appareil de mesure comme dans les équipements dédiés décrits précédemment. Cela peut être un avantage dans la mesure où le praticien peut choisir la méthode et les paramètres de calcul (en particulier le coefficient d'extinction  $k$ ) mais cela requiert une parfaite maîtrise de la théorie.

### L'exploitation de photographies hémisphériques

La prise de photographies, généralement hémisphériques à l'aide d'un objectif avec un angle d'ouverture de  $180^\circ$ , est une alternative souvent utilisée pour estimer l'indice foliaire. Le principe est de prendre une photographie de la strate feuillée depuis le sol puis de réaliser, à l'aide de logiciels d'analyse d'image, une



© Philippe Balandier - IRSTEA

**Capteur linéaire d'un mètre de long (Delta-T Devices, Cambridge, UK) permettant de mesurer le rayonnement solaire global sous le couvert forestier.**



© Philippe Balandier - IRSTEA

**Photographie hémisphérique d'un peuplement de chênes à Poitiers.**

classification des pixels composant tout ou une partie de la photographie, soit en pixels de végétation, soit en pixels de ciel. Le nombre de pixels de ciel sur le nombre total de pixels de l'image donne alors la fraction de trous de la canopée ce qui permet de le ramener au calcul de l'indice foliaire par inversion de la loi de Beer-Lambert (cf. Encadré F1). Cependant, cette technique n'est pas exempte de critiques car subjective dans la phase de classification des pixels et souvent interprétée à dire d'expert malgré les raffinements des logiciels d'analyse d'image. Par ailleurs, la photographie doit être d'excellente qualité, ce qui requiert l'acquisition d'un appareil et d'un objectif coûteux et ce qui implique d'être réalisée dans des conditions météorologiques propices. Comme pour les autres techniques, le disque solaire ne doit pas être présent sur la photographie, ce qui limite les heures possibles de prises de vue (dans le cas des photographies hémisphériques : avant le lever ou après le coucher du soleil). En théorie, la méthode photographique ne requiert pas la mesure du rayonnement incident ( $I_0$ ) mais, en pratique, elle est recommandée pour faciliter l'opération de classification des pixels.

## Avantages et inconvénients des méthodes indirectes

Les différentes méthodes de mesure de l'indice foliaire présentées précédemment ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche et de validation. Il existe souvent une **bonne corrélation entre les**

**méthodes** directes d'estimation de l'indice foliaire (cf. Fiche E) et les méthodes indirectes, souvent optiques telles que le LAI-2000 ou les mesures de rayonnement avec des pyranomètres (cf. Figure F1). Pour ces dernières, les mesures présentent l'avantage d'être **plus faciles et plus rapides à réaliser** que les méthodes directes. Elles peuvent toutefois présenter des sur- ou sous-estimations par rapport aux mesures obtenues avec des méthodes directes. C'est en particulier le cas lorsque la strate feuillée s'éloigne des hypothèses sur lesquelles reposent les modèles (cf. Encadré F2) ; une autre source de biais est que toutes les mesures indirectes intègrent des éléments non foliaires qui interceptent le rayonnement (bois des troncs et branches). Ce n'est pas très grave si la proportion de feuilles est bien supérieure à la proportion de bois (les feuilles cachent le bois) : c'est le cas fréquent des peuplements sains. Cela peut cependant devenir plus problématique, par exemple dans le cas des peuplements dépérissants (forte proportion de bois). Les méthodes indirectes tendent à sous-estimer l'indice foliaire dans les peuplements de conifères à indice foliaire faible, avec des branches en verticilles lâches et des aiguilles très agrégées comme la plupart des pins. Le calcul de l'indice foliaire nécessite alors un traitement particulier pour tenir compte de l'agrégation qui contredit l'hypothèse de distribution aléatoire des éléments foliaires.

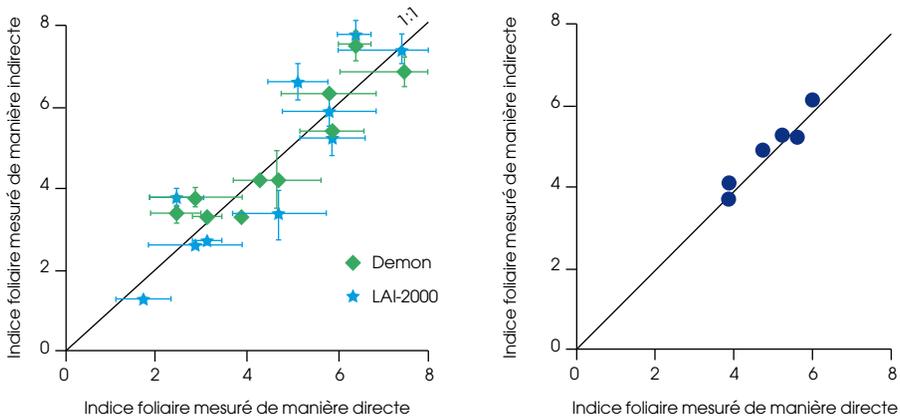
1. En toute rigueur ce qui est alors mesuré est appelé le PAI pour *Plant Area Index* en anglais, qui correspond bien à la somme des feuilles et du bois.

### Particularités des méthodes indirectes optiques

- Elles reposent sur une approche probabiliste et statistique de la distribution des éléments foliaires dans la strate peuplement\* et utilisent des modèles de calcul relativement complexes basés sur de nombreuses hypothèses, pas toujours vérifiées.
- Elles ne sont pas destructives et sont relativement faciles et rapides à opérer.
- Elles nécessitent des conditions de rayonnement rigoureusement stables au cours de la mesure et sans rayonnement direct sur les capteurs.
- Elles fournissent un indice foliaire total (toutes essences confondues) sans possibilité simple de distinction des espèces.

### Utilisation de variables dendrométriques

En fin de compte, mesurer directement ou indirectement l'indice foliaire implique l'utilisation d'appareils coûteux et/ou un investissement en temps important. C'est pourquoi des travaux de recherche explorent les relations qui pourraient exister entre l'indice foliaire et certaines caractéristiques des peuplements mesurées de façon plus routinière dans le cadre de la gestion. Parmi ces variables, la **surface terrière des peuplements** est souvent utilisée. Elle s'appuie sur le principe que **l'indice foliaire est directement proportionnel à la surface**



**Figure F2 : Comparaison entre l'indice foliaire mesuré de manière directe (méthode du recueil des feuilles sèches) et l'indice foliaire mesuré de manière indirecte, par mesure d'interception du rayonnement (capteur de rayonnement global, à droite) ou avec des instruments dédiés (LAI-2000, Demon, à gauche)** (d'après Dufrène & Bréda, 1995 et Bréda, 2003). Il existe une bonne corrélation entre les deux types de méthodes ( $r^2 = 0,95$ ). Les différents symboles correspondent à des mesures effectuées sur des peuplements différents de chênes et de hêtres en forêt de Fontainebleau et de Champenoux.

d'aubier\* (cf. Fiche E), elle-même proportionnelle au diamètre du tronc. Ces travaux ont montré que d'autres variables dendrométriques testées, telles que la densité des tiges, la hauteur moyenne du peuplement ou le facteur d'espace se révèlent être indépendantes de l'indice foliaire.

Au début de ce chapitre, nous avons vu que le rayonnement transmis était relié à l'indice foliaire (IF) et à un coefficient d'extinction  $k$ , selon la loi de Beer-Lambert (cf. Encadré F1) :

$$I/I_0 = e^{-k \cdot IF}$$

En supposant que l'indice foliaire est relié à la surface terrière ( $G$ ) par une relation de type  $IF = a \cdot G$  (cf. Fiche E), la relation peut alors s'écrire :

$$I/I_0 = e^{-k \cdot a \cdot G}$$

Et en posant  $k \cdot a = b$ , le problème d'estimation de l'indice foliaire à partir de la surface terrière revient alors à estimer le coefficient  $b$ , soit en connaissant  $k$ , soit en connaissant  $a$ .

L'Exemple F1 est une illustration de la modélisation de la transmittance à partir de la surface terrière dans différents peuplements réguliers monospécifiques. Le modèle utilisé est  $T = e^{-b \cdot G}$  où le coefficient  $b$  est une constante à estimer, qui sert de base à la détermination de  $a$  ou de  $k$ .



© Jacques Becquey - IDF

Évaluation au relascope à chaînette de la surface terrière d'un peuplement de douglas.

### Que faut-il retenir ?

- Il est possible de trouver une bonne corrélation entre la transmittance et la surface terrière pour certains types de peuplements réguliers. Mais la connaissance du coefficient d'extinction du rayonnement, dépendant de l'essence et de la structure de la strate peuplement, est indispensable pour estimer l'indice foliaire.
- En présence de perturbations récentes, c'est-à-dire lorsque la structure du peuplement se trouve modifiée (réduction de l'indice foliaire) de manière naturelle (ex : sécheresse) ou suite à une intervention sylvicole (ex : éclaircie\*), la relation obtenue est de mauvaise qualité et l'indice foliaire ne peut pas être estimé correctement à partir de la surface terrière (cf. Fiche E).

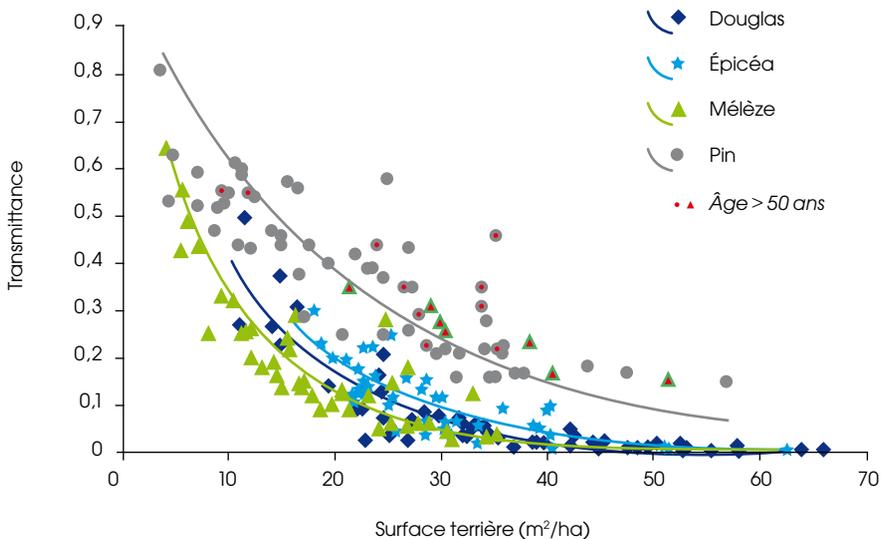


### Exemple F1

(d'après Sonohat et al., 2004)

Sonohat et al. (2004) modélisent la relation entre transmittance (dans le rayonnement global, 300 – 3 000 nanomètre) et surface terrière à partir de mesures effectuées dans 204 parcelles de peuplements réguliers monospécifiques et équiennes situées en climat tempéré (France et Belgique, entre 145 m et 1 250 m d'altitude). Elles concernent quatre espèces résineuses différentes, douglas (*Pseudotsuga menziesii*), épicéa commun (*Picea abies*), mélèze (*Larix sp.*) et pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), dans diverses conditions écologiques et

de gestion. Il s'agit de peuplements éclaircis\* ou non, âgés de 10 à 96 ans, avec des valeurs de surface terrière de 4 à 66 m<sup>2</sup>/ha, pour lesquelles la transmittance varie entre 0,5 % et 81 %. Un modèle est construit pour chaque espèce. La Figure F3 montre qu'à surface terrière égale, l'épicéa intercepte davantage de lumière que le pin sylvestre (qui a la transmittance la plus élevée), approximativement autant que le douglas, et moins que le mélèze (transmittance la plus faible). Malgré une certaine dispersion, ces modèles simples expliquent entre 56 % (pour l'épicéa commun) et 80 % (pour le douglas) de la variation de la transmittance.



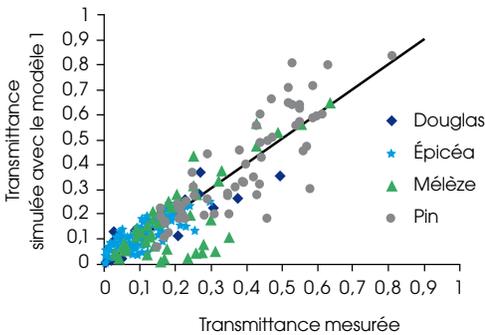
**Figure F3 : Relation entre la transmittance moyenne journalière (dans le rayonnement global, 300 - 3 000 nm) et la surface terrière pour différentes essences en peuplements réguliers monospécifiques et équiennes (d'après Sonohat et al., 2004).**

Les courbes ajustées aux données correspondent à la transmittance modélisée par la loi de Beer-Lambert.

tance dans les peuplements selon les espèces (cf. Figure F3).

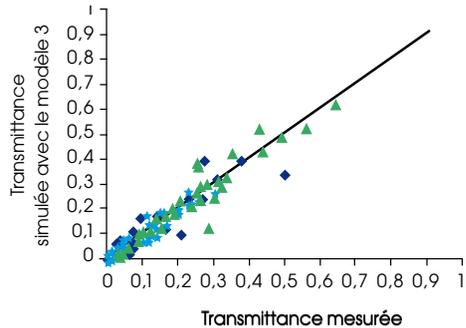
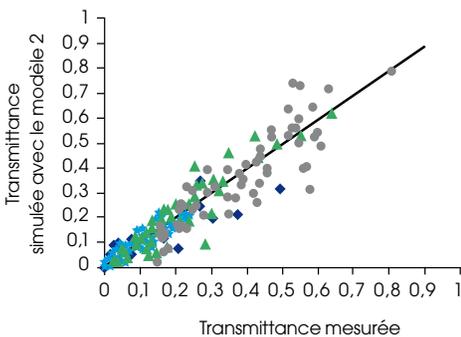
Comme présenté dans la Fiche E, l'âge du peuplement et les caractéristiques de l'éclaircie influencent la relation entre l'indice foliaire et la surface terrière. Il s'ensuit qu'en prenant en compte ces deux variables dans cet exemple, la prédiction de la transmittance est grandement améliorée. Ainsi, en prenant en compte l'âge, le modèle peut expliquer 87 % pour le mélèze, 79 % pour le douglas, 83 % pour l'épicéa commun et 73 % pour le pin, au lieu respectivement de 62 %, 80 %, 56 % et 73 %, dans

le modèle simple (cf. Figure F4, modèles 1 et 2). La qualité de prédiction du modèle de transmittance est encore améliorée si, en plus de l'âge, on tient compte des caractéristiques de l'éclaircie (durée depuis la dernière éclaircie et intensité, exprimée comme le ratio de la surface terrière prélevée par rapport à la surface terrière initiale). En prenant en compte ces variables, le modèle peut ainsi expliquer 87 % pour le mélèze et le douglas et 88 % pour l'épicéa commun (absence de données pour le pin) de la variation de la transmittance, au lieu respectivement de 62 %, 80 % et 56 % dans le modèle simple (cf. Figure F4, modèles 1 et 3).



**Figure F4 : Comparaison entre les valeurs de transmittance mesurées et simulées pour différents modèles d'estimation de la transmittance par espèce** (d'après Sonohat et al., 2004).

Les modèles utilisés permettent d'estimer la transmittance à partir de la surface terrière dans les peuplements réguliers monospécifiques et équiennes. Modèle 1 = modèle simple où le coefficient  $b$  est une constante ; Modèle 2 = modèle où  $b$  est une fonction de l'âge du peuplement ; Modèle 3 = modèle où  $b$  est une fonction de l'âge et des caractéristiques de la dernière éclaircie. L'ajustement le meilleur est avec le modèle 3.



### Principaux enseignements de la fiche

- Pour la plupart des types de peuplements, les méthodes indirectes et notamment optiques permettent une bonne évaluation de l'indice foliaire\*.
- Elles sont néanmoins pratiquement toutes soumises à des restrictions d'usage liées aux conditions et hypothèses d'utilisation de la loi de Beer-Lambert (homogénéité du feuillage par exemple).
- Lorsqu'une mesure optique n'est pas envisageable (coût trop élevé ou temps de travail trop important), l'utilisation de variables dendrométriques, plus faciles à mesurer, telles que la surface terrière du peuplement, est possible. Cependant le calcul de l'indice foliaire requiert alors deux étapes : 1- le calcul de la transmittance\* à partir de la variable dendrométrique considérée, puis 2- le calcul de l'indice foliaire par application de la loi de Beer-Lambert et soumis aux mêmes restrictions d'usage que celles mentionnées précédemment. Ce double calcul multiplie d'autant les erreurs d'estimation de l'indice foliaire.

### Références bibliographiques

- AUSSENAC G. & DUCREY M. (1977). Étude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'est de La France. I - Analyse des profils microclimatiques et des caractéristiques anatomiques et morphologiques de l'appareil foliaire. *Annales des Sciences Forestières*, 34: 265-284.
- BALANDIER P. (2010). Comment estimer la lumière dans le sous-bois forestier à partir des caractéristiques dendrométriques des peuplements ? ONF, RDV techniques n°27-28, 52-58.
- BALANDIER P., SONOHAT G., SINOQUET H., VARLET-GRANCHER C. & DUMAS Y. (2006). Characterisation, prediction and relationships between different wavebands of solar radiation transmitted in the understorey of even-aged oak (*Quercus petraea*, *Quercus robur*) stands. *Trees*, 20, 363-370.
- BRÉDA N. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392): 2403-2417.
- BRÉDA N., SOUDANI K. & BERGONZINI J.-C. (2002). Mesure de l'indice foliaire en forêt. GIP ECO-FOR éd. 157 pages. ISBN 2-914770-02-2.
- DUFRENE E. & BRÉDA N. (1995). Estimation of deciduous forest leaf-area index using direct and indirect methods. *Oecologia*, 104(2): 156-162.
- SONOHAT G., BALANDIER P. & RUCHAUD F. (2004). Predicting solar radiation transmittance in the understorey of even-aged coniferous stands in temperate forests. *Annales des Sciences Forestières*, 61, 629-641.

### Pour en savoir plus

BALANDIER P. (2010). Comment estimer la lumière dans le sous-bois forestier à partir des caractéristiques dendrométriques des peuplements ? Rendez-vous Techniques ONF, n°27-28, 52-58.

PITMAN R., BASTRUP-BIRK A., BRÉDA N. & RAUTIO P. (2010). Sampling and Analysis of Litter-fall. 16 pp. Part XIII. In: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre, Hamburg. ISBN: 978-3-926301-03-1. (<http://www.icp-forests.org/Manual.htm>)

Pour rappel, les différentes illustrations de cette fiche sont données à titre d'exemple. Elles sont dépendantes du contexte. Il convient par conséquent de ne pas en déduire des généralités.

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implication pour la gestion associée



F



# **Facteurs de variation de la transpiration des arbres et statut social**

## **Objectifs généraux**

**Mieux comprendre les facteurs de variation  
de la transpiration d'un arbre.**

**Évaluer l'importance du statut social  
de l'arbre sur sa transpiration.**

## Prérequis

- Savoir distinguer les différentes strates\* d'un peuplement forestier\* (cf. *Figure C1 de la Fiche C*).
- Connaître les éléments structuraux élémentaires de la plante qui participent à la circulation de l'eau dans l'arbre (éléments conducteurs, surface d'aubier\*, stomates\*, etc.) (cf. *Fiche E*).
- Savoir distinguer la transpiration\* des autres flux du bilan hydrique\* (cf. *Fiche A*).
- Savoir ce qu'est l'indice foliaire\* d'un peuplement forestier (cf. *Fiche C*).

## Deux principaux déterminants de la transpiration

La transpiration des arbres au niveau des feuilles (cuticule et surtout stomates) consiste à libérer de la vapeur d'eau qui est évaporée dans l'atmosphère (cf. *Fiche A*). Ce mécanisme permet à

l'arbre de réguler sa température et son état hydrique. Parallèlement, la libération de vapeur d'eau lors de la transpiration produit un gradient de potentiels hydriques dans l'arbre, où la sève circule en phase liquide. Ce gradient de potentiels entre les feuilles et le sol induit l'absorption de l'eau par les racines des arbres en créant un phénomène d'aspiration de la sève brute depuis le sol vers les feuilles (cf. *Fiche E*). Le flux de la transpiration est déterminé principalement par la demande climatique\* et par certaines caractéristiques intrinsèques de l'arbre.

### La demande climatique

Pour une même espèce, lorsque les conditions d'alimentation en eau au niveau du sol ne sont pas limitantes, la transpiration de l'arbre est proportionnelle à l'évapotranspiration potentielle\* (ETP) qui rend compte de la **demande climatique** (rayonnement, température, humidité de l'air et vitesse du vent). Cette demande est d'autant plus forte que le rayonnement est intense, que l'air est sec, que la

#### Dispositif de mesure du rayonnement incident et réfléchi sur un poste météo INRA en haut d'un peuplement de hêtre.

Le mât porte un capteur ponctuel mesurant le PAR (gamme de longueurs d'ondes utilisées par la photosynthèse), un pyranomètre mesurant le rayonnement global au centre, et à l'extrémité un bilan-mètre qui mesure à la fois le rayonnement incident et le rayonnement réfléchi par la végétation.



© Nathalie Bréda - INRA

température est élevée et que le vent est fort. Les besoins en eau de l'arbre sont alors importants, pour compenser l'émission de vapeur d'eau dans l'atmosphère lors de la transpiration. Pour conserver son état hydrique, l'absorption racinaire est égale à la transpiration imposée par ces conditions d'ETP au niveau des feuilles. C'est ce qui induit la circulation de la sève brute sous tension dans le xylème. **Le rayonnement et le déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air\* sont les deux composantes majeures de la force motrice de la transpiration (cf. Fiche A).**

La transpiration de l'arbre varie à différents pas de temps :

**1) horaire**, en suivant classiquement, durant une belle journée sans nuages, une courbe en cloche qui correspond aux variations journalières de rayonnement et donc de l'ETP, maximale en milieu de journée (cf. *Figure G1*). La transpiration foliaire suit la cinétique de l'ETP avec un petit décalage (de 1h à 1h30), lié à la dis-

tance entre le flux de vapeur au niveau des feuilles et le flux de sève mesuré en bas du tronc (sous réserve que les arbres soient bien alimentés en eau et que l'air ne soit pas saturé en vapeur d'eau) ;

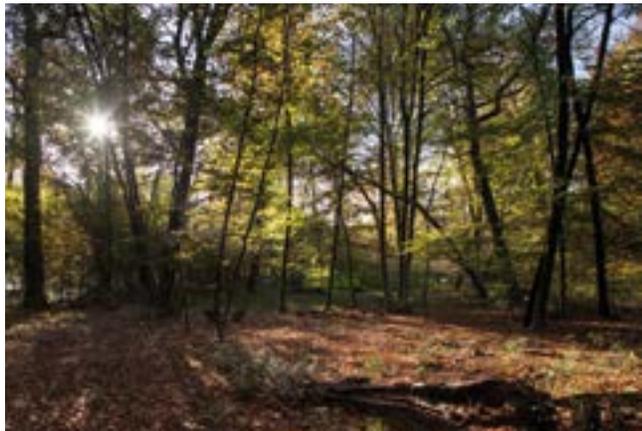
**2) saisonnier, en raison de :**

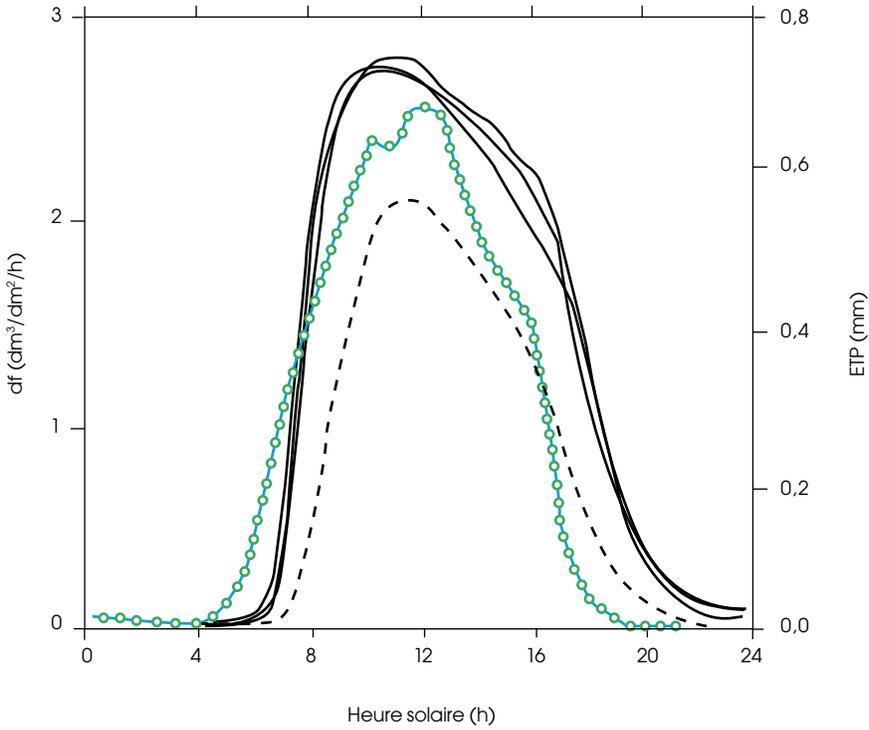
- la phénologie\* : interruption en hiver chez les essences décidues\*, quand les feuilles sont absentes, et diminution nette chez les essences sempervirentes\*, quand les conditions climatiques sont peu favorables (très faible rayonnement et/ou faible déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air ou température basse) ;
- la disponibilité en eau dans le sol qui induit alors une régulation de la transpiration (cf. *Fiche B*).

## Les caractéristiques intrinsèques des arbres

Il existe des différences de transpiration entre essences et au sein d'une même essence (Zapater, 2009 ; Zapater *et al.*, 2013). Les arbres ne transpirent pas de la

Diminution du rayonnement atteignant le peuplement, en fin de journée.





**Figure G1 : Exemple dans une futaie régulière de chêne sessile (*Quercus petraea*), de l'évolution journalière de la densité de flux de sève brute ( $df$ ) de différentes catégories d'arbres en conditions d'alimentation en eau non limitantes (d'après Bréda et al., 1993). Le peuplement est au stade perchis (32 ans), avec un indice foliaire de 6, une densité de 3 644 arbres/ha et une surface terrière de 25  $m^2$ /ha. La hauteur et la circonférence (à 1,30 m) moyennes sont de 13 m et 22,7 cm. Les mesures ont été réalisées sur 3 arbres dominants\* (trait plein) et sur 1 arbre dominé\* (trait tireté). Elles sont comparées avec l'évapotranspiration potentielle (ETP) mesurée au-dessus de la strate peuplement\* (trait vert). L'arbre dominé présente une cinétique de transpiration restreinte dans la journée : la densité de flux de sève augmente plus tard dans la matinée et diminue plus tôt dans l'après-midi.**

même façon du fait de leurs différences de surface d'aubier, de surface foliaire\*, de régulation stomatique, et d'architecture du houppier\* et de système racinaire (disposition et distribution de la surface foliaire dans le houppier et du système racinaire dans le sol) (cf. Fiche A).

Il est important de bien connaître les notions relatives au flux de sève brute

pour comprendre les variations de transpiration pour un arbre donné et entre les arbres. Le tronc est un lieu de mesure privilégié de la circulation de l'eau d'un arbre car il constitue la voie de passage obligatoire de la sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles. **La densité de flux de sève brute et son débit sont deux sources possibles de variation de la transpiration de l'arbre.**

▪ **Densité de flux de sève brute\*** (**df** ; **flux unitaire**) : elle correspond au **volume de sève brute qui circule par unité de surface d'aubier\* et par unité de temps** (par exemple en  $\text{dm}^3/\text{cm}^2$  d'aubier par heure). Différentes méthodes de mesure ont été développées (ONF, 1999).

▪ **Débit de sève brute\*** (**F** ; **flux total ou transpiration totale de l'arbre**) : il correspond au **volume de sève brute qui circule à travers la surface d'aubier de l'arbre par unité de temps** (par exemple en  $\text{m}^3/\text{heure}$  ou en  $\text{L}/\text{jour}$ ) (ONF, 1999). Il est calculé en multipliant **df** par la surface d'aubier (**As**, en  $\text{cm}^2$ ), soit **F = df \* As** (cf. Fiches C et E).

## Transpiration de l'arbre et statut social

En conditions d'alimentation en eau non limitantes, la transpiration varie considérablement entre des arbres de statut social\* contrasté. Ces variations sont directement liées à celles de la densité de flux de sève brute et à celles du débit de sève brute.

La variation de la densité de flux de sève brute en fonction du statut social est illustrée ci-après au travers de deux exemples (cf. Exemples G1 et G2).

### Exemple G1

(d'après Granier et al., 2000)

Dans les peuplements réguliers\* monospécifiques à indice foliaire élevé (peuplement fermé), les mesures journalières de densité de flux de sève sont similaires entre les arbres dominants et codominants\*, mais

plus faibles pour les arbres dominés (cf. Figures G1 et G3). Les écarts observés entre dominants et codominants par rapport aux dominés peuvent facilement s'expliquer par l'environnement microclimatique\* des houppiers des arbres : ceux des dominés se trouvent en grande partie sous les houppiers des arbres voisins et disposent donc d'un rayonnement réduit et limité dans la journée (demande climatique faible).

| Statut social | Classe de circonférence (cm) | Classe de hauteur (m) |
|---------------|------------------------------|-----------------------|
| Dominant      | 30 - 65                      | 14 - 18,2             |
| Codominant    | 20 - 29,9                    | 11,9 - 14             |
| Intermédiaire | 17 - 19,9                    | 11 - 11,8             |
| Dominé        | 9 - 16,9                     | 7,6 - 11              |

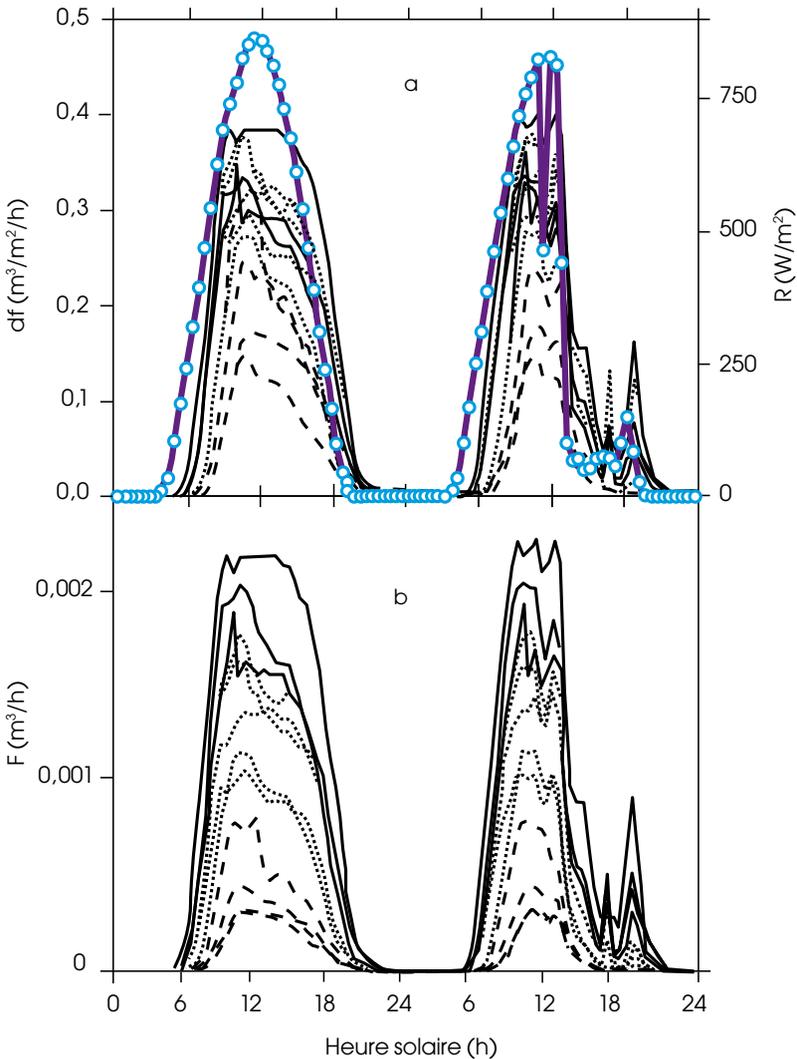
Figure G2 : Classes de circonférence et de hauteur pour les différentes catégories d'arbres dans le peuplement de hêtre décrit en Figure G3 (d'après Granier et al., 2000).



© Nathalie Bréda - INRA

**Exemple de dispositifs utilisés pour mesurer le flux de sève brute sur un chêne sessile en forêt de Champenoux lors d'une comparaison de méthodes.**

Les deux capteurs à gauche de la photo utilisent une impulsion de chaleur tandis que les capteurs à droite de la photo utilisent un chauffage continu. Pour décrire le flux de sève à différentes profondeurs dans l'aubier, les deux types de capteurs ont été installés entre 0-1 cm et 1-2 cm sous écorce.



**Figure G3: Exemple d'évolution journalière pour le hêtre a) de la densité de flux de sève brute ( $df$ ) et du rayonnement ( $R$ ), et b) du flux total ( $F$  ; transpiration totale de l'arbre) en conditions de disponibilité en eau non limitantes (d'après Granier *et al.*, 2000).**

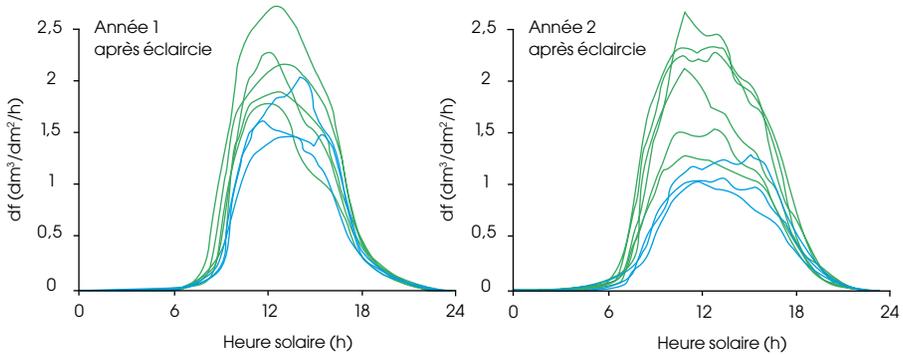
Représentation pour 12 hêtres de quatre catégories différentes (cf. Figure G2), pendant deux jours ensoleillés consécutifs en juin 1996. Ces hêtres appartiennent à un peuplement régulier pur d'une trentaine d'années, issu de régénération naturelle. Il est situé dans la forêt de Hesse, en France. Il a un indice foliaire de 6, une densité de 3 800 tiges/ha et une surface terrière de 20 m<sup>2</sup>/ha. La hauteur et la circonférence (à 1,30 m) moyennes sont de 13 m et 22,7 cm. Les mesures ont été réalisées sur des arbres dominants (trait plein), des arbres codominants (trait pointillé), des arbres intermédiaires et dominés (trait tireté). Elles sont comparées avec le rayonnement ( $R$ ) mesuré au-dessus de la strate peuplement (trait coloré).

**Exemple G2**

(d'après Bréda et al., 1995)

Bréda et al. (1995) comparent les densités de flux de sève brute d'arbres dominants, codominants et dominés dans un peuplement de chênes, dont une moitié a été éclaircie\* l'hiver précédent (indice foliaire passé de 6 à 3,3) et l'autre non (indice foliaire de 5). Comparativement aux témoins, la variabilité des densités de flux de sève augmente transitoirement entre les arbres éclaircis au cours des deux années suivant l'éclaircie (cf. Figure G4). Dans le peuplement sans éclaircie, les résultats des mesures sont similaires entre les dominants et les codominants, et inférieurs

chez les dominés, ce qui rejoint les constats de l'Exemple G1. En revanche, dans le peuplement qui vient d'être éclairci, Bréda et al. (1995) observent une variabilité importante entre les mesures des arbres, quel que soit leur statut social, au cours de l'année de l'éclaircie et de l'année suivante. Ils expliquent cette hétérogénéité par des différences au niveau de l'architecture des houppiers et de leur exposition à la lumière suite à l'éclaircie (demande climatique variable). On retient donc qu'après certains types d'éclaircie, il y a une évolution transitoire du comportement des différentes catégories d'arbres.



**Figure G4:** Effet de l'éclaircie sur les cinétiques journalières de densité de flux de sève brute (df) mesurées sur trois chênes sessiles en peuplement témoin (traits bleus) et six chênes en peuplement éclairci (traits verts) (d'après Bréda et al., 1995).

Sections de chêne après abattage laissant apparaître l'aubier (zone claire sous l'écorce), pour des chênes conduits en futaie (République Tchèque).



© Nathalie Bréda - INRA

**Le statut de l'arbre conditionne directement son accès à la lumière et à l'évapotranspiration potentielle.**



© Nathalie Bréda - INRA

Des différences importantes de surface d'aubier (et donc de surface foliaire) existent entre arbres (cf. Fiche E). **Ces différences influencent les écarts de transpiration totale entre les arbres selon leur statut**, puisque la transpiration totale est calculée à partir du produit entre la densité de flux de sève brute et la surface d'aubier (cf. Figure G3b et Exemple G3).

**Les arbres dominants transpirent plus que les arbres dominés** car ils ont des surfaces foliaires plus importantes et leurs houppiers sont placés dans des conditions de demande climatique plus forte (c'est-à-dire que les feuilles au sommet de la canopée\* sont soumises à un plus fort rayonnement, une température plus élevée et une vitesse de vent plus importante). **Les arbres dominés contribuent donc peu à la transpiration totale du peuplement lorsqu'ils sont dans un peuplement non éclairci au couvert\* fermé.** Si, lors d'une éclaircie dans un peuplement fermé, seuls des

arbres dominés sont enlevés (éclaircie par le bas), la diminution de la transpiration totale du peuplement est faible et le bilan hydrique du peuplement est peu impacté. Au contraire, l'exploitation des arbres dominants diminue très fortement la transpiration totale du peuplement. Il convient cependant de noter que les arbres dominés se retrouvent alors mieux exposés au rayonnement et leur transpiration individuelle augmente transitoirement (cf. Exemple G2). La transpiration totale du peuplement diminue cependant après éclaircie parce que le nombre d'arbres diminue, ce qui se traduit par une baisse de l'indice foliaire (cf. Fiche H, pour la prise en compte de la transpiration de la strate inférieure à 2 m).

### Exemple G3

(d'après Granier, 1987)

Granier (1987) mesure la densité de flux de sève et le flux total de trois douglas de statuts différents (dominant, codominant, dominé) dans la forêt d'Amance (près de

**Différences d'accès à la lumière en fonction du statut des arbres dans une jeune hêtraie mélangée, issue de régénération naturelle (forêt domaniale de Hesse, Moselle).**

*Lorsqu'on accède aux couronnes des arbres par une tour, l'accès au rayonnement et à l'ETP des arbres selon leur statut est visible.*



© Nathalie Bréda - INRA

**Mise en lumière de la strate inférieure du peuplement dans une futaie régulière de hêtre.**



Sylvain Gaudin - CRPF CA © CNPF

Nancy). Il s'agit d'une plantation équiennne de 24 ans qui n'a jamais été éclaircie, avec 2 545 tiges/ha et une surface terrière du peuplement de 45 m<sup>2</sup>/ha. La hauteur et la circonférence (à 1,30 m) moyennes sont de 17,5 m et 46 cm. En conditions d'alimentation en eau non limitantes, Granier (1987) observe une densité de flux de sève similaire pour l'arbre dominant et pour le codominant. Elle est beaucoup plus faible pour l'arbre dominé. Les surfaces d'aubier des trois douglas étant très différentes, la différence de transpiration entre ces

trois arbres est très forte, avec des valeurs maximales de 2,6 litres/heure (L/h) pour le dominant (circonférence de 64,1 cm), 1 L/h pour le codominant (circonférence de 49,9 cm) et seulement 0,2 L/h pour le dominé (circonférence de 33,9 cm). Au niveau de leurs cumuls journaliers, et à titre d'exemple, les calculs conduisent pour une journée bien ensoleillée à 1,6 litre d'eau transpirée pour le dominé, 8 litres pour le codominant et 22 litres pour le dominant, soit un rapport entre les extrêmes de 1 à 14.

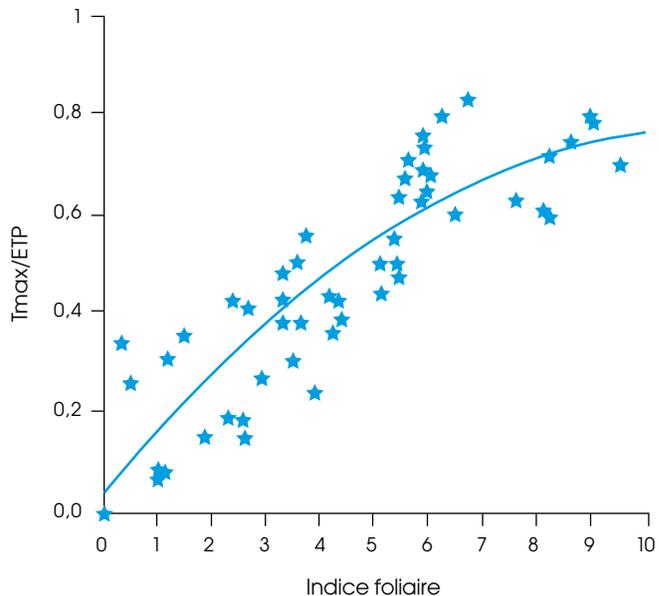
## Transpiration du peuplement et indice foliaire

Pour rappel, la surface foliaire totale d'un peuplement est calculée en additionnant les surfaces foliaires de tous les arbres qui le composent, toutes strates confondues. L'indice foliaire du peuplement est déduit en rapportant la surface foliaire du peuplement contenue dans la strate feuillée\* à la surface occupée par le peuplement (surface de la parcelle considérée) (cf. Fiche C).

À l'échelle du peuplement et en conditions d'alimentation en eau non limitantes, la transpiration est déterminée par la demande climatique et par la structure de la strate peuplement\* (surface

foliaire et agencement dans l'espace) (cf. Fiche A). En dessous d'un indice foliaire de 5, la transpiration d'un peuplement régulier monospécifique augmente quasi-linéairement avec l'indice foliaire. Au-delà, la pente de la relation diminue, puis elle atteint un plateau vers un indice foliaire autour de 6-7. Une augmentation supplémentaire d'indice foliaire n'engendre que peu d'augmentation de la transpiration du peuplement (Granier *et al.*, 1999). Elle atteint alors la fraction maximale d'évapotranspiration potentielle (cf. Figure G5). On peut expliquer cette valeur maximale par le fait qu'au-delà d'indices foliaires de 6-7, une importante fraction de la surface foliaire est faiblement éclairée (beaucoup d'auto-ombrage) et les feuilles à l'ombre transpirent très peu (Bréda, 1999 ; Granier *et al.*, 1999).

**Figure G5 : Relation entre la transpiration maximale (Tmax) rapportée à l'ETP et l'indice foliaire du peuplement en conditions d'alimentation en eau non limitantes** (d'après Granier *et al.*, 1999).  
Relation établie pour des peuplements monospécifiques d'espèces différentes.



### Principaux enseignements de la fiche

- En conditions d'alimentation en eau non limitantes, **les arbres transpirent différemment selon leur statut social\***, non pas parce qu'ils fonctionnent de manière différente - le principe de la transpiration\* est strictement le même - mais à cause de caractéristiques intrinsèques de l'arbre (surface foliaire\*, agencement dans l'espace, etc.) et de différences de demandes microclimatiques\* (à l'échelle des feuilles).
- La **nature des coupes** (éclaircie\* par le bas ou exploitation des dominants\*) influence alors très fortement le fonctionnement hydrique des arbres et la transpiration totale du peuplement. Ils contribuent ainsi à modifier le bilan hydrique\* d'un peuplement, même s'il convient de garder en mémoire que ce bilan ne résulte pas que des flux au niveau de l'arbre, mais également de la demande climatique\* et des flux au niveau du sol (contexte pédo-climatique\*), ces derniers étant indépendants du statut des arbres (cf. Fiche A).

### Références bibliographiques

- BRÉDA N. (1999). L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française*, LI-2, 135-150.
- BRÉDA N., COCHARD H., DREYER E. & GRANIER A. (1993). Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*): seasonal evolution and effects of a severe drought. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 1136-1143.
- BRÉDA N., GRANIER A. & AUSSENAC G. (1995). Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree Physiology*, 15, 295-306.
- GRANIER A. (1987). Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3, 309-320.
- GRANIER A., BIRON P. & LEMOINE D. (2000). Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100, 291-308.
- GRANIER A., BRÉDA N., BIRON P. & VILLETTE S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, 269-283.
- ONF – DIRECTION TECHNIQUE ET COMMERCIALE (1999). L'eau et la forêt. Synthèse bibliographique réalisée par Christine FORT. *Bulletin technique ONF*, n°37, 240 pages. ISBN 2-84207-165-4.
- ZAPATER M. (2009). Diversité fonctionnelle de la réponse à la sécheresse édaphique d'espèces feuillues en peuplement mélangé : approches écophysiological et isotopique. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 310 pages.
- ZAPATER M., BRÉDA N., BONAL D., PARDONNET S. & GRANIER A. (2013). Differential response to soil drought among co-occurring broad-leaved tree species growing in a 15-to 25-year-old mixed stand. *Annales des Sciences Forestières*, 70, 31-39.

### Pour en savoir plus

GEBAUER T., HORNA V. & LEUSCHNER C. (2008). Variability in radial sap flux density patterns and sapwood area among seven co-occurring temperate broad-leaved tree species. *Tree Physiology*, 28, 1821-1830.

GRANIER A. & GROSS P. (1987). Mesure du flux de sève brute dans le tronc du douglas par une nouvelle méthode thermique. *Annales des Sciences Forestières*, 44(1), 1-14.

GRANIER A. (1977). Transfert de sève brute dans le tronc des arbres aspects méthodologiques et physiologiques. *Annales des Sciences Forestières*, 34 (1), 17-45.

GRANIER A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42(2), 193-200.

GRANIER A., BRÉDA N., CLAUSTRES J.-P. & COLIN F. (1989). Variation of hydraulic conductance of some adult conifers under natural conditions. *Annales des Sciences Forestières*, 46 suppl., 357s-360s.

HÖLSCHER D., KOCH O., KORN S. & LEUSCHNER C. (2005). Sap flux of five co-occurring tree species in a temperate broad-leaved forest during seasonal soil drought. *Trees*, 19, 628-637.

INRA (2010). Biljou© – Modèle de bilan hydrique forestier. Fiche pédagogique « **Transpiration et régulation** » <<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fiche/transpiration-et-regulation>>. INRA, UMR Écologie et écophysiologie forestières.

Pour rappel, les différentes illustrations de cette fiche sont données à titre d'exemple. Elles sont dépendantes du contexte. Il convient par conséquent de ne pas en déduire des généralités.

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implications pour la gestion associées



Cette fiche apporte également des éléments de réponse aux questions n°13 et 15 (cf. pages 17 et 19).



# **Évapotranspiration réelle de la strate inférieure d'un peuplement**

## **Objectifs généraux**

**Comprendre comment se répartissent les racines dans le sol, en présence de plusieurs strates de végétation.**

**Apprécier l'incidence du développement de la végétation de la strate inférieure sur le bilan hydrique total du peuplement.**

## Prérequis

- Savoir distinguer les différentes strates\* d'un peuplement forestier\* (cf. Figure C1 de la Fiche C).
- Comprendre le processus de remplissage du réservoir d'eau du sol\* et la réserve à laquelle les plantes de la strate peuplement\* ont accès (cf. Fiche B).
- Savoir comment s'établit le bilan hydrique\* d'un peuplement forestier et quels sont les différents flux qui le composent (cf. Fiche A).
- Savoir ce qu'est l'indice foliaire\* et comment il varie dans l'espace et dans le temps (cf. Fiches C et D).
- Comprendre les principaux facteurs de variation de la transpiration\* des arbres et en particulier, la demande climatique\* (cf. Fiche G).

Cette fiche s'intéresse essentiellement à la végétation de la strate inférieure\*, qu'il s'agisse d'un peuplement régulier\* ou irrégulier\*, pur ou mélangé\*. **Son contenu s'appuie sur l'analyse d'une synthèse de plus de 200 articles scientifiques réalisée par Gobin (2014) dans sa thèse.** Il se concentre sur :

- la végétation herbacée ou ligneuse (arbustes, ronces, etc.) jusqu'à 2 m de haut et qui ne comprend donc pas le taillis (charme, noisetier, etc.) pour lequel il existe peu d'études ;
- les milieux boréal et tempéré essentiellement, les références pour le milieu méditerranéen étant encore limitées actuellement. **Seul le milieu tempéré est traité dans cette fiche.**

L'influence du mélange d'essences (cas des peuplements mélangés) ou de la structure\* (cas des peuplements irréguliers) sur le bilan hydrique du peuplement est traitée spécifiquement dans les Fiches I et J.

Développement de la strate inférieure d'un peuplement de chêne (molinie, fougère, houx, etc.).



## Préambule

Dans un peuplement forestier, il n'est pas rare de trouver, sous la strate arborée\*, une strate inférieure\* qui peut être constituée d'une strate herbacée\* ou d'une strate arbustive\* (équivalent au sous-étage\*), ou les deux (cf. *Figure C1 de la Fiche C*). Les espèces composant cette strate sont souvent des espèces plus ou moins tolérantes à l'ombre et donc présentes même sous des peuplements relativement fermés. Mais dans ce cas, leur couvert\* est assez modeste et n'influence alors pas significativement le bilan hydrique. Lorsque les peuplements sont plus ouverts (après une éclaircie\* par exemple) et donc plus lumineux, certaines de ces espèces, qualifiées de monopolistes\*, se développent alors fortement. C'est par exemple le cas de la ronce (*Rubus* section *fruticosi*), de certaines Graminées comme la molinie (*Molinia caerulea*), de certaines Fougères comme la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) ou de certaines Éricacées comme la callune (*Calluna vulgaris*) (cf. Balandier *et al.* 2006, pour une liste plus exhaustive). La présence de ces espèces reste cependant dépendante du contexte écologique et, même lorsqu'il leur est favorable, elles ne sont pas toujours observées. **Dans certaines situations, leur très forte colonisation du milieu fait qu'elles évapotranspirent de façon significative et contribuent négativement au bilan en eau du peuplement forestier ; il faut donc en tenir compte au moment de raisonner sa gestion.**

La transpiration des arbres de la strate arborée a été bien décrite dans la littérature scientifique. Ce n'est pas le cas de celle des végétaux de la strate inférieure. La transpiration de la végétation de cette strate, son interception\* des précipitations et l'évaporation du sol peuvent pourtant, dans certaines circonstances, représenter une proportion non négligeable de l'évapotranspiration réelle\* du peuplement (ETR).

**En conditions d'alimentation en eau non limitantes**, l'évapotranspiration réelle de la végétation de la strate inférieure n'est pas un problème majeur pour celle de la strate arborée. Elle ne vient pas déséquilibrer le bilan hydrique du peuplement.

**En conditions d'alimentation en eau limitantes**, la végétation herbacée peut contribuer de manière significative à une diminution plus rapide de la réserve en eau du sol\*. Le seuil de contrainte hydrique entraînant une régulation stomatique des arbres sera donc atteint plus tôt (cf. *Fiche B*).

## Les facteurs de variation de l'évapotranspiration de la strate inférieure

### Le microclimat dans la strate inférieure

La végétation de la strate arborée d'un peuplement crée pour sa strate inférieure des conditions climatiques spécifiques aussi appelées microclimat\*. Elles dépendent des conditions climatiques au-dessus de la canopée\* (rayonnement,

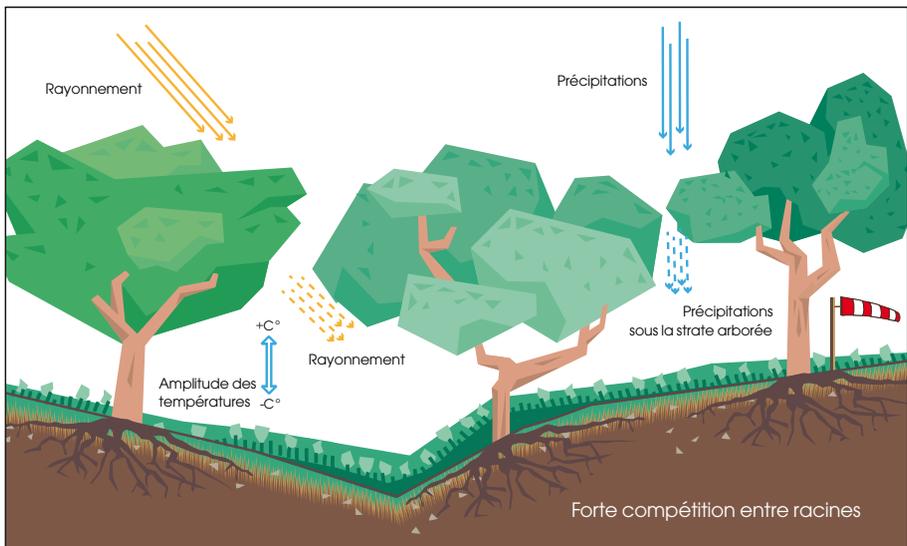
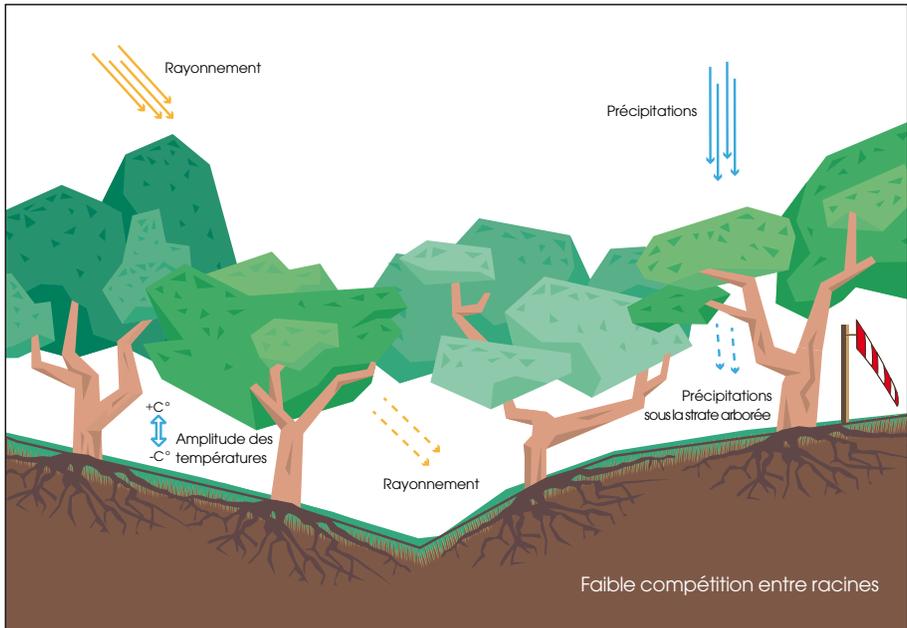


Figure H1 : Représentation théorique des conditions environnementales qui affectent la végétation de la strate inférieure pour deux indices foliaires du peuplement, l'un élevé (en haut) et l'autre plus faible (en bas) (d'après Gobin *et al.*, 2015).



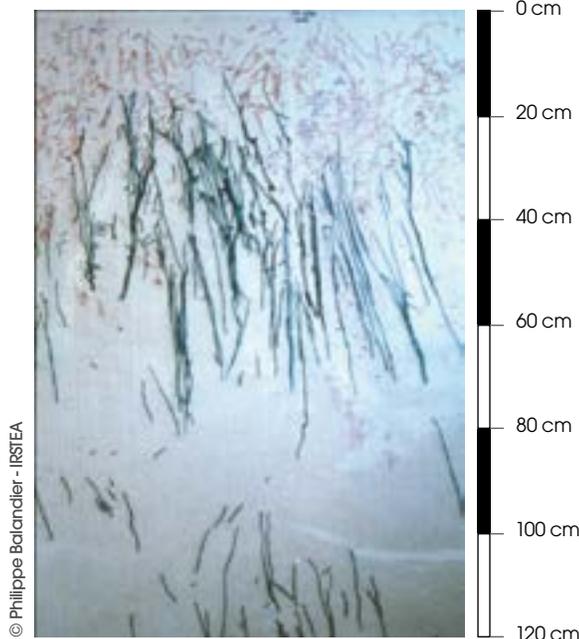
température, humidité de l'air, vitesse du vent et précipitations) et des caractéristiques du peuplement (structure\*, composition\*, indice foliaire, etc.) (cf. Figure H1). Pour rappel, le rayonnement, la température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent définissent la demande climatique (cf. Fiche G). **Le microclimat propre à la strate inférieure est le principal facteur qui influe sur son évapotranspiration.**

Parmi les variables climatiques qui conditionnent ce microclimat, le rayonnement dépend essentiellement de l'indice foliaire de la strate arborée et de l'agencement dans l'espace de ses houppiers\*. Ainsi, une **diminution de l'indice foliaire des arbres de la strate arborée** (après éclaircie par exemple), lorsqu'elle permet l'ouverture du peu-

plement, engendre un changement du microclimat de la strate inférieure :

- une augmentation du rayonnement et de la température et une diminution de l'humidité relative de l'air, avec pour corollaire une demande climatique plus forte ;
- des précipitations au sol plus élevées (moins d'interception par la strate arborée).

Cette augmentation des ressources\* (rayonnement, eau dans le sol) favorise la croissance de la strate inférieure. En revanche, la diminution de l'humidité de l'air consécutive à l'ouverture du peuplement peut engendrer une limitation de la transpiration (et de la photosynthèse), du fait de la fermeture des stomates\* (cf. Figure H1).



© Philippe Balandier - IRSTEA

**Représentation de la colonisation des différents horizons du sol par les racines des strates arborées (merisier, en noir) et herbacées (graminées, en rouge).**

*Les graminées colonisent principalement l'horizon de surface, le merisier les horizons plus profonds avec, entre les deux, une zone colonisée par les deux espèces. Enregistrement réalisé sur rhizotron.*

## La distribution des racines de la végétation de la strate inférieure

La distribution dans le sol des racines de la végétation des différentes strates du peuplement et la possibilité d'optimiser entre espèces l'espace de sol colonisé dépendent largement de la profondeur du sol et de ses propriétés physiques, dont la structure et la texture (cf. Fiche B). Cette distribution varie aussi selon les espèces considérées.

**Lorsque les propriétés du sol le permettent, les racines des arbres et de la végétation de la strate inférieure peuvent coloniser différents horizons du sol.** On observe alors, pour la végétation de la strate arborée, un enracinement souvent profond (mais extrêmement variable d'une espèce à l'autre). Pour la végétation de la strate inférieure, il est principalement localisé dans les horizons les plus superficiels du sol. **Cette colonisation de différents horizons du sol donne accès à un réservoir d'eau différent pour chacune des strates.** La compétition pour l'accès à la ressource s'opère uniquement dans le réservoir colonisé à la fois par la strate inférieure et par la strate arborée. Cependant, en saison de végétation, il peut arriver que l'eau issue des précipitations soit quasiment intégralement interceptée et absorbée par la strate herbacée prospectant les premiers horizons de sol. La recharge en eau des horizons plus profonds est ainsi fortement limitée (cf. exemple dans Balandier *et al.*, 2008). C'est le cas par exemple d'espèces herbacées telles que la molinie (*Molinia caerulea*) qui a une

densité racinaire exceptionnelle. Dans ce cas la recharge en eau de tous les horizons du sol est ralentie et différée à la période d'automne voire d'hiver.

**Lorsque les propriétés du sol ne permettent pas un enracinement profond,** les racines de la végétation de la strate arborée et celles de la strate inférieure peuvent être **concentrées ensemble dans les horizons supérieurs du sol.** Elles exploitent alors le **même réservoir d'eau** (cf. Exemple H1). Une forte concurrence pour l'eau dans ces horizons peut alors s'installer entre les différents végétaux, y compris les arbres, si les ressources sont limitées.

### Que faut-il retenir ?

- La diminution de l'indice foliaire des arbres de la strate arborée, lorsqu'elle engendre l'ouverture du peuplement, modifie le microclimat dans le sous-bois. L'augmentation des ressources (rayonnement, précipitations) va généralement favoriser la croissance de la végétation de la strate inférieure.
- Si la profondeur de sol le permet, les systèmes racinaires des arbres et des herbacées vont afficher une certaine ségrégation. Les racines des herbacées se concentrent plutôt dans les horizons supérieurs tandis que celles des arbres sont dans les horizons inférieurs. Elles définissent ainsi deux réservoirs d'eau bien distincts.
- Si la profondeur de sol est faible, arbres et herbacées partagent les mêmes horizons du sol et sont en compétition pour le même réservoir d'eau.



Sylvain Gaudin - CRPF CA © CNPF

Prospection du sol par les racines des différentes strates du peuplement dans un sol colluvial limoneux profond.

## Contribution de la strate inférieure à l'évapotranspiration totale du peuplement

### Contribution moyenne

Une revue de la littérature portant sur 42 études montre une contribution de la végétation de la strate inférieure à l'évapotranspiration réelle du peuplement variant de 10% à 75% (Gobin, 2014). Cette large gamme est due à des différences de techniques de mesure, de composition en espèces de la strate inférieure et de la strate arborée, aux saisons étudiées, et à la durée des mesures.

Selon la période considérée, la contribution de la végétation de la strate inférieure à l'évapotranspiration réelle du peuplement représente en moyenne :

- 31% ( $\pm 9\%$  ;  $n = 8$  études) de l'évapotranspiration réelle du peuplement sur une année entière ;
- 34% ( $\pm 15\%$  ;  $n = 33$  études) de l'évapotranspiration réelle du peuplement, lorsque seul l'été ou la saison de végétation sont pris en compte.

Pour les forêts de conifères étudiées, cette contribution moyenne représente 36% ( $\pm 14\%$  ;  $n = 33$  études) sur une base annuelle, ce qui est significativement plus élevé que celle des forêts de feuillus qui est de 23% ( $\pm 10\%$  ;  $n = 8$  études).

La contribution de la végétation de la strate inférieure à l'évapotranspiration totale du peuplement peut donc être importante et le forestier doit l'intégrer dans son raisonnement quand il gère un peuplement avec présence d'un fort couvert d'espèces particulièrement monopolistes avec l'objectif d'améliorer son bilan hydrique.

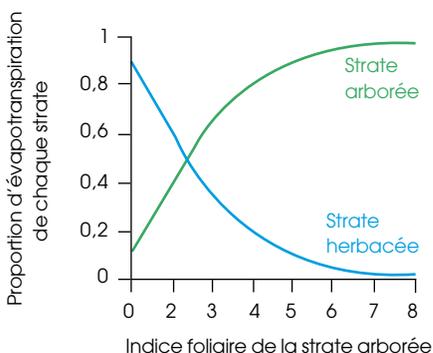


Figure H2 : Évapotranspiration relative de la strate herbacée et de la strate arborée en fonction de l'indice foliaire de la strate arborée (d'après Gobin et al., 2015, sur des données extraites de Gobin, 2014). Le cas représenté ici est de la molinie sous couvert de chêne en saison feuillée.

## Contribution maximale

La contribution de la strate inférieure à l'évapotranspiration totale du peuplement est maximale quand l'indice foliaire de la strate arborée est faible. On distingue deux cas :

▪ **Toute la saison (cas de peuplements ouverts, après éclaircie par exemple).**

Comme évoqué plus haut, la demande climatique à laquelle est exposée la végétation de la strate inférieure est relativement faible lorsque le peuplement est assez fermé (indice foliaire de la strate arborée plus ou moins supérieur à 3). L'évapotranspiration réelle de la strate inférieure est alors modeste. Si le peuplement est beaucoup plus ouvert, avec un couvert arboré discontinu (indice foliaire de la strate arborée plus ou moins inférieur à 3), alors la contribution de la strate herbacée à l'évapotranspiration réelle du peuplement augmente très fortement (cf. *Figure H2*). Cette augmentation de l'évapotranspiration n'est pas seulement due à un couvert plus important des espèces de la strate herbacée mais surtout à la très forte augmentation de la de-

mande climatique. Ces espèces sont en effet souvent tolérantes à l'ombre et leur couvert est déjà bien développé pour des indices foliaires de la strate arborée bien supérieurs à 3 (cf. cas de la ronce dans Balandier *et al.*, 2013).

▪ **Transitoirement (avant le débourrement des arbres, pour les espèces à feuilles caduques).**

L'évapotranspiration maximale de la strate inférieure est généralement mesurée durant la période qui précède le débourrement des arbres, quand la teneur en eau du sol et le rayonnement sous la strate arborée sont élevés (cf. *Exemple H1*). Après le débourrement, les conditions microclimatiques sous la strate arborée changent, avec une réduction du rayonnement au niveau de la strate inférieure directement proportionnelle à l'indice foliaire de la strate arborée. L'évapotranspiration de la strate inférieure diminue alors fortement. Même en absence de fortes variations de l'indice foliaire de la strate arborée, comme c'est le cas pour les résineux, l'évapotranspiration de la strate inférieure peut

**Strate herbacée  
d'un peuplement  
de chêne envahie  
par la molinie.**

*L'hétérogénéité des  
taches de lumière  
illustre l'atténuation  
du rayonnement par  
l'indice foliaire du  
peuplement.*



présenter des variations saisonnières liées à la phénologie\* des espèces en présence et notamment dans le cas des espèces décidues\* comme la molinie (cf. Exemple H2) ou la fougère.

### Exemple H1

(d'après Bréda & Peiffer, 1999)

Bréda & Peiffer (1999) ont mesuré dans un peuplement de chêne sessile (*Quercus petraea*) les variations d'indice foliaire du chêne et de transpiration des graminées (cf. Figure H3). La phénologie «décidue» du chêne influence directement les variations au cours de la saison de la fraction de rayonnement reçu par la strate inférieure. Une diminution de la transpiration de la strate herbacée (graminées) intervient dès que les arbres sont feuillés : l'indice foliaire du peuplement augmente alors et la transpiration de la strate herbacée diminue puisqu'elle reçoit un rayonnement beaucoup plus faible.

### Exemple H2

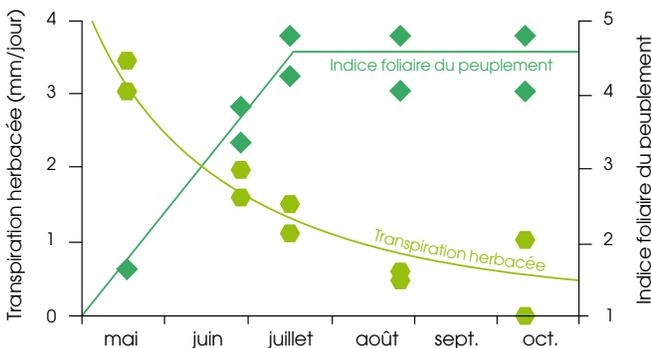
(d'après Loustau et Cochard, 1991)

Dans cet exemple, la strate arborée est composée d'une espèce de conifère à faible indice foliaire (autour de 4) avec peu de variations saisonnières de l'indice foliaire de la strate arborée : la fraction de rayonnement qui atteint la strate inférieure est constante. Il existe cependant

des variations saisonnières de la transpiration de la molinie qui se trouve dans la strate inférieure et qui sont liées à sa phénologie propre. Loustau et Cochard (1991) ont ainsi montré que la surface foliaire\* de la molinie (*Molinia caerulea* L.) était faible au début de la saison de végétation dans des peuplements de pin maritime (*Pinus pinaster*). Du fait de cette faible surface foliaire, l'évapotranspiration réelle est réduite. Ensuite, en cours de saison (de juin à juillet), l'évapotranspiration de la molinie est d'environ 1 mm/jour. En août, elle chute à 0,6 mm/jour en raison du déficit en eau du sol puis sa sénescence réduit encore l'évapotranspiration à 0,4 mm/jour fin septembre.

## La strate herbacée peut-elle renforcer les conséquences d'une sécheresse ?

Toutes les espèces végétales, herbacées ou arborées, ne réagissent pas de la même façon en présence d'une sécheresse, en particulier au niveau de leur régulation stomatique. Or, un certain nombre d'espèces herbacées, les Graminées en particulier, sont réputées pour ajuster leur transpiration en réponse à un stress édaphique\* plus tardivement que nombre d'espèces arborées (cf. Fiches B



**Figure H3 :** Exemple d'évolution saisonnière de la transpiration en eau d'une strate herbacée dense et continue et de l'indice foliaire de la strate arborée d'un peuplement de chênes (d'après Bréda et Peiffer, 1999).

et G). Il s'ensuit que ces espèces herbacées continuent à transpirer une plus forte quantité d'eau que les espèces arborées en période de contrainte hydrique, accentuant d'autant la contrainte édaphique lorsque arbres et herbacées partagent les mêmes horizons de sol.

### Effet du contrôle de la végétation de la strate inférieure

De manière générale, la suppression de la végétation de la strate inférieure supprime de fait sa transpiration et conduit ainsi à une amélioration du bilan hydrique total du peuplement. Toutefois, dans certains cas, l'élimination de cette végétation peut se traduire uniquement par un partitionnement\* différent des composantes du bilan hydrique (cf. Fiche A) : l'évaporation du sol augmente, tout comme la transpiration des arbres.

#### Que faut-il retenir ?

- La végétation de la strate inférieure (moins de 2 m de hauteur) a, dans certaines circonstances, une contribution significative dans l'évapotranspiration totale du peuplement.
- L'évapotranspiration de la strate inférieure est souvent maximale au printemps, avant le débourrement des arbres (décidus) et lorsque la réserve en eau du sol est élevée.
- L'ouverture du couvert de la strate arborée, en particulier lorsque l'indice foliaire de cette strate atteint une valeur inférieure à 2 ou 3, augmente le partitionnement au profit de la végétation de la strate inférieure. Mais cet indice foliaire correspond à un couvert arboré disjoint, constitué d'arbres plus ou moins isolés, ou à des essences à faible indice foliaire telles que les pins.
- La suppression de la végétation de la strate inférieure peut parfois améliorer le bilan en eau total du peuplement.



Concurrence pin-molinie pour le partage de la ressource en eau.

### Principaux enseignements de la fiche

- Le développement de la végétation de la strate inférieure\*, en terme de biomasse, de couvert\* et d'indice foliaire\* est favorisé par la diminution de l'indice foliaire de la strate arborée\*.
- L'augmentation des ressources\* disponibles (lumière, eau) dans le sous-bois lors d'éclaircies\* est favorable à la croissance de la végétation de la strate inférieure.
- La végétation de la strate inférieure a une grande capacité pour exploiter l'eau du sol.
- En moyenne, la contribution de la végétation de la strate inférieure à l'évapotranspiration\* totale du peuplement est de 30 %.
- La contribution de la strate inférieure à l'évapotranspiration totale du peuplement ne devient prédominante et supérieure à celle des arbres que pour des peuplements très ouverts dont l'indice foliaire de la strate arborée est plus ou moins inférieur à 3.

### Références bibliographiques

- BALANDIER P., COLLET C., MILLER J.H., REYNOLDS P.E. & ZEDACKER S.M. (2006). Designing forest vegetation management strategies based on the mechanisms and dynamics of crop tree competition by neighbouring vegetation. *Forestry*, 79, 1, 3-27.
- BALANDIER P., DE MONTARD F.-X. & CURT T. (2008). Root competition for water between trees and grass in a silvopastoral plot of ten-year-old *Prunus avium*. In : «Ecological basis of agroforestry», D.R. Batish, R.K. Kohli, S. Jose and H.P. Singh, eds., CRC Press, Boca Raton, FL, USA, Chapter 13, 253-270.
- BALANDIER P., MARQUIER A., CASELLA E., KIEWITT A., COLL L., WEHRLÉN L. & HARMER R. (2013). Architecture, cover and light interception by bramble (*Rubus fruticosus*), a common understorey weed in temperate forests. *Forestry*, 86, 39-46.
- BRÉDA N. & PEIFFER M. (1999). Étude du bilan hydrique des chênaies de la forêt domaniale de la Harth (Haut-Rhin) et impact des épisodes de sécheresses sur la croissance radiale des chênes. Rapport scientifique, Convention ONF - INRA, Nancy, 67 pages.
- GOBIN R. (2014). Contribution relative de la végétation du sous-bois dans le bilan hydrique des placettes forestières soumises aux changements climatiques et de pratiques. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, Orléans, Irstea, Nogent-sur-Vernisson.
- GOBIN R., BALANDIER P., KORBOULEWSKY N., DUMAS Y., SEIGNER V. & RICHTER C. (2015). Une strate herbacée monopoliste : quelle concurrence vis-à-vis de l'eau pour le peuplement adulte ? *Rendez-vous Techniques ONF*, 48-49, 17-22.
- LOUSTAU D. & COCHARD H. (1991). Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de pin maritime à molinie (*Molinia caerulea* (L.) Moench). *Annales des Sciences Forestières*, 48 (1), 29-45.

ZAPATER M. (2009). Diversité fonctionnelle de la réponse à la sécheresse édaphique d'espèces feuillues en peuplement mélangé : approches écophysiologique et isotopique. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 310 pages.

ZAPATER M., BRÉDA N., BONAL D., PARDONNET S. & GRANIER A. (2013). Differential response to soil drought among co-occurring broad-leaved tree species growing in a 15-to 25-year-old mixed stand. *Annales des Sciences Forestières*, 70, 31-39.

### Pour en savoir plus

BAKKER M.R., AUGUSTO L. & ACHAT D.L. (2006). Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites. *Plant and Soil*, 286, 37-51.

GAUDIO N., BALANDIER P. & MARQUIER A. (2008). Light-dependent development of two competitive species (*Rubus idaeus*, *Cytisus scoparius*) colonizing gaps in temperate forest. *Annales des Sciences Forestières*, 65 (1), 1-5.

GAUDIO N., BALANDIER P., DUMAS P. & GINISTY C. (2011). Régénération naturelle du pin sylvestre sous couvert : contrainte de la végétation monopoliste de sous-bois en milieu acide. *Rendez-vous Techniques ONF*, n°33-34, 18-24.

GOBIN R., KORBOULEWSKY N., DUMAS Y. & BALANDIER P. (2015). Transpiration of four common understory plant species according to drought intensity in temperate forests. *Annales des Sciences Forestières*, 72, 8, 1053-1064.

Pour rappel, les différentes illustrations de cette fiche sont données à titre d'exemple. Elles sont dépendantes du contexte. Il convient par conséquent de ne pas en déduire des généralités.

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implications pour la gestion associées



Cette fiche apporte également des éléments de réponse aux questions : n°11, 12, 13 et 17 (cf. pages 17 et 19).



# **Bilan hydrique d'un peuplement mélangé**

## **Objectif général**

Apprécier les particularités du bilan hydrique d'un peuplement régulier mélangé, en comparaison avec un peuplement régulier monospécifique situé dans un contexte pédo-climatique similaire.

## Prérequis

- Savoir distinguer les différentes strates\* d'un peuplement forestier\* (cf. *Figure C1 de la Fiche C*).
- Comprendre le processus de remplissage du réservoir d'eau du sol\* et la réserve à laquelle les plantes de la strate peuplement\* ont accès (cf. *Fiche B*).
- Savoir comment s'établit le bilan hydrique\* d'un peuplement forestier et quels sont les différents flux qui le composent (cf. *Fiche A*).
- Comprendre les principaux facteurs de variation de la transpiration\* des arbres et, en particulier, la demande climatique\* (cf. *Fiche G*).

Cette fiche s'intéresse au cas des peuplements réguliers mélangés. Elle ne traite pas de la présence éventuelle d'une strate inférieure\* (strate herbacée\* et/ou strate arbustive\*) qui est abordée dans la *Fiche H*. Le cas spécifique de peuplements à structure irrégulière\* est traité dans la *Fiche J*.

## Préambule

### Particularités d'un peuplement mélangé

Pour mémoire, un peuplement mélangé\* est, au sens large, défini comme un peuplement forestier composé au minimum de deux essences (mais le nombre d'espèces n'est pas limité) dont aucune n'atteint le seuil de pureté retenu (en général, couvert\* ou surface terrière supérieur(e) à 75%). Le mélange peut

être constitué d'essences feuillues, d'essences résineuses ou d'un mélange des deux. Il peut être organisé pied à pied, par bouquets, par lignes, par étages\*, etc. (Bastien & Gauberville, 2011).

### Bilan hydrique et productivité

Des études scientifiques ont montré que les peuplements mélangés sont parfois, bien que de façon non systématique, un peu plus productifs que la moyenne obtenue pour les peuplements purs des espèces considérées dans le mélange (ex : Morin *et al.*, 2011). L'étude de cet effet positif n'est pas l'objet de cette fiche. Il est cependant important de souligner qu'il y a souvent confusion entre cette amélioration de la productivité\* du peuplement parfois observée dans les forêts mélangées, et l'amélioration du bilan hydrique du peuplement en tant que tel (économie de la ressource\* en eau). En



© Jacques Becquey - IDF

Sapinière-hêtraie de montagne à bois moyens, en mélange pied à pied (Vercors).

réalité, l'augmentation de la productivité d'un peuplement peut s'accompagner de trois phénomènes :

- soit d'une augmentation de la quantité des ressources consommées : eau, lumière ou nutriments. Dans ce cas, le bilan hydrique n'est donc pas amélioré ;
- soit d'une meilleure efficacité d'utilisation de ces ressources. Dans ce cas, le bilan hydrique peut alors être amélioré. Par exemple, une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau permet à l'arbre d'assimiler la même quantité de carbone au cours de la photosynthèse, tout en consommant moins d'eau ;
- soit les deux précédentes options interviennent en même temps et il est alors impossible d'évaluer l'effet sur le bilan hydrique.

Ainsi, quelle que soit l'origine de l'augmentation de productivité, elle n'indique pas forcément que le bilan hydrique du peuplement a été au final amélioré.

### Les limites d'une comparaison du bilan hydrique entre peuplements purs et mélangés

Comparer le bilan hydrique d'un peuplement mélangé avec celui de peuplements purs des espèces considérées dans le mélange requiert la mise en place de dispositifs de recherche complexes et la réalisation de mesures des différentes composantes du bilan hydrique. Ces mesures doivent prendre en compte le changement d'échelle (de l'arbre au peuplement) entre le fonctionnement des espèces en interaction et la résultante à l'échelle du couvert.

De tels programmes de recherche permettant d'acquérir ce type de données commencent tout juste à aborder ces questions par la mise en place de dispositifs, mais les résultats ne sont pas encore disponibles. Les connaissances sur les spécificités du bilan hydrique des peuplements réguliers mélangés sont donc actuellement quasi-inexistantes.



Mélange  
pied à pied  
de chêne  
pédonculé,  
chêne sessile  
et pin sylvestre,  
en plaine  
(forêt d'Orléans).

Cette fiche a donc la particularité de ne pas répondre directement à la question posée. Elle présente les connaissances disponibles sur le fonctionnement hydrique des espèces d'arbres dans les peuplements mélangés. Elle s'intéresse en particulier aux caractéristiques des espèces qui pourraient être modifiées quand celles-ci interagissent avec d'autres espèces dans les peuplements mélangés. Il y est aussi fait état des difficultés de comparer peuplements mélangés et peuplements purs. Le manque d'informations sur le changement d'échelle entre la réponse individuelle des espèces et la réponse globale du peuplement est le frein principal pour envisager de répondre pleinement à la question ici posée. En effet, afin d'évaluer l'effet bénéfique, neutre ou négatif du peuplement mélangé (composé de n espèces) par rapport au peuplement pur, une des méthodes les plus utilisées est de comparer le fonctionnement observé dans le peuplement mélangé avec celui d'un peuplement hypothétique formé à partir des n peuplements purs auxquels on affecte un coefficient pondérateur de 1/n (Loreau & Hector, 2001).

## Accès à la ressource en eau du sol

### Capacités d'enracinement propres aux espèces

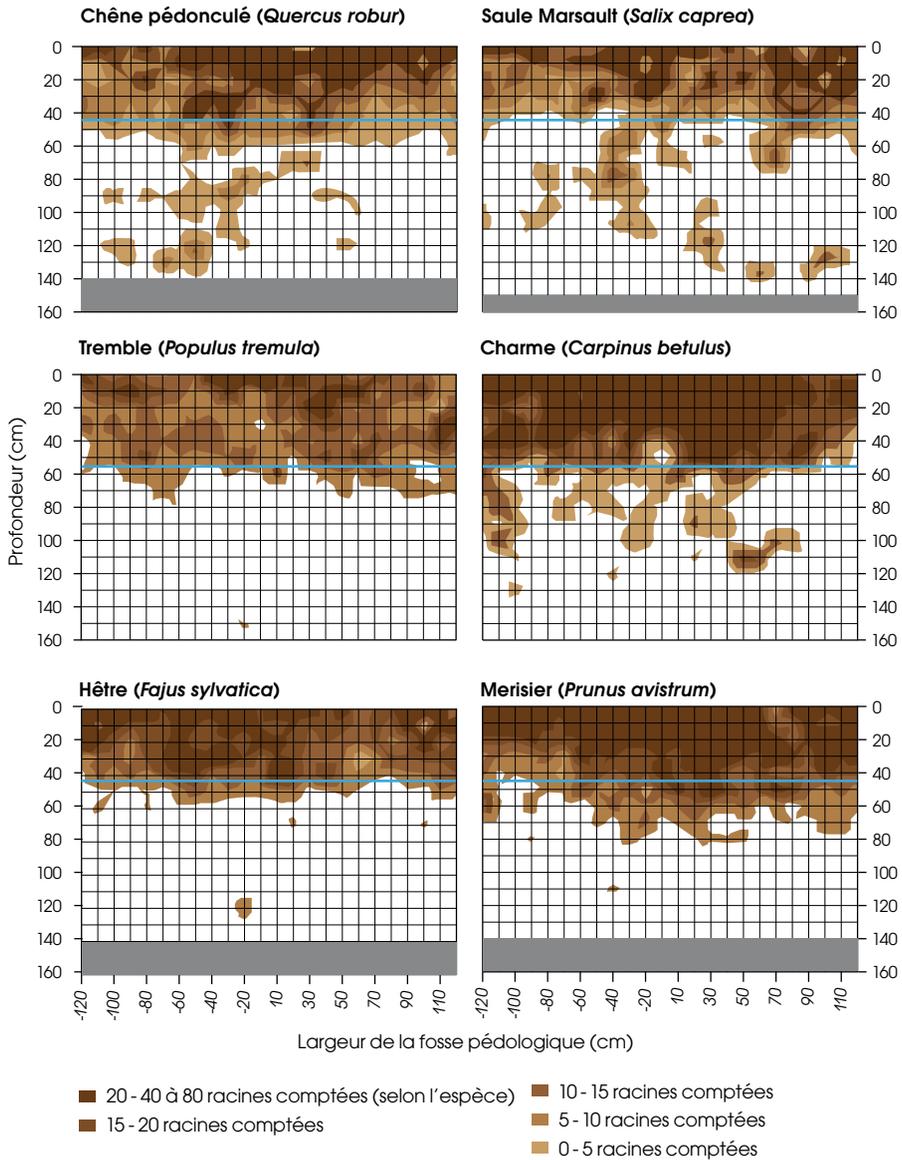
La capacité des racines des différentes espèces à coloniser des horizons plus ou moins profonds dépend de leur sensibilité aux propriétés physiques, chimiques et hydrodynamiques du sol. Des diffé-

rences de profondeur d'enracinement impactent le fonctionnement de l'arbre quand il se trouve en condition de sécheresse : **le ressenti de la sécheresse du sol\*** et **la régulation potentielle de la transpiration des arbres (diminution de la circulation de la sève brute) dépendent en effet de l'accès des racines à l'eau** (cf. Fiches B et G).

Une étude menée par Bréda *et al.* (2008) en régénération naturelle pour 6 espèces vivant en interaction\* illustre les différentes capacités d'exploration du sol des espèces (cf. Figure 1f). Les espèces en mélange présentent des distributions racinaires verticales très différentes. Le développement racinaire de certaines d'entre elles (tremble, hêtre, merisier) semble être freiné en particulier par l'horizon d'accumulation de l'argile.

À partir de ce type d'informations sur le développement racinaire des espèces et de mesures de la transpiration réalisées au cours d'un été sec, les espèces peuvent être classées selon leur **comportement en condition de sécheresse** (Zapater *et al.*, 2013) :

- celles qui diminuent fortement leur transpiration et qui ont un système racinaire superficiel (ex. : charme et hêtre) ;
- celles qui réduisent fortement leur transpiration malgré un système racinaire profond (ex. : bouleau) ;
- celles qui ne réduisent pas leur transpiration, à cause en particulier d'un système racinaire profond (ex. : chêne pédonculé, saule).



**Figure 11 : Cartographie des racines fines (diamètre <math>< 3\text{ mm}</math>) de 6 espèces d'arbres co-occurentes dans un jeune peuplement mélangé issus de régénération naturelle (Lorraine) (d'après Bréda *et al.*, 2008).**

La ligne bleue représente la limite supérieure de l'horizon d'accumulation d'argile (Bt), rupture texturale brutale avec forte augmentation de la densité apparente du sol. La bande grise représente le plancher de chaque fosse pédologique réalisée pour l'étude. Pour le tremble et le charme, ce plancher n'apparaît pas sur la figure car il est au-delà de 160 cm de profondeur.

## Accès différencié à la réserve utile au sein du mélange

Le concept de réserve utile en eau\* (RU) d'un peuplement mélangé est le même que celui en peuplement pur (cf. Fiche B). Cependant, ce qui nous intéresse ici, c'est de comparer celle d'un peuplement mélangé avec celles de peuplements purs, pour les espèces qui composent ce mélange.

En peuplement mélangé, **les différentes espèces sont en interaction\* et elles partagent l'accès aux ressources en eau du sol**. Cette interaction peut être à l'origine, chez certaines d'entre elles, et quand les propriétés du sol le permettent, d'un changement de profondeur d'enracinement pour une ou plusieurs espèces. Les racines des espèces en interaction peuvent explorer des horizons différents du fait de la détection de la présence des racines d'une ou de plusieurs autres espèces, ou du fait des conditions du sol différentes (sol plus sec si densité plus forte de racines). Ce comportement a été observé chez le hêtre par exemple, en interaction avec le chêne et des conifères dans une plantation de 15 ans en Allemagne (Grossiord *et al.*, 2014a). On parle alors de «**différenciation de niche écologique**» pour l'acquisition de l'eau, ou de **complémentarité**. Cette colonisation racinaire du sol plus en profondeur augmente de fait la taille du réservoir d'eau du sol\* accessible au peuplement. **Le peuplement régulier mélangé a ainsi accès à un volume d'eau plus important** qu'un peuplement régulier pur situé dans le même contexte pédo-

climatique\*. La réserve utile en eau du sol extractible par les racines est elle aussi augmentée.

## Effets du mélange sur les composantes du bilan hydrique

Compte tenu des différences de prospection racinaire entre les espèces, on peut légitimement faire l'hypothèse que le bilan hydrique des peuplements mélangés peut être amélioré par rapport à celui d'un peuplement pur. En effet, ayant accès à un réservoir d'eau important et par conséquent à une réserve utile en eau plus grande, on peut supposer que, lors d'un épisode de sécheresse, la ressource en eau risque de moins manquer



©Vincent Seigner – IRSTEA

Mise en évidence de la prospection racinaire des arbres sur un profil de fosse pédologique, pour un mélange de chênes et de pins (forêt d'Orléans).

pour le peuplement mélangé. La réalité n'est pas aussi simple, car il convient de considérer les autres composantes et flux de ce bilan (cf. Fiche A) :

- le réservoir d'eau du sol : il doit avant tout avoir été alimenté suffisamment par les pluies pour que les racines puissent y puiser l'eau dont elles ont besoin ;
- l'évapotranspiration\* des arbres : elle joue un rôle important dans la consommation de la ressource. Si elle est forte, alors la vitesse de diminution de la réserve utile en eau sera grande, quelle que soit sa taille. Ainsi, si le mélange d'espèces a une réserve utile en eau plus forte, il aura, à indice foliaire\* égal, une plus forte évapotranspiration réelle\* par rapport à un peuplement régulier monospécifique car les mécanismes de régulation se mettront en place plus tard dans la saison. Le peuplement atteindra donc plus tardivement le seuil de régulation de la transpiration ( $REW = 0,4$  ; cf. Fiche B), mais il aura consommé au final plus d'eau qu'un peuplement pur, et réparti sur

une plus longue période. Dans les régions où la protection de la ressource en eau est quantitativement un enjeu majeur, favoriser les peuplements mélangés pourrait alors s'avérer néfaste.

## Agencement des houppiers dans l'espace et évapotranspiration

Dans les peuplements mélangés, l'agencement dans l'espace des houppiers\* des différentes espèces qui possèdent des architectures différentes peut varier par rapport à celui des espèces dans des peuplements purs (Jucker *et al.*, 2015). Cela conduit à une **stratification verticale de la strate arborée\*** et à un **effet de tamponnement du microclimat\* différents** (fraction plus ou moins importante du feuillage éclairé, réduction du vent, de la température, etc.). Cet effet est dû à l'irrégularité introduite dans la structure verticale en raison du mélange d'essences. Il pourrait être obtenu aussi, mais de façon plus marquée, avec un



Peuplement mélangé de hêtres et chênes sur versant (Corrèze, Limousin).

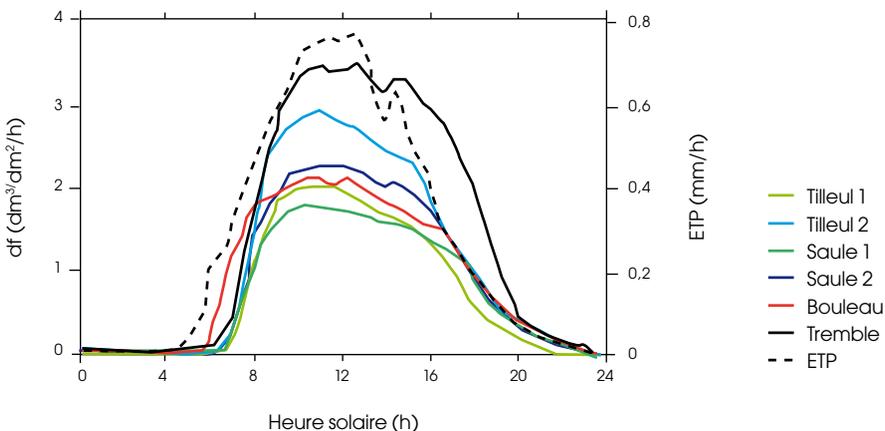
peuplement monospécifique étagé de type irrégulier (cf. Fiche J). Cet effet peut engendrer alors des différences d'évapotranspiration entre peuplements mélangé et monospécifique (cf. Fiche G), car la surface évaporatrice diffère. Le bilan hydrique du peuplement est donc influencé. **Mais il est impossible à ce stade des connaissances d'identifier si cet effet est généralement positif ou négatif dans les peuplements mélangés.**

## Illustration de la diversité d'utilisation de l'eau entre espèces

La comparaison de la transpiration d'arbres d'espèces différentes poussant dans les mêmes conditions de sol et de climat est peu fréquente dans la littérature. La Figure 12 présente les cinétiques de variation des densités de flux de sève\*

d'arbres (cf. Fiches E et G) obtenues lors de journées ensoleillées dans une parcelle mélangée de la forêt d'Amance, en Lorraine, sur quatre espèces différentes : saule, tilleul, tremble et bouleau (Granier *et al.*, 2002). La forme générale de ces courbes est voisine, avec un maximum centré sur 12 h (heure solaire), correspondant au maximum de la demande climatique. Toutefois, les niveaux de densité de flux sont différents selon les espèces : le tremble, mesuré ici, présente de plus fortes valeurs - et sa transpiration se poursuit plus tard en fin d'après-midi - que pour les autres espèces. On peut donc en conclure qu'il y a des différences de transpiration entre espèces au sein d'un mélange, plus ou moins fortes selon les espèces.

L'exemple de la Figure 12 illustre les différences de transpiration entre espèces quand les arbres coexistent en peuple-



**Figure 12 : Représentation des variations journalières de la densité de flux de sève (df) entre différentes espèces d'un peuplement mélangé et de l'évapotranspiration potentielle (ETP)** (d'après Granier *et al.*, 2002).

Mesures réalisées lors d'une journée ensoleillée, en forêt d'Amance (Lorraine).



**Agencement dans l'espace des houppiers d'un peuplement mélangé composé de feuillus et de résineux (Ussades-et-Rieuford, Ardèche).**

ment mélangé. Au-delà de ces différences, il est important de comprendre la manière dont évoluent ces niveaux de transpiration en mélange, lors d'un épisode de sécheresse. Pour répondre à ce type de question, divers travaux ont été menés pour comparer la transpiration (mesurée à travers la densité de flux de sève) d'espèces en peuplements purs et en peuplements mélangés dans des conditions de sol et de climat similaires. Deux d'entre eux sont présentés dans les *Exemples 11 et 12*. Ils s'intéressent aux différences de réaction entre espèces, en termes de transpiration, lors d'épisodes de sécheresse.

### **Exemple 11**

(d'après Grossiord et al., 2014b)

Dans la région de Toscane, en Italie, Grossiord et al. (2014b) ont suivi l'évolution de la transpiration du chêne sessile (*Quercus petraea*) et du chêne chevelu (*Quercus cerris* L.) au cours d'une sécheresse estivale, dans des peuplements où ces deux essences se trouvaient soit en mélange,

soit en peuplement pur (cf. Figure 13a). Dans chacun des cas, les deux essences montrent une diminution de leur transpiration au cours de la sécheresse. Cependant, la diminution pour le chêne chevelu est beaucoup plus forte en mélange qu'en peuplement pur, alors que la différence entre mélange et peuplement pur pour le chêne sessile est faible. Ce résultat semble indiquer que le mélange impacte ici négativement l'accès aux ressources hydriques pour le chêne chevelu, alors que la présence du chêne chevelu n'a pas d'impact sur l'alimentation en eau du chêne sessile.

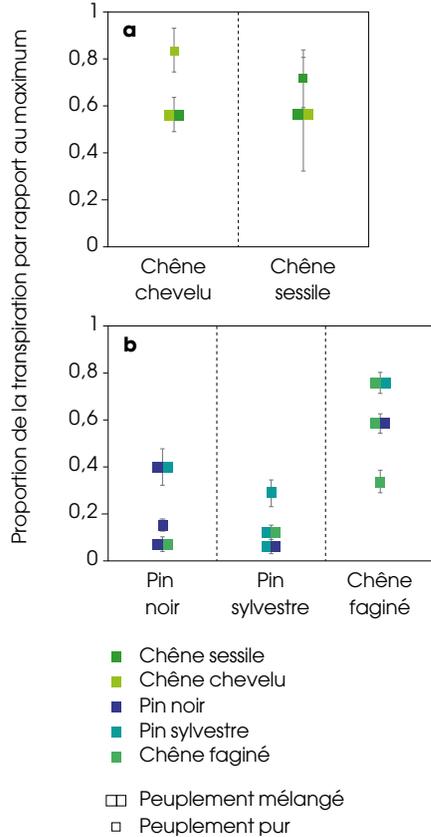
### **Exemple 12**

(d'après Grossiord et al., 2015a)

Grossiord et al. (2015a) ont réalisé une étude similaire en forêt méditerranéenne, en Espagne, impliquant trois essences en interaction : pin sylvestre, pin noir et chêne faginé (*Quercus faginea* Lam.). Ils ont mis en évidence des comportements différenciés entre les essences en fonction des mélanges considérés (cf. Figure 13b). Le chêne faginé montre une moindre diminution de sa transpiration lorsqu'il est en interaction avec le pin sylvestre par rapport à la situation de peuplement pur.

La même tendance est observée avec le pin noir, mais dans une moindre mesure. Concernant ce dernier, le mélange avec le chêne faginé semble être défavorable pour sa transpiration (diminution plus importante en mélange qu'en peuplement pur). Le pin sylvestre, au contraire, semble pâtir de la présence des autres essences en mélange : il montre une plus forte diminution de sa transpiration par rapport à la monoculture.

Les Exemples 11 et 12 suggèrent que les essences les plus adaptées à des épisodes de sécheresse, en particulier celles présentant un enracinement profond, telles que le chêne sessile, le chêne faginé ou encore le pin noir, bénéficient de la présence d'autres essences en mélange. La compétition pour l'eau entre les espèces dans le mélange semble dans ce cas moins forte que celle entre individus dans les peuplements purs. Au contraire, les essences moins adaptées aux épisodes de sécheresse (comme le chêne chevelu ou le pin sylvestre) semblent souffrir de la compétition pour les ressources dans le mélange avec des espèces bien adaptées à de tels épisodes. Ces dernières semblent influencer négativement la disponibilité en eau pour les premières, et donc leur transpiration et leur productivité. Cependant, il s'agit de cas particuliers et il n'est pas possible à ce stade de proposer une généralisation de l'effet des interactions des espèces sur leur comportement lors d'épisodes de sécheresse.



**Figure 13 : Influence du mélange d'espèces sur la diminution de la transpiration des arbres au cours d'une sécheresse**

(d'après Grossiord et al., 2015b). La proportion moyenne de la transpiration est exprimée en pourcentage par rapport au maximum de transpiration observé avant la sécheresse. Le cas (a) est une placette située en Italie dans une forêt composée de chênes chevelu et sessile, et le cas (b) est en Espagne, dans une forêt composée de pins noir et sylvestre, et de chêne faginé. Les barres verticales représentent l'écart à la moyenne d'un échantillon de 4 ou 5 arbres par espèce.

### Principaux enseignements de la fiche

- Les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de conclure de manière générale sur d'éventuels effets bénéfiques ou néfastes des mélanges d'espèces sur le bilan hydrique\* des peuplements mélangés\*.
- Les espèces en peuplement mélangé se partagent l'accès à la ressource\* en eau du sol. Cela peut avoir pour conséquence une modification de leur développement et de leur architecture racinaire, rendue possible grâce à la diversité d'espèces présentes au même endroit. En particulier, quand le sol le permet, certaines espèces développent un enracinement plus profond en peuplement mélangé qu'en peuplement pur. L'accès à une réserve utile en eau\* est dans ce cas plus important. Mais il est impossible de conclure à ce stade si le bilan hydrique du peuplement est ou non amélioré (il faut aussi considérer les autres composantes du bilan hydrique et notamment l'évapotranspiration\*).
- Au niveau aérien, l'association d'espèces différentes dans un peuplement mélangé conduit à une irrégularité de la structure verticale des houppiers\* ayant des conséquences sur l'évapotranspiration. Mais il est impossible de conclure à ce stade si le bilan hydrique du peuplement est ou non amélioré.
- En l'état des connaissances actuelles, il n'est pas encore possible de faire des préconisations de gestion particulières reposant sur le bilan en eau des peuplements mélangés, ni de préconiser des associations d'espèces (feuillues, résineuses ou mixtes) optimales en termes de bilan hydrique. En particulier, il est impossible de répondre de manière générique à des questions telles que l'intérêt du mélange feuillus-résineux plutôt que feuillus-feuillus ou résineux-résineux, ou encore de préconiser telle ou telle espèce plutôt qu'une autre.

### Références bibliographiques

BASTIEN Y. & GAUBERBILLE C. (coordinateurs) (2011). Vocabulaire forestier - Écologie, gestion et conservation des espaces boisés. IDF éd., 608 pages.

BRÉDA N., ZAPATER M., BARLET C., LEFÈVRE Y. & GRANIER A. (2008). An efficient pump: contribution of fine roots of forest trees in clay layer drying out during drought events. In: SEC2008-Volume 1, International Symposium Drought and construction, Magnan J. P., Cojean R., Cui Y.J eds, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Marne-La-Vallée, 103-111.

GRANIER A., COCHARD H. & LEMOINE D. (2002). Fonctionnement hydrique et hydraulique des arbres forestiers. La Houille Blanche, 3: 18-23.

GROSSIORD C., GESSLER A., GRANIER A., BERGER S., BRÉCHET C., HENTSCHEL R., HOMMEL R., SCHERER-LORENZEN M. & BONAL D. (2014a). Impact of interspecific interactions on the soil water uptake depth in a young temperate mixed species plantation. *Journal of Hydrology*, 519:3511–3519.

GROSSIORD C., GESSLER A., GRANIER A., POLLASTRINI M., BUSSOTTI F. & BONAL D. (2014b). Interspecific competition influences the response of oak transpiration to increasing drought stress in a mixed Mediterranean forest. *Forest Ecology and Management*, 318: 54-61.

GROSSIORD C., FORNER A., GESSLER A., GRANIER A., POLLASTRINI M., VALLADARES F. & BONAL D. (2015a). Influence of species interactions on transpiration of Mediterranean tree species during a summer drought. *European Journal of Forest Research*, 134: 365–376.

GROSSIORD C., GESSLER A., GRANIER A. & BONAL D. (2015b). Les forêts tempérées face aux conséquences du changement climatique : est-il primordial de favoriser une plus forte diversité d'arbres dans les peuplements forestiers ? *Revue Forestière Française*, 47: 99-110.

JUCKER T., BOURIAUD O., & COOMES D. A. (2015). Crown plasticity enables trees to optimize canopy packing in mixed-species forests. *Functional Ecology*, 29, 8: 1078-1086.

LOREAU M. & HECTOR A. (2001). Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412, 6842: 72-76.

MORIN X., FAHSE L., SCHERER-LORENZEN M. & BUGMANN H. (2011). Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecology Letters*, 14:1211-1219.

ZAPATER M., BRÉDA N., BONAL D. & PARDONNET S., GRANIER A. (2013). Differential response to soil drought among co-occurring broad-leaved tree species growing in a 15-to 25-year-old mixed stand. *Annals of Forest Science*, 70:31-39.

### Pour en savoir plus

ZAPATER M. (2009). Diversité fonctionnelle de la réponse à la sécheresse édaphique d'espèces feuillues en peuplement mélangé : approches écophysiological et isotopique. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 310 pages.

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées

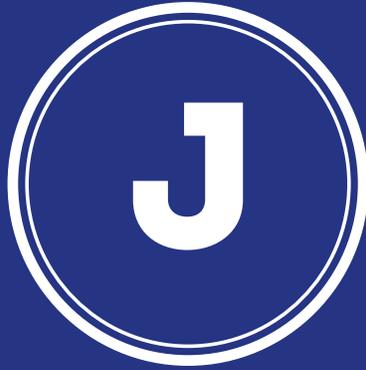


### Implications pour la gestion associées



Cette fiche apporte également des éléments de réponse aux questions n°13, 14, 15 et 16 (cf. pages 17 et 19).





# **Bilan hydrique d'un peuplement irrégulier**

## **Objectif général**

Apprécier les particularités du bilan hydrique d'un peuplement irrégulier, en comparaison avec celui d'un peuplement régulier composé de la (ou des) même(s) espèce(s), et situé dans un contexte pédo-climatique similaire.

## Prérequis

- Savoir distinguer les différentes strates\* d'un peuplement forestier\* (cf. Figure C1 de la Fiche C).
- Comprendre le processus de remplissage du réservoir d'eau du sol\* et la réserve à laquelle les plantes de la strate peuplement\* ont accès (cf. Fiche B).
- Savoir comment s'établit le bilan hydrique\* d'un peuplement forestier et quels sont les différents flux qui le composent (cf. Fiche A).
- Comprendre les principaux facteurs de variation de la transpiration\* des arbres et, en particulier, la demande climatique\* (cf. Fiche G).

Cette fiche s'intéresse uniquement à l'effet de l'irrégularité de la structure\* de la strate arborée\* sur le bilan en eau du peuplement. Elle ne tient pas compte de sa composition\* en espèces. Le cas des peuplements mélangés\* est traité dans la Fiche 1. À ce jour, peu de données, mesurées ou simulées, existent sur le bilan hydrique des peuplements irréguliers\* car la complexité de la structure de la strate peuplement rend les mesures et les modélisations particulièrement difficiles.

## Préambule

Pour rappel, la futaie irrégulière peut être définie selon trois approches :

- « **structure** dont la distribution des diamètres ne correspond pas à une courbe en cloche (unimodale). Elle

se caractérise par une grande dispersion des diamètres ;

- **peuplement forestier** de structure irrégulière constitué de tiges de plusieurs catégories de grosseur réparties pied à pied ou par bouquets ;

- **mode de traitement\*** cherchant à valoriser dans un peuplement les arbres des différentes catégories de grosseur pouvant conduire à son renouvellement partiel. » (Bastien et Gauberville, 2011).

Comparativement aux cas étudiés dans toutes les autres fiches, qui sont axées sur la futaie régulière, il faut retenir ici les particularités suivantes :

- irrégularité de diamètres et donc souvent de hauteurs, conduisant à un



Sylvain Gaudin - CRPF CA © CNPF

Peuplement irrégulier de douglas présentant plusieurs strates et modalités d'agencement.

étagement de la végétation avec plusieurs niveaux (nombre variable) de strates arborées ;

- irrégularité de répartition spatiale des arbres pouvant se traduire par des variations sensibles de densité locale, d'agencement, d'essences, etc.).

Compte tenu de ces particularités, il est possible de formuler un point de vue théorique sur la manière dont les composantes du bilan hydrique sont influencées dans un peuplement irrégulier. L'analyse développée dans le reste de la fiche reste ainsi théorique et ne peut pas être considérée comme générique.

## Distribution étagée de la strate peuplement et évapotranspiration

Dans un peuplement irrégulier, les conditions microclimatiques sont différentes de celles que l'on peut trouver en peuplement régulier.

Cette différence est une conséquence de l'irrégularité de l'agencement des houppiers\* dans l'interface peuplement-atmosphère (cf. Fiche A) et de la distribution étagée des différentes strates au sein du peuplement (cf. Figure C1 de la Fiche C) et donc de la surface foliaire\*. Il est ainsi souvent constaté dans les peuplements irréguliers :

- une **réduction du rayonnement** au fur et à mesure de son avancée dans les différentes strates du peuplement. Chaque strate, à commencer par la strate la plus haute, intercepte une partie du rayonnement qui peut être réfléchi par les feuilles et les éléments ligneux dans différentes directions et donc disponible pour les strates situées en dessous. Une autre fraction est absorbée par les feuilles (rayonnement photosynthétiquement actif notamment) mais une partie n'est pas utilisée et est transmise vers les strates suivantes. Le rayonnement transmis et réfléchi au niveau d'une strate déter-



Sapinière irrégulière : une essence, plusieurs diamètres et plusieurs strates.

mine donc la quantité disponible pour la (les) strate(s) successives. Il faut cependant noter que ce rayonnement sera de plus en plus faible et appauvri en longueurs d'ondes favorables à la photosynthèse au fur et à mesure qu'il progresse vers les strates les plus basses ;

- une **diminution de la vitesse du vent** à l'intérieur du peuplement du fait de la résistance aérodynamique en rapport avec la stratification du feuillage en structure irrégulière. Il faut cependant noter qu'à l'inverse, en fonction de son irrégularité, la strate la plus haute peut être soumise à des turbulences plus importantes que pour un peuplement régulier ;

- une **plus forte humidité de l'air** à l'intérieur du peuplement du fait de l'évapotranspiration\* des strates inférieures (cf. Fiche G).

**Cependant, les données manquent encore pour décrire avec précision le partitionnement\* de l'évapotranspiration**

**entre les différentes strates du peuplement et ses conséquences à l'échelle globale du peuplement.** En particulier, rien n'indique que les structures irrégulières soient plus favorables à une baisse de la demande climatique et par conséquent, de l'évapotranspiration à l'échelle globale du peuplement. En effet, la réduction de l'évapotranspiration d'une strate, consécutive à la diminution du rayonnement l'atteignant, peut être compensée par l'augmentation d'une autre, et *vice versa*. Des travaux de modélisation permettant de simuler la répartition de la surface foliaire (cf. Fiche C) au sein de tels peuplements laissent penser que la distribution de la surface foliaire au sein de l'espace ne pourrait avoir *in fine* qu'un effet limité sur les flux d'eau qui composent le bilan hydrique (Baldochi *et al.*, 2002) et que c'est l'indice foliaire\* total sommé sur l'ensemble du peuplement qui compte. **Des observations plus directes demeurent cependant nécessaires pour valider les conclusions de ces simulations.**



**Peuplement irrégulier de hêtre avec présence de régénération dans la strate inférieure (forêt communale de Florentville).**

## Prospection racinaire et réserve en eau

À l'image des peuplements mélangés (cf. *Fiche I*), la présence d'individus d'âges et de hauteurs différentes dans les peuplements irréguliers, parce qu'ils induisent une compétition asymétrique entre les individus, pourrait engendrer, si les propriétés du sol le permettent, une colonisation du sol plus en profondeur des racines qu'en peuplement régulier. Cette plus grande prospection racinaire de certains individus sous la contrainte de leurs voisins est une propriété utilisée

par exemple en agroforesterie pour augmenter la production. Elle agrandit de fait le volume du réservoir d'eau du sol défini par la profondeur atteinte par les racines fines (cf. *Fiches B et H*). Cependant, rien n'indique que le bilan en eau soit amélioré, l'augmentation de la ressource\* en eau pouvant augmenter proportionnellement la transpiration des végétaux présents. Certes, en fonction des conditions météorologiques, le seuil de régulation de la transpiration ( $REW = 0,4$ ) sera atteint plus tardivement mais le peuplement aura consommé plus d'eau plus longtemps.

### Principaux enseignements de la fiche

- En termes de bilan hydrique\*, l'avantage que pourrait représenter un peuplement irrégulier\* par rapport à un peuplement régulier\* composé de la même essence (ou des mêmes essences) et situé dans le même contexte pédo-climatique\* reste à démontrer. **Trop peu de connaissances sont disponibles actuellement sur cette question pour construire un raisonnement générique.**
- Le terme « d'irrégulier » regroupant des structures de peuplements parfois assez différentes, il faudrait caractériser chacune d'elles du point de vue des différents flux hydriques. L'approche théorique est ainsi rendue difficile par la complexité de la structure\* de la strate peuplement\*.

## Références bibliographiques

BASTIEN Y. & GAUBERBILLE C. (coordinateurs). (2011). Vocabulaire forestier - Écologie, gestion et conservation des espaces boisés. IDF éd. 608 pages. ISBN 978-2-904740-99-2.

BALDOCCHI D.D., WILSON K.B. & GU L. (2002). How the environment, canopy structure and canopy physiological functioning influence carbon, water and energy fluxes of a temperate broad-leaved deciduous forest - an assessment with the biophysical model CANOAK. *Tree Physiology*, 22, 1065-1077.

## Pour en savoir plus

JARVIS P.G. & MCNAUGHTON K.G. (1986). Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 15, 1-49.

MONTEITH J.L. (1981). Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107 (451), 1-27.

SHUTTLEWORTH W.J. & WALLACE J.S. (1985). Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111 (469), 839-855.

## Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implication pour la gestion associée



Cette fiche apporte également des éléments de réponse à la question n°17 (cf. pages 17 et 19).



**Partie**



**Implications  
pour la gestion**

# 1

## Qu'est-ce qui fait varier l'indice foliaire dans un peuplement régulier ?

### D'un point de vue sylvicole, le regard du forestier

L'indice foliaire\* d'un peuplement forestier\* (IF ou Leaf Area Index, en anglais) correspond par définition à la surface foliaire\* contenue dans la strate feuillée du peuplement, rapportée à une unité de surface au sol (cf. Fiche C). Il peut varier en fonction de l'agencement des houppiers\* dans la strate arborée\* (occupation de l'espace disponible quand c'est possible et sinon, possibilité "d'empilement des feuilles"). **Le forestier, par la sylviculture qu'il mène dans le peuplement, influe sur cet agencement. Il est ainsi le premier responsable des variations d'indice foliaire (cf. Implication 2). Il est à l'origine de variations de cet indice dans le temps et dans l'espace notamment au travers de ses interventions (éclaircies\* par exemple ; cf. Implications 3, 4 et 7) et de ses choix (modification de la composition\*, de la structure\* ou éventuellement des âges). Le choix**

de l'espèce, entre sempervirente\* et décidue\* influe, par exemple, sur les variations saisonnières de l'indice foliaire liées à la phénologie\* de l'espèce considérée (cf. Fiche D).

### D'un point de vue hydrique

Au-delà de l'influence de la sylviculture, l'indice foliaire peut varier **spatialement** en raison de différences microclimatiques\* locales (fond de vallon, versant sud, etc.) ou d'une hétérogénéité pédologique au sein du peuplement, qui entraînent des différences de disponibilités et de consommation des ressources\* hydriques et minérales (cf. Fiche G). Il peut aussi varier **dans le temps** sous l'influence de facteurs climatiques (aléas de type sécheresses ou tempêtes, ou évolution des conditions microclimatiques) ou de facteurs biotiques (insectes ravageurs ou agents pathogènes) qui vont affecter directement ou indirectement la surface foliaire (cf. Fiche D).

Pour rappel, l'indice foliaire d'un peuplement forestier conditionne les principaux flux d'eau entrant et sortant du peuplement. Il détermine en effet la surface de feuilles de la strate peuplement par laquelle se fait la transpiration\* et l'interception\* des précipitations (cf. Fiches A et G). Il influe également sur le microclimat de la strate inférieure, conditionnant

ainsi son évapotranspiration\* et l'évaporation du sol (cf. Fiche H). Ainsi, **chaque peuplement a un indice foliaire propre qui contribue à un partitionnement\* différent entre les flux d'eau déterminant le bilan hydrique\*** (ce qui est aussi vrai pour un peuplement irrégulier\*, monospécifique ou mélangé\*) : plus ou moins de transpiration\* des arbres,

Variations de l'agencement dans l'espace des houppiers des arbres en peuplement de douglas (Centre).



© Céline Perrier – IDF

d'interception des précipitations par chacune des strates, de transpiration de la strate inférieure, d'évaporation du sol, etc. (cf. Fiches A, I et J). Une variation de l'indice foliaire implique donc une variation de ce partitionnement, avec pour conséquence des différences de résultats en matière de bilan hydrique.

## Implications sylvicoles

L'indice foliaire varie ainsi naturellement au sein du peuplement, à la fois dans l'espace (variations locales en fonction du contexte pédo-climatique\*) et dans le temps (variations interannuelles et saisonnières). Ces variations doivent être connues pour une meilleure prise en compte de l'évolution dans le temps et dans l'espace du

bilan hydrique du peuplement. Le sylviculteur est en mesure d'appréhender par exemple des variations locales par une bonne connaissance de la forêt et de son contexte pédo-climatique (taille du réservoir d'eau du sol\*, microclimat, espèce, caractéristiques du peuplement, etc.). Il peut aussi orienter ses interventions en faveur d'une espèce plutôt qu'une autre en tenant compte de la phénologie de l'espèce pouvant être à l'origine de variations intra-annuelles de l'indice foliaire.

À la suite d'aléas biotiques ou abiotiques, s'ils n'ont pu être anticipés, le sylviculteur doit aussi tenir compte de l'évolution importante du partitionnement des flux d'eau dans le peuplement qui en résulte et de l'influence que cela

Sylvain Gaudin - CRPF CA © CNPF



Modification après tempête de l'indice foliaire d'un peuplement et du microclimat de sa strate inférieure (Auvergne).

peut avoir sur le bilan hydrique global. Un peuplement soudainement ouvert ou ayant un indice foliaire très fortement réduit expose par exemple sa strate inférieure à un tout autre microclimat pouvant entraîner une forte augmentation de l'évapotranspiration réelle\* (cf. Fiche H). Cette prise en compte lui permettra d'orienter plus efficacement ses choix d'intervention post-aléa.

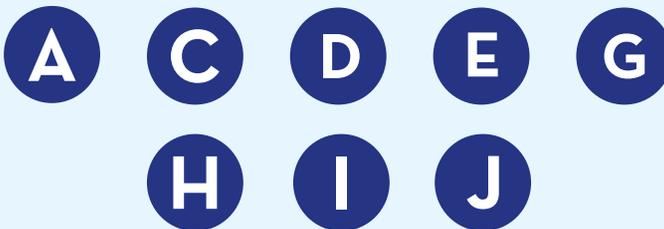
**Enfin, le sylviculteur est lui-même responsable des variations de l'indice foliaire en raison des choix de gestion qu'il fait. Il doit donc tenir compte de ce paramètre lors de ses interventions, s'il souhaite pouvoir maintenir un bilan hydrique favorable, voire l'améliorer (cf. Implications 2, 3 et 4).** Une éclaircie

a, par exemple, pour effet de diminuer transitoirement l'indice foliaire, mais elle modifie dans le même temps le microclimat de la strate inférieure (cf. Fiches D, E et H). Un changement dans le dosage des essences peut aussi impacter significativement l'indice foliaire et donc, le bilan hydrique (cf. Fiche G).

## Mises en garde

Abaisser l'indice foliaire du peuplement dans un but d'amélioration du bilan hydrique doit se faire en tenant compte du contexte pédo-climatique dans lequel évolue le peuplement, des objectifs du gestionnaire et des éventuelles autres contraintes propres au peuplement (économiques, techniques, etc.).

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implications pour la gestion associées



# 2

## Comment évolue l'indice foliaire au cours de la vie d'un peuplement régulier ?

### D'un point de vue sylvicole, le regard du forestier

Au cours des premières années du cycle sylvicole\* d'un peuplement forestier\*, le couvert\* du peuplement se ferme progressivement, plus ou moins vite selon les espèces, la densité, les conditions de croissance initiales et en fonction du contexte pédo-climatique\* dans lequel évolue le peuplement. **Sans intervention sylvicole** et sans accident biotique ou abiotique, le couvert reste ensuite fermé. **Avec intervention sylvicole** (si le sylviculteur pratique par exemple périodiquement des éclaircies\* dans le peuplement pour améliorer la croissance individuelle et favoriser les plus belles tiges), le peuplement est soumis à des variations de son couvert. Chaque coupe provoque des ouvertures qui, passée l'intervention, se referment progressivement et de manière très diverse selon les peuplements

et la nature des interventions. Le sylviculteur intervient alors à nouveau, plus ou moins fortement, pour éviter notamment que la croissance des meilleures tiges ne ralentisse.

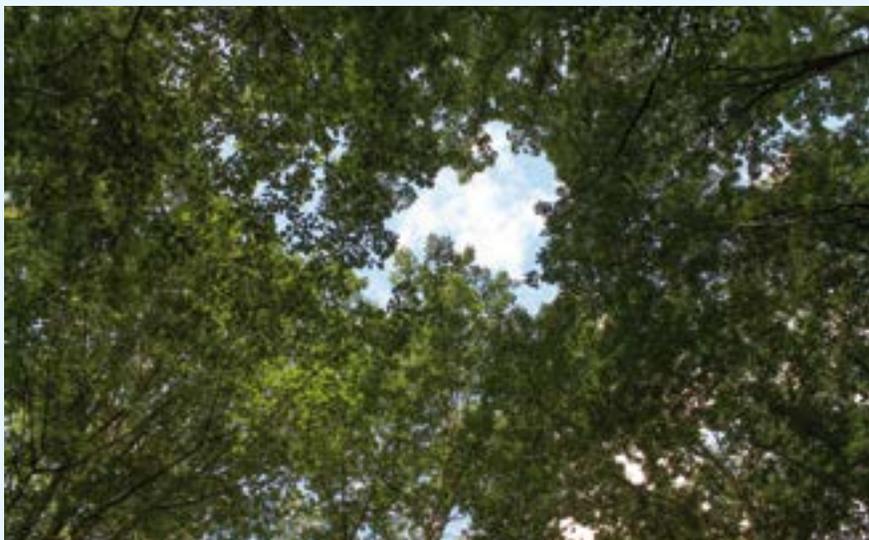
L'évolution de l'agencement des houp-piers\* et de la refermeture\* du couvert forestier constitue un des repères utilisés par le sylviculteur pour orienter ses éclaircies dans le peuplement. Il n'est pas familier avec la notion d'indice foliaire\* (IF), qu'il assimile parfois et à tort à celle de couvert (cf. Fiche C). C'est pourquoi il est important de souligner qu'indice foliaire et couvert n'évoluent pas forcément de manière proportionnelle. De plus, deux peuplements ayant un même couvert n'ont pas forcément le même indice foliaire et inversement (cf. Fiche C). En revanche, **les interventions influant sur le couvert jouent bel et bien sur l'indice foliaire et contribuent à le faire varier.**

## D'un point de vue hydrique

Pour rappel, l'indice foliaire d'un peuplement est un des paramètres essentiels qui conditionne son bilan hydrique\* (cf. Fiche A). En lien direct avec la surface foliaire\* du peuplement, il influe sur la transpiration\* des arbres, sur l'interception\* des pluies et sur les conditions microclimatiques\* des strates inférieures\* du peuplement, et il détermine le flux de l'évapotranspiration\* (cf. Fiche H). **Le sylviculteur peut améliorer ce bilan hydrique au travers des interventions ; l'objectif est de faire en sorte que les arbres du peuplement ne se retrouvent jamais - ou le plus tard possible - dans une situation où ils seraient contraints de fermer leurs stomates\* pour limiter la transpiration (quand  $REW < 0,4$ ). Ce cas de figure est à éviter car il se traduit par un arrêt de la croissance (cf. Fiche B).**

**Sans intervention sylvicole**, l'indice foliaire d'un peuplement augmente au fur et à mesure que le peuplement vieillit, jusqu'à atteindre un maximum où il se stabilise. Il a ensuite parfois tendance à diminuer légèrement avec l'âge (cf. Fiche E). Cette diminution n'est cependant pas systématique et reste très variable selon les peuplements et selon leur cycle de vie (maturation, vieillissement physiologique, etc.). Sans intervention, le bilan hydrique du peuplement adulte est souvent assez peu favorable car l'indice foliaire reste très élevé, avec une forte interception des pluies limitant la recharge du réservoir d'eau du sol\* et une forte transpiration. La diminution potentielle de l'indice foliaire, après avoir atteint son niveau maximum, n'est ainsi pas suffisante pour améliorer les différents flux qui composent le bilan hydrique et aboutir

Louis-Adrien Lagneau - CRPF Bourgogne © CNPF



Refermeture du couvert d'un peuplement éclairci de chêne rouge (Bourgogne).

à une moindre interception qui pourrait favoriser la recharge du réservoir d'eau du sol, ou à une diminution significative de la surface de transpiration.

**Avec intervention sylvicole**, l'indice foliaire peut être contrôlé par le biais des éclaircies. Pour améliorer le bilan hydrique, il doit être réduit par rapport à sa dynamique naturelle et maintenu dans une gamme de valeurs déterminée par le contexte pédo-climatique, en adaptant la périodicité et l'intensité\* des éclaircies (cf. *Implications 3 et 4*). L'objectif est de conserver un équilibre favorable entre apports par les pluies et pertes par évapotranspiration (soit un REW > 0,4) d'une part, et le maintien du potentiel économique (capital\* sur pied, rentabilité de la vente de l'éclaircie, etc.) d'autre part. D'un point de vue hydrique, cet équilibre est conditionné à la fois par l'indice foliaire du peuplement, par la taille du réservoir d'eau du sol et par le microclimat dans lequel évolue le peuplement (cf. *Fiche A*). À titre indicatif, il est préférable de ne pas dépasser un indice foliaire du peuplement d'une va-

leur d'environ 6-7. Au-delà de ce seuil, il y a généralement saturation de l'évapotranspiration, c'est-à-dire qu'elle n'augmente quasiment plus malgré l'augmentation de l'indice foliaire (cf. *Fiche G*). En effet, quand le couvert est fermé (il n'y a quasiment plus de trous dans la canopée\*), rajouter des feuilles qui n'auraient du coup pas ou peu accès à la lumière ne change presque rien à l'évapotranspiration totale du peuplement. **L'indice foliaire cible devra donc être préférentiellement plus faible que ce seuil et être adapté dans tous les cas au contexte pédo-climatique.**

À titre indicatif, après éclaircie, le nombre d'années nécessaires pour arriver à une refermeture de la strate peuplement varie en moyenne entre 3 et 5 ans (cf. *Implication 7*). Cependant, cette durée est fortement dépendante des caractéristiques de l'éclaircie (fréquence et intensité), de l'âge des arbres, de l'espèce et du contexte pédo-climatique (cf. *Fiches D et E*). Le peuplement ne revient alors pas forcément à un indice foliaire égal à celui avant intervention.

**Futaie régulière d'épicéa commun âgés de 55 ans n'ayant pas été éclaircies.**



© Jacques Becquey - IDF

Plus généralement, l'indice foliaire peut aussi varier dans le temps de manière saisonnière, en relation avec la phénologie\* des espèces (cf. Fiche D et Implication 1).

## Implications sylvicoles

Dans les peuplements où il est utile d'améliorer le bilan hydrique (fort risque de sécheresse, faible réserve utile en eau\*, etc.), il est important de contrôler et de réduire l'indice foliaire. Il est conseillé pour cela de pratiquer des éclaircies suffisamment fréquentes pour qu'il n'augmente pas trop (= réduction périodique de la densité et de la continuité du couvert). En pratique, **l'idéal serait que le peuplement soit toujours légèrement entrouvert par des interventions régulières et suffisamment fortes sans toutefois provoquer l'isolement des arbres et un couvert trop discontinu (IF < 3)**. Cela aurait pour conséquence de changer trop fortement le partitionnement\* des différents flux du bilan hydrique, notamment entre strate arborée\* et strate inférieure (cf. Fiche H) : la strate inférieure et le sol mis en lumière

auraient par exemple une évapotranspiration réelle\* nettement plus importante. Cette recommandation est tout à fait cohérente avec une sylviculture dynamique. Des peuplements initialement installés à forte densité et non éclaircis sont ainsi à éviter puisqu'ils se situent à des niveaux d'indice foliaire toujours élevés.

## Mises en garde

- Intégrer l'indice foliaire dans le raisonnement de gestion ne revient pas à une simple prise en compte de l'évolution du couvert (cf. Fiche D).
- Laisser vieillir un peuplement sans intervenir n'améliore pas son bilan hydrique.
- Raisonner le choix du rythme et des caractéristiques des éclaircies ne doit pas se faire seulement en tenant compte de l'indice foliaire. Il faut aussi composer avec le contexte pédo-climatique, le type de peuplement et toutes les éventuelles contraintes qui lui sont propres (ex : production de résineux assez serrés pour obtenir des bois peu branchus et à faible défilement, etc.).

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implications pour la gestion associées



# 3

## Quel est l'effet de l'intensité des éclaircies sur le bilan hydrique dans les peuplements réguliers ?

### D'un point de vue sylvicole, le regard du forestier

La pratique d'une **éclaircie\* forte\*** est souvent conseillée dans les jeunes\* peuplements réguliers\*, dans la mesure où elle n'augmente pas significativement la sensibilité du peuplement au vent ou à d'autres aléas. Elle permet une sélection dans le peuplement à un stade de son développement où il réagit généralement bien. La croissance des arbres d'avenir est maintenue ou augmentée et le couvert\* se referme progressivement. Le volume de bois exploité permet généralement de réaliser une opération économiquement satisfaisante.

À l'inverse, la réalisation d'une **éclaircie faible\*** dans un jeune peuplement régulier, entraîne une refermeture\* très rapide du couvert. De plus, elle est sou-

vent déficitaire économiquement et peu efficace pour favoriser la croissance des arbres d'avenir.

**Dans des peuplements en retard d'éclaircie**, en plus des risques liés à leur fragilité au vent, une intervention forte, en isolant trop les arbres favorisés, peut causer divers phénomènes indésirables : descente de cime, développement de gourmands (sur feuillus en particulier), voire apparition de parasites (scolytes dans les épicéas par exemple). De plus, à intensité\* égale d'éclaircie, le couvert se referme plus lentement que dans un jeune peuplement, car les houppiers\* sont plus étriqués. Généralement, dans ces situations, des éclaircies (tardives\*) de faible intensité sont plutôt préconisées. La refermeture du couvert se fait alors relativement rapidement et il faut renouveler l'opération fréquemment pour relancer ou maintenir une bonne dynamique de croissance.

## D'un point de vue hydrique

Une éclaircie qui ouvre le couvert diminue nettement la surface foliaire\* du peuplement forestier\* et donc son indice foliaire\* (cf. Fiche C). Il en résulte une réduction de la transpiration\* et de l'interception\* des précipitations par les arbres de la strate arborée\* (cf. Fiche A). Cela s'accompagne d'une arrivée de pluie au sol plus importante, améliorant la recharge du réservoir d'eau du sol\* lors des épisodes pluvieux. À l'inverse, l'augmentation de pluie et de lumière au niveau du sol peut augmenter aussi l'évapotranspiration\* de la strate inférieure\* (sous-étage\* et/ou strate herbacée\*). Ceci peut modifier le partitionnement\* de l'évapotranspiration réelle\* totale du peuplement forestier, entre celle de la strate arborée et celle de la strate inférieure, toujours dans la limite maximale imposée par la demande climatique\* (cf. Fiche G).

Dans les peuplements avec une espèce décidue\*, la part de l'évapotranspiration réelle issue de la strate inférieure sera sou-

vent observée seulement de manière transitoire au cours de la saison de végétation, notamment avant le développement des feuilles de la strate arborée (cf. Fiche H). Le bilan hydrique\* du peuplement reste néanmoins amélioré par l'éclaircie, si l'on prend garde à ne pas descendre à des indices foliaires inférieurs à 3. Dans ce dernier cas, la strate arborée du peuplement devient très discontinue. La contribution de la strate herbacée à l'évapotranspiration totale du peuplement devient alors prépondérante, diminuant le bénéfice de l'éclaircie. À noter que cette strate inférieure mobilise de l'eau plutôt dans les couches superficielles du sol ; elle est susceptible de flétrir lors de l'épuisement de cette ressource\* hydrique superficielle.

**La vitesse de refermeture du couvert après éclaircie, en relation avec l'augmentation de la surface foliaire - elle-même en lien avec la croissance en diamètre (surface d'aubier\*) - commande la durée pendant laquelle le bilan hydrique est amélioré (cf. Fiche E).**



Éclaircie dans un perchis de chêne.

Jacques Bequaey - IDF © CNIF

**Essai du GIS**  
**« coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers » : comparaison de différents régimes d'éclaircies (forêt domaniale de Tronçais).**  
*Sur la même parcelle de chêne sessile et au même âge, l'essai comprend trois régimes d'éclaircies : jamais éclairci (a,  $RDI^* = 1$ ), moyennement éclairci (b,  $RDI = 0,5$ ), très fortement éclairci (c,  $RDI = 0,25$ ). Noter dans ce dernier cas le développement abondant des graminées du sous-bois, quasi absentes dans la placette jamais éclaircie.*



© Philippe Balandier – IRSTEA

© Philippe Balandier – IRSTEA

© Philippe Balandier – IRSTEA

## Implications sylvicoles

Pour garantir un bilan hydrique du peuplement favorable, il conviendrait de conduire des peuplements avec des couverts entrouverts en permanence sans toutefois provoquer l'isolement des arbres et un couvert discontinu. **Dans les peuplements réguliers jeunes**, les éclaircies assez fortes et par le haut qui ouvrent bien le couvert sont les plus favorables, à la fois pour le bilan hydrique, pour la gestion des contraintes économiques de récolte, pour la réactivité des arbres et pour la réduction des risques. **En cas d'éclaircie tardive\***, il est plus difficile d'améliorer rapidement le bilan hydrique car l'intensité de l'éclaircie doit généralement rester assez faible pour limiter différents risques (chablis, gourmands, scolytes, etc.). Dans les deux cas, pour maintenir un effet positif sur le bilan hydrique, il faut à nouveau intervenir dès que le couvert se referme, voire un peu avant.

**En résumé, l'intensité des éclaircies doit être adaptée aux caractéristiques des peuplements, en particulier son âge, sa hauteur et sa densité. La marge de manœuvre du sylviculteur est d'autant plus importante que les peuplements**

sont jeunes ou qu'ils ont déjà bénéficié d'éclaircies par le haut. Il faut aussi adapter leur fréquence (rotation\*), de façon à maintenir un couvert entrouvert ou à peine fermé\*, garant d'un bilan hydrique durablement favorable (cf. Implications 4 et 5).

## Mises en garde

- Ne pas ouvrir trop fortement le peuplement sous prétexte d'amélioration du bilan hydrique :
  - dans des peuplements jeunes ou régulièrement éclaircis, afin d'éviter de favoriser le développement d'une strate inférieure vigoureuse (cf. Fiche H), le grossissement des branches, des pertes de production ;
  - dans des peuplements en retard d'éclaircie, à cause des risques de déstabilisation, de descente de cime ou d'explosion de gourmands.
- Le choix de l'intensité de l'éclaircie est un compromis prenant en compte le contexte pédo-climatique\*, les risques climatiques et sanitaires, et les éventuelles pertes de production : il est par exemple inutile d'éclaircir fortement si les conditions pédo-climatiques assurent un bilan hydrique favorable.

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



#### Implications pour la gestion associées



# 4

## Quelle est l'influence de la rotation des coupes sur le bilan hydrique des peuplements réguliers ?

### D'un point de vue sylvicole, le regard du forestier

En peuplement régulier\*, les coupes sont le plus souvent motivées par la nécessité de favoriser la croissance et la qualité des arbres d'avenir. Raccourcir leur rotation\* permet de limiter la refermeture\* du couvert\* entre deux interventions. **La concurrence entre les arbres conservés est ainsi réduite et leur croissance est favorisée.** Selon le stade de développement du peuplement, la contrepartie de coupes fréquentes peut cependant être l'absence d'élagage naturel, voire un grossissement des branches et la conicité des troncs, ce qui peut alors nécessiter des élagages artificiels.

### D'un point de vue hydrique

Lorsque le couvert est fermé\*, l'indice foliaire\* du peuplement forestier\* est élevé et souvent supérieur à une valeur d'envi-

ron 6-7, au delà de laquelle la transpiration\* du feuillage de la strate peuplement\* n'augmente plus beaucoup, même si son indice foliaire continue à croître. Cela s'explique par le fait que seule la couche de feuilles supérieures, exposée à une forte demande climatique\* (forte lumière, sécheresse de l'air\*, vent), transpire beaucoup, les feuilles à l'ombre ayant une transpiration réduite. Avec un fort indice foliaire, rajouter des feuilles n'augmente alors plus la proportion de feuilles exposées à la lumière (elle est déjà maximale). Dans cette situation, **si aucune intervention ne réduit l'indice foliaire**, l'évapotranspiration réelle\* est alors maximale, saturante et proche de la demande climatique (cf. Fiche G). **Dans de telles situations, le bilan hydrique\* n'est pas optimisé** car en plus d'une forte évapotranspiration\*, l'interception de la pluie par la strate arborée\* est élevée : la réserve en eau du sol\* se recharge donc moins bien et moins vite

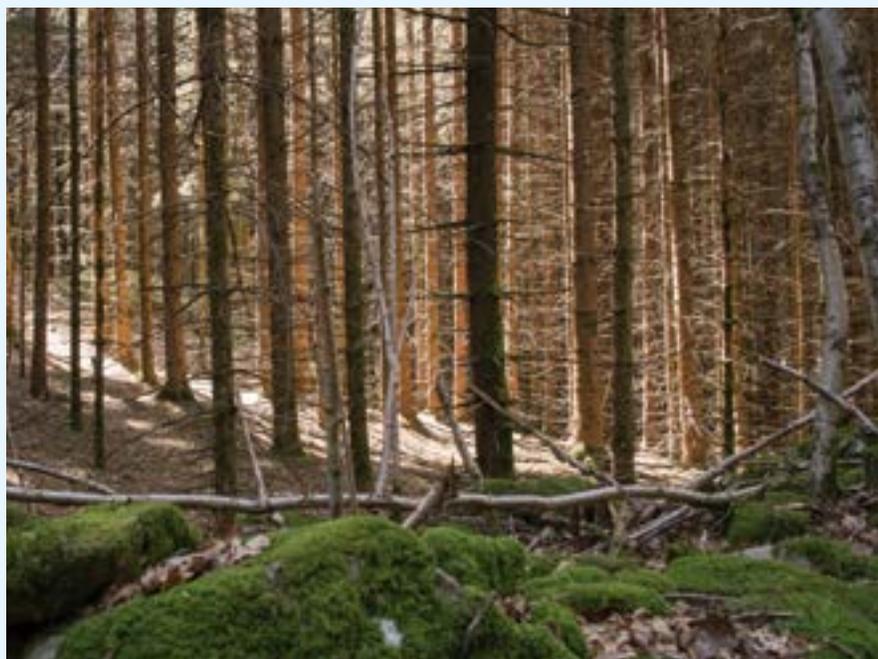
(cf. Fiches A et B). Si des interventions viennent réduire l'indice foliaire, le bilan hydrique peut être amélioré, au moins transitoirement (diminution de la transpiration et de l'interception\* des pluies). La vitesse de refermeture du couvert est très variable selon l'intervention, le type de peuplement et le contexte pédo-climatique\* (cf. Implication 7). Le peuplement ne revient d'ailleurs pas nécessairement à son indice foliaire d'origine. C'est la fréquence - et donc la rotation - des éclaircies qui permettra d'éviter la refermeture complète du peuplement et donc de maintenir son indice foliaire dans une fourchette donnée.

Au niveau individuel, les arbres de la strate arborée peuvent avoir des réac-

tions très diverses et variables d'une année à l'autre dans la période qui suit l'ouverture du peuplement. On constate en effet des augmentations très inégales des densités de flux de sève\* (cf. Fiches E et G). C'est davantage le type d'éclaircie (par le haut ou par le bas ; cf. Implication 5) et l'intensité\* (cf. Implication 3) qui influenceront ces réactions.

Il faut aussi tenir compte du fait qu'une ouverture du peuplement crée de nouvelles conditions microclimatiques\* pour les strates inférieures\*. Elles reçoivent davantage d'eau et de lumière, ce qui augmente leur évapotranspiration\* tant que le sol est humide. Cela peut modifier le partitionnement\* de l'évapotranspiration totale du peuple-

4



Sylvain Gaudin - CRPF CA © CNPF

Jeune futaie d'épicéa commun à forte densité, en moyenne montagne (Auvergne).

ment forestier, entre celle de la strate arborée et celle de la strate inférieure. À noter également que la contribution de la strate inférieure à l'évapotranspiration du peuplement est souvent transitoire en cours de saison de végétation (cf. Fiche H).

## Implications sylvicoles

**Le partitionnement des différents flux d'eau du bilan hydrique se travaille par la sylviculture** : l'objectif est d'allouer la plus grande partie de la consommation en eau au profit des arbres de la strate arborée afin de favoriser leur productivité\* et de limiter celle de la strate inférieure.

Tant que l'intensité de la coupe reste raisonnable (c'est-à-dire qu'elle ne pro-

voque pas l'isolement des arbres et un couvert trop discontinu), des rotations courtes, évitant la refermeture totale du couvert, sont favorables à la fois à la croissance en diamètre des arbres du peuplement et à son bilan hydrique. Il est cependant nécessaire d'adapter l'intensité de l'intervention et la rotation aux caractéristiques du peuplement ( $H_o^*$ ,  $H/D^*$ , etc.) et aux autres contraintes, notamment pratiques et économiques (fréquence des passages et fragilité des sols, volumes de bois exploités suffisants, risques sanitaires ou de chablis, etc.).

**Pour un contexte pédo-climatique donné, c'est la combinaison de la rotation des coupes, de leur intensité et de leurs modalités d'application (type de coupe) qui permet de piloter le bilan hydrique.**



Sylvain Gaudin – CRPF CA © CNIF

**Abatteuse réalisant une éclaircie dans un taillis avec réserves de chêne, de châtaignier et de tremble (Centre).**

## Mises en garde

- Éviter une ouverture trop importante du peuplement (mise en croissance libre de tous les arbres restants) par des éclaircies trop fréquentes (et/ou trop fortes) qui peuvent inverser le partitionnement de l'évapotranspiration, entre celle des arbres (alors fortement diminuée) et celle de la strate inférieure (alors fortement augmentée), avec pour conséquence une amélioration atténuée de l'état hydrique des arbres (cf. Fiche H). En revanche, pour des coupes d'ensemencement\*

ment\*, ce partitionnement permettra le bon développement des semis (sous réserve que la végétation concurrente soit maîtrisée) sans nuire excessivement aux arbres conservés, qui exploitent un volume de sol différent si la profondeur de sol le permet (cf. Fiches H et I).

- Veiller à raisonner l'intensité des interventions en fonction du contexte pédo-climatique : du point de vue hydrique, il n'est pas nécessaire d'éclaircir fortement et fréquemment quand les contraintes sont faibles ou inexistantes.

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implications pour la gestion associées



# 5

## Quelle est l'influence du type d'éclaircie sur le bilan hydrique d'un peuplement régulier ?

### D'un point de vue sylvicole, le regard du forestier

Parmi ses différentes fonctions, l'éclaircie\* a notamment un rôle de sélection qui se fait en priorité au profit des arbres de qualité, par rapport à leur utilisation potentielle. En futaie régulière\*, le sylviculteur oriente préférentiellement le choix sur les arbres dominants\*, les plus vigoureux, ou à défaut sur des codominants\*, de façon à obtenir le plus rapidement possible un peuplement homogène en fin de cycle sylvicole\*, avec des arbres au diamètre d'exploitabilité recherché. **Cela signifie que des individus à forte surface foliaire\* individuelle sont conservés** (cf. Fiche C). Pour favoriser des arbres dominants et codominants, il faut faire de la place au niveau de leur strate feuillée\*, ce qui implique d'enlever en priorité des dominants ou des codominants concurrents. Les arbres domi-

nés\* sont récoltés en une ou plusieurs fois selon les scénarios sylvicoles choisis par les praticiens, parfois pour homogénéiser le peuplement ou pour faciliter l'exploitation des plus gros. Ils participent aux revenus intermédiaires. Ils peuvent être conservés assez longtemps s'ils ne gênent pas les autres arbres.

### D'un point de vue hydrique

La transpiration\* individuelle des arbres varie en fonction de leur statut social\* (cf. Fiche G). D'un point de vue hydrique, ces différences sont la conséquence directe du fait que la transpiration individuelle des arbres est dépendante de leur surface foliaire (souvent réduite pour les arbres dominés) d'une part, et de la demande climatique\* (également réduite pour les codominants et surtout pour les dominés) d'autre part. En conditions de disponibilité en eau non limitantes, les

dominants transpirent donc un peu plus que les codominants et beaucoup plus que les dominés (cf. Fiche G). L'élimination d'arbres dominants ou codominants aura donc un impact nettement plus positif sur le bilan hydrique\* du peuplement forestier\* que l'enlèvement de dominés, à la fois parce qu'ils transpirent plus et parce qu'ils interceptent\* plus l'eau de pluie. Dans ce raisonnement, le choix des arbres à ôter prioritairement en éclaircie repose donc sur la surface foliaire totale de l'arbre et sur sa proportion exposée à la lumière.

## Implications sylvicoles

Lors des éclaircies dans des peuplements fermés, la suppression d'arbres de la strate arborée\* dans l'étage\* princi-

pal (dominants et codominants) permet une amélioration du bilan hydrique plus efficace qu'une suppression des dominés. Toutefois, il convient de veiller à ce que l'indice foliaire\* du peuplement après éclaircie se situe bien en dessous du seuil d'environ 6-7 (seuil au-delà duquel l'augmentation de la transpiration du feuillage de la strate peuplement\* est limitée, même si l'indice foliaire continue à augmenter) (cf. Fiche G). L'amélioration significative du bilan hydrique du peuplement implique la réalisation d'éclaircies par le haut\*, laissant un peuplement entrouvert. Une telle intervention a généralement pour avantage de réduire le nombre d'arbres (et donc indirectement l'indice foliaire), en priorité parmi les plus consommateurs d'eau, sans pour autant exposer trop fortement



Désignation dans un taillis de chêne pubescent (Centre).

Jérôme Rosa - CRPF Île-de-France-Centre © CNPF



**Agencement des houppiers des arbres avant éclaircie dans un accru naturel de chêne pédonculé (Centre).**

les strates inférieures\* à des conditions d'évapotranspiration\* trop importantes. Elle permet de surcroît de répondre simultanément aux diverses attentes du sylviculteur :

- maintien d'une bonne croissance (voire augmentation) des arbres de la strate arborée\* restant dans l'étage principal, avec la possibilité d'obtenir des diamètres d'exploitabilité plus vite qu'avec les dominés ;
- bonnes opportunités de commercialisation des bois ;
- possibilité de conserver des dominés (en attente de dimensions commerciales, maintien d'un certain couvert\* au sol, ombrage des troncs des dominants, etc.).

**Le meilleur compromis est donc de préconiser des éclaircies par le haut au profit des meilleures tiges tout en conservant des dominés non gênants. Ce choix doit bien évidemment être couplé avec une**

**intensité et une fréquence des interventions adaptées aux caractéristiques du peuplement et au contexte pédo-climatique\* (cf. Implications 3 et 4).**

## Mises en garde

- Une ouverture trop importante du peuplement pourrait avoir pour conséquence de provoquer une augmentation transitoire de la transpiration individuelle des arbres dominés et/ou de l'ensemble de la végétation de la strate inférieure (cf. Fiche H). Le bilan hydrique serait alors nettement moins favorable.
- Le raisonnement vis-à-vis du bilan hydrique sur le choix des arbres lors du martelage d'une éclaircie se place au niveau global du peuplement. La question d'une plus ou moins forte sensibilité individuelle au stress hydrique\* des arbres dominants par rapport aux dominés est beaucoup plus complexe et elle n'est pas traitée ici.

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implications pour la gestion associées





## Existe-t-il une relation simple entre la surface terrière et l'indice foliaire ?

### D'un point de vue sylvicole, le regard du forestier

Pour orienter certaines de ses interventions, le sylviculteur a besoin de connaître leurs conséquences sur le bilan hydrique\* du peuplement forestier\*. Pour calculer ce bilan, entre autres variables (cf. Fiche A), il est indispensable de connaître l'indice foliaire\* du peuplement (cf. Fiche C). Sa prise en compte est particulièrement stratégique dans le raisonnement de la sylviculture pour des peuplements :

- exposés à une forte demande climatique\* (rayonnement, vent, déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air\*) ;
- et/ou limités en termes d'alimentation en eau de pluie ;
- et/ou restreints à n'accéder qu'à un réservoir d'eau du sol\* réduit (cf. Fiche B).

Cet indice peut être mesuré de différentes manières. La méthode la moins coûteuse et la plus accessible (mise en œuvre, matériel nécessaire, etc.) est une méthode

de mesure directe (cf. Fiche E). Elle repose sur le recueil d'un échantillon de feuilles dans des bacs collecteurs de surface connue en forêt. La surface foliaire\* totale du peuplement est déterminée dans un premier temps, puis l'indice foliaire est déduit en rapportant cette surface à la surface occupée par le peuplement (cf. Fiche C). La principale contrainte de cette méthode réside dans le temps de travail qu'il faut investir pour la mettre en œuvre (mise en place des collecteurs, récolte, tri et mesure de la surface individuelle d'un échantillon de feuilles). D'autres méthodes, dites indirectes, basées sur la mesure du rayonnement, ont aussi été développées mais elles sont coûteuses et souvent contraignantes, et elles nécessitent, elles aussi, un fort investissement en temps (cf. Fiche F).

**Dans tous les cas, compte tenu de ces contraintes, aucune de ces méthodes ne peut être utilisée en routine par le praticien. Il serait donc intéressant de**

développer une relation qui permettrait d'approcher l'indice foliaire d'un peuplement en utilisant une variable qui soit plus familière aux praticiens et plus facile d'accès, comme la surface terrière. Il pourrait être utile pour le praticien de pouvoir disposer de modèles d'évolution de l'indice foliaire en fonction de variables dendrométriques courantes.

## D'un point de vue hydrique

Différents travaux ont été conduits pour tenter de définir une relation entre l'indice foliaire d'un peuplement et sa surface terrière. D'autres variables, telles que la hauteur des arbres, le facteur d'espacement, etc., ont aussi été testées mais ne sont pas bien corrélées avec l'indice foliaire.



Louis-Adrien Lagneau - CRPF Bourgogne © CNPF

Mesure du diamètre au compas forestier : une mesure effectuée en routine par les praticiens (Bourgogne).

Les études montrent un lien de proportionnalité net à l'échelle de l'individu, entre la **surface d'aubier\*** (partie fonctionnelle périphérique du bois assurant la circulation de la sève brute) et la surface foliaire\* de l'arbre (cf. Fiche E). Cette relation peut être utilisée pour passer de la surface d'aubier d'un arbre à sa surface foliaire puis, en intégrant tous les arbres constituant le peuplement, pour déterminer son indice foliaire (cf. Fiche C). Ce changement d'échelle n'est pas sans difficulté. Par ailleurs, la relation est bien meilleure dans des conditions strictes de peuplement homogène, régulier\*, sans sous-étage\* (taillis), en plantation feuillue ou résineuse, par exemple.

Le lien est beaucoup moins évident entre la **surface terrière** elle-même et l'indice foliaire du peuplement. Pour rappel, la surface terrière intègre une plus ou moins grande surface de tronc non conductrice de la sève. Elle est donc imparfaitement reliée à la surface foliaire de l'arbre. Certaines études établissent cependant une relation entre ces deux variables, notamment pour des peuplements réguliers monospécifiques en l'absence de sous-étage (taillis) et hors de périodes de perturbations de toutes natures (aléas climatiques, pathogènes et interventions sylvicoles telles que les éclaircies\*) qui modifient la structure\* du peuplement et créent un déséquilibre transitoire entre surface d'aubier et surface foliaire (cf. Fiches D et F). Mais même dans ces situations, cette relation n'est malheureusement pas universelle car elle dépend de l'âge, de l'essence, de la date de la dernière intervention sylvicole et des conditions pédo-clima-

tiques\* du peuplement. De plus, au-delà de certains seuils de surface terrière, il n'y a plus du tout de relation (cf. Fiche E).

## Implications sylvicoles

À ce jour, pour des peuplements réguliers monospécifiques, des ordres de grandeur d'indice foliaire de peuplements correspondant à certaines gammes de surfaces terrières pourraient être obtenus pour quelques essences. Mais il convient d'être prudent car l'utilisation d'une telle relation établie par ailleurs (dans une autre région ou à partir d'un autre dispositif) peut être une importante source d'erreur.

**Pour rappel, les relations allométriques\* ne sont pas généralisables à tout peuplement ou conditions pédo-climatiques.** Il faut veiller à ne pas les appliquer en dehors de leur domaine de validité (cf. Fiche E). En l'absence de relation, il faut mesurer l'indice foliaire du peuplement à l'aide de l'une des méthodes décrites dans les Fiches E et F.

## Mises en garde

Toute relation établie entre la surface terrière et l'indice foliaire d'un peuplement, est valable pour une essence et un peuplement donné (correspondant à un contexte pédo-climatique et sylvicole donné). Elle ne peut pas être généralisée et ne peut donc pas être appliquée sans contrôle et validation préalable à d'autres peuplements de la même essence situés dans d'autres contextes.

## Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implications pour la gestion associées



© Jacques Becquey - IDF

L'estimation de la surface terrière, une pratique utile pour connaître son peuplement et en raisonner la gestion.

6



## Dans un peuplement régulier, l'effet des éclaircies sur le bilan hydrique n'est-il que temporaire, le temps que le couvert se referme ?

### D'un point de vue sylvicole, le regard du forestier

En peuplement régulier\*, les éclaircies\* (et les coupes d'amélioration en général) sélectionnent les meilleurs arbres et les favorisent en éliminant leurs voisins concurrents. Lors de leur réalisation, **en réduisant le nombre de tiges, elles ouvrent le couvert\* et ce d'autant plus que l'éclaircie est forte.** Ceci se traduit généralement après éclaircie par le **maintien ou l'augmentation de la croissance en diamètre** des arbres conservés jusqu'au moment où le couvert est complètement refermé\*. Juste avant sa refermeture, il est d'usage d'éclaircir à nouveau pour éviter un ralentissement de la croissance et pour poursuivre la sélection des meilleures tiges.

### D'un point de vue hydrique

Une éclaircie, en abaissant l'indice foliaire\* des peuplements (cf. Fiche D), diminue l'interception\* des pluies par les arbres de la strate arborée\* et leur transpiration\* (cf. Fiche A). Elle doit être suffisamment forte (cf. Implication 3) pour faire chuter l'indice foliaire\* en dessous de la valeur seuil d'environ 6-7 au-delà de laquelle il y a saturation de la transpiration de la strate peuplement\* (cf. Fiche G). L'effet est alors bénéfique pour le bilan hydrique\* : il est établi que la teneur en eau du sol (cf. Fiche B) et l'état hydrique des arbres sont améliorés en comparaison avec une parcelle non éclaircie. **Cet effet est cependant transitoire** : après éclaircie, du fait de la croissance des arbres, le couvert se referme progressive-

ment jusqu'à (ré-)occuper l'espace laissé libre entre les houppiers\*. Pendant cette refermeture, les arbres réagissent de manière différente en fonction de leur statut avant éclaircie et de leur nouvelle exposition (cf. Fiche G). Au fur et à mesure que l'indice foliaire s'accroît, l'interception des pluies est de nouveau plus forte et la transpiration globale du peuplement augmente proportionnellement.

En fonction de l'intensité\* de l'éclaircie, de l'âge des arbres et des essences en place, plusieurs études montrent que l'indice foliaire revient à un niveau assez comparable à son niveau initial, 3 à 5 ans environ après l'intervention (cf. Fiche E). L'effet de l'éclaircie sur la baisse de consommation en eau est donc temporaire, tout comme son effet sur la croissance en diamètre.

## Implications sylvicoles

Dans la pratique, le sylviculteur a intérêt à pratiquer des éclaircies régulièrement, en particulier lorsque les conditions pédo-climatiques\* sont limitantes et même si la réduction de l'évapotranspiration\* du peuplement et l'amélioration du bilan hydrique ne sont que temporaires. Cela se justifie pour plusieurs raisons :

- il suffit d'éclaircir à nouveau dès que le couvert se referme, voire un peu avant, pour retrouver une amélioration du bilan hydrique. Les rotations\* et l'intensité des coupes doivent être ajustées au cas par cas (cf. Implications 3 et 4) ;
- dans les peuplements où l'indice foliaire est faible à moyen (voisin ou inférieur au seuil de 6-7 avant éclaircie), même si les éclaircies ne sont réalisées que lorsque l'indice est revenu à son



Jeune futaie d'épicéa commun en cours d'éclaircie : ouverture du couvert, abaissement de l'indice foliaire (Champagne-Ardenne).

Sylvain Gaudin - CRPF CA © CNPF

niveau d'avant l'intervention, elles le limitent et le maintiennent à un niveau permettant d'améliorer, au moins temporairement, le bilan hydrique ;

- dans les peuplements à indice foliaire élevé (supérieur au seuil de 6-7), les éclaircies successives sont le seul moyen de l'abaisser progressivement pour revenir à des niveaux permettant d'améliorer le bilan hydrique.

D'une façon générale, le contrôle de l'évapotranspiration d'un peuplement peut se faire par la pratique d'éclaircies régulières, plutôt par le haut (cf. *Implication 5*), dont l'intensité et la périodicité sont fixées en fonction des caractéristiques de ce peuplement et du contexte pédo-climatique.

## Mises en garde

- D'un point de vue hydrique, le choix de l'intensité, de la rotation et du type d'éclaircie est un compromis prenant en compte le contexte pédo-climatique, les risques climatiques et sanitaires et les éventuelles pertes de production : il est par exemple inutile d'éclaircir fortement si les conditions pédo-climatiques ne sont pas limitantes.
- La prise en compte du bilan hydrique est un des critères de décision pour intervenir dans un peuplement. Le sylviculteur devra, par ailleurs, intégrer d'autres paramètres notamment techniques et économiques, afin de trouver le meilleur compromis de gestion.



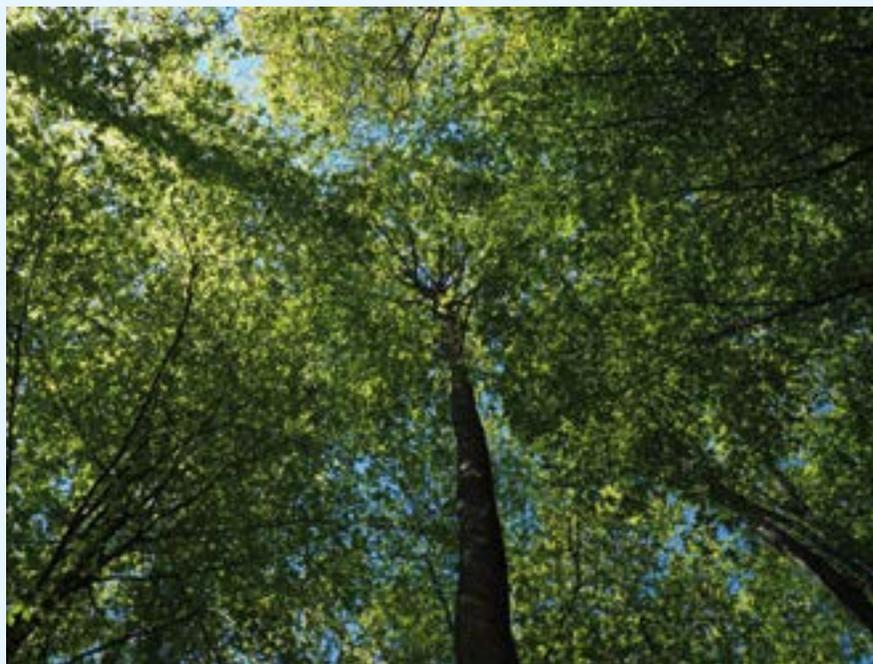
Carole Penpoul - CRPF PACA © CNPF

Eclaircie mécanisée en futaie de pin d'Alep (Var).

Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



Implication pour la gestion associée



Jacques Becquey - IDF © CNPF

Fermeture du couvert d'un peuplement de chêne et charme.



## Deux peuplements réguliers de dimensions différentes mais de même indice foliaire ont-ils le même bilan hydrique ?

### D'un point de vue sylvicole, le regard du forestier

L'indice foliaire\* d'un peuplement forestier\* dépend de nombreux paramètres tels que l'essence qui le compose, les caractéristiques du peuplement (âge, densité, surface terrière, etc.) et la sylviculture qui y est menée (cf. *Fiche D et Implications 1 et 2*). Il varie en fonction de la surface foliaire\* totale du peuplement et en fonction de la surface qu'il occupe ( $\text{m}^2$  de feuilles par  $\text{m}^2$  de sol ; cf. *Fiche C*). **Il est ainsi possible d'observer, pour une même valeur d'indice foliaire, des dimensions de peuplements assez différentes** : en pratique, dans le cas de peuplements réguliers\*, cela correspond à des diamètres moyens différents.

Il peut s'agir par exemple de peuplements de même âge et composés de la même espèce, dont l'un a été régu-

lièrement et fortement éclairci\* alors que l'autre l'a été plus faiblement. Le premier présentera un nombre d'arbres réduit, à gros houppiers\* étalés\* et avec des troncs de gros diamètres. Le second sera composé de nombreux arbres à houppiers plus étriqués (forme en V pour les feuillus) et avec des troncs de faible diamètre. La surface foliaire de chaque arbre est plus importante dans le premier cas mais les arbres sont moins nombreux. Dans le deuxième cas, c'est l'inverse : la surface foliaire de chaque arbre est plus faible mais le nombre d'arbres est plus grand. L'indice foliaire de ces deux peuplements peut donc être identique, malgré un parcours sylvicole très différent. Sur un plan purement sylvicole et financier, ces deux types de peuplements peuvent avoir un intérêt. Cela dépend essentiellement de la facilité de les gérer et des marchés existant pour les bois produits.



© Philippe Balandier – IRSTEA



© Philippe Balandier – IRSTEA



© Philippe Balandier – IRSTEA

**Parcelles forestières de même âge et à indice foliaire comparable, situées dans un même contexte pédo-climatique (forêt domaniale de Blois).**

*Dispositif du Laboratoire d'études des ressources forêt-bois (LERFoB) composé d'une placette régulièrement éclaircie (a) et d'une placette moins régulièrement éclaircie à houppiers fins et étriqués (b1 et b2).*

## D'un point de vue hydrique

L'indice foliaire d'un peuplement est un des paramètres essentiels qui conditionne son bilan hydrique\* (cf. Fiche A). Il détermine les différents flux qui le composent : la transpiration\* de la végétation, l'interception\* des pluies et l'évaporation du sol. On pourrait donc être tenté de penser que deux peuplements à même indice foliaire ont un bilan en eau identique (les mêmes flux d'eau). Ce n'est pas forcément le cas car ce bilan dépend aussi d'autres paramètres qui peuvent être très variables :

- le sol dont les propriétés déterminent la capacité de stockage d'eau (réservoir d'eau du sol\*) et la part réellement accessible pour les plantes (réserve utile en eau du sol\*) (cf. Fiche B) ; indirectement cette réserve module le flux de transpiration : elle diminue nettement à partir d'une teneur d'eau extractible relative inférieure à 0,4 ( $REW < 0,4$  ; cf. Fiche B) ;
- le microclimat\* de la strate peuplement\* qui conditionne la demande climatique\* (rayonnement, vent, déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air\*) responsable de l'évapotranspiration des arbres et des strates inférieures\* (cf. Fiches G et H).

**Il est donc indispensable de prendre en considération le contexte pédo-climatique\* dans la comparaison des bilans hydriques de peuplements aux caractéristiques proches.**

Enfin, il est important de rappeler que l'indice foliaire varie à la fois dans l'espace et dans le temps (cf. Fiche D).

Ainsi, il est peu probable que deux peuplements de même indice foliaire mais ayant des caractéristiques différentes ou étant soumis à des sylvicultures différentes restent longtemps à une même valeur d'indice foliaire.

## Implications sylvicoles

Quand cela est nécessaire (nouvelles conditions d'alimentation en eau, contexte pédo-climatique peu favorable, etc.), le sylviculteur a la possibilité d'infléchir sa gestion sylvicole pour améliorer le bilan hydrique d'un peuplement (cf. *Implications 3 et 4*). Il doit pour cela bien connaître ce qui conditionne ce bilan et **agir de manière à éviter que le peuplement se retrouve dans une situation de stress hydrique\*** qui aboutirait à un arrêt temporaire (quand  $REW < 0,4$ ), voire définitif de la croissance des arbres (cf. Fiche B). **L'indice foliaire fait partie des paramètres directement liés au bilan hydrique. Il convient par conséquent de le connaître et de le contrôler.**

Dans la plupart des cas, d'autres facteurs devront aussi être pris en compte. Prenons par exemple deux peuplements réguliers situés dans un même contexte pédo-climatique, composés de la même espèce, de hauteur et d'âge analogues, mais de densités différentes et qui ont à un moment donné un même indice foliaire élevé. Le sylviculteur peut se poser la question du scénario sylvicole à privilégier entre les deux pratiques. Il doit pour cela tenir compte de plusieurs critères :

- l'évolution probablement différente du bilan hydrique du peuplement au

cours du temps : en fonction de l'intensité\* et de la fréquence des éclaircies pratiquées, il y a une diminution plus ou moins forte et durable de l'évapotranspiration réelle\* du peuplement (cf. *Implications 3 et 4*) ;

- les possibilités d'intervention pour réduire l'évapotranspiration réelle dans les deux peuplements en fonction de leur stade de développement : pour des peuplements hauts et/ou âgés, la réduction de l'indice foliaire par éclaircie est plus facile dans le peuplement de moindre densité (arbres « trapus ») que dans le peuplement dense (arbres élancés) où cela devra se faire plus graduellement à cause du risque plus élevé de chablis ou de dégradation de la qualité des bois ;

- la valeur et les débouchés actuels des bois (billes courtes de gros diamètre dans un cas, billes longues de faible diamètre dans l'autre) : vendables immédiatement ou attente nécessaire, avec risque lié à une absence d'amélioration du bilan hydrique ;

- la faisabilité de mise en œuvre du scénario et le bilan économique : difficultés rencontrées, coûts de travaux, dépenses, recettes.

En résumé, pour deux peuplements réguliers situés dans un même contexte pédo-climatique et ayant un même indice foliaire mais des caractéristiques sylvicoles différentes, la question peut se poser de la gestion à adopter pour conserver un bilan en eau favorable. Cette gestion sera nécessairement différente, même si l'indice foliaire initial est le même.

## Mise en garde

- L'indice foliaire n'est pas le seul paramètre à considérer pour raisonner le bilan hydrique.
- L'indice foliaire doit être contrôlé progressivement par le biais d'éclaircies. Des interventions trop peu fréquentes conduisent à des peuplements très denses avec des arbres à houppiers étriqués (difficilement rattrapables), avec un couvert fermé\* et un indice foliaire élevé. Des interventions initiales trop fortes et rapprochées (demandant un suivi régulier) conduisent à des peuplements avec des arbres espacés à gros houppiers et courtes billes, qui doivent du coup être conservés fermés sans éclaircie en fin de révolution\* pour éviter l'isolement des arbres et des pertes de production.

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées

A

B

C

D

G

H

1

2

3

4



## Le seuil de réserve relative en eau extractible du sol de 0,4 est-il universel ?

### D'un point de vue sylvicole, le regard du forestier

Habituellement, lorsqu'il effectue un diagnostic stationnel, le sylviculteur fait une synthèse entre les données climatiques disponibles sur un poste météorologique proche (température moyenne, précipitations annuelles et en période de végétation, parfois gelées), des informations géologiques, topographiques et des données pédologiques obtenues à partir d'une fosse spécialement creusée ou plus souvent d'un sondage à la tarière. L'alimentation potentielle en eau des arbres est évaluée grossièrement par les précipitations (apports), la nature du sol (capacité de stockage), la topographie (drainage, etc.) et éventuellement la température (évaporation).

**La connaissance de la quantité d'eau disponible dans le sol et accessible pour les plantes est en effet essentielle pour raisonner la gestion.** Elle détermine

la capacité des espèces à survivre et à croître. Évaluer cette quantité permet de guider le choix des essences à planter ou à favoriser dans un peuplement, en fonction de leurs exigences spécifiques. Elle détermine aussi les itinéraires sylvicoles à appliquer au peuplement (cf. *Implications 3, 4, 5 et 7*). **Le sylviculteur estime généralement pour cela la réserve utile en eau du sol\* (RU) qui permet de caractériser la capacité du sol à stocker l'eau et à la restituer aux végétaux** (cf. *Fiche B*). Elle correspond à la quantité d'eau maximale<sup>1</sup> que les végétaux peuvent extraire dans un sol donné. Elle dépend donc très fortement à la fois des propriétés du sol (texture, structure, éléments grossiers) et de la profondeur d'enracinement de la végétation. Plus la réserve utile en eau est élevée, meilleure est la disponibilité en eau extractible par les plantes. Mais si cette

---

<sup>1</sup> C'est pour cette raison que la réserve utile en eau est aussi appelée réserve utile maximale en eau (RUM).

grandeur renseigne sur une capacité de stockage et d'extraction, elle ne tient pas compte de l'état de remplissage de cette réserve et de son évolution dans le temps (cf. Fiche B).

## D'un point de vue hydrique

Tous les sols n'ont pas les mêmes capacités à retenir et à restituer l'eau. Cela peut être quantifié par deux valeurs, la réserve en eau à la capacité au champ\* (réserve maximale que peut retenir un sol

après ressuyage) et la réserve en eau au point de flétrissement permanent\* des plantes (c'est-à-dire quand la plante ne peut plus extraire d'eau, bien qu'il en reste encore dans le sol car cette eau est trop fortement liée aux particules du sol). La différence des deux définit la réserve utile en eau.

À épaisseur égale, un sol argileux a une réserve en eau à la capacité au champ bien supérieure à celle d'un sol sableux mais sa réserve en eau au

### Réalisation d'une fosse pédologique dans un peuplement de douglas.

Observation des racines fines (proportion et profondeur de l'enracinement) pour estimer la taille du réservoir d'eau du sol et appréciation des caractéristiques du sol (texture, structure, charge en éléments grossiers, etc.) pour compléter le diagnostic stationnel et estimer la réserve utile en eau du sol..



© Christophe Drénou – IDF



© Philippe Balandier – IRSTEA



© Philippe Balandier – IRSTEA

**Fosse pédologique en peuplement de chêne mettant en évidence un enracinement superficiel sur couche d'argile quasi impénétrable.**

point de flétrissement permanent est aussi plus élevée. **La réserve en eau en absolu d'un sol à un moment donné ne renseigne donc pas sur la quantité d'eau réellement disponible pour la plante** (avec 10 % d'eau, un sol argileux est déjà bien en dessous du point de flétrissement permanent alors qu'il reste encore de l'eau extractible dans un sol sableux). C'est pourquoi il est plus facile de raisonner en réserve d'eau extractible relativement à la réserve utile en eau (Réserve Relative en Eau Extractible\*, REW ; cf. Fiche B). REW varie entre une valeur de 1 à la capacité au champ et de 0 au point de flétrissement permanent. Une valeur de 0,5 pour REW signifie qu'il reste 50 % de l'eau extractible dans le réservoir sol et ce, quels que soient le type de sol et sa texture.

La quantité d'eau contenue dans le réservoir d'eau du sol\* fluctue dans le temps. Or, de nombreuses études ont montré que **la diminution de REW en dessous d'une valeur de 0,4 entraîne une régulation de la transpiration\* des arbres**. En effet, à partir de ce seuil, l'eau devient difficilement extractible. Cette résistance à l'absorption induit une fermeture des stomates\*, réduisant les échanges gazeux et la transpiration. Cela impacte la photosynthèse et la croissance. Plus la valeur de REW diminue en dessous de 0,4 et plus le flux de transpiration est réduit, entraînant d'abord une réduction de croissance puis un arrêt pour les valeurs les plus faibles. **Comme ce seuil de REW correspond à des mécanismes thermodynamiques liés à l'état de liaison de l'eau dans le sol, il est indépendant de l'espèce** (cf. Fiche B).

**Cette valeur seuil de REW à 0,4 est universelle** : elle a été validée par de nombreuses études réalisées dans des conditions pédo-climatiques\* variées et pour des essences différentes, ce qui lui donne une valeur générique. Ce qui est variable, en fonction des situations (propriétés du sol, taille de la RU, espèce, etc.), c'est la vitesse à laquelle ce seuil est atteint ; cette vitesse est dépendante du contexte pédo-climatique et de l'indice foliaire\* de la végétation (effet combiné de l'évapotranspiration réelle\* des arbres et de la pluie arrivant au sol) (cf. Fiches A et G).

## Implications sylvicoles

La prise en compte de la réserve utile en eau du sol dans les raisonnements de gestion doit tenir compte du fait que, **tant que le remplissage de la part extractible du réservoir d'eau du sol (équivalente à la RU) est comprise entre 100% et 40% ( $0,4 < REW < 1$ ), les arbres fonctionnent sans limitation hydrique**. Les 40% restants sont aussi accessibles mais ils seront mobilisés à une vitesse plus lente par l'arbre, non optimale : **le passage dans cette «réserve» s'accompagne d'une chute de croissance, voire de son arrêt**. Les conséquences pour les arbres et leur sévérité dépendent de la durée (nombre de jours) pendant laquelle REW reste inférieure à 0,4 et de l'ampleur (REW se rapprochant de 0) de la consommation de cette ultime réserve.

Compte tenu de ces éléments, on comprend qu'il est primordial de bien connaître le contexte pédo-climatique dans lequel évolue un peuplement (ou dans lequel il doit être implanté), pour

veiller à ne retenir que les essences qui ont des exigences en adéquation avec les potentialités de la station (dont le climat) afin que REW reste le plus longtemps possible au-dessus de 0,4.

Pour les peuplements en place, la **sylviculture doit contribuer à maintenir le plus longtemps possible le remplissage du réservoir d'eau du sol entre 100 % et 40 %** en favorisant les entrées d'eau (la non interception\* des pluies) et en réduisant les sorties d'eau (l'évapotranspiration\*). C'est d'autant plus vrai pour les sols à faible réserve utile en eau. Il convient pour cela d'appliquer des itinéraires sylvicoles permettant d'économiser au maximum l'eau, notamment en maintenant un indice foliaire du peuplement en dessous du seuil d'environ 6-7, mais c'est à raisonner en fonction de la contrainte pédo-climatique :

- si elle est faible (REW étant peu fréquemment sous le seuil de 0,4), le sylviculteur peut viser un indice foliaire plus élevé ;
- si elle est forte (REW fréquemment sous le seuil de 0,4 et se rapprochant de 0), alors l'indice foliaire doit être bien inférieur (cf. Fiche G), ce que le sylviculteur peut obtenir en pratiquant régulièrement des éclaircies\* (cf. Implications 3, 4, 5 et 7).

Pour mieux comprendre la dynamique de remplissage et de vidange du réservoir d'eau du sol, il est possible d'observer l'évolution de REW dans le temps. Il existe en effet un **modèle de calcul du bilan hydrique\* des peuplements forestiers\* qui simule l'évolution de cette réserve relative en eau extractible au pas de temps journalier, pour une ou plusieurs années consécutives**. Il s'agit du modèle

**Biljou**<sup>2</sup>, développé par l'INRA. Il implique de connaître les caractéristiques climatiques (précipitations, températures, etc.), l'indice foliaire maximum du peuplement, la phénologie\* de l'espèce (espèce sempervirente\* ou décidue\* et le cas échéant, la date de débourrement et de chute des feuilles), les caractéristiques des premiers horizons de sol (réserve utile en eau, proportion de racines, etc.). Les résultats fournis sont une aide précieuse pour raisonner la gestion, en particulier pour des peuplements situés dans des conditions d'alimentation en eau limitantes de manière ponctuelle ou permanente. Il peut aussi éventuellement permettre de mieux comprendre les causes de l'affaiblissement apparent des arbres.

## Mises en garde

- Les évolutions climatiques annoncées vont augmenter dans certaines régions la fréquence et la durée des périodes sèches au cours de la saison de végétation. Dans de nombreux cas, sans adaptation de la sylviculture, le seuil de REW de 0,4 risque d'être atteint plus fréquemment et plus tôt dans la saison.
- Il convient de rester particulièrement vigilant pour les sols à textures grossières, à forte charge en éléments grossiers et/ou limités en profondeur. Sur ces sols, l'épuisement de la réserve utile en eau du sol est rapide. Il est donc préférable de n'y introduire (ou de n'y maintenir) que les essences les plus rustiques et d'avoir conscience qu'elles seront peu productives. Cette précaution est moins importante dans les zones à forte pluviométrie.

---

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

Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées

A

B

G

Implications pour la gestion associées

3

4

5

7

10



CRPF Île de France – Centre © CNPF

Détermination des caractéristiques du sol à l'aide d'un sondage à la tarière pédologique.

9

# 10

## Les vieux peuplements réguliers ont-ils un bilan hydrique plus favorable que les jeunes ?

### D'un point de vue sylvicole, le regard du forestier

Au cours des différents stades de développement d'un peuplement forestier\*, les systèmes racinaires et foliaires des arbres évoluent en fonction de ses caractéristiques (essence, structure\*, mélange, etc.), du contexte pédo-climatique\* et sous l'influence des interventions sylvicoles. Les peuplements âgés gérés ont généralement des densités d'arbres moindres que les jeunes<sup>1</sup> peuplements mais les arbres y ont des diamètres de tronc plus importants et des houppiers\* plus étalés. À l'inverse, les peuplements jeunes sont souvent plus denses mais les arbres sont moins gros avec des houppiers plus étriqués. On peut donc se demander s'il existe une différence de bilan

hydrique\* entre ces deux situations et si oui, quel traitement\* sylvicole adopter pour chaque situation ?

### D'un point de vue hydrique

Dès le stade juvénile\*, la totalité du volume de sol disponible est rapidement colonisée par les racines fines du système racinaire des arbres, si les interactions avec d'autres racines (cf. *Fiches H et I*) ou les caractéristiques du sol ne freinent pas cette colonisation (éléments grossiers, structure compacte, etc.). Ces racines à faible durée de vie se renouvellent régulièrement. Dans les forêts gérées où les arbres atteignent rarement le stade sénescence, le volume qu'elles prospectent et leur dynamique de renouvellement varient donc ensuite assez peu avec l'âge. Cette prospection par les racines fines est déterminante pour l'alimentation en eau des plantes puisque ce sont ces racines qui assurent la majeure partie de l'ab-

---

<sup>1</sup> Dans cette fiche, la notion de « jeune » peuplement n'intègre pas les stades de régénération.

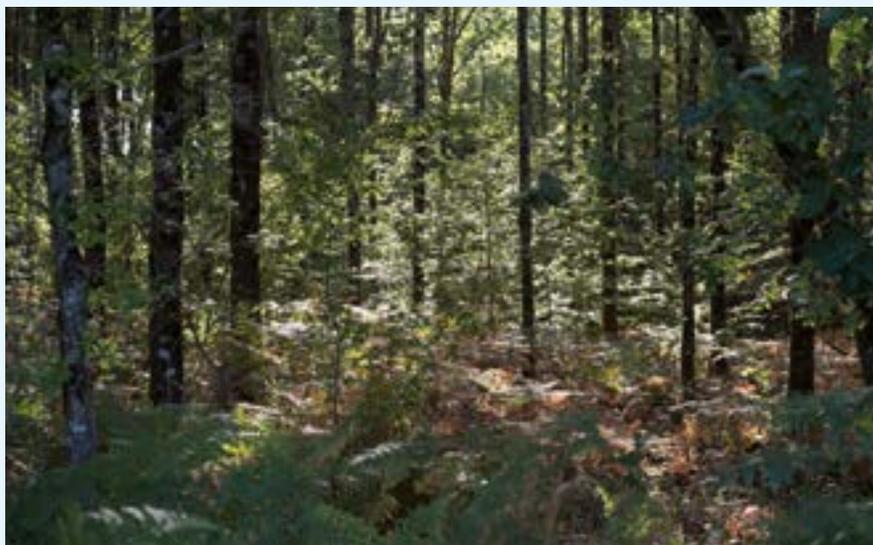
sorption de l'eau et des nutriments dans le sol. Plus la prospection est importante, plus grand est le réservoir d'eau du sol\*. L'eau réellement extractible (réserve utile en eau\*) dépend cependant des propriétés du sol (texture notamment), et de son remplissage grâce aux apports des précipitations (cf. Fiche B).

Pour que la plante puisse bénéficier de conditions d'alimentation en eau favorables, il est indispensable que la réserve en eau du sol soit alimentée par les précipitations d'une part, et que la demande climatique\* (rayonnement, vent, déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air\*) n'entraîne pas une forte évapotranspiration\* d'autre part, sinon la réserve en eau du sol\* serait vite épuisée. L'équilibre entre ces différents flux est conditionné par l'indice foliaire\* du peuplement (cf. Fiche G).

**Dans les peuplements gérés, il n'est pas possible d'établir une relation entre l'âge du peuplement et son indice foliaire.**

Dans les peuplements peu ou pas gérés, il augmente au fur et à mesure que le peuplement vieillit, jusqu'à atteindre un maximum où il se stabilise. Il a ensuite parfois tendance à diminuer légèrement avec l'âge (cf. Fiches D et E). Cette diminution n'est cependant pas systématique et reste très variable selon les peuplements et selon leur cycle de vie (maturation, vieillissement physiologique, etc.).

Ainsi, deux peuplements réguliers\* composés de la même essence, l'un au stade perchis et l'autre au stade futaie mature (âgée), situés dans un même contexte pédo-climatique, pourront avoir sensiblement la même taille de réservoir d'eau du sol. En revanche, la réserve réellement disponible pour la végétation à un temps t



Sylvain Gaudin – CRPF CA © CNPF

**Jeune peuplement de chêne sessile au stade perchis (Champagne-Ardenne).**

*Dans ce jeune peuplement, les troncs sont de faible diamètre et les houppiers sont étriqués.*

ne sera pas forcément la même car elle est en partie conditionnée par l'indice foliaire (plus ou moins grande évapotranspiration et interception\* des pluies), qui peut ne pas être la même entre les deux peuplements, et ceci sans lien avec l'âge.

## Implications sylvicoles

Dans un contexte pédo-climatique donné, ce n'est pas l'âge du peuplement qui influe sur son bilan hydrique, mais ses caractéristiques – en particulier son

indice foliaire – liées notamment à la gestion (ou à l'absence de gestion) qui lui est appliquée. Ainsi, certains jeunes peuplements pourront avoir un bilan hydrique plus favorable que certains peuplements âgés, mais pour d'autres cela pourra être l'inverse.

En pratique, quel que soit l'âge du peuplement, il est donc indispensable de tenir compte du contexte pédo-climatique dans lequel il évolue et de son indice foliaire pour évaluer le partitionne-



Jérôme Rosa - CRPF Île-de-France-Centre © CNPF



Jérôme Rosa - CRPF Île-de-France-Centre © CNPF

### **Futaie mature de chêne sessile en forêt domaniale de Bercé (Sarthe).**

*Dans ce peuplement âgé, le diamètre des troncs des arbres est de taille importante (a) et les houppiers sont plus étalés que dans un jeune peuplement (b).*

ment\* des différents flux qui composent le bilan hydrique (cf. Fiche A). Il est alors plus facile d'anticiper d'éventuelles situations de déficit hydrique\*. Pour des peuplements amenés à se trouver dans ces situations, qu'ils soient jeunes ou vieux, il existe plusieurs moyens d'action :

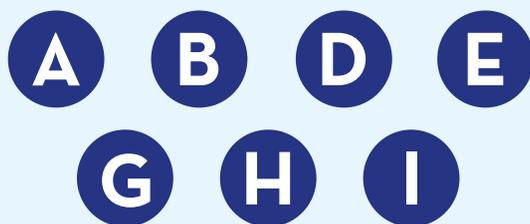
- préserver la réserve en eau du sol et favoriser l'étalement de la prospection racinaire en évitant les phénomènes de tassement qui empêchent l'infiltration de l'eau dans le sol et limitent l'enracinement (modification de la structure et de la porosité, augmentation de la compacité, etc.) ;
- contenir l'indice foliaire en réalisant des éclaircies\* dont la fréquence, le type et l'intensité\* devront être adaptés au contexte pédo-climatique et économique du site (cf. Implications 3, 4, 5 et 7).

Ces différentes précautions peuvent permettre de limiter l'impact d'éventuels déficits hydriques en diminuant, selon le cas, la durée ou l'intensité du déficit. Le risque d'une baisse de croissance (lorsque la proportion de réserve utile en eau du sol disponible chute en dessous de 40%), voire d'une mortalité des arbres, est ainsi réduit (cf. Implication 9).

## Mises en garde

Ne pas penser que les peuplements sont de plus en plus résistants à la sécheresse avec l'âge. En effet, il ne faut pas confondre résistance à la sécheresse (qui dépend de mécanismes complexes altérés par le vieillissement physiologique de l'arbre) et exposition à la sécheresse (qui dépend du bilan hydrique).

### Fiches de synthèse des connaissances scientifiques et techniques associées



### Implications pour la gestion associées





# Partie



# Glossaire

## A

### Aubier :

Partie périphérique du bois de l'arbre où se trouvent les éléments conducteurs fonctionnels à travers lesquels s'effectue le transport de la sève brute. Il est donc constitué des cernes de bois les plus récents.

Certaines essences telles que le hêtre ne différencient pas visuellement de bois d'aubier.

### Auto-éclaircie :

« Mortalité naturelle se produisant au sein d'un peuplement forestier\*, généralement en l'absence d'interventions sylvicoles, liée principalement à des phénomènes de forte concurrence (essentiellement vis-à-vis de la lumière, mais aussi vis-à-vis de l'eau, des éléments minéraux, etc.) » (1)

## B

### Bilan hydrique d'un peuplement :

Somme algébrique des flux d'eau entrant et sortant du peuplement forestier\*. Il est ici considéré dans son ensemble, comme un système (système étudié\*) comportant la strate peuplement\* et le sol colonisé par les racines de la végétation.

Dans ce bilan simplifié, on compte positivement :

- les précipitations (P).

On compte négativement :

- la transpiration\* de la strate peuplement (T) ;

- l'interception\* des précipitations (In) par la strate peuplement ;
- l'évaporation du sol (E) ;
- le drainage\* (D) ;
- le ruissellement (X).

L'état de remplissage de la réserve en eau du sol\* à la date t (R<sub>t</sub>) résulte de la variation entre deux dates de la réserve :

$$R_t = R_{t-1} + P - T - In - E - D - X$$

Pour augmenter R<sub>t</sub>, il faut diminuer les sorties (T, In, D, etc.).

*Ne pas confondre le bilan hydrique avec le bilan hydrologique, un terme utilisé à l'échelle du bassin versant et qui inclut des couches de sous-sol profondes, non accessibles aux racines.*

## C

### Canopée :

Dans le contexte forestier, il s'agit de la « frange supérieure des houppiers\* des arbres d'une formation forestière (peuplement, forêt, massif) soumise à l'influence directe de la lumière solaire. » (1)

### Capital

#### (d'un peuplement forestier) :

« Volume ou surface terrière, parfois nombre d'arbres recensables d'un peuplement forestier\*. » (1)

### Codominant :

« Se dit d'un arbre de l'étage\* dominant, situé légèrement en dessous des arbres dominants\* voisins ou à houppier\* moins développé. » (1)

**Composition****(d'un peuplement forestier) :**

« Proportion de chacune des essences d'un peuplement forestier\*, exprimée en pourcentage du total de sa surface terrière, de son nombre de tiges ou de son volume. » (1). Cette proportion peut aussi s'exprimer en indice foliaire\*.

**Conductance stomatique pour la vapeur d'eau :**

Correspond à l'inverse de la résistance opposée par les stomates\* pour la sortie des molécules d'eau de la feuille vers l'atmosphère lorsqu'il y a transpiration\*. Plus la conductance stomatique pour la vapeur d'eau est forte, plus la résistance imposée par les stomates est faible (cela traduit que les stomates sont très ouverts) : la transpiration\* est alors facile, tout comme l'entrée de CO<sub>2</sub> dans la feuille (photosynthèse). Les variations de conductance stomatique pour la vapeur d'eau sont donc dictées par l'ouverture et par la fermeture des stomates. Les plants qui subissent une sécheresse édaphique\* ou atmosphérique\* ont une conductance stomatique pour la vapeur d'eau inférieure à celle de plants bien alimentés en eau.

**Contexte pédo-climatique :**

Ensemble composé par le sol exploitable par les racines des arbres, par la demande climatique\* et par la pluie pour un site donné.

**Coupe d'ensemencement :**

« Première coupe progressive de régénération dans une futaie mûre, ayant pour but de favoriser l'installation de la régénération naturelle. » (1)

**Coupe secondaire :**

« Coupe progressive de régénération naturelle comprise entre la coupe d'ensemencement\* et la coupe définitive pour favoriser le développement des semis. Il peut y avoir, selon les peuplements, une ou plusieurs coupes secondaires. » (1)

**Couvert :**

« Surface de sol occupée par la projection verticale sur un plan horizontal des houppiers\* d'un arbre, d'une population d'arbres, d'un peuplement forestier\* dans son ensemble (couvert total) ou d'une ou plusieurs strates\* de végétation (couvert partiel). Il est exprimé le plus souvent en pourcentage de la surface au sol dont le total peut excéder 100 % du fait de la superposition des strates. » (1)

Dans le cadre de ce travail, un couvert dit "fermé" correspond à des houppiers jointifs. Le couvert "ouvert" correspond, quant à lui, à des houppiers non jointifs. Dans le cas des peuplements réguliers\*, le couvert concerne la strate arborée.

**Cycle sylvicole :**

« Ensemble des opérations sylvicoles se succédant tout au long de la vie d'un peuplement forestier\*, depuis sa régénération jusqu'à sa récolte finale. Pour la futaie régulière\*, la durée du cycle est déterminée par l'âge d'exploitabilité des essences principales. » (1)

**D****Débit de sève brute****(ou transpiration totale de l'arbre) :**

Volume d'écoulement de la sève brute

à travers la surface d'aubier\* de l'arbre, par unité de temps. Il s'exprime en L/arbre/j.

### **Décidu(e) :**

« Relatif aux plantes dont la totalité des feuilles tombent selon un rythme saisonnier (du latin *deciduus*, qui tombe). » (2)

**Dans le cadre de ce travail**, il est important de rappeler que l'indice foliaire\* d'un peuplement décidu présente des variations saisonnières fortes : nulle en période défeuillée, augmentation rapide au printemps après débourrement et atteinte d'un plateau jusqu'à diminution progressive à l'automne.

### **Déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air :**

« Différence entre la quantité maximale d'eau sous forme de vapeur (humidité absolue) que l'air pourrait contenir à un moment et à une température donnée, et celle qu'il contient réellement (humidité relative). Plus le déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air est important, plus le pouvoir évaporant de l'air augmente. Il s'exprime en masse d'eau par unité de masse ou de volume d'air. » (1)  
C'est un des termes de l'évapotranspiration potentielle\*.

### **Déficit hydrique :**

Le déficit hydrique ou déficit en eau du sol caractérise l'état de la réserve en eau du sol\* à un instant donné par rapport à son niveau de remplissage maximal ou par rapport à des seuils, définis par référence aux conséquences physiologiques du manque d'eau (d'après (3)). Il quantifie la sécheresse du sol\* ou sécheresse édaphique.

### **Demande climatique :**

Elle est définie principalement par quatre variables climatiques : le rayonnement, la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité de l'air. Elle est quantifiée par l'évapotranspiration potentielle\* (ETP). Ainsi, plus il y a de soleil, plus l'air est sec, plus la température est élevée, plus le vent est fort, plus le besoin en eau des plantes est important pour compenser la transpiration\* imposée par le climat.

### **Densité de flux de sève brute :**

« Volume d'écoulement de la sève brute par unité de surface d'aubier\* et par unité de temps » (4) (ex. :  $\text{dm}^3/\text{cm}^2/\text{h}$ ).

### **Dominant :**

« Arbre de l'étage\* dominant, de plus grande hauteur que ses voisins immédiats et à houppier\* plus développé. » (1)

### **Dominé :**

« Arbre situé en dessous des arbres dominants\* et codominants\* » (1)

### **Drainage :**

Eau d'infiltration au-dessous du plancher racinaire. Selon les caractéristiques hydrologiques du site auquel on s'intéresse, ce flux alimente nappes profondes et cours d'eau (d'après (3)).

### **Duramen :**

Partie centrale du bois de l'arbre qui contient des éléments conducteurs qui ne sont plus fonctionnels du fait de l'accumulation de diverses substances dans les parois et cavités cellulaires. Il joue un rôle mécanique de soutien de l'arbre. Il est constitué des cernes les plus anciens de l'arbre. Il est aussi appelé bois de

cœur ou bois parfait. Certaines essences comme le hêtre ne différencient pas de duramen.

## E

### Eau gravitaire :

Eau non retenue par le sol qui s'infiltré et percole vers les profondeurs.

### Eau liée :

Eau trop fortement adhérente aux particules du sol pour être extractible par la végétation.

### Éclaircie :

« Coupe généralement sélective réduisant le nombre d'arbres et prélevant des produits marchands. » (1)

### Éclaircie faible :

Éclaircie\* d'une intensité\* inférieure à 20% en volume (ou en surface terrière).

### Éclaircie forte :

Éclaircie\* d'une intensité\* supérieure à 30% en volume (ou en surface terrière).

### Éclaircie par le haut :

Coupe enlevant principalement des arbres qui concurrencent le houppier\* de ceux que l'on souhaite privilégier.

### Éclaircie précoce :

Première éclaircie\* réalisée peu après la fermeture du couvert\* ; la hauteur de branches mortes n'excède pas 1/3 de la hauteur totale des arbres (aux densités habituelles de plantation, elle correspond à une hauteur dominante\* de peuplement comprise entre 10 et 13 m).

### Éclaircie sélective :

« Mode opératoire d'une coupe d'éclaircie\* qui détermine les arbres à enlever en éclaircie au profit d'arbres jugés de meilleure qualité. » (1)

### Éclaircie systématique :

« Mode opératoire d'une coupe d'éclaircie\*, généralement réalisée dans des plantations et enlevant une ligne sur deux ou une ligne sur trois. Elle est le plus souvent complétée par une éclaircie sélective\* dans le reste du peuplement forestier\*. » (1)

### Éclaircie tardive :

Éclaircie\* réalisée bien après la fermeture du couvert\* ; le peuplement subit une phase de compression ce qui se traduit par une hauteur de branches mortes de plus de la moitié de la hauteur totale des arbres (elle correspond généralement à une hauteur dominante\* de peuplement de plus de 16 m aux densités habituelles de plantation).

### Étage :

« Dans un peuplement forestier\*, espace occupé par les houppiers\* des arbres d'une même tranche de hauteur bien différenciée. La présence d'une discontinuité verticale marquée permet de distinguer plusieurs étages : dominant\*, dominé\* et sous-étage\*.

Rem. 1) Dans les peuplements réguliers\*, on peut distinguer un étage principal comprenant l'ensemble des houppiers des arbres dominants\*, codominants\* et dominés\*, pour le différencier du sous-étage\*.

Rem. 2) En futaie irrégulière\*, préférer strate\*. » (1)

### **Évapotranspiration potentielle (ETP) :**

L'évaporation potentielle est un indice qui quantifie la demande climatique\*. Elle correspond à la quantité d'eau maximale transférée vers l'atmosphère par évaporation du sol et par transpiration\* des végétaux en condition de bonne alimentation en eau.

L'ETP se décompose en un terme lié au rayonnement (radiatif) et en un terme lié au déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air\* (convectif). Elle est définie par un volume d'eau par unité de temps (ex. : L/jour ou m<sup>3</sup>/an). Elle peut être également ramenée à une surface au sol (ex. : L/m<sup>2</sup>/jour équivalent à mm/j ou à m<sup>3</sup>/ha/an).

### **Évapotranspiration réelle (ETR) :**

Elle correspond à l'évapotranspiration d'un couvert\* végétal particulier pour un stade phénologique\* quelconque et pour toutes conditions hydriques. Elle dépend de la transpiration\* de la végétation, de l'évaporation de l'eau interceptée et de l'évaporation du sol.

L'ETR est une fraction de l'ETP\*, maximale en situation hydrique confortable et qui diminue soit lors d'un manque d'eau dans la zone racinaire, soit lors d'un déficit en vapeur d'eau de l'air\* élevé. Ces deux phénomènes contraignent le végétal à fermer partiellement les stomates\* des feuilles. Elle est définie par un volume d'eau par unité de temps (ex. : L/jour ou m<sup>3</sup>/an). Elle peut être également ramenée à une surface au sol (ex. : L/m<sup>2</sup>/jour équivalent à mm/j ou à m<sup>3</sup>/ha/an).

Dans le cadre de ce travail, lorsque le terme "évapotranspiration" est utilisé, il est question d'ETR. S'il est question d'évapotranspiration potentielle, c'est alors précisé directement.

## **F**

### **Facteur d'élancement (H/D) :**

Pour un peuplement, rapport entre la hauteur totale (H) et le diamètre à 1,30 m (Dg) de son arbre moyen. Par commodité, on utilise parfois la hauteur dominante\* (H<sub>0</sub>) du peuplement. Ce rapport permet d'apprécier la résistance d'un arbre ou d'un peuplement aux dégâts provoqués par le vent ou par la neige (d'après (1)).

### **Fermeture du couvert :**

v. «Couvert fermé».

### **Futaie irrégulière :**

v. «Irrégulier».

### **Futaie régulière :**

v. «Régulier».

## **H**

### **Hauteur dominante (H<sub>0</sub>) :**

Pour un peuplement forestier\*, hauteur moyenne des 100 plus gros arbres par hectare bien répartis. (1)

### **Houppier :**

« Ensemble des ramifications vivantes d'un arbre (branches et rameaux) situées au-dessus du fût. » (1)

### Indice de densité relative (RDI) :

« Rapport du nombre de tiges d'un peuplement équienne monospécifique au nombre de tiges d'un peuplement équienne monospécifique de même espèce et de même surface terrière jamais éclairci. La loi d'auto-éclaircie\* rend ce calcul possible (dans un peuplement équienne monospécifique sans aucune intervention sylvicole, on constate aux divers stades de son évolution que le diamètre moyen quadratique est inversement proportionnel à la densité des tiges élevée à la puissance 1,5). » (1)

### Indice foliaire du peuplement (IF) :

Il correspond à la surface foliaire\* du peuplement contenue dans la strate feuillée\* du peuplement projetée par unité de surface au sol. Il s'exprime en m<sup>2</sup> de feuilles par m<sup>2</sup> de sol ou par un nombre sans unité.

### Intensité d'éclaircie :

« Quantification du prélèvement réalisé lors d'une éclaircie\*, s'exprimant par la proportion du nombre de tiges, de la surface terrière ou du volume sur pied enlevé dans un peuplement forestier\* par rapport à ces mêmes caractéristiques avant éclaircie. » (1). Cette quantification peut également être exprimée en indice foliaire\*.

### Interaction des espèces :

En écologie des communautés, la notion d'interaction fait référence au fait que des espèces sont confrontées les unes aux autres. Cette notion ne fait pas

référence au résultat de cette co-présence, qui peut être neutre pour tous, positif pour tous ou seulement pour certains, négatif pour tous ou pour certains, etc. On parle de compétition quand une des espèces bénéficie de l'interaction au détriment de l'autre. On parle de facilitation quand une espèce va bénéficier de la présence de l'autre.

### Interception des précipitations (In) :

Quantité d'eau interceptée par le feuillage lors d'événements pluvieux. L'interception est l'un des termes majeurs du bilan hydrique\* d'un peuplement forestier\*. Elle est définie par le rapport entre la pluie sous couvert\* et la pluie incidente, en pourcentage ; elle correspond à un volume d'eau par unité de temps (ex. : L/jour ou m<sup>3</sup>/an). Elle peut être également ramenée à une surface au sol (ex. : L/m<sup>2</sup>/jour équivalent à mm/j ou m<sup>3</sup>/ha/an). L'interception des précipitations est souvent exprimée en mm pour comparer cette grandeur à celle de la pluie ou de l'évapotranspiration potentielle\*.

### Irrégulier (au sens futaie irrégulière) :

« La futaie irrégulière se définit à trois niveaux :

1. *structure\** dont la distribution des diamètres ne correspond pas à une courbe en cloche (unimodale). Elle se caractérise par une grande dispersion des diamètres ;
2. *peuplement forestier\** de structure irrégulière constitué de tiges de plusieurs catégories de grosseur réparties pied à pied ou par bouquets ;
3. *mode de traitement\** cherchant à valoriser dans un peuplement les arbres

des différentes catégories de grosseur pouvant conduire à son renouvellement partiel. » (1)

## J

### **Jeune peuplement régulier :**

Peuplement régulier\* au stade du perchis (catégories de grosseurs concernées : perches et petit bois ; classes de diamètres à 1,30 m : de 10 à 25 cm).

## M

### **Mélangé :**

v. «Peuplement mélangé».

### **Microclimat :**

Il s'agit de la déclinaison locale du climat modifié par la végétation et par la microtopographie. Cela concerne toutes les variables climatiques (rayonnement, température, humidité de l'air, vent et précipitations) d'un espace homogène restreint qui influencent la vie de la plante (croissance et développement, fonctionnement hydrique et carboné, reproduction, santé, etc.).

### **Monopoliste :**

« Caractérise un type de végétation ou une formation végétale qui connaît une dynamique spatiale de grande ampleur. » (1)

## O

### **Ouverture du couvert :**

v. «Couvert ouvert».

## P

### **Partitionnement :**

Partage des différents flux d'eau déterminant le bilan hydrique\* dans un peuplement forestier\* et entre les différentes strates\* qui le composent.

### **Pédo-climatique :**

v. « Contexte pédo-climatique ».

### **Peuplement forestier :**

v. « Système étudié ».

### **Peuplement irrégulier :**

v. « Irrégulier (au sens futaie irrégulière) ».

### **Peuplement mélangé :**

Au sens large, il s'agit d'un peuplement forestier\* composé au minimum de deux essences différentes, soit uniquement feuillues, soit uniquement résineuses, soit les deux (également appelé peuplement mixte), dont aucune n'atteint le seuil de pureté retenu (en général, couvert\* ou surface terrière supérieurs à 75%). Le mélange peut être organisé pied à pied, par bouquets, par lignes, par étages\*, etc. (d'après (1)).

### **Peuplement régulier :**

v. « Régulier (au sens futaie régulière) ».

### **Phénologie :**

La phénologie des êtres vivants est l'étude de l'apparition d'événements périodiques de leur vie qui est déterminée par les variations saisonnières du climat. (5)

### **Productivité :**

Accroissement moyen annuel en volume du peuplement forestier\* à l'hectare ( $m^3/ha/an$ ).

**Productivité maximale :**

Maximum de l'accroissement moyen annuel en volume du peuplement forestier\* à l'hectare ( $m^3/ha/an$ ).

**R****Refermeture du couvert :**

v. « Couvert ».

**Régime :**

« Mode de renouvellement d'un peuplement forestier\*. On distingue fondamentalement deux régimes :

- le taillis (régénération végétative),
- la futaie (régénération par semences).

Le taillis sous futaie est la combinaison de ces deux régimes. » (1)

**Régulier**

*(au sens futaie régulière) :*

« La futaie régulière se définit généralement à trois niveaux :

1. *structure\** dont la distribution des diamètres correspond à une courbe en cloche (unimodale). Elle se caractérise par l'indication de la classe d'âge ou de critères dendrométriques moyens (diamètre, hauteur, etc.) ;

2. *peuplement forestier\** de structure régulière. Une futaie régulière suit les stades d'évolution semis, fourré, gaulis, perchis et futaie (jeune, adulte, vieille) ;

Par extension, elle peut provenir :

- de la régularisation d'un taillis sous futaie ou d'une futaie irrégulière\* ;
- du balivage d'un taillis.

3. *mode de traitement\** caractérisé par une séparation de la nature des interventions dans les différents peuplements

forestiers en fonction de leur âge ou de leur catégorie de grosseur :

- récolte et renouvellement des peuplements forestiers mûrs ;
- amélioration des peuplements en cours de croissance (travaux sylvicoles et coupes). » (1)

**Relation allométrique :**

Relation statistique qui permet de prédire une mensuration d'un arbre (typiquement sa biomasse) en fonction d'une autre mensuration (son diamètre par exemple). Elle traduit généralement un équilibre fonctionnel entre les grandeurs.

Une équation allométrique est une formule qui formalise de manière quantitative cette relation. (6)

**Réserve en eau à la capacité au champ ( $R_{cc}$ ) :**

Il s'agit de la quantité maximale d'eau que peut retenir le réservoir d'eau du sol\* après écoulement de l'eau gravitaire\* ou ressuyage par drainage\*. Elle est dépendante de la texture. Elle s'exprime en mm.

**Réserve en eau au point de flétrissement permanent ( $R_{pfp}$ ) :**

Il s'agit de la quantité d'eau du réservoir d'eau du sol\* que les racines ne sont pas capables d'extraire car trop fortement liée aux particules de sol. Elle caractérise un état que les agronomes appellent «le point de flétrissement permanent de la plante». Elle est dépendante de la texture. Elle s'exprime en mm.

**Réserve en eau du sol ( $R_s$ ) :**

Il s'agit de la quantité d'eau contenue dans le réservoir d'eau du sol\* à un ins-

tant t.  $R_t$  peut être supérieure à la réserve en eau à la capacité au champ\* ( $R_{cc}$ ) ou inférieure à la réserve en eau au point de flétrissement permanent\* ( $R_{pfp}$ ). Elle s'exprime en mm.

*Ne pas confondre avec la « Réserve utile en eau du sol\* » (RU). Contrairement à elle,  $R_t$  est indépendante du fait que l'eau soit accessible pour les racines ou absorbable par leur succion.*

### Réserve relative en eau extractible du sol (REW) :

« État relatif de remplissage en eau du réservoir d'eau du sol\* d'un peuplement donné à un instant t » (7) :

$$REW = (R_t - R_{pfp}) / RU$$

$R_t$  = réserve en eau du sol\* (en mm).

$R_{pfp}$  = réserve en eau au point de flétrissement permanent\* (en mm).

$RU$  = réserve utile en eau du sol\* (en mm).

### Réserve utile en eau du sol (RU) :

Quantité d'eau accessible et extractible par la végétation de la strate peuplement\* pour un réservoir d'eau du sol\* donné. C'est la fraction de la réserve en eau du sol\* comprise entre  $R_{cc}$  et  $R_{pfp}$  et qui est exploitable par la végétation : accessible par les racines et absorbable par leur succion.

$$RU = R_{cc} - R_{pfp}$$

$R_{cc}$  = réserve en eau à la capacité au champ\* (en mm).

$R_{pfp}$  = réserve en eau au point de flétrissement permanent\* (en mm).

*Ne pas confondre avec la Réserve en eau du sol\* ( $R_t$ ).*

**Dans le cadre de ce travail**, la réserve utile en eau du sol (RU) doit être comprise comme équivalente à la Réserve Utile Maximale (RUM). Cette RUM est utilisée aussi par les praticiens qui ont fait la distinction dans le but d'éviter des confusions avec la réserve en eau du sol ( $R_t$ ) qui correspond à l'eau contenue dans le réservoir d'eau du sol à un instant donné. Ces deux notions sont pourtant très différentes : la réserve utile en eau du sol (RU) caractérise la taille du réservoir accessible pour la végétation, la réserve en eau du sol ( $R_t$ ) renseigne sur le niveau de remplissage du réservoir sol, indépendamment de toute végétation.

### Réserve utile maximale (RUM) :

v. « Réserve utile en eau du sol (RU) ».

### Réservoir d'eau du sol :

Volume de sol prospecté par les racines fines de la végétation du peuplement forestier\* pour extraire l'eau. La profondeur d'enracinement définit la taille du réservoir d'eau du sol du système étudié\*.

### Ressources :

Stocks et flux de matière et d'énergie naturelle disponibles pour subvenir aux besoins d'un être vivant (eau, lumière, nutriments, etc.).

### Révolution :

Durée d'un cycle sylvicole\* depuis l'installation d'un peuplement régulier\* jusqu'à son renouvellement.

### Rotation :

« Durée séparant deux coupes successives de même nature dans la

même unité de gestion (ex. : rotation des coupes d'éclaircie\* ou de jardinage). » (1)

## S

### Sécheresse du sol (ou sécheresse édaphique) :

La sécheresse édaphique reflète un manque d'eau dans un sol donné qui ne permet pas le fonctionnement optimal de la végétation. Elle est quantifiée par le déficit hydrique\* du sol.

### Sécheresse de l'air (ou sécheresse atmosphérique) :

La sécheresse atmosphérique traduit un niveau faible d'humidité dans l'air, c'est-à-dire un fort déficit de saturation en eau de l'air\*. Quand la sécheresse atmosphérique est forte, l'évapotranspiration potentielle\* (ETP) est forte et l'évaporation de l'air est facilitée, en particulier au niveau des feuilles. La transpiration\* des arbres est donc forte quand la sécheresse atmosphérique est forte. Néanmoins, quand celle-ci est forte, certaines espèces d'arbre modifient leur fonctionnement foliaire, en particulier en fermant leurs stomates\*, afin de réguler la transpiration : cela engendre une diminution de la photosynthèse.

### Sempervirent(e) :

« Se dit des plantes qui portent des feuilles vertes toute l'année (du latin *semper vivens*, toujours vert). » (2)

**Dans le cadre de ce travail**, il est important de rappeler que l'indice foliaire\* d'un peuplement sempervirent présente peu de variations saisonnières, le feuillage

étant renouvelé par la mise en place de nouveaux éléments foliaires (feuilles ou aiguilles), concomitante à une chute partielle des éléments foliaires les plus âgés.

### Sous-étage :

« En structure régulière\*, espace occupé par l'ensemble des houppiers\* des arbres situés nettement en dessous (discontinuité) de celui des arbres du ou des étages\* supérieurs (principal, dominant\*, dominé\*). Par extension, le sous-étage peut parfois comprendre les houppiers des arbustes ou arbrisseaux. Terme parfois étendu au cas des structures irrégulières\*. » (1)

**Dans le cadre de ce travail**, le sous-étage est appelé la strate arbustive\*. Par ailleurs, il comprend le taillis.

### Stade juvénile :

**Dans le cadre de ce travail**, il s'agit d'un peuplement n'ayant pas encore atteint le stade perchis.

### Statut social d'un arbre :

Caractérisation d'un arbre généralement par la situation de son houppier\* dans l'un des étages\* (dominant\*, codominant\*, dominé\*, sous-étage\*) ou dans l'une des strates\* du peuplement. Il peut être exprimé par une relation du type  $H/H_0$  ou  $D/D_0$ .

### Stomate :

Au niveau de la surface de la feuille, ensemble de deux cellules réniformes (« cellules de garde ») ménageant entre elles une petite ouverture par laquelle s'effectuent les échanges gazeux entrants et sortants ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ) entre la plante et l'atmosphère (d'après (2)).

### **Strate :**

« Tranche horizontale du volume aérien qu'occupe un peuplement forestier\*. La segmentation en strates (nombre, épaisseur) est souvent réalisée de manière arbitraire. » (1)

v. « Étage ».

### **Strate arborée :**

Dans le cadre de ce travail, il s'agit du volume aérien occupé par les houppiers\* des arbres d'une ou plusieurs espèces de l'étage\* principal.

### **Strate arbustive :**

Dans le cadre de ce travail, il s'agit du volume aérien occupé par des ligneux, en majorité des arbres, de taille nettement inférieure à celle des arbres de la strate arborée\*.

Il a été décidé, dans le cadre de ce travail, que le sous-étage\* serait équivalent à cette strate arbustive et comprendrait les taillis.

### **Strate feuillée :**

Dans le cadre de ce travail, il s'agit du volume aérien occupé par l'ensemble du feuillage du peuplement.

### **Strate herbacée :**

Dans le cadre de ce travail, il s'agit du volume aérien occupé par les végétaux de petite taille.

### **Strate inférieure :**

Dans le cadre de ce travail, il s'agit du volume aérien occupé par les strates\* situées sous la strate arborée\*, à savoir la strate arbustive\*, la strate herbacée\*, ou les deux.

### **Strate peuplement :**

Dans le cadre de ce travail, il s'agit du volume aérien occupé par le peuplement forestier\*.

### **Stress hydrique :**

On parle de stress hydrique lorsque les ressources\* en eau du sol ne permettent pas un fonctionnement optimal de la plante ou lorsqu'il y a sécheresse atmosphérique\*. Cela se traduit par la mise en place d'une régulation des échanges gazeux (transpiration\* et photosynthèse) ; de nombreuses fonctions sont affectées, dont la croissance.

### **Structure :**

« Organisation spatiale d'un peuplement forestier\* du point de vue de la répartition des tiges, distinguée par catégories de grosseur ou par strates\*. On distingue deux grands types de structure : régulière\* et irrégulière\*, la structure jardinée n'étant qu'un cas particulier de la structure irrégulière. » (1)

### **Surface foliaire d'un arbre :**

Somme des surfaces de chaque feuille de l'arbre. Elle s'exprime en m<sup>2</sup>.

### **Surface foliaire d'un peuplement :**

Somme de la surface foliaire de toutes les plantes dans le peuplement. Elle s'exprime en m<sup>2</sup>.

### **Système étudié :**

Le système étudié est ici le peuplement forestier\*. Ses limites sont :

- au niveau aérien, l'interface atmosphère-strate peuplement\* (volume occupé par la strate peuplement) ;

- au niveau souterrain, l'interface sol-racines (volume de sol colonisé par les systèmes racinaires).

## T

### Traitement :

« Ensemble des interventions (coupes et travaux sylvicoles) appliquées à un peuplement en vue de le maintenir ou le faire évoluer vers une structure\* déterminée. » (1)

### Transmittance :

Ratio entre le rayonnement transmis sous une plante et le rayonnement incident mesuré au-dessus de la plante ou en plein découvert. Il s'agit par extension pour un peuplement forestier\*, de la proportion de rayonnement arrivant au sol après son passage au sein de la strate peuplement\*. La transmittance varie selon les longueurs d'onde du rayonnement considéré.

### Transpiration :

Volume d'eau émis dans l'atmosphère sous forme de vapeur par un végétal, par ses feuilles principalement (à travers les stomates\*). Elle dépend surtout de la demande climatique\* et des caractéristiques intrinsèques des essences. Elle s'exprime en mm.

## Références bibliographiques

(1) BASTIEN Y. et GAUBERVILLE C. (coordonateurs) (2011). Vocabulaire forestier - Écologie, gestion et conservation des espaces boisés. IDF éd. 608 pages. ISBN 978-2-904740-99-2.

(2) Édition Larousse. Dictionnaires de français. <<http://www.editions-larousse.fr/>>.

(3) INRA (2010). Biljou© - Modèle de bilan hydrique forestier <<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>>. INRA, UMR Écologie et écophysio- logie forestières.

(4) GRANIER A. (1977). Transfert de sève brute dans le tronc des arbres, aspects méthodologiques et physiologiques. Annales des Sciences Forestières, 34 (1), 17-45.

(5) CNRS et Tela Botanica. ODS - Observatoire des saisons. <<http://www.obs-saisons.fr/>>. Réalisation : Tela Botanica 2010.

(6) PICARD N., SAINT-ANDRÉ L. & HENRY M. (2012). Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et de la biomasse des arbres: de la mesure de terrain à la prédiction. FAO et CIRAD. 210 pages. ISBN 978-92-5-207347-5.

(7) GRANIER A. (1987). Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology, 3, 309-320.



EKOLOG, société de conseil, de recherche et de formation, accompagne les acteurs privés et publics dans la définition, l'analyse et la mise en œuvre opérationnelle de stratégies forestières innovantes et durables. Elle appréhende les écosystèmes forestiers de manière fonctionnelle, et intervient à différentes échelles d'aménagement - arbre, peuplement, territoire - dans un contexte de changement climatique. EKOLOG favorise l'emploi d'une méthode d'analyse sous l'angle des services écosystémiques, ce qui lui permet de mobiliser différentes expertises et d'interagir avec des acteurs de secteurs variés. Sa fondatrice, Sophie BERTIN est docteur en écophysiologie et gestion forestière de l'Université d'Édimbourg, Royaume-Uni, et titulaire d'un BTS en gestion forestière, France. Elle est dotée de plus de 13 ans d'expérience et dispose d'un réseau solide en France et à l'international.

Site Internet : [www.ekolog.fr](http://www.ekolog.fr)

# AFORCE

RMT Adaptation des forêts  
au changement climatique

- > Accélérer la diffusion des connaissances
- > Fournir des outils d'aide à la décision
- > Encadrer les initiatives d'adaptation
- > Informer, échanger et expérimenter

## Un réseau pour accompagner les forestiers dans la préparation des forêts au changement climatique

AFORCE est un réseau mixte technologique (RMT) consacré à l'adaptation des forêts au changement climatique. Créé en 2008 sous l'impulsion des forestiers, il rassemble aujourd'hui 15 partenaires, acteurs de la recherche, du développement, de la gestion, de la formation et de l'enseignement. Son objectif est d'accompagner les forestiers dans la préparation des forêts au changement climatique, en veillant à l'accélération de la diffusion des connaissances, à la fourniture d'outils d'aide à la décision, à l'encadrement des initiatives d'adaptation et à la centralisation de l'information. Parmi ses missions, le réseau s'efforce notamment de créer des lieux d'échange (ateliers, groupes de travail, etc.) et de mobiliser l'expertise pour accélérer la mise à disposition des connaissances et des savoir-faire, ainsi que pour assurer leur traduction pour la gestion. AFORCE est animé par l'Institut pour le Développement Forestier (IDF). Il bénéficie d'un soutien par le ministère en charge de l'agriculture et de la forêt, et par l'Interprofession France Bois Forêt.



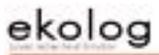
L'eau joue un rôle déterminant mais complexe dans la vitalité des arbres de nos forêts. Les récents cas de sécheresse et de canicule en sont l'illustration parfaite. De nombreux travaux de recherche ont déjà abordé ce sujet. L'objectif de ce travail a été de les recenser, de les analyser et de les retranscrire pour qu'ils soient valorisés et compréhensibles par les gestionnaires et les conseillers forestiers. Ce bilan reprend l'état des connaissances actuelles : circuit de l'eau dans le sol, dans l'arbre et au sein du peuplement, facteurs importants à quantifier avec les méthodes utilisables par le forestier comme la réserve utile ou l'indice foliaire, liens avec les mesures dendrométriques.

La seconde partie du document aborde l'impact de la gestion et de la composition des peuplements sous forme de questions que peuvent se poser les sylviculteurs. Bien entendu, toutes les questions n'ont pas encore trouvé de réponse. Des propositions d'études nouvelles sont faites afin de mieux prendre en compte la variabilité de l'ensemble des peuplements et de la gestion réalisée.

Production :

**AFORCE**  
RMT Adaptation des forêts  
au changement climatique

Document rédigé  
en collaboration avec :



Financiers :



ISBN : 978-2-916525-35-8

