

Institut pour le développement  
forestier/Centre national de la  
propriété forestière

47 rue de chaillot, 75116 Paris  
Tél. : 01 47 20 68 15  
foretentreprise@cnpf.fr

Directeur de la publication  
**Alain de Montgascon**

Directeur de la rédaction  
**Thomas Formery**

Rédactrice  
**Nathalie Maréchal**

Conception graphique  
 Mise en page  
**Sophie Saint-Jore**

Responsable Édition-Diffusion  
**Samuel Six**

Diffusion — abonnements  
**François Kuczynski**

Publicité  
**Bois International**

14, rue Jacques Prévert  
Cité de l'avenir - 69700 Givros  
Tél. : Corinne Oliveiras :  
04 78 87 29 41

Impression  
**Centre Impression**

BP 218 — 87220 Feytiat  
Tél. : 05 55 71 39 29

Numéro d'imprimeur 00138

Tous droits de reproduction  
ou de traduction réservés pour  
tous pays, sauf autorisation de  
l'éditeur.

**Périodicité : 6 numéros par an**  
**Abonnement 2014**

**France: 48 € - étranger : 62 €**  
**édité par le CNPF-IDF**

Commission paritaire des  
publications et agences de  
presse: n° 1014 B 08072  
ISSN: 0752-5974  
Siret: 180092355 00015

Les études présentées dans Forêt-  
entreprise ne donnent que des  
indications générales. Nous attirons  
l'attention du lecteur sur la  
nécessité d'un avis ou d'une étude  
émanant d'une personne ou d'un  
organisme compétent avant toute  
application à son cas particulier.  
En aucun cas le CNPF-IDF ne  
pourrait être tenu responsable des  
conséquences — quelles qu'elles  
soient — résultant de l'utilisation  
des méthodes ou matériels pré-  
conisés.

Cette publication peut être utilisée  
dans le cadre de la formation per-  
manente.

**Dépôt légal: septembre 2014**



© J. Lemaire, CNPF-IDF



## Le diagnostic forestier doit évoluer...

Les effets du changement climatique sont visibles et multiples.

Les arbres sont face à un défi. Ils devront soit s'accommoder en modifiant leur fonctionnement au risque d'atteindre leurs limites. Ou bien, ils devront s'adapter grâce à la sélection des plus résistants. Ils pourront également migrer en modifiant leur aire de présence.

Mais les changements du climat seront probablement plus rapides et imprévisibles au risque d'engendrer des dépérissements, si le forestier n'en anticipe pas les conséquences.

Jusqu'à présent, le climat était considéré comme stable (ou invariant) à long terme dans les stations forestières. Avec la récurrence des sécheresses (1976, 1989-1992, 2003-2005), le dépassement des limites climatiques expliquent certains dépérissements observés. Ces impacts tangibles obligent les forestiers à intégrer le changement climatique dans le diagnostic de station.

Initié en 2008, le projet "Chênaies atlantiques" a ainsi mis en évidence sur le terrain des seuils climatiques, auxquels le chêne pédonculé est sensible. Une corrélation est alors démontrée entre le déficit hydrique climatique et les dépérissements de chêne pédonculé dans l'Ouest de la France.

Ce numéro de Forêt-entreprise vous présente la méthode d'élaboration du nouvel outil de prise en compte du climat dans le diagnostic de station : BioClimSol, "Bio" pour la prise en compte du vivant, "Clim" pour le climat, "Sol" pour les facteurs compensateurs ou aggravants liés au sol.

Cet outil de diagnostic sylvo-climatique de terrain est construit par le travail conjoint des ingénieurs et techniciens du CNPF, étroitement mobilisés dans le développement de BioClimSol, grâce à un réseau de correspondants climatiques régionaux. L'outil, validé pour le chêne pédonculé, est en cours d'expérimentation pour d'autres essences comme les chênes sessile et pubescent, le sapin, le châtaignier, le cèdre ou le douglas.

Pour ce dernier, une étude en Haut-Languedoc permet de mieux comprendre l'impact de l'année 2003 sur l'état sanitaire de cette essence. Elle confirme ici aussi, la nécessité d'intégrer le diagnostic climatique en complément de l'expertise de terrain dans les réflexions et décisions de gestion forestière.

Une avancée importante pour la sylviculture privée est ainsi accomplie grâce à l'engagement du personnel du CNPF.

Bonne lecture

Thomas FORMERY



© J. Lemaire, CNPF-IDF

Futaie de douglas dans le Tarn.

Numéro suivant N° 219  
L'eau forestière,  
source de partenariats

Retrouvez l'agenda et les actus sur  
le site [www.foretpriveefrancaise.com](http://www.foretpriveefrancaise.com)

Crédits photographiques :

© jean Lemaire, CNPF-IDF sauf indications particulières

## Forêt-entreprise, votre revue technique de gestionnaire forestier

Oui, je m'abonne (Tarifs 2014)

- Abonnement France 1 an – 6 numéros : 48 €
- Abonnement étranger 1 an – 6 numéros : 62 €
- Abonnement France 1 an – **spécial étudiant**  
– 1 an – 6 numéros : 40 € (joindre la photocopie de votre justificatif)
- Abonnement France 1 an  
– Remise de 30 % aux adhérents de Cetef,  
GDF, et organismes de développement, Fogefor  
– 6 numéros : 33,60 €

Nom .....

Prénom .....

Adresse .....

Code postal .....

Commune .....

Tél. ....

Courriel .....

Chèque bancaire ou postal à l'ordre de :  
« agent comptable CNPF » à retourner à la librairie de l'IDF,  
47 rue de Chaillot, 75116 Paris – Tél. : 01 47 20 68 15  
Fax : 01 47 23 49 20 – idf-librairie@cnpf.fr  
Catalogue de l'Institut pour le développement forestier  
consultable [sur le site www.foretpriveefrancaise.com](http://www.foretpriveefrancaise.com)  
et gratuit sur simple demande



© J. Lemaire, CNPF-IDF

-  4 BioClimSol  
objectifs et fonctionnement  
Jean Lemaire
-  7 BioClimSol : acquis, apports, limites  
Jean Lemaire
-  12 Quelques notions de référence  
et outils complémentaires  
Jean Lemaire
-  16 Données climatiques pour l'outil  
BioClimSol  
Jean Lemaire
-  18 Lien entre le déficit hydrique  
climatique et le dépérissement  
du chêne pédonculé sur la façade  
atlantique  
Jean Lemaire
-  26 La théorie du boxeur :  
exemple du chêne pédonculé  
Jean Lemaire

# Numéro spécial

# BioClimSol

un outil d'aide à la décision face au changement climatique

4 parties : **mode d'emploi** **données climatiques** **moteur** **applications**

▶ 34 Cartes de vigilance climatique :  
concept, usage, communication  
Jean Lemaire, Arnaud Guyon, Christian Weben

▶ 40 Exigences et cartes de  
vigilance climatique des chênes  
pédonculé, sessile et pubescent  
Jean Lemaire

▶ 46 Impact de l'année 2003 sur la  
vitalité du douglas vert sur le  
secteur du Parc naturel régional  
du Haut-Languedoc  
J. Lemaire, G. Martin-Horcajo, X. Beaussart,  
P. Marty, J.-M. d'Orazio, M. Lagacherie,  
J.-P. Ortisset, P. Mathieu, et R. Hemeryck

▶ 52 BioClimSol : de la théorie à  
la pratique, un exemple de  
diagnostic de la vigilance  
climatique  
Jean Lemaire et Pascal Mathieu

▶ 59 Fiche de vigilance climatique

> 63 Les perspectives  
pour l'outil BioClimSol  
Thomas Formery

> 64 Bibliographie



# BioClimSol

## objectifs et fonctionnement

par Jean Lemaire, CNPF-IDF\*

\* ingénieur,  
 antenne de Lyon.

*Les forestiers doivent intégrer la variation du climat dans leur réflexion de gestion, mais comment ? Tant de paramètres influent... Établir un diagnostic du peuplement intégrant le climat et ses « extrêmes », les conditions de terrain qui aggravent ou compensent le climat (sol, topographie, exposition), tel est l'ambition de l'outil BioClimSol.*

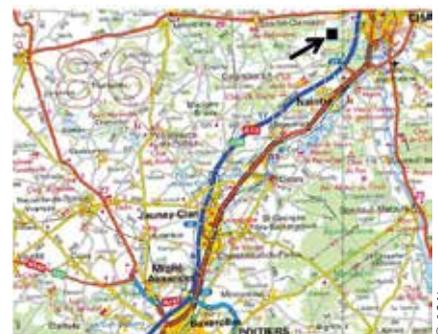
Le changement climatique est aujourd'hui une réalité. Pour le futur en revanche, on ne connaît ni son intensité, ni sa vitesse, ni les extrêmes climatiques associés. Le gestionnaire est donc face à des incertitudes liées à un changement. Les impacts des changements climatiques et les risques associés seront très différents, selon qu'on se situera dans un scénario de hausse moyenne globale des températures de 1 °C ou de 4 °C à la fin du siècle. La forêt est un écosystème de production à cycle long avec une forte inertie,

c'est-à-dire une rapidité limitée d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques. Ce doute sur le climat futur pourrait décourager le gestionnaire et l'inciter à l'immobilisme. Cependant, cette incertitude doit le pousser à définir des stratégies d'adaptation et à orienter son mode de gestion. BioClimSol est un outil qui intègre une part de l'évolution du climat pour aider le gestionnaire dans ses choix sylvicoles. Cet article présente l'outil, à partir d'un exemple, pour comprendre son fonctionnement. Les différentes étapes sont décrites.

### Les étapes du diagnostic BioClimSol

#### Étape 1 - Référence de la parcelle

Le peuplement se situe au sud de Châtelerault dans la Vienne. Il s'agit d'un ancien taillis sous futaie de chênes pédonculés âgés d'environ 120 ans. La hauteur dominante atteint 28 m et le diamètre moyen est de 50 cm. Le peuplement présente des signes de dépérissements.

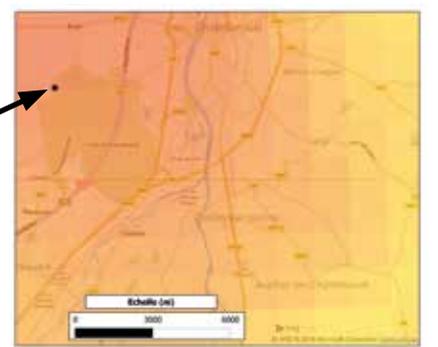


© IGN

#### Étape 2 - Diagnostic climatique

Le peuplement est géolocalisé à l'aide d'un GPS. Le niveau de vigilance climatique est précisé à l'aide de la carte de vigilance établie par BioClimSol.

Le bilan climatique est dressé à partir des données Météo-France.



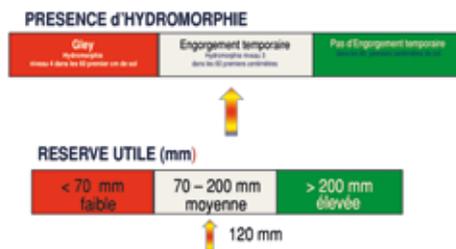
Positionnement de la parcelle sur la carte de vigilance climatique (voir l'article p. 34) Ce peuplement se situe en **zone de vigilance climatique maximale**. La répétition des années à risque de déficit hydrique climatique est très fréquente, pouvant induire un risque plus élevé de dépérissement du peuplement.

### Étape 3 - Diagnostic de la station

La topographie est relevée. La réserve utile est estimée ainsi que l'intensité de l'hydromorphie si elle est présente. Le bilan en eau est ensuite établi.



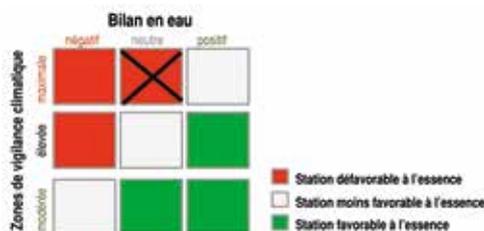
Ce peuplement est situé sur un plateau présentant des traces d'engorgement temporaire à 80 centimètres de profondeur et une réserve utile de 120 mm. Le bilan en eau est neutre.



**Bilan en eau de la parcelle : neutre** = sans effet aggravant ou compensant le climat

### Étape 4 - Bilan pédoclimatique

Le croisement entre le niveau de vigilance climatique (Étape 2) et le bilan en eau (Étape 3) permet de définir si l'essence est en adéquation stationnelle ou non.



**Ce peuplement est situé sur une station défavorable pour le chêne pédonculé.**

*Bilan en eau neutre = le sol et/ou la topographie n'aggravent ni ne compense le bilan climatique en eau*

*Bilan en eau négatif = le sol et/ou la topographie aggravent le bilan climatique en eau*

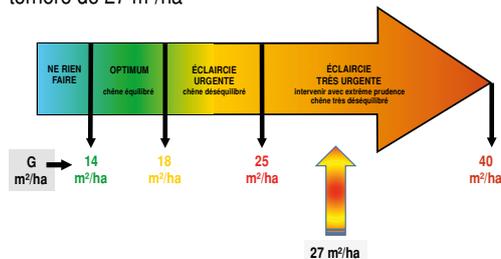
*Bilan en eau positif = le sol et/ou la topographie compensent le bilan climatique en eau*

### Étape 5 - Relevé dendrométrique et niveau de résilience du peuplement

Ce relevé permet de connaître la dimension des arbres, la densité et la qualité des tiges, mais également l'état sanitaire et la capacité de résilience du peuplement.



Un retard d'éclaircie très important est constaté : surface terrière de 27 m<sup>2</sup>/ha



Qualité des tiges : C

Le diagnostic sanitaire classe le peuplement au stade IRREVERSIBLE : 30 % des tiges sont classées comme dépérissantes et jugées dans l'incapacité de reconstruire un houppier fonctionnel.

### Étape 6 - Pistes de recommandations sylvicoles

C'est l'ensemble des diagnostics : **climat + station + peuplement** qui permet de proposer des recommandations sylvicoles.

Ce peuplement est situé en zone de vigilance climatique maximale. Près d'une année sur deux, le chêne pédonculé est soumis à des forts déficits hydriques. Ce peuplement, situé sur plateau, présente une réserve utile moyenne et des traces d'hydromorphie sont constatées. La station (bilan pédoclimatique) est considérée comme défavorable pour le chêne pédonculé. Ce peuplement pur de chêne pédonculé présente des signes de dépérissement. 30 % des tiges sont classées au statut irréversible (méthode ARCHI). La densité du peuplement est très élevée avec un très fort retard d'intervention en éclaircie. Etant donné que le chêne pédonculé n'est pas en station, que le diamètre des tiges est de 50 cm en moyenne, que la qualité des tiges est moyenne, que les houppiers sont très comprimés, une éclaircie serait délicate. Dans ces conditions, il est conseillé de convertir ce peuplement en le reboisant avec une autre essence plus adaptée (pins maritimes, chênes pubescents, sessiles...) aux conditions pédoclimatiques actuelles voire futures.

## BioClimSol: c'est quoi?

**BioClimSol** est un outil numérique du Centre national de la propriété forestière en cours de développement. Il vise à **aider le forestier dans la gestion des peuplements sur pied ou pour le choix des essences lors d'un renouvellement dans un contexte de changement du climat.**

L'acronyme BioClimSol se décompose en :

> **Bio** pour la prise en compte du vivant, en l'occurrence une essence, ou un peuplement...

> **Clim** pour la prise en compte du climat,

> **Sol** pour la prise en compte des facteurs compensateurs ou aggravants le climat, liés au sol et à la topographie, en particulier la disponibilité en eau.

BioClimSol a pour **objectif de cartographier des « zones de vigilance climatique » spécifiques à chaque essence en intégrant certaines hypothèses d'évolution du climat. Cette cartographie des zones de vigilance climatique<sup>1)</sup>, couplée à un diagnostic de la station et du peuplement, préconise *in fine* des recommandations sylvicoles pour la gestion des peuplements sur pied ou des propositions d'essences pour des reboisements.** L'ensemble du diagnostic: climat + station + peuplement permet de préconiser ces recommandations de sylviculture. BioClimSol n'est ni un outil de prédiction de la production forestière, ni un outil de cartographie des dépérissements.

1) Voir l'article des cartes de vigilance climatique p. 34.

2) *Global Positioning System* (GPS) ou système de localisation mondial.

3) voir les articles du « moteur » de l'outil p. 18 à 39.

4) voir les articles des applications de l'outil p. 40 à 62.

## BioClimSol: les objectifs

L'objectif, après des échanges nourris avec les gestionnaires, est d'élaborer un outil :

- > numérique (ordinateur, GPS<sup>2)</sup>, smartphone) évolutif, directement utilisable sur le terrain ;
- > s'appuyant sur des données climatiques spatialisées avec des échelles les plus fines possibles pour prendre une décision de gestion au niveau de la parcelle forestière ;
- > multi-essences ;
- > tenant en compte le changement climatique ;
- > utilisant un protocole commun sur le terrain pour les diagnostics du peuplement et de la station ;
- > proposant des pistes de recommandations sylvicoles.

## BioClimSol: les étapes pour en comprendre le fonctionnement

Ce numéro spécial de Forêt-entreprise est consacré à la présentation du « moteur » de BioClimSol<sup>3)</sup>. Des exemples pratiques d'utilisation de l'outil pour deux essences emblématiques de nos forêts privées sont présentés<sup>4)</sup>. Le mode d'emploi de l'outil BioClimSol associé à un diagnostic d'une douglaie dans le Tarn est détaillé au sein de l'exemple d'un diagnostic à la page 59 à 62.

Un exemple de diagnostic réalisé avec l'outil BioClimSol aide le lecteur à comprendre l'objectif, la démarche et les recommandations de sylviculture.

## Perspectives

Cette présentation « succincte » de l'outil explique les étapes du diagnostic qui aboutissent *in fine* aux pistes de recommandations sylvicoles. La volonté de développer un outil intégrant le climat, la station et le peuplement est une tâche complexe. Il existe de nombreux écueils à éviter, des hypothèses à éprouver et encore de nombreuses incertitudes. Nous les abordons dans l'article suivant. ■

### À retenir

**BioClimSol est un outil numérique de terrain d'aide à la décision pour les forestiers dans un contexte de changement du climat.**

**L'ensemble du diagnostic climat + station + peuplement aboutit à des préconisations de sylviculture pour la gestion des peuplements sur pied ou lors du renouvellement.**

**Cet outil, développé par le Centre national de la propriété forestière, évoluera en fonction des données à disposition (climat, sol,...) et en concertation avec le personnel de terrain.**

# BioClimSol : acquis, apports, limites

par Jean Lemaire, CNPF-IDF

*Avancer dans un projet implique des choix et accepter de ne pouvoir être exhaustif. Concevoir un tel outil implique aussi des validations sur le terrain par les techniciens et des innovations assumées. BioClimSol, ce qu'il est et ce qu'il n'est pas...*

Construire un outil intégrant le climat, le sol et le peuplement pour améliorer les recommandations sylvicoles est une tâche ardue. Répondre aux attentes des gestionnaires forestiers nous paraît aussi essentiel. De nombreux écueils sont à éviter, des hypothèses à éprouver et des incertitudes difficiles à contourner.

Nous retranscrivons ci-dessous, étape par étape, l'ensemble des réflexions qui ont permis la construction de l'outil. Face à des difficultés, il a fallu choisir des solutions pragmatiques, soit en s'appuyant sur des résultats disponibles de la recherche ou en se basant sur les résultats des études entreprises par le CNPF ces dernières années. Pour franchir certaines difficultés, des hypothèses ont été posées. Nous avons ainsi listé les acquis, les apports et les limites de l'outil.

## Étape 1 Comprendre les dépérissements en lien avec le climat

L'outil BioClimSol est né du projet « Chênaies atlantiques » mené conjointement par les Centres régionaux de la propriété forestière (CRPF) de la façade atlantique et l'Institut pour le développement forestier (IDF). En 2008, les CRPF s'interrogent face à l'augmentation des demandes de coupes sanitaires dérogatoires au Plan simple de gestion dans les chênaies (chêne pédonculé principalement) notamment en Poitou-Charentes et en Pays de la Loire. Les études sur ces secteurs démontrent l'impact de la répétition des années à fort déficit hydrique<sup>1)</sup> sur la perte de vitalité des chênaies, en particulier du chêne pédonculé.

Mais le dépérissement est un phénomène complexe, induit par de multiples facteurs qui interagissent entre eux : sécheresses, maladies

et ravageurs mais également les pratiques sylvicoles, l'historique des peuplements, voire le génotype des arbres... Très rapidement, il est apparu illusoire de vouloir tracer des cartes prédictives des dépérissements<sup>1)</sup>.

Cependant, les dépérissements sont souvent déclenchés par un stress climatique, en particulier les sécheresses, comme le démontre la littérature sur le sujet<sup>2)</sup>. Les résultats sur les chênes et le douglas présentés dans ce dossier étayent cette hypothèse. Le **déficit hydrique climatique P-ETP<sup>1)</sup>** est en effet identifié comme un des paramètres climatiques permettant d'expliquer la présence de dépérissements.

Si on ne peut donc pas produire des cartes prédictives des zones dépérisantes, les données climatiques à disposition<sup>3)</sup> permettent de tracer des **cartes de vigilance climatiques<sup>4)</sup>**.

Ces cartes de vigilance ont pour objectif de prédire le risque de répétition des années à fort déficit hydrique climatique, dont le seuil critique est spécifique aux exigences écologiques de chaque essence.

Concept novateur de l'outil BioClimSol, un article est spécifiquement dédié à cette thématique des cartes de vigilance afin de mieux comprendre leurs usages mais surtout leurs limites pour en assurer un bon emploi. Le déficit hydrique climatique (défini par son intensité et sa durée) et la récurrence des années à fort déficit hydrique constituent le moteur de BioClimSol. La majeure partie de ce numéro de Forêt-entreprise est consacrée à la description du fonctionnement de ce « moteur »<sup>5)</sup> à l'aide d'exemples concrets sur les chênes et le douglas notamment<sup>6)</sup>.

1) voir l'article Notions de référence, p. 12.

2) Les citations bibliographiques reliant stress hydrique et dépérissement sont reprises en p. 26.

3) voir l'article des données climatiques, p 16.

4) voir l'article des cartes de vigilance climatique, p.34.

5) voir les articles détaillant le « moteur » de l'outil page 18 à 39

6) voir les articles d'exemples d'applications de l'outil page 40 à 62.

## Étape 2 Les paramètres climatiques de référence de l'outil: le déficit hydrique climatique et le gel

À partir des résultats des études réalisées, trois critères climatiques sont retenus pour délimiter les exigences climatiques de chaque essence : le déficit hydrique climatique, la récurrence des années à fort déficit hydrique et les risques de gel. Il apparaît évident que, travailler avec trois variables climatiques, certes pertinentes, ne permet qu'une vision simplifiée de la réalité. Le déficit hydrique climatique (P-ETP) est un paramètre essentiel du calcul du bilan hydrique, il intègre plusieurs données climatiques : les précipitations, les températures, le rayonnement voire le vent et l'humidité de l'air. En simplifiant, on considère, dans BioClimSol, que le P-ETP est une variable pouvant discriminer des essences plus ou moins résistantes à la contrainte hydrique. Si la valeur limite de P-ETP est apparue utile pour définir les seuils de résistance à la contrainte hydrique des essences, l'intégration de la récurrence d'années à fort déficit hydrique est apparue importante pour expliquer des phénomènes de dépérissement. Dit autrement, un peuplement peut se situer en moyenne dans une zone climatique favorable à sa croissance, si trop d'années à fort déficit hydrique se succèdent, cela peut engendrer des pertes de vitalité significatives dans les peuplements.

L'important n'est pas toujours le climat moyen, mais bien plus les extrêmes climatiques auxquels est soumis un peuplement<sup>1)</sup>.

Même si le critère hydrique est important, le critère de risque lié aux gelées l'est tout autant. Une essence peut être résistante à des déficits hydriques marqués, elle risque de périr sous l'effet de gelées si elle est sensible aux froids comme c'est le cas pour beaucoup d'espèces méditerranéennes par exemple.

## Étape 3 Détermination des valeurs seuils de déficit hydrique (P-ETP) et de température minimale pour de nombreuses essences

Les valeurs seuils de P-ETP, spécifiques à chaque essence, sont déterminées à partir de calculs effectués sur l'aire de répartition selon

la méthode décrite page 52 (construction de la fiche BioClimSol). Pour certaines essences (comme les chênes pédonculé, sessile et pubescent et pour le douglas et le sapin), les valeurs de P-ETP sont affinées et validées à partir d'études réalisées sur le territoire français. Pour ces cinq essences, des cartes de vigilance climatique sont produites en tenant compte de la fréquence des années à fort déficit hydrique climatique dont la valeur seuil est spécifique à chaque essence. Pour de nombreuses essences, nous disposons de valeurs de P-ETP définies sur l'aire de répartition, mais pas sur des valeurs validées précisément sur le territoire français. Des travaux sont en cours pour combler cette lacune sur les principales essences forestières : châtaignier, pin sylvestre, épicéa, hêtre, feuillus précieux, cèdre de l'Atlas. Certaines essences ne pourront pas bénéficier de telles études, elles risquent de rester orphelines. C'est une limite notamment face aux effets liés aux provenances.

Dans l'outil de diagnostic BioClimSol, le risque de gel est caractérisé par la moyenne des températures minimales de mars, prises sur la période 1981-2010. Les seuils de températures minimales du mois de mars, proposés pour caractériser la résistance au gel, ont tous été calculés sur l'aire de répartition par la méthode décrite à la page 54. Il est à remarquer qu'on dispose très peu d'informations pour caractériser la résistance au gel de la plupart des essences forestières.

Les seuils d'exigences climatiques, ainsi définis pour les principales essences forestières, mentionnés dans le tableau 1 page 55, sont mieux cernés mais loin d'être connus avec certitude. Des études sont encore nécessaires pour affiner ces limites.

## Étape 4 Prise en compte du sol

La réserve utile (RU) maximale est un paramètre essentiel du calcul du bilan hydrique. Elle représente la quantité d'eau du sol utilisable par la plante. Elle est estimée en fonction de la profondeur maximale d'enracinement prospectée par l'arbre. Elle est exprimée, comme les précipitations, en mm<sup>2)</sup>.

Simple en apparence, l'estimation de la réserve utile est en réalité très compliquée sur le terrain. La principale difficulté de mesure de la réserve utile provient de l'estimation de la profondeur maximale de l'enracinement des arbres. En effet, les racines peuvent descendre à des

1) voir l'article de la théorie du boxeur p. 26.

2) Bréda *et al.*, 2002.

### Figure 1 - L'estimation de la réserve utile maximale s'avère difficile sur le terrain.

Elle impose de creuser des fosses profondes au tractopelle pour estimer la profondeur maximale de sol prospectée par les racines. Les deux peuplements, dans lesquels ces fosses ont été creusées, présentent des signes de dépérissement. Malgré le creusement très profond des fosses, des racines colonisaient le sol plus bas que le plancher de la fosse, rendant l'estimation de la réserve utile maximale très délicate. Les réserves utiles estimées dans ces deux cas sont supérieures à 200 mm, elles sont donc sous-estimées.

En réalité, on devrait donc parler de réserve utile minimale lorsqu'on essaie de mesurer la taille du réservoir sur le terrain.

Chêne pédonculé



© J. Lefèvre

Douglas vert



© J. Lemaire

profondeurs très importantes, parfois à plus de 20 m (figure 1)<sup>3)</sup>. Or en période de stress, l'enracinement profond s'avère essentiel pour alimenter l'arbre en eau. Il joue un rôle essentiel pour limiter l'impact d'un stress hydrique<sup>4)</sup>. Ainsi N. Bréda (2002) démontre que 8 % du système racinaire situé en profondeur fournit au frêne l'eau nécessaire pour surmonter un stress hydrique durant les périodes les plus sèches des mois d'été.

La réserve utile maximale étant difficilement estimable sur le terrain, nous avons choisi, dans BioClimSol, le bilan en eau compensant ou aggravant le déficit hydrique du climat en intégrant : la position topographique, la réserve utile définie par trois grandes classes (faible, moyenne, élevée) et l'hydromorphie<sup>5)</sup> ; pour dresser au final un bilan en eau (positif, négatif ou neutre). La richesse chimique du sol est prise en compte à la faveur d'un relevé floristique ou d'une mesure du pH sur le terrain.

## Étape 5 Intégrer le changement climatique

Prendre en compte un phénomène conjuguant de nombreuses incertitudes est complexe. Nous avons donc choisi de travailler d'abord sur les exigences climatiques de chaque essence en ajoutant les limites climatiques de résistance au gel et de tolérance au déficit hydrique, avant d'intégrer les scénarios d'évolution du climat du GIEC<sup>6)</sup>.

Nous avons deux choix possibles pour inclure le changement climatique.

Le premier était d'inclure des simulations du climat à partir des données disponibles sur le portail DRIAS<sup>7)</sup>. Ce portail constitue la réf-

érence nationale de projection des climats futurs potentiels. Pour une essence, si l'on croise les échelles de temporalité (horizon proche, moyen ou lointain), les scénarii d'évolution des teneurs en gaz à effet de serre (pessimiste, intermédiaire, ou optimiste), les modèles de projection du climat futur (9 au total), il y aurait donc potentiellement 81 cartes par essence d'évolution du climat. De plus, ces modèles climatiques seront évolutifs du fait de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre et de l'amélioration des modèles climatiques en fonction des acquis de la science.

Le deuxième choix était de ne pas utiliser les simulations du climat futur comme telles. Nous avons donc choisi d'estimer deux niveaux de vigilance climatique. Le premier niveau de vigilance climatique est associé au climat actuel sur la période climatique 1981-2010. Le second niveau de vigilance est défini par les données climatiques trentennaires 1981-2010, auxquelles 1 °C sur la température moyenne annuelle trentenaire et sans évolution des précipitations durant l'année (hypothèse probablement optimiste) est ajouté. La pluviométrie est un des moteurs principaux de la croissance des végétaux. Ce paramètre varie fortement dans le temps et dans l'espace, aucune tendance fiable ne se dégage aujourd'hui quant à son évolution.

Cette variable d'1 °C supplémentaire en température permet de déjà tenir compte du réchauffement climatique lors du choix des essences à régénérer. Elle est temporaire. En effet, les niveaux de vigilance climatique sont définis en fonction des exigences climatiques de chaque essence. Ces seuils sont connus, il sera possible « à tout instant » de les faire

3) Urli M., 2013.

4) L'étude du système racinaire du chêne pédonculé dans le programme « Chênaies atlantiques » sera publié dans le n°221 de Forêt-entreprise.

5) Sol engorgé par l'eau périodiquement ou en permanence.

6) Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

7) Portail internet de projections climatiques régionalisées développé par les climatologues de Météo-France. [www.drias-climat.fr](http://www.drias-climat.fr)

évoluer en fonction du ou des scénarii climatiques qui émergeront. À ce stade de conception de l'outil, la priorité est donnée à la définition des seuils climatiques des essences. Ce qui représente déjà un travail ambitieux et conséquent.

### Étape 6 Un diagnostic peuplement combinant dendrométrie et niveau de résilience

Les techniques de diagnostic sylvicole d'un peuplement sont le savoir-faire acquis par tout technicien forestier. Grâce à la méthode ARCHI<sup>1)</sup>, certaines essences bénéficient d'une clé de détermination, qui précise le niveau de résilience du peuplement. Pour les essences ne bénéficiant pas encore de clé ARCHI, l'état sanitaire est estimé à l'aide du protocole DEPEFEU<sup>2)</sup>. L'objectif est de coupler le niveau de vigilance climatique avec le niveau de résilience du peuplement, soit sa capacité à réagir suite à un stress.

1) Drénou *et al.*, 2011. Voir aussi Notions de référence p. 13.

2) voir l'article Notions de référence p. 14.

### Étape 7 Agir en proposant des recommandations sylvicoles éprouvées

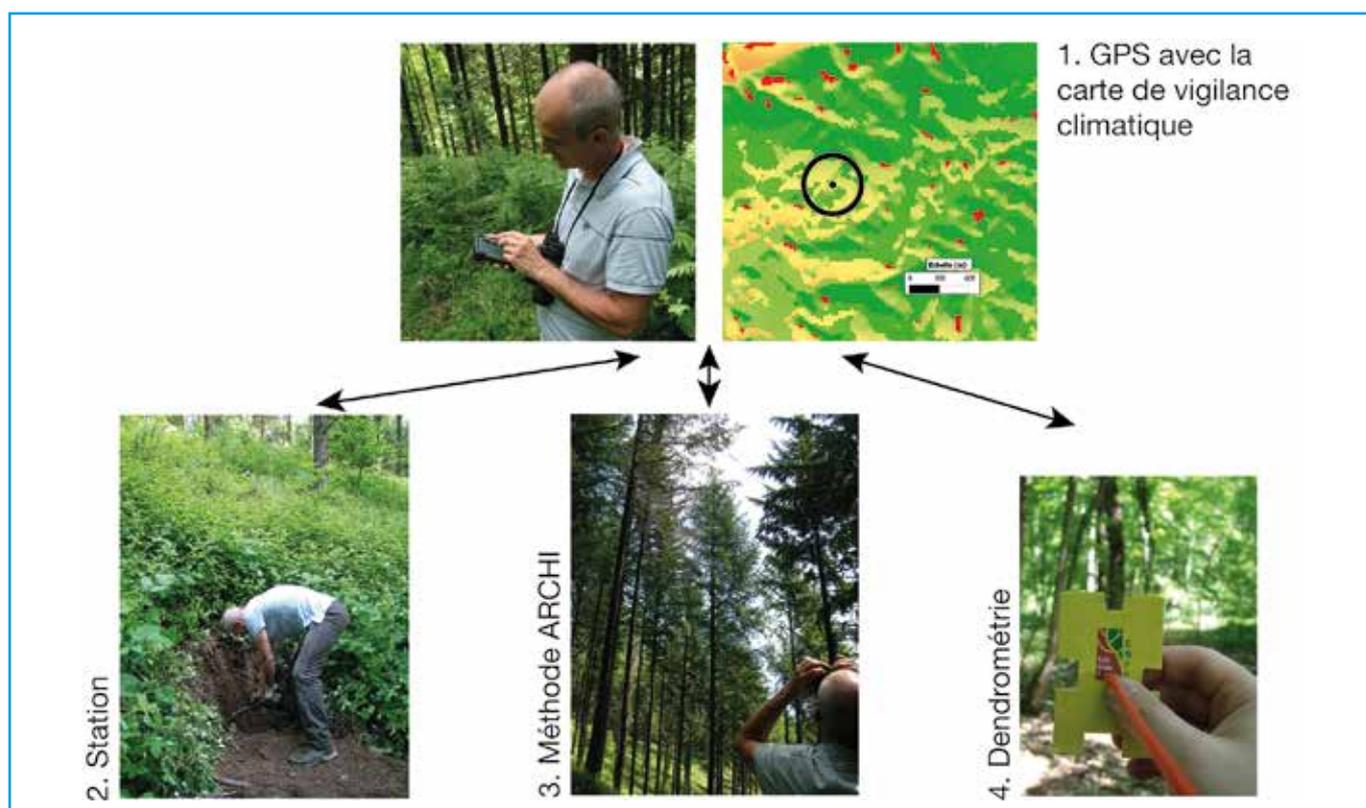
C'est l'ensemble du diagnostic, climat + station + peuplement, qui doit permettre de proposer des recommandations sylvicoles (*figure 2*). Il n'est pas concevable de décliner des itinéraires sylvicoles détaillés tant les situations rencontrées sur le terrain sont diverses (économie, propriétaire, climat, station...). Il convient plutôt de proposer des recommandations sylvicoles précisant les erreurs sylvicoles à ne pas commettre. Certaines sont déjà validées pour le douglas (*page 46*). Pour les autres essences, une mutualisation d'expertises de terrain est indispensable.

### BioClimSol, les perspectives

L'objectif de développement de BioClimSol est d'aboutir à un outil numérique multi-essences, directement utilisable sur le terrain.

La réalité du terrain étant complexe, un tel outil est logiquement une représentation simplifiée de la réalité (*tableau ci-contre*). BioClimSol est un outil d'aide à la décision, qui doit éclairer sans jamais s'imposer face au bon sens du forestier. BioClimSol est un outil récent, il doit s'améliorer sans cesse au gré des avancées de la recherche et des validations avec les techniciens de terrain. ■

Figure 2 - Les étapes du diagnostic liées à l'outil BioClimSol





### À retenir

La volonté d'intégrer de nombreux facteurs aussi variables que l'évolution du climat, le sol, le peuplement, les exigences écologiques de chaque essence rend le développement de l'outil complexe.

BioClimSol reflète une vision simplifiée d'une réalité variable de terrain. Ce diagnostic sylvo-climatique doit aider le sylviculteur à prendre une décision de gestion en complément de l'expertise du technicien sur le terrain.

## BioClimSol

Tableau 1 - Les acquis, les apports et les limites de BioClimSol

<p><b>Les acquis</b> = la consolidation par des travaux de la recherche inclus dans l'outil</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impact des années à fort déficit hydrique sur les risques de dépérissement du peuplement ;</li> <li>- Intégration des données climatiques spécifiques à la gestion forestière dans le diagnostic stationnel « classique » : bilan hydrique, gel, récurrence d'événements extrêmes.</li> </ul>
<p><b>Les innovations</b> = les apports spécifiques de BioClimSol</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Outil numérique de terrain intégrant un module de cartographie des zones de vigilance climatique spécifiques à chaque essence ;</li> <li>- Nombreuses expérimentations validées sur le terrain ;</li> <li>- Définition de valeurs seuils par essence et de tolérance au déficit hydrique climatique (P-ETP) ;</li> <li>- Estimation de seuils de récurrence des années à fort déficit hydrique (la théorie du boxeur) ;</li> <li>- Complément par la méthode ARCHI dans le diagnostic, soit la définition d'un niveau de vigilance climatique couplé à un potentiel de résilience du peuplement défini par ARCHI pour estimer le risque ;</li> <li>- Intégration des diagnostics de climat, de sol et peuplement dans un contexte de climat changeant permet de lister des recommandations sylvicoles et un choix des essences à reboiser.</li> </ul>
<p><b>Les limites</b> = les paramètres peu ou pas pris en compte dans BioClimSol</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplification de la réalité complexe de terrain ;</li> <li>- Définition des seuils pédoclimatiques sur trois critères : P-ETP, gel et bilan en eau ;</li> <li>- Intégration limitée du risque lié au gel ;</li> <li>- Intégration partielle du bilan hydrique ;</li> <li>- Non-intégration de l'effet de la sylviculture sur le bilan hydrique : surface du couvert forestier, impact des éclaircies, structure du peuplement ;</li> <li>- Intégration limitée du changement climatique + 1° C sur la moyenne trentenaire 1981-2010 ;</li> <li>- Pas ou peu de prise en compte des effets de provenance des espèces boisées ;</li> <li>- Pas de cartographies des potentialités de production forestière ni de cartes de dépérissement.</li> </ul>

# Quelques notions de référence et outils complémentaires

par Jean Lemaire, CNPF-IDF

*D'autres outils sont développés pour aider le sylviculteur à prendre des décisions de gestion, dans un contexte de climat changeant. Deux notions de référence sont détaillées, le dépérissement et le déficit hydrique climatique afin de faciliter la lecture de ce numéro de Forêt-entreprise.*

## Outils complémentaires



Le premier, le plus connu, est le **catalogue des stations**. Les catalogues sont disponibles sur deux tiers de la France. Ils décrivent finement les stations sur chaque territoire forestier. Ils précisent souvent les essences à boiser et leurs potentialités. Ils donnent en général des informations importantes sur les types de sols : types, profondeurs, roche mère, richesse minérale,.... À ce jour, ils prennent rarement en compte le changement climatique.

1) <http://silvae.agroparistech.fr/home/>,

Piedallu C. *et al.*, 2008, 2009, 2012.

Richard J.B., 2011.

2) <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/index.php?p=accueil>

Granier A. *et al.*, 1995.

3) Indice foliaire (LAI) : la mesure de l'indice foliaire (m<sup>2</sup> feuille par m<sup>2</sup> sol) est le rapport de la surface des feuilles d'un végétal à la surface de sol que celui-ci occupe.

Le second outil est le **portail SILVAE**<sup>1)</sup> développé par AgroParisTech. Son accès gratuit permet de consulter de nombreuses informations géoréférencées disponibles sur l'ensemble de la France métropolitaine. Ces données sur les espèces végétales forestières, essentiellement arborées, décrivent les principaux facteurs déterminant leur écologie.

Les informations sont classées par thématiques et ont 3 origines :

- des références bibliographiques ;
- des relevés phytoécologiques de terrain géolocalisés issus de la base de données Eco-Plant ;
- des données géographiques spatialisées, extraites de la base de données Digitalis (climat, bilan hydrique,...).

Ce portail s'adresse à un public averti. Il est nécessaire de lire les fiches descriptives de chaque donnée avant leur utilisation ; et plus particulièrement le paragraphe concernant les limites d'utilisation, ainsi que les publications scientifiques qui s'y rapportent et qui servent de référence.

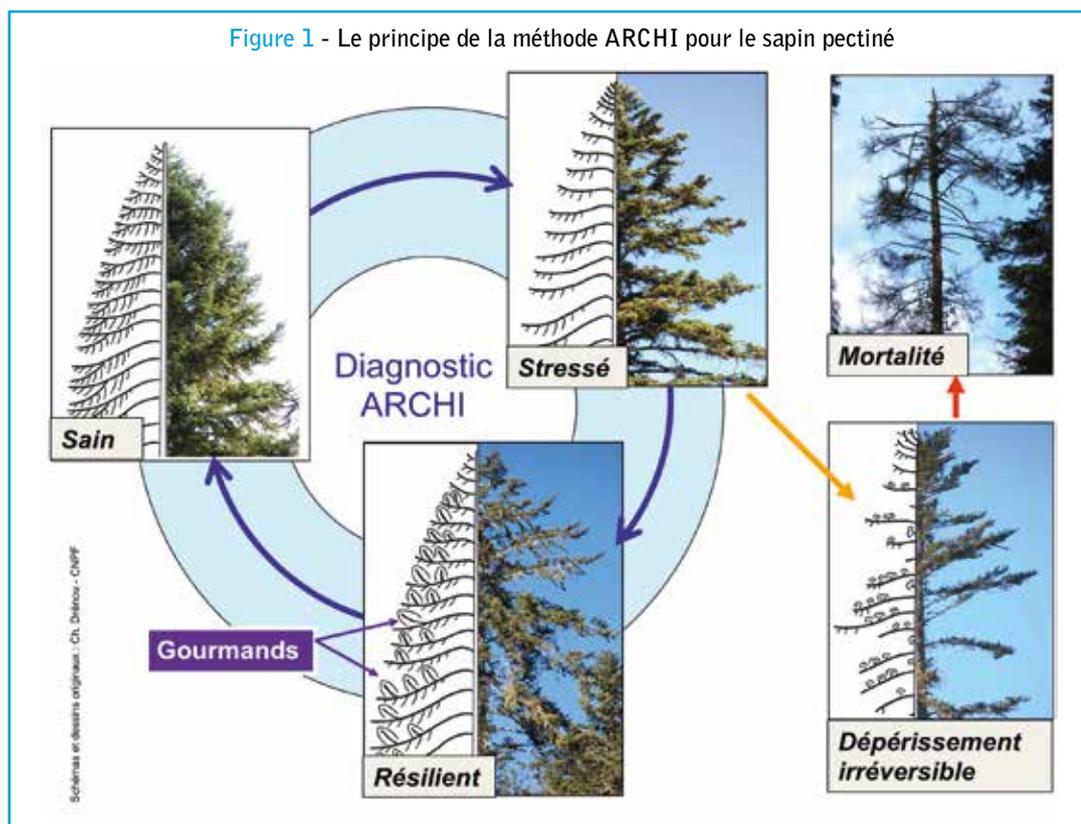
SILVAE sera régulièrement enrichi au gré de l'amélioration des données mises en ligne ou des publications de nouvelles informations.

Le troisième outil est le modèle de calcul de bilans hydriques forestiers **BILJOU**<sup>2)</sup>, développé par l'unité de recherche Écologie et Écophysologie Forestières (Inra de Nancy).

Cet outil met librement à disposition un cours en ligne sur le bilan hydrique des écosystèmes forestiers sous forme de fiches détaillées. Les articles de référence sont téléchargeables. L'utilisation de l'outil (avec le calcul en ligne de bilans hydriques) est réservée à un public averti ayant bénéficié au préalable d'une formation dispensée à l'Inra de Nancy. Il fournit des simulations de fonctionnement hydrique de peuplements réels, sous conditions climatiques observées. Il prend en compte : le climat (précipitation, évapotranspiration...), le sol (réserve utile, enracinement) et le peuplement par groupe d'essences (résineux, feuillus à feuilles pérennes ou caduques) et des caractéristiques liées au couvert forestier (phénologie, LAI<sup>3)</sup>) pour calculer un bilan hydrique détaillé du peuplement.

Cet outil vise à permettre l'intégration progressive du fonctionnement hydrique des peuplements dans les raisonnements sylvicoles (impact du choix de l'essence (feuillu/résineux) sur le bilan hydrique, classification des niveaux de stress, récurrence des années à forte sécheresse,...).





## Quelques notions de référence : le dépérissement et le déficit hydrique climatique

### Dépérissement

Le terme « dépérissement » est avant tout un terme de symptomatologie. Il traduit « une altération durable de l'aspect extérieur des arbres (mortalité d'organes pérennes, réduction de la qualité et de la quantité du feuillage) et une réduction de la croissance. La mort d'un certain nombre de sujets est observée mais l'issue n'est pas obligatoirement fatale même si la situation est préoccupante »<sup>4)</sup>. « Il s'agit d'un phénomène complexe, dans lequel interviennent des facteurs de plusieurs types : prédisposants, déclenchants, aggravants en partie interchangeables »<sup>5)</sup>.

Un dépérissement est un phénomène évolutif au cours du temps, qui traduit donc une altération durable de l'aspect extérieur d'un arbre. Si la situation peut être inquiétante, l'expérience montre qu'un dépérissement n'entraîne pas systématiquement la mort de l'arbre et peut être réversible dans le temps.

Un dépérissement ne présume pas de causes particulières, contrairement aux maladies provoquées par un seul agent biotique ou abiotique. Du terme dépérissement émane l'idée d'un phénomène non identifié directement et non d'une maladie provoquée identifiable avec certitude.

### La méthode ARCHI<sup>6)</sup>

Le CNPF développe depuis 2010 une méthode de diagnostic de la vitalité des arbres. L'arbre, lorsqu'il subit un stress, change de morphologie et donc d'architecture. La méthode ARCHI est basée sur la lecture de l'architecture du houppier (ramification, réitération, type de gourmands,...). Cette lecture de l'architecture du houppier permet de pronostiquer l'avenir proche des arbres dépérissants. Le principe de la méthode ARCHI est de décomposer l'arbre en deux images. La première regroupe les symptômes de dégradation du houppier (appauvrissement de la ramification, mortalité de branches,...). La deuxième image concerne le processus de restauration (émission et développement de gourmands, redressement de branches,...).

La comparaison des deux images permet ensuite de pronostiquer le devenir de l'arbre (figure 1) :

- > l'arbre est sain = développement normal ;
- > l'arbre est stressé = écart à la normale ;
- > l'arbre est résilient = l'arbre a subi un stress mais retourne vers la normalité ;
- > l'arbre présente une descente de cime = formation d'un nouvel houppier à un niveau inférieur ;
- > l'arbre est en dépérissement irréversible = l'arbre a subi un ou des stress et n'est plus capable de revenir à la normale ;
- > l'arbre est mort.

La méthode ARCHI présente trois spécificités :

4) Delatour, 1990. Les parties de textes ici citées sont reprises de la note : DGAL/SDQP/N2010-8119 du 27 avril 2010 rédigée par Département de la santé des forêts, téléchargeable à l'adresse suivante : <http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN20108119Z.pdf>

5) Sinclair, 1964, 1967 ; Manion, 1981.

6) Drénou Ch. *et al.*, 2014.

- > elle prend en compte l'analyse des gourmands pour définir le type ARCHI;
- > elle se décline essence par essence, autant pour les feuillus (chênes pédonculé, sessile, pubescent) que pour les résineux (sapin pectiné, douglas) .
- > elle hiérarchise les observations collectées sous forme de clés de détermination des 6 types ARCHI.

### Le protocole DEPEFEU

Le Département de la santé des forêts (DSF) a mis au point un protocole spécifiquement adapté à l'observation des dépérissements feuillus, (acronyme DEPEFEU pour DEPÉrissement d'essences FEUillues). Ce protocole n'est applicable que sur des essences feuillues à un stade adulte. Il peut être mis en œuvre tant en hiver qu'en été.

L'aspect général du houppier d'un arbre est la résultante de plusieurs phénomènes :

- la croissance en longueur des pousses, qui en cas de réduction, à la suite d'un stress par exemple, prend notamment chez le hêtre un aspect caractéristique en « fouet », pouvant conduire à une répartition en « paquets »<sup>1)</sup>;
- la vitalité ou la mortalité des rameaux et des branches;
- l'abondance de la ramification fine, qui en cas de diminution peut évoluer en fenêtré ou échancrure dans le houppier.

Pour un arbre dépérisant, ces phénomènes se traduisent par trois catégories de symptômes visibles :

1. transparence du houppier laissant voir des fragments de ciel à l'observateur depuis le sol ;

2. mortalités d'organes pérennes ;
3. répartition plus ou moins homogène de la masse foliaire.

Ces symptômes sont analysés et quantifiés à partir de 9 critères de diagnostics (3 par catégorie de symptômes visibles cités ci-dessus). Ils permettent d'établir une notation du dépérissement en 4 classes (*figure 2*). Seule la partie supérieure du houppier des arbres dominants ou co-dominants est inventoriée pour définir et caractériser l'intensité du dépérissement.

Par convention, les « arbres très (ou fortement) dépérissants » ont une atteinte globale au niveau de houppier de plus de 50 % (notes 3 et 4 du protocole DEPEFEU). Cette atteinte peut être due à une mortalité des branches, à une perte de ramification fine, à un défaut de feuillaison non conjoncturel. Il convient en effet de ne pas considérer comme dépérissants des arbres qui ont uniquement un dommage aux feuilles lié à une cause simple temporaire telle qu'un gel, une canicule, une attaque de chenilles ou de champignons.

Aussi bien avec la méthode ARCHI qu'avec le protocole DEPEFEU, un peuplement sera désigné comme « peuplement à dépérissement faible ou diffus » si moins de 20 % des tiges de l'essence concernée sont très dépérissantes et comme « peuplement à dépérissement intense » si plus de 20 % des tiges de l'essence concernée sont très (ou fortement) dépérissantes. Ce pourcentage est défini en proportion du nombre de tiges de l'étage dominant ou co-dominant, ou de surface terrière ou de volume bois fort, en cumul depuis le début du processus, donc sans oublier de prendre en compte les arbres récoltés récemment pour cause de dépérissement<sup>2)</sup>.

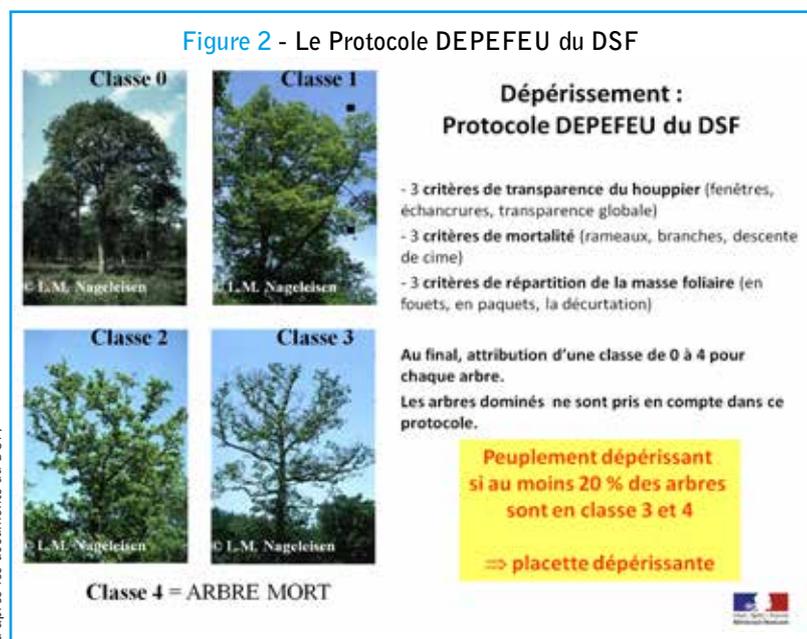
### Déficit hydrique climatique

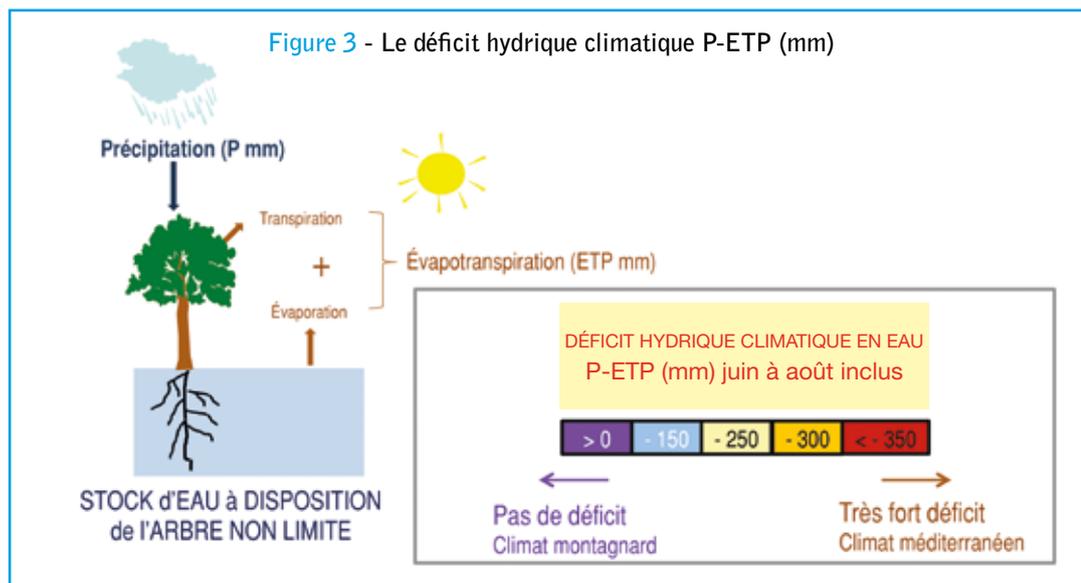
Le bilan hydrique le plus simple consiste à faire la **différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle au pas de temps mensuel (P-ETP)** ou sur des périodes spécifiques de l'année (P-ETP durant la période de végétation, durant les mois les plus chauds de juin à août par exemple). On parle généralement de « bilan hydrique potentiel » ou « climatique » car il ne tient pas compte du sol (réserve utile maximale,...) et du couvert forestier (LAI).

L'évapotranspiration potentielle correspond à la quantité d'eau maximale (mm) évapotranspirée par un couvert végétal abondant, couvrant

1) Roloff, 1991, note du DSF.

2) Nageleisen L.-M., 2005b et la note du DSF.





bien le sol, en phase active de croissance, et alimentée en eau de façon optimale. L'évapotranspiration est dite potentielle quand l'énergie nécessaire à la vaporisation est le seul facteur limitant. L'expérience montre en effet que des couverts végétaux différents, placés dans des conditions aussi voisines que possible de celles de la définition opérationnelle (pas de contraintes physiologiques et pédologiques d'alimentation en eau du végétal) de l'ETP, consomment à peu près la même quantité d'eau. L'ETP est donc une variable qui dépend « uniquement » du climat. Ainsi l'ETP est aussi nommée **demande climatique en eau**.

Le **bilan P-ETP** représente la quantité de pluie disponible pour les plantes, une fois les besoins en évaporation et en transpiration satisfaits<sup>3</sup>. En moyenne, en France, l'ETP est supérieure aux pluies pendant une période qui couvre généralement la période 1<sup>er</sup> avril au 1<sup>er</sup> octobre environ (hormis les zones montagneuses). **Le P-ETP durant ces mois étant négatif**, on parle de **déficit hydrique climatique**. Le P-ETP calculé sur les périodes de juin à août inclus s'est souvent avéré discriminant durant les études BioClimSol. En effet, ce critère discrimine bien les climats à tendance méditerranéens (chaud et très peu arrosé en été) des autres climats (figure 3). ■

#### Formule de Turc

Formule utilisée pour calculer l'ETP à l'échelle journalière, décadaire ou mensuelle. Pour une humidité relative  $H_r > 50\%$ , ce qui est le cas général des régions tempérées, la formule est la suivante :

$$\text{ETP (mm/n jours)} = n \times 0,013 \times (R_g + 50) \times (t / (t + 15))$$

$n$  = période considérée [jour ( $n = 1$ ), décade ( $n = 10$ ), mois ( $n = 28, 29, 30$  ou  $31$ )]

$t$  = température moyenne de l'air de la période ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R_g$  = rayonnement global en  $\text{cal} / \text{cm}^2 / \text{jour}$  (pour cette valeur, il est possible d'utiliser des données calculées à l'aide d'un SIG. Elle est, par exemple, fournie par l'outil DIGITALIS).

Cette formule utilise des variables simples et elle est facile à calculer, elle est recommandée pour le praticien de terrain<sup>4</sup>. Il s'agit d'une estimation de l'ETP (des volumes d'eau évaporée ont été corrélés à des paramètres climatiques). Idéalement, cette formule devrait être recalibrée à des échelles régionales. Elle est assez bien corrélée à l'ETP Penman, mais elle a tendance parfois à sous-estimer la demande transpiratoire (pendant la période de végétation), puisque ni l'albédo des couverts (affectant le terme radiatif), ni la vitesse du vent, ni l'humidité de l'air (pas de terme convectif) ne sont pris en compte. C'est surtout le cas en climat méditerranéen.

3) [http://silvae.agroparistech.fr/home/?page\\_id=905](http://silvae.agroparistech.fr/home/?page_id=905)

4) Lebourgeois F. & Piedallu Ch., 2005.

#### Formule de Penman

Formule utilisée pour calculer l'ETP au pas de temps journalier :  $\text{ETP (en mm/jour)} = \frac{\Delta R_n + g L E_a}{(\Delta + g) \times L}$

$R_n$  = rayonnement net de la surface (en  $\text{J cm}^{-2} \text{mm}^{-1}$ ) qui peut être mesuré ou calculé

$\Delta$  = pente de la courbe de tension de vapeur saturante à la température de l'air (en  $\text{mb } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$E_a$  = pouvoir évaporant de l'air

$L$  = chaleur latente de vaporisation de l'eau ( $2,56 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ )

$g$  = constante psychrométrique de Bowen =  $0,665 \text{ mb } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

Cette formule nécessite la prise en compte de nombreux paramètres à un pas de temps court (journalier voire mensuel). Cette formule se rapproche le mieux des processus d'évapotranspiration, puisqu'elle correspond à un calcul de bilan d'énergie complet.

# Données climatiques pour l'outil BioClimSol

par Jean Lemaire, CNPF-IDF

L'accès aux données climatiques du passé revêt une importance primordiale pour effectuer un diagnostic de qualité : à des échelles de temps et d'espaces plus ou moins fines : températures, pluviométrie, évapotranspiration potentielle, nombre de jours de gel...

## Bibliographie

La bibliographie associée aux différents modèles décrits dans cet article est disponible au sein des articles détaillant ces modèles téléchargeables sur le site : [www.foretpriveefrancaise.com/bioclimsol](http://www.foretpriveefrancaise.com/bioclimsol)

Les données climatiques collectées quotidiennement par le réseau Météo-France sont très nombreuses. Ces données collectées sont ensuite traitées pour construire des modèles climatiques permettant la production de carte de paramètres climatiques (figure 1). Il existe différents modèles climatiques qui diffèrent entre eux en fonction des données climatiques disponibles, de la résolution cartographique des données climatiques, de la temporalité, de la prise en compte ou non du topo-climat (pente, exposition), de l'intégration ou non de l'évapotranspiration potentielle et de la formule employée pour l'estimer. Parmi les modèles de cartogra-

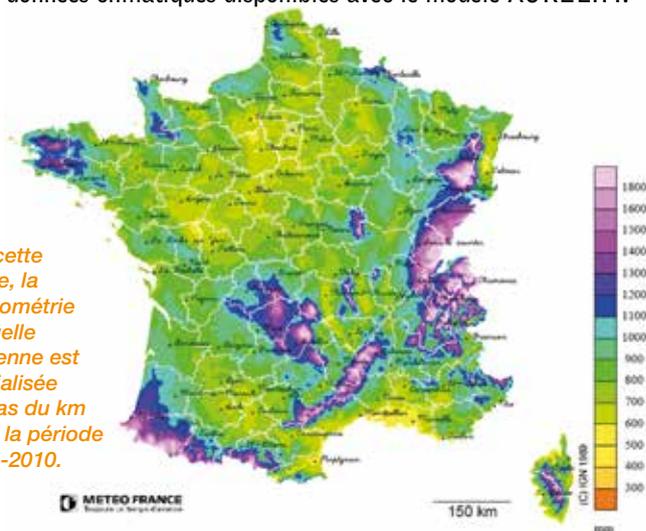
phie des données climatiques les plus connus, on citera AURELHY © Météo-France, SAFRAN © Météo-France et DIGITALIS © AgroParisTech. Les avantages et limites de différents modèles sont comparés synthétiquement dans le tableau 2. **Le lecteur intéressé trouvera sur le site de la forêt privée des articles détaillant les modalités de la construction et l'usage des différents modèles climatiques présentés dans le tableau 2.**

## Les données climatiques employées par BioClimSol

Les données de précipitations et de températures proviennent d'AURELHY au pas du km pour la moyenne trentenaire 1981-2010 et de SAFRAN pour les données journalières au pas du 8 km. Le choix de ces modèles s'explique par le nombre important de stations météorologiques. Le calcul de l'évapotranspiration ETP de Turc est choisi pour les données d'évapotranspiration potentielle. L'ETPQ n'a pas été employée car son usage est uniquement conseillé en plaine en dessous de 500 m d'altitude. Le modèle AURELHY ne fournit pas de données d'évapotranspiration potentielle. Les données d'évapotranspiration sont calculées, pour la période 1981 – 2010 (non disponibles dans DIGITALIS pour cette période), en combinant les données de température d'AURELHY et le modèle de rayonnement de DIGITALIS pour produire une carte d'ETP à la résolution du 50 m (Tableau 1).

Les modalités de construction de ce modèle combinatoire sont téléchargeables à l'adresse suivante [www.foretpriveefrancaise.com/bioclimsol](http://www.foretpriveefrancaise.com/bioclimsol)

Figure 1 - Exemple de spatialisation à l'échelle de la France d'une des données climatiques disponibles avec le modèle AURELHY.



Sur cette figure, la pluviométrie annuelle moyenne est spatialisée au pas du km pour la période 1981-2010.

Tableau 1 - AURITALIS : modèle combinant AURELHY et DIGITALIS utilisé pour alimenter BioClimSol (Moyenne trentenaire période 1981-2010)

Paramètres climatiques disponibles	Source	Résolution
Température moyenne mensuelle	AURELHY © Météo-France	1 km
Pluviométrie moyenne mensuelle	AURELHY © Météo-France	1 km
Rayonnement	DIGITALIS © AgroParisTech	1 km
Évapotranspiration ETP Période : - annuelle - juin à août inclus - mai à septembre inclus - avril à octobre inclus	ETP Turc calculée avec - Température AURELHY - Rayonnement DIGITALIS - Modèle numérique de terrain (MNT) DIGITALIS	50 m (prise en compte du topo-climat)

Pour rappel : pour les données journalières, mensuelles ou annuelles d'une année précise (exemple 2003 pour le douglas), les données utilisées dans BioClimSol proviennent du modèle SAFRAN dont la résolution spatiale est de 8 km.

Tableau 2 - Avantages et inconvénients des différents modèles de cartographie des données climatiques

AUTEUR	Modèle climatique	Variables climatiques disponibles	Période	Avantages	Inconvénients
METEOROFRANCE	AURELHY Analyse Utilisant le RELief pour l'Hydro-météorologie  résolution spatiale = 1 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>- P mensuelles et annuelles</li> <li>- TN mensuelles et annuelles</li> <li>- TX mensuelles et annuelles</li> <li>- Nombre de jours avec <math>P \geq 1</math> mm mensuelles et annuelles</li> <li>- Nombre de jours avec <math>P \geq 5</math> mm et <math>P \geq 10</math> mm mensuelles et annuelles</li> <li>- Nombre de jours de gelées sous abri mensuels et annuels</li> <li>- Nombre de jours avec <math>TN \leq -5^\circ\text{C}</math>, <math>TN \leq -10^\circ\text{C}</math>, <math>TX \leq 0^\circ\text{C}</math>, <math>TX \geq 25^\circ\text{C}</math> et <math>TX \geq 30^\circ\text{C}</math> annuelles</li> </ul>	Moyenne trentenaire de 1971-2000 ; 1981-2010  Remarque : les périodes climatiques 1951-1980 et 1961-1990 sont disponibles mais avec moins de variables climatiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très grand nombre de stations météorologiques impliquées dans le modèle pour la pluviométrie (3 400 stations) et la température (1 500 stations),</li> <li>- Variables climatiques liées aux températures et précipitations très nombreuses,</li> <li>- Nombreuses périodes de données,</li> <li>- Résolution spatiale fine 1 km</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'évapotranspiration (ETP) estimée avec cette méthode</li> <li>- La faible fréquence du pas de temps des données (moyenne trentenaire)</li> <li>- Postes de référence pour construire le modèle climatique AURELHY ne sont pas les mêmes d'une normale climatique à l'autre = impossibilité d'étudier le changement climatique.</li> <li>- Prise en compte partielle de la topographie (altitude et forme du relief mais pas le topoclimat).</li> </ul>
METEOROFRANCE	ETPQ ETP quotidienne en point grille  Résolution spatiale $\approx 12$ km	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ETP mensuelles et annuelles</li> </ul> formule de Penman- Monteith	Moyenne trentenaire de 1971-2000 ; 1981-2010	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ETP estimée selon la formule de Penman-Monteith tenant compte de la température, du rayonnement, de l'humidité atmosphérique, de la vitesse du vent.</li> <li>- Données allant jusqu'au pas quotidien et disponible en temps réel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible résolution spatiale <math>\approx 12</math> km</li> <li>- Pas de prise en compte de l'altitude</li> <li>- Pas de prise en compte du topoclimat</li> <li>- <b>Usage déconseillé au-delà de 500 m d'altitude.</b></li> <li>- <b>Donnée non utilisée dans BioClimSol</b></li> </ul>
METEOROFRANCE	SAFRAN Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige  Résolution spatiale = 8 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TN, TX, TM 2 m au-dessus du sol</li> <li>- Humidité relative moyenne à 2 m au-dessus du sol</li> <li>- Force moyenne du vent à 10 m au-dessus du sol</li> <li>- P</li> <li>- P liquide</li> <li>- Ray infrarouge/solaire</li> <li>- Ray atmosphérique</li> <li>- ETP formule de Penman-Monteith</li> </ul>	Données horaires de 1958 à aujourd'hui	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Données disponibles au pas de temps horaire</li> <li>- 8 paramètres climatiques (température, humidité, vent, précipitations rayonnement, évapotranspiration)</li> <li>- Fourniture de l'ETP de Penman-Monteith tenant compte de la température, du rayonnement, de l'humidité atmosphérique, de la vitesse du vent</li> <li>- Ancienneté des données (jusqu'à 1958) pour les études d'évolution climatique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résolution spatiale de 8 km qui ne permet pas la prise en compte plus fine du <b>topoclimat</b> comme les effets de pente et d'exposition.</li> </ul>
AGROPARISTECH	Modèles climatiques liés à la base de données DIGITALIS  Résolution spatiale = 50 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>P mensuelles et annuelles</li> <li>TM mensuelles et annuelles</li> <li>Ray atmosphérique mensuelles et annuelles</li> <li>ETP formule de Turc</li> </ul>	Moyenne trentenaire de 1961-1990	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prise en compte du <b>topoclimat</b> : exposition pente (MNT au pas du 50 m) pour l'évapotranspiration potentielle ;</li> <li>- Postes de référence pour construire le modèle climatique toujours les mêmes d'une normale climatique à l'autre.</li> </ul> (MNT : modèle numérique de terrain)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible nombre de postes météo pour la modélisation de pluviométries (437 stations météorologiques) et des températures (237 stations météorologiques)</li> <li>- ETP estimée selon la formule de Turc prenant en compte la température de l'air et le rayonnement. Elle ne prend pas en compte le vent et l'humidité de l'air. L'ETP est sous-estimée principalement en été.</li> </ul>

Variables : P = précipitations, TN : température minimale, TX = température maximale, TM = température moyenne, ETP = évapotranspiration potentielle, Ray = rayonnement

## À retenir

Il existe actuellement un nombre important de données climatiques à la disposition du forestier. Ces données lui permettent de connaître, en tout point du territoire, le climat d'une zone et cela, même si la forêt n'est pas équipée d'une station météorologique. Mais attention, le bon usage de ces données climatiques impose une formation préalable pour éviter des erreurs conséquentes lors de leur utilisation.

# Lien entre le déficit hydrique climatique et le dépérissement du chêne pédonculé sur la façade atlantique

par Jean Lemaire, CNPF-IDF

*Le projet « Chênaies atlantiques », travail commun des 7 CRPF du grand Ouest et de l'IDF, a précisé les seuils climatiques au-delà desquels les chênaies pédonculées souffrent et « décrochent ». Une avancée dans la compréhension des dépérissements de cette essence.*

En 2008, le CRPF Pays de la Loire et Poitou-Charentes s'interrogent face à l'augmentation des demandes des coupes sanitaires, dérogoires au plan simple de gestion dans les chênaies (chêne pédonculé en particulier). Les CRPF voisins, de la façade atlantique, arrivent au même constat, à la savoir la dégradation de l'état de vitalité des chênaies. Avec l'appui de l'IDF, ils bâtissent un projet visant à quantifier, à cartographier et à comprendre les phénomènes en jeu (*encadré ci-contre*). C'est le projet « Chênaies atlantiques ».

La première partie discutera de la corrélation entre le déficit hydrique climatique (P-ETP) et le taux de dépérissement des chênaies pédonculées sur le secteur atlantique. Nous présenterons ensuite le lien entre cette variable et la distribution du chêne pédonculé en Europe et en France. Ensuite, l'influence des années à fort déficit hydrique climatique sur la vitalité des chênes sera abordée à partir de l'analyse de la croissance radiale. Finalement, nous examinerons l'impact de la récurrence des sécheresses climatiques, enregistrées ces 30 dernières années, sur la vitalité des chênaies pédonculées.

## Le déficit hydrique climatique (P-ETP) : un indicateur climatique intéressant

### Dépérissement et limite climatique du chêne pédonculé sur le secteur atlantique

Durant la saison de végétation 2009-2010, 335 placettes sont installées dans des parcelles à dominance de chênes (sessile, pédonculé ou parfois en mélange avec du pubescent notamment) dans les forêts privées des régions de la façade atlantique (Normandie, Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes et Aquitaine) (*figures 1 et 2*). L'objectif de l'étude visait à comprendre s'il existe un seuil climatique à

partir duquel les chênes sessile et pédonculé dépérissent.

Le niveau de dépérissement des chênes de chaque placette est évalué en employant le protocole DEPEFEU du Département de la santé des forêts (DSF)<sup>1</sup>. L'espèce de chênes identifiée, de multiples mesures dendrométriques (circonférence, diamètre des tiges, surface terrière,...) sont effectuées. Un relevé de sol est également réalisé sur chaque placette. Chaque placette étant localisée avec le GPS, les données climatiques (normale climatique trentenaire 1961-1990 AURELHY® Météo-France) sont collectées pour chacun de ces points d'inventaires.

Les résultats montrent que parmi les trois grands chênes blancs présents (sessile, pédonculé et pubescent), seul le chêne pédonculé était significativement touché par des phénomènes de dépérissement. En Poitou-Charentes, un quart des placettes à dominance de pédonculé présente des signes de dépérissement.

L'analyse statistique des données collectées met en évidence l'importance des variables du bilan hydrique sur le taux de dépérissement du chêne pédonculé. Parmi celles-ci, le **déficit hydrique climatique (P-ETP)** et les **températures estivales** apparaissent comme des variables explicatives du phénomène de dépérissement. Enfin, l'absence de sylviculture dynamique, c'est-à-dire le maintien de peuplements trop serrés (surface terrière de la futaie supérieure à 20 m<sup>2</sup>/ha), est apparue comme un facteur aggravant.

Une clé de détermination des limites climatiques, où la probabilité de dépérissement est accrue, est définie à partir de ces deux critères climatiques (*figure 3*) : P-ETP de mai septembre inclus et température maximal de juin à août. La représentation cartographique de cette clé est proposée à la *figure 7*.

20 % des peuplements inventoriés et situés dans la zone climatique défavorable au pédon-

<sup>1</sup> Voir l'article des notions de référence page 14.

Cet article présente les principaux résultats de l'étude « Les Chênaies atlantiques face aux changements climatiques globaux : comprendre et agir », dont certains sont déjà parus dans la revue Forêt-entreprise n° 191, n° 198, n° 200, n° 211.

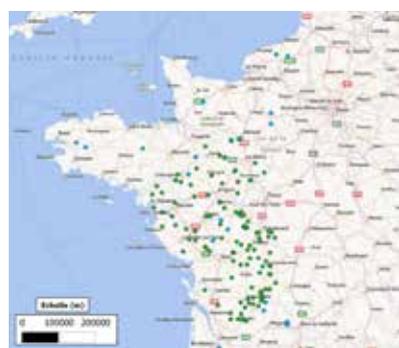
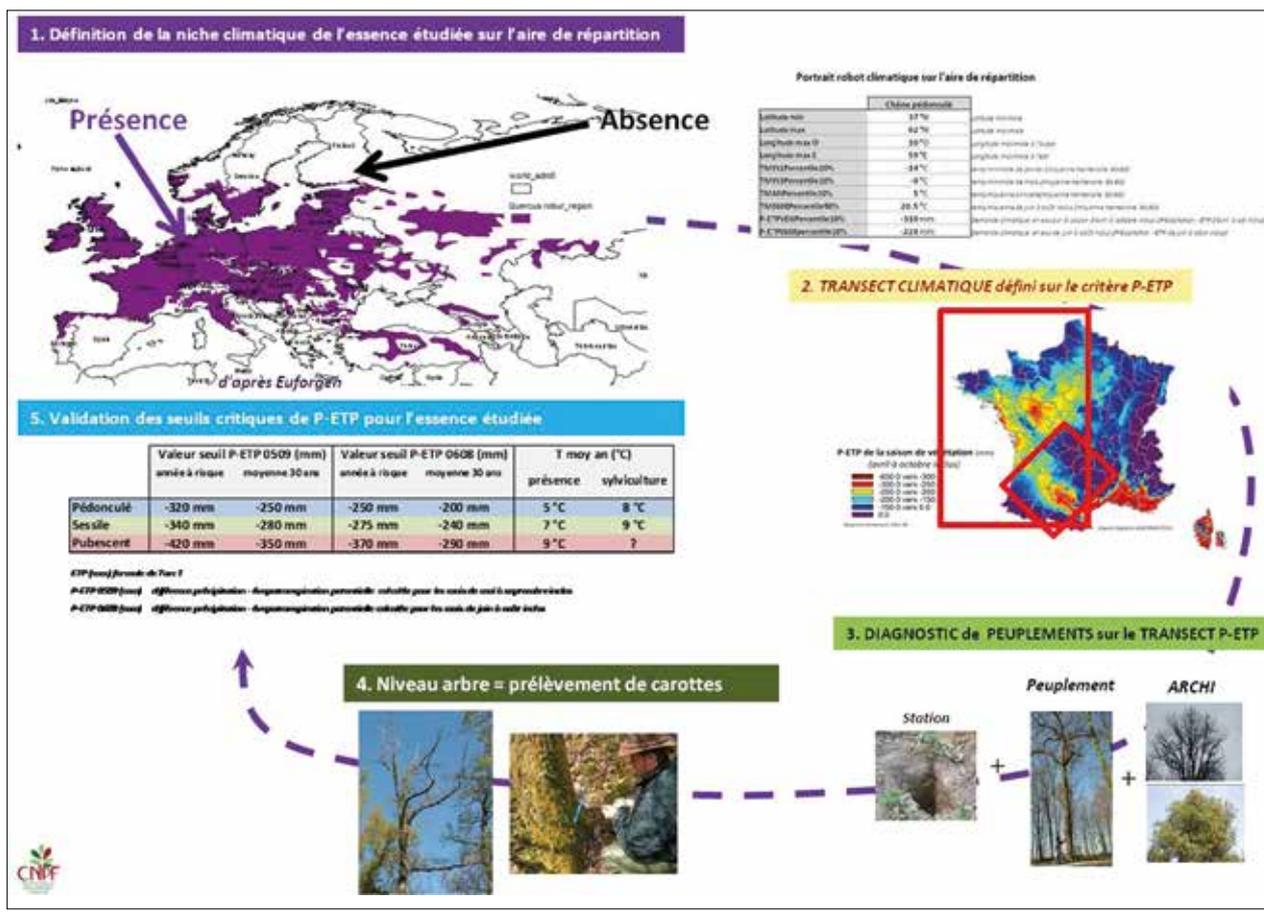
## Présentation du protocole de l'étude « Chênaies atlantiques »

Le projet « Chênaies atlantiques » a finalisé un protocole d'étude visant à mieux cerner l'impact du changement climatique sur la vitalité d'une essence. L'étape 1 du protocole vise à dresser le portrait robot climatique de l'essence sur son aire de répartition en examinant les paramètres climatiques qui expliquent sa présence et son absence (modèle de niche).

Les étapes 2 et 3 consistent à étudier, en France, l'état sanitaire d'un grand nombre de peuplements (au minimum 90 à 120) sur un gradient de déficit hydrique marqué. Des relevés de stations et des mesures dendrométriques sont effectués pour chaque peuplement. Les premières analyses statistiques ciblent les paramètres pédoclimatiques et sylvicoles influençant l'état sanitaire du peuplement. Dans les

zones où le plus fort taux de dépérissement est constaté, des carottes sont prélevées sur les arbres pour analyser la croissance radiale en lien avec les évolutions passées du climat. Pour le sapin, cette étape est remplacée par des analyses d'images satellites ciblées sur les années critiques comme 2003. Pour le douglas, nous avons utilisé les photos aériennes de l'IGN prises en 2003<sup>1)</sup>. L'ensemble de ces étapes a validé les seuils critiques de bilan hydrique climatique (P-ETP) spécifiques à chaque essence et a permis d'établir ensuite les cartes de vigilance climatique. Ce protocole est répliqué pour le sapin, le chêne pubescent et le douglas. Des projets sont en cours sur le cèdre et le châtaignier et bientôt d'autres essences selon les demandes (hêtre, pin sylvestre, feuillus précieux, épicéa, ...).

1) Voir l'article L'impact de l'année 2003 sur le douglas page 46.



**Figure 1 - Localisation des 335 placettes de chênes inventoriées sur la façade atlantique**

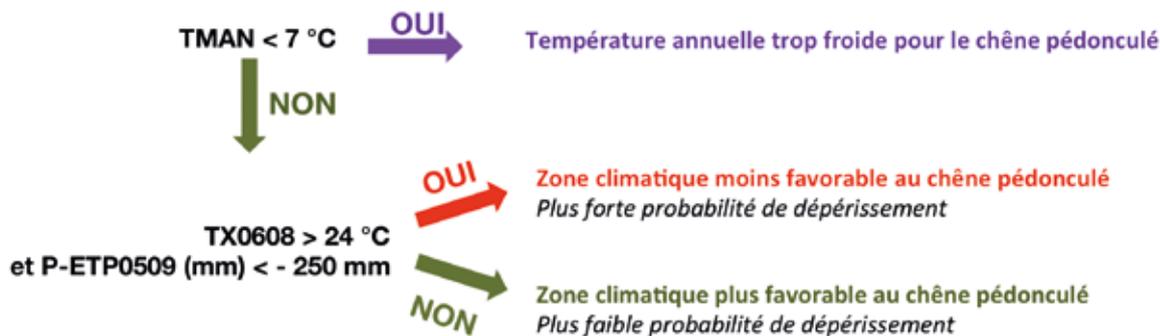
Les points ● correspondent aux 184 placettes inventoriées en 2009 en Poitou-Charentes et Pays de la Loire.

Les points ● représentent les massifs forestiers où 151 placettes de chêne pédonculé ont été inventoriées en 2010 : Normandie, Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes, Aquitaine.



**Figure 2 - Le taux de dépérissement de la placette est estimé à l'aide du protocole DEPEFEU du Département de la Santé des Forêts (voir l'article des notions de référence page 14)**

Figure 3 - Clé de détermination des limites climatiques du chêne pédonculé validée lors du projet « Chênaies atlantiques ».

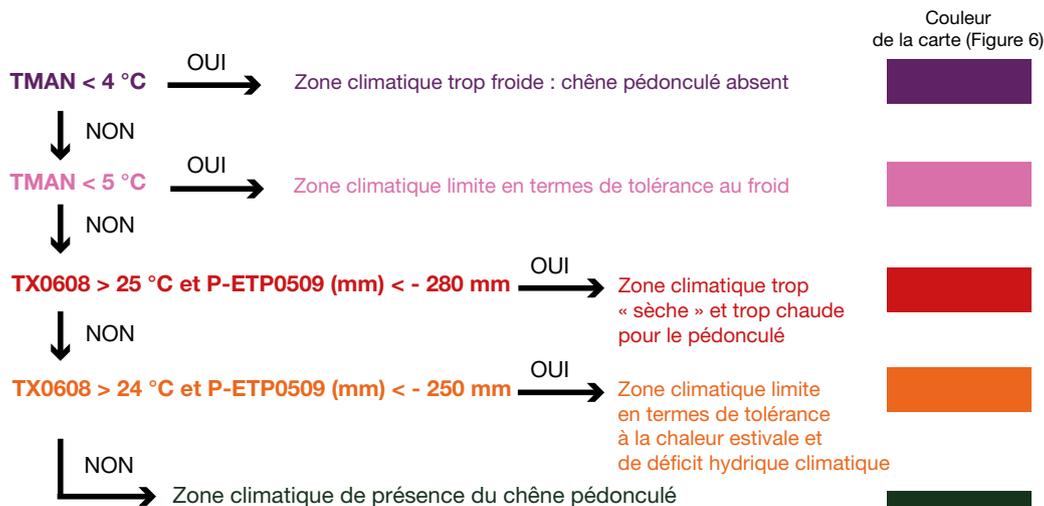


TMAN : température moyenne annuelle.  
 TX0608 : moyenne des températures maximales de juin à août inclus.  
 P-ETP0509 (mm) : déficit hydrique climatique de mai à septembre inclus  
 Source des données : AURELHY (Météofrance) 1961-90. ETP calculé selon la formule de Turc

Comment lire cette clé : si la température moyenne annuelle est inférieure à 7 °C, le climat est défavorable au chêne pédonculé car il est trop froid. Si on se situe dans une région où la température est supérieure à 7 °C et si la température maximale de juin à août est supérieure à 24 °C (moyenne trentenaire 1961-90) et si le P-ETP de mai à septembre inclus (moyenne trentenaire 1961-90 ETP de Turc) est inférieure à - 250 mm, la zone climatique est défavorable au chêne pédonculé. Dans le cas inverse, elle lui est favorable.

Cette clé est valable pour les stations ne bénéficiant pas d'un apport latéral en eau (= effet de compensation du climat), de départ excessif en eau ou de présence d'hydromorphie marquée dans les 60 cm premiers centimètres de sol (effet d'aggravation du climat).  
 (voir la théorie du boxeur page 26).

Figure 4 - Clé de détermination des limites climatiques du chêne pédonculé sur son aire de répartition



TMAN : moyenne annuelle des températures. Données climatiques Worldclim<sup>1)</sup> 1961-90.  
 TX0608 : moyenne maximale des températures de juin à août inclus. Données climatiques Worldclim 1961-90.  
 P-ETP0509 : déficit hydrique climatique de mai à septembre inclus. Données climatiques Worldclim 1961-90 et ETP formule de Turc.

1) Hijmans R.-J. et al., 2005.

culé (zone climatique définie par la clé, voir la figure 3) sont classés dépérissants (un peulement est jugé dépérissant si plus de 20 % des tiges inventoriées sont notées en classe 3 ou plus selon le protocole DEPEFEU. Dans la zone climatiquement favorable au chêne pédonculé, 9 % des peuplements sont jugés dépérissants en utilisant les mêmes critères de classification.

### La distribution du chêne pédonculé en Europe est corrélée au déficit hydrique climatique (P-ETP)

Les valeurs seuils définies par la clé de détermination climatique du programme « Chênaies atlantiques » (figure 3) sont testées pour discriminer l'absence et la présence du chêne pédonculé sur son aire de répartition (figures 5

Figures 5 et 6 - Aire de répartition naturelle du chêne pédonculé à gauche et aire de répartition simulée à partir de la clé de détermination climatique.

Pour les codes couleur de la figure 6, voir la clé de détermination de la figure 4.



L'aire de répartition naturelle du chêne pédonculé (figure 5) étant géoréférencée (source Euforgen), il est possible, à partir des données climatiques mondiales (*Worldclim* résolution  $\approx 10$  km), de préciser les seuils climatiques déterminant sa présence (zone verte des cartes figure 6) ou son absence (zones trop sèches et/ou trop chaudes ou trop froides figure 6).

et 6). L'analyse statistique sur l'ensemble de l'aire de répartition a permis de proposer la clé de la figure 4.

Cette clé de détermination discrimine 9 fois sur 10 la présence ou l'absence du chêne pédonculé sur l'aire de répartition.

Cette clé met en évidence deux secteurs défavorables au chêne pédonculé sur la façade atlantique française. Ils sont tracés en orange sur la carte de la figure 6 :

- > au nord, un triangle dans le secteur ligérien dont les sommets sont délimités par les villes de Tours, Angers et Poitiers où le chêne pédonculé est très présent (figure 7, p. 22).
- > au sud, une zone climatique à cheval sur la région Aquitaine et Midi-Pyrénées et plus précisément autour du bassin de la Garonne et de la Gironde où le chêne pédonculé est peu présent (figure 7).

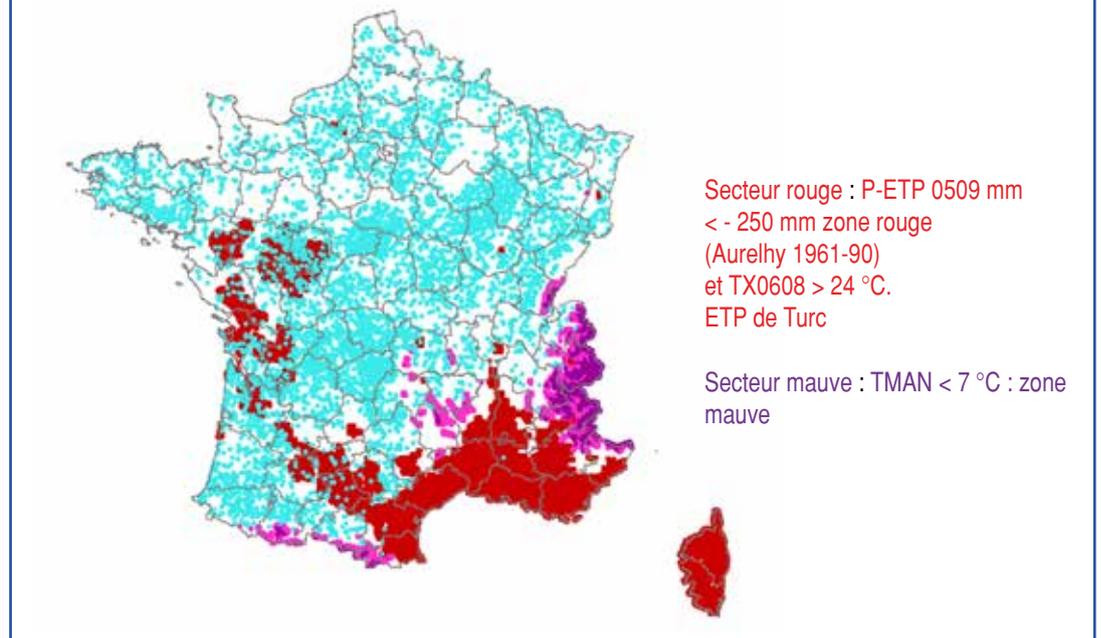
Les seuils limites de température et de déficit hydrique climatique tolérés par le chêne pédonculé sur l'aire de répartition sont donc proches de ceux discriminant les zones favorables ou défavorables sur la façade atlantique. Cela pourrait indiquer que sur le secteur Tours, Angers et Poitiers, où le chêne pédonculé est très présent, les limites climatiques de cette essence commenceraient à être atteintes. Ces résultats doivent être toutefois confirmés en les croisant avec d'autres études en cours (Agro-ParisTech, Inra).

### La distribution du chêne pédonculé en France est corrélée au déficit hydrique climatique (P-ETP)

La figure 7 présente la carte des points d'inventaire de l'IGN (2005 et 2011) où le chêne pédonculé est recensé. Cette carte de présence a été superposée à celle des limites climatiques définie par la clé de détermination climatique du chêne pédonculé de la figure 3. Les points d'inventaire où des effets de sol ou de topographie expliquent à eux seuls la présence du chêne pédonculé (présence d'hydromorphie dans les 60 premiers centimètres du sol, bas de versant, combe, vallée ou replat sur versant) ne sont pas retenus pour cette analyse.

Les zones en mauve, trop froides pour la survie de cette essence, sont les secteurs de montagne à savoir une partie des Alpes, des Pyrénées, des Vosges, du Jura et du Massif central. Les zones rouges délimitent les secteurs trop chauds et/ou trop déficitaires en eau pour cette essence. Dans le Sud-Est, en climat méditerranéen, le chêne pédonculé est logiquement exclu. Dans le secteur Sud-Ouest, la zone climatique en rouge est centrée sur le bassin de la Garonne et de la Gironde où le chêne pédonculé est très peu présent et remplacé par le chêne pubescent. Elle délimite également les secteurs peu boisés du Sud-

Figure 7 - Carte superposant les points d'inventaire de l'IGN (2005-2011) (symbole ●) où le chêne pédonculé est présent avec les cartes de limites climatiques de cette essence.



- 1) Territoire phytogéographique du bassin de la Loire.  
2) Mercadier C., 1997 ; Saintonge F.-X., 1998.

Vendée, Deux-Sèvres et des plaines des deux Charente où le chêne pédonculé est moins présent. Elle concerne également le secteur ligérien<sup>1)</sup> délimité entre Tours, Poitiers et Angers déjà identifié sur la figure 6. Dans cette zone climatique, le chêne pédonculé, essence dominante du secteur, connaît des problèmes de dépérissement depuis la fin des années 80<sup>2)</sup>.

### Déficit hydrique climatique et lien avec la croissance radiale du chêne pédonculé

Des prélèvements de carottes sont effectués (2010) pour analyser la croissance radiale du chêne pédonculé dans la zone climatique de Tours-Angers-Poitiers au bilan hydrique déficitaire, et où le plus fort pourcentage de peuplements dépérissants est inventorié en 2009-2010 (*zone rouge de la figure 7*). 90 arbres sont carottés, répartis dans 19 peuplements avec des dépérissements constatés. Tous les arbres sont choisis dans la strate dominante et dans la même classe d'âges (80 à 100 ans selon les couples)<sup>3)</sup>. Les stations climatiques de référence pour ces 19 peuplements carottés sont les stations de Tours et de Poitiers.

L'analyse des cernes s'est faite sur des carottes extraites à l'aide d'une tarière de Pressler. Après collage sur une baguette et ponçage progressif des carottes, la largeur de chaque cerne a été mesurée sur une plateforme de mesures dédiée à cet effet. Les cernes sont mesurés et l'année de formation du cerne est

notée. La largeur des cernes est ensuite exprimée en indice de croissance. Un indice de croissance supérieur à 1<sup>4)</sup> signifie que l'arbre pousse proportionnellement plus vite que la moyenne à un âge donné. Un indice de croissance inférieure à 1 indique qu'il pousse moins vite.

La mesure de carottes a permis d'identifier des années (1970-2009) où l'indice de croissance radiale est :

- > « beaucoup » plus élevée que la moyenne (croissance par rapport à la moyenne > + 20 % sur l'indice de croissance) ;
- > « beaucoup » plus faible que la moyenne (croissance par rapport à la moyenne < - 20 % sur l'indice de croissance).

Ces années correspondent généralement à un événement climatique particulier. Entre 1970 et 2009 : huit années à tendance de croissance négative et cinq à tendance positive (*tableau 1*) sont identifiées.

En analysant, les valeurs du P-ETP de mai à septembre inclus (*figure 8*) des stations météorologiques de Poitiers et Tours, on constate trois faits :

1- Des années apparaissent particulièrement défavorables en termes de déficit hydrique, à savoir 1976, 1989-1991, 1996, 2004-2005. Ces années sont souvent citées dans la littérature<sup>5)</sup> comme étant à l'origine de dépérissements dans les chênaies pédonculées. L'année même où cette sécheresse climatique est survenue, la croissance radiale a diminué de

3) Drénou Ch. *et al.*, 2012 a.

4) Merian & Lebourgeois, 2012.

5) Nageleisen L.-M., 1993, 1994, 2004, 2006 ; Rodriguez, 2009 ; Mercadier, 1997.

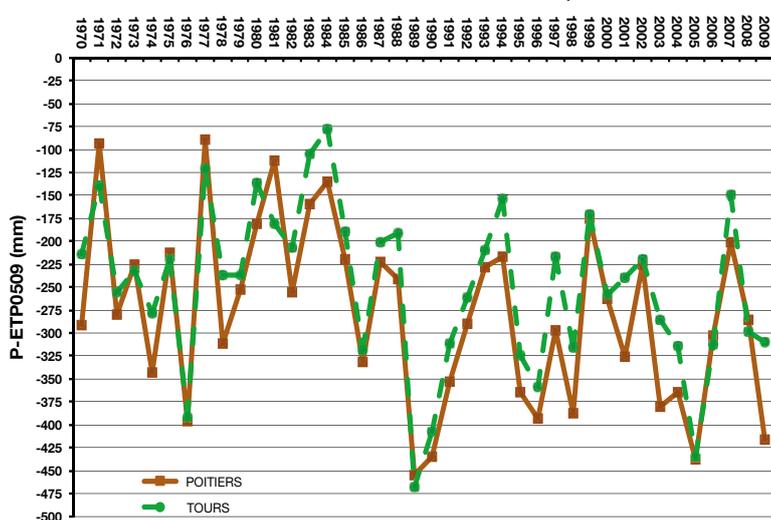
**Tableau 1** - Récapitulatif des années avec un indice de croissance beaucoup plus élevé ou beaucoup plus faible que la moyenne depuis 1970

	1974	1976	1981	1983	1985	1988	1990	1992	2004	2005	2006	2007	2008
Tendance de croissance	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑
Gain ou perte sur l'indice de croissance radiale exprimé en %	- 26	- 36	- 27	+ 44	+ 34	+ 51	- 20	- 25	- 27	- 41	- 27	+ 28	+ 23

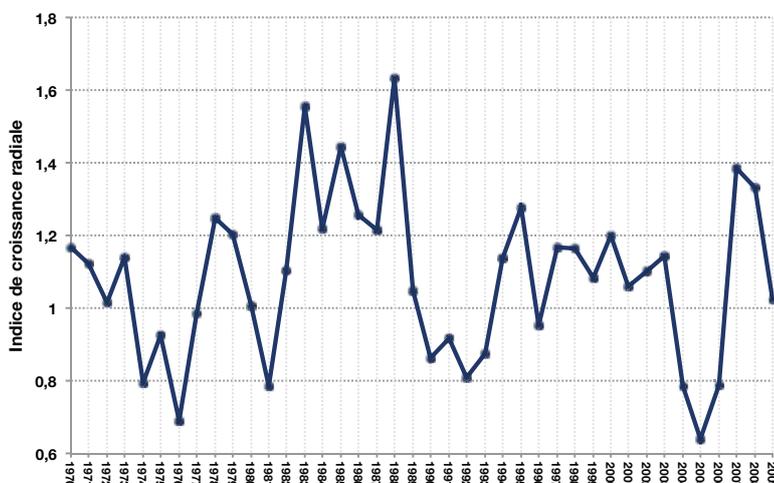
Vrai ou Faux ?

**Figure 8** - Évolution du déficit hydrique climatique de mai à septembre inclus sur les secteurs de Tours et Poitiers de 1970 à 2009 inclus.

(Source SAFRAN © Météo-France. ETP de Turc)



**Figure 9** - Évolution de l'indice moyen de croissance radiale (indice de Fritts) des 90 tiges carottées.



Un indice de croissance proche de 1 signifie que la croissance radiale des arbres, à un âge donné, est proche de la moyenne. Quand il est supérieur à 1,2, la croissance radiale est élevée. Quand il est inférieur à 0,8, elle est faible.

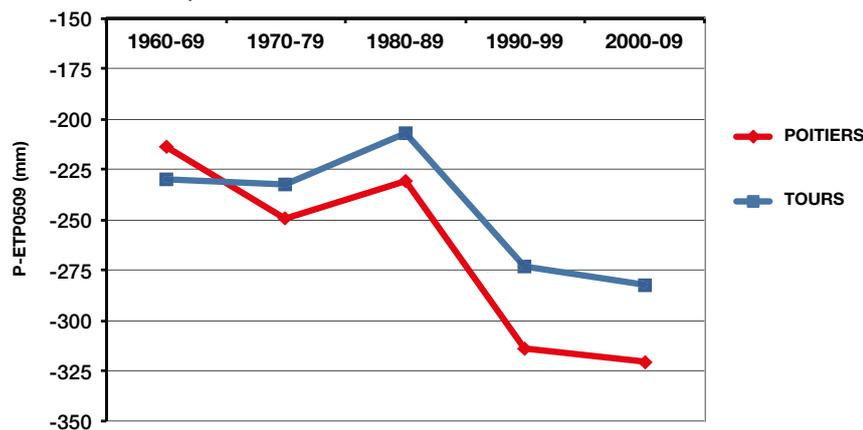
**Les limites climatiques pour lesquelles on constate le plus de perte de vitalité du chêne pédonculé sur le secteur atlantique en France sont les mêmes qu'au sud de son aire européenne ?**

**Peut-être.** Les limites climatiques à partir desquelles on constate le plus de signes de perte de vitalité se situent à un déficit hydrique P-ETP de mai à septembre inclus de - 250 mm (ETP Turc moyenne trentenaire) et à des températures maximales de juin à août de 24 °C (moyenne trentenaire). Ces limites discriminent à la fois la présence et l'absence du chêne pédonculé au sud de son aire de répartition et la zone climatique où plus de cas de signalement de dépérissement sont identifiés sur le secteur atlantique en France. Cela démontrerait que ce n'est pas forcément au sud de l'aire de répartition qu'on pourra sélectionner plus de provenances résistantes à la sécheresse. Ceci reste toutefois à confirmer!

**Un peuplement à dominance de chêne pédonculé, situé dans un contexte climatique où le P-ETP de mai à septembre inclus inférieure à - 250 mm, a 100 % de chance de dépérir ?**

**Faux.** Tout dépend de la récurrence des sécheresses sur le secteur, qui peut être différente d'une forêt à l'autre. Ensuite cela dépend également du sol, des conditions du microclimat liées à la topographie mais aussi de la sylviculture pratiquée et de la présence ou non d'attaque d'agents pathogènes qui peuvent aggraver la perte de vitalité.

Figure 10 - Évolution du déficit hydrique climatique de mai à septembre inclus (P-ETP0509) par décennie sur le secteur de Tours et Poitiers



Données SAFRAN © Météo-France) avec l'ETP formulée de Turc.

30 % en moyenne (figure 9). L'impact de ces sécheresses climatiques se fait encore fortement ressentir sur la croissance les années qui suivent : 1992, 2006 par exemple.

2- L'année 1981 présente une croissance radiale en diminution, alors que la valeur de P-ETP est élevée. Ce dernier résultat souligne l'importance des autres facteurs sur l'état sanitaire des chênes (engorgement en eau des sols, chenilles défoliatrices et autres pathogènes...).

3- Une diminution et donc une dégradation du bilan hydrique climatique depuis la fin des années 80 pourraient être mises en lien avec les évolutions du climat depuis la fin des années 80.

La valeur seuil du déficit hydrique climatique pour les années défavorables à la croissance (baisse d'au moins 20 % de l'indice de croissance) et connues pour être associée à des

crises sanitaires (1976 ; 1989-91 ; 1996 ; 2004 ; 2005) est d'environ - 320 mm. En-dessous de ce seuil climatique, le risque de perte de croissance, voire de dépérissement, est accru, d'autant plus si les années sèches se succèdent à intervalle régulier, comme ce fut le cas en 1989, 1990, 1991, 1995-1996 et 2003-2005. À cet égard, les années 1990 et le début des années 2000 ont donc été défavorables au chêne pédonculé. 5 des 8 années, avec un indice de croissance beaucoup plus faible que la moyenne, sont enregistrées durant la période 1989-2006. Durant cet intervalle de temps, aucune année avec une forte croissance n'est enregistrée. Depuis 2007, la reprise de croissance observée est à mettre en lien avec des déficits hydriques plus favorables.

## Discussion des résultats

En France, et plus largement en Europe, des dépérissements de chênaies pédonculées sont signalés ces 40 dernières années. Delatour (1983) relate des dépérissements dans les chênaies européennes dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. L'étude des dépérissements dans les forêts de Tronçais<sup>1)</sup> a montré l'importance de l'essence (pédonculé ou sessile) et de la station sur le taux de dépérissement. Le dépérissement des chênaies est un phénomène complexe qui se déroule en plusieurs étapes, sous l'effet de différents facteurs, qu'ils conviennent d'analyser finement<sup>2)</sup> : le climat, la station, la sylviculture et les facteurs biotiques. L'ensemble de ces facteurs interagissant peuvent induire au final le dépérissement d'un arbre, d'un peuplement...

Les crises de dépérissement du chêne pédonculé sont relativement bien documentées depuis les années 80. Les facteurs déclenchants souvent mentionnés sont principalement les

### À retenir

- 1) Becker & Lévy, 1982 & 1983.
- 2) Nageleisen, 1994.

**L'étude « Chênaies atlantiques » précise les limites climatiques du chêne pédonculé en lien avec les dépérissements : températures annuelle et estivale maximales et seuil de déficit hydrique climatique. Le secteur atlantique présente un enjeu important pour le chêne pédonculé dans ce contexte de changement climatique. L'importance de la répétition des sécheresses sur le déclenchement des dépérissements est confirmée. L'absence de sylviculture, trop souvent constatée, dans ces chênaies augmente le risque de dépérissement.**

stress hydriques à répétition, les attaques de chenilles défoliatrices et des champignons comme l'oïdium<sup>3)</sup> L'absence de sylviculture est souvent un effet aggravant. L'étude réalisée sur le secteur atlantique identifie un seuil de déficit hydrique climatique (P-ETP de mai à septembre inclus) et de température estivale à partir desquels le risque de dépérissement est accru (figure 3).

Tours-Angers-Poitiers est un secteur où le chêne pédonculé présente le plus de signes de dépérissement sur la façade atlantique. Sur ces régions, le déficit hydrique climatique (P-ETP) se dégrade depuis la fin des années 80. En moyenne, le déficit hydrique climatique, P-ETP de mai à septembre, y est passé sous le seuil de - 250 mm (figure 10) ces 20 dernières années.

L'analyse de la croissance radiale, année par année, tend à démontrer que si le P-ETP de mai à septembre inclus passe, pour une année sous le seuil - 320 mm, elle est climatiquement à risque pour le chêne pédonculé. Ce risque est d'autant plus accru que ces années à risque se répètent dans un intervalle de temps rapproché, comme ce fut le cas durant la décennie 1990 et le début des années 2000.

L'hypothèse, qui émerge de ces travaux, est qu'un tri climatique s'opère au sein des chênaies au gré des sécheresses répétées, de plus en plus rapprochées sur ce secteur climatique depuis la fin des années 80<sup>4)</sup>.

Les chênes pédonculés dépérissants sont éliminés progressivement au profit des chênes sessile et pubescents, souvent présents en mélange sur ce secteur. Cette accumulation de sécheresses n'est pas le seul facteur expliquant ces dépérissements. L'absence de gestion et l'implantation du chêne pédonculé sur des stations inadaptées, conjuguées parfois à des attaques d'agents pathogènes, renforcent ces impacts climatiques.

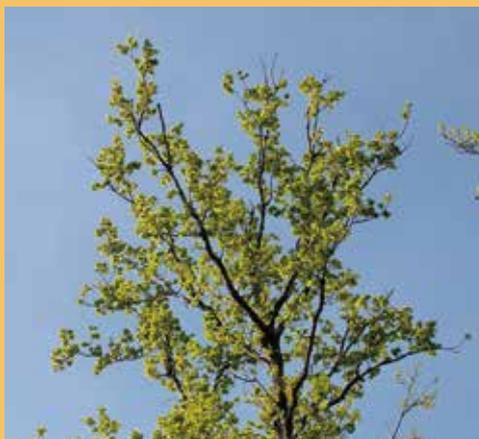
## Perspectives

À ce jour, il n'y a pas en effet de dépérissement massif et étendu sur le transect atlantique, mais des bouquets d'arbres dépérissants. C'est là un facteur qui doit encourager le gestionnaire à améliorer la résilience des peuplements, en favorisant le mélange des essences, des chênes pubescents et sessiles en particulier. Les études démontrent que dans tous les peuplements, même touchés par un dépérissement, il existe toujours des chênes résilients aptes à surmonter les stress subis. C'est aussi un facteur encourageant démontrant qu'au sein d'un même peuplement, il existerait (à confirmer toutefois par des études) des chênes pédonculés plus résistants à la sécheresse. La vigilance du forestier doit être maximale sur ce secteur, mais cela ne doit pas le décourager. Une dynamique de sélection est probablement en marche, au forestier de la favoriser. ■

3) Nageleisen *et al.* 2010, Bréda 1999, Vennetier 2010.

### Le savez-vous ?

**Les chênaies pédonculées du secteur ligérien, en particulier en Poitou-Charentes, Pays de la Loire et Centre, sont situées dans les régions les plus sèches où le chêne pédonculé est recensé sur son aire de répartition. Le secteur Tours-Angers-Poitiers est ainsi parmi les 10 % des régions les plus sèches climatiquement où le chêne pédonculé est présent en Europe. Le chêne pédonculé est l'espèce de chêne la plus impactée par le dépérissement actuellement sur la façade atlantique.**



4) voir la figure de la théorie du boxeur p. 28

# La théorie du boxeur : exemple du chêne pédonculé

par Jean Lemaire, CNPF-IDF

*La répétition d'années à fort déficit hydrique explique en partie la perte de vitalité des chênaies pédonculées du grand Ouest. Malgré sa capacité de résilience élevée, le chêne est affaibli par la récurrence des années à fort déficit hydrique. À force de recevoir des coups, cela peut l'entraîner vers un dépérissement irréversible. La théorie du boxeur : une image percutante pour mieux comprendre l'impact des sécheresses à répétition.*

1) Allen H.D. *et al.*, 2010.

2) Joly D. *et al.*, 2010.

3) Bréda N. & Peiffer M., 1999 ; Bréda N., 1999 ; Courbet F. *et al.*, 2013 ; Choat B. *et al.*, 2012 ; Charru M., 2012 ; Lebourgeois F. *et al.*, 2013 ; Lebourgeois F. *et al.*, 2010 ; Lebourgeois F., 2006 ; Lelou D., 2010 ; Lemaire J., 2008 ; Lemaire J. *et al.*, 2010 ; Matias L., Alistair S., Jump, 2012 ; Mercadier C., 1997 ; Mérian P., 2012 ; Nageleisen L.-M., 2005 ; Nageleisen L.-M. *et al.*, 2010 ; Rodriguez A., 2009, Sergent A.-S. *et al.*, 2013 ; Thabeet A., 2008 ; Thauvin G., 2011 ; Vennetier M., 2012. & Vincke C., 2003.

4) Gravier H., 2012.

5) Berger C., 2013.

6) Martin-Horcajo G., 2013.

Lorsqu'on réalise une revue bibliographique des facteurs déclenchants des vagues de dépérissements, les stress hydriques sont un des facteurs les plus fréquemment cités, aussi bien en climats équatorial, tempéré, méditerranéen ou boréal. Une excellente revue bibliographique sur cette thématique est proposée par Allen *et al.*, (2010). Les auteurs ont recensé, à l'échelle du globe, les cas de mortalité de forêts probablement liés à des stress climatiques provoqués par des températures et des sécheresses excessives : « La mortalité des arbres dépend normalement de multiples facteurs interactifs, allant de la sécheresse aux attaques d'insectes nuisibles et aux maladies, rendant souvent irréaliste la recherche d'une cause unique. » Toutefois, ce sont les facteurs de stress abiotiques qui sont souvent à la base des problèmes de santé de la forêt, le stress climatique étant considéré comme le principal facteur de déclenchement de nombreuses grandes attaques d'insectes et de maladies<sup>1)</sup>.

Chez nous, ce problème est connu. La France est un pays aux climats contrastés. Des climats méditerranéens, montagnards, océaniques ou à tendances continentales se côtoient sur des espaces proches<sup>2)</sup>. Le déclenchement de dépérissements liés à des épisodes de sécheresse y est mentionné pour de nombreuses essences : le sapin pectiné, les chênes, le pin sylvestre, le châtaignier, le douglas, l'épicéa, le cèdre, le hêtre, ...<sup>3)</sup>.

Pour comprendre l'impact des déficits hydriques à répétition sur les risques de dépéris-

sement, nous proposons la théorie du boxeur. Cette théorie du boxeur explique la perte de vitalité des arbres, conséquente à la répétition d'années à fort déficit hydrique climatique (P-ETP). Dans la première partie de cet article, son concept est défini, en prenant pour exemple, le chêne pédonculé. D'autres études montrent la pertinence de cette approche sur le sapin<sup>4)</sup>, le chêne pubescent<sup>5)</sup>, et le douglas<sup>6)</sup> notamment, dont les résultats sont présentés dans l'article sur la vitalité du douglas (p. 46).

La deuxième partie développe le lien entre les dépérissements des chênaies et la répétition des années à forts déficits hydriques climatiques. Enfin, la méthode de construction des cartes de vigilance climatique sera décrite.

## La théorie du boxeur : exemple du chêne pédonculé

L'étude « Chênaies atlantiques » et la bibliographie ont ciblé les années caractéristiques en termes de déficit hydrique climatique, qui ont engendré des dépérissements chez le chêne pédonculé sur la façade océanique : 1976, 1989-1991, 1995-1996, 2003-2005. Au cours des années critiques, le déficit hydrique climatique en eau (P-ETP) de mai à septembre inclus (durée fixe) est passé sous le seuil de - 320 mm (intensité). Les chênes subissent alors un stress important qui impacte en réalité « tous » les arbres. Ce stress provoque souvent une chute de croissance (*figure 1 p. 28*) l'année de cette sécheresse et perdure très souvent les années suivantes. La première

© J. Lemaire



### Développement des bourgeons latents

Cette photo représente une coupe transversale d'une branche de chênes prélevée. On y voit les très nombreux bourgeons épïcormiques qui se sont développés à partir des bourgeons latents. Suite à un stress, ces bourgeons latents, en se développant en gourmands, permettent au chêne de recomposer son houppier s'il possède des capacités de réaction suffisantes.

© G. de Kerville



© F. Radigue

### Exemple de résilience chez le chêne pédonculé

Il s'agit du même chêne pris en photo en 1895 et en 1981 soit 86 ans après. Suite à un stress, le chêne pédonculé prend un aspect moribond (photo de gauche). Lorsque les conditions deviennent à nouveau favorables à sa croissance, il reconstruit un houppier fonctionnel grâce à l'émission de nombreux gourmands vigoureux (photo de droite).

étape du diagnostic consiste à identifier ce seuil climatique de P-ETP pouvant déclencher le dépérissement d'une essence. L'analyse de la récurrence des sécheresses est tout aussi importante. Un arbre, ayant subi un stress climatique marqué, sera à même de réagir si les conditions climatiques redeviennent favorables (augmentation de la pluviométrie principalement), et s'il a des capacités à réagir (figure 1 B). Cette capacité de réaction, après un à-coup climatique, est nommée résilience. La résilience des chênes est en réalité très élevée.

En effet, lorsqu'un chêne subit une sécheresse, il s'adapte aux nouvelles conditions environnementales en mettant en place des mécanismes de régulation. Il régule sa transpiration en fermant les stomates des feuilles. Ensuite, si les conditions continuent à être très défavorables, il limite la transpiration en sacrifiant des feuilles, des rameaux voire des branches de diamètres plus ou moins importants. Le stress passé, l'arbre peut alors avoir un aspect moribond (voir encadré ci-dessus).

Les saisons de végétation se succédant mais ne se ressemblant pas, le chêne peut reconstruire un houppier fonctionnel si les conditions climatiques redeviennent favorables. Cette reconstruction est rendue possible à partir de la très grande réserve de bourgeons latents (nommés bourgeons épïcormiques, voir photo) qui couvrent le tronc et les branches des chênes (figure 1 B). L'arbre résilient reconstruit ainsi un houppier fonctionnel à partir de ces bourgeons latents en émettant de vigou-

reux gourmands. L'arbre recouvre peu à peu sa vigueur et un aspect sanitaire favorable (figure 1 C). Le diagnostic de ces arbres résilients est indispensable. Il est rendu possible grâce à la méthode ARCHII. Un dépérissement est rarement un processus irréversible.

## Le savez-vous ?

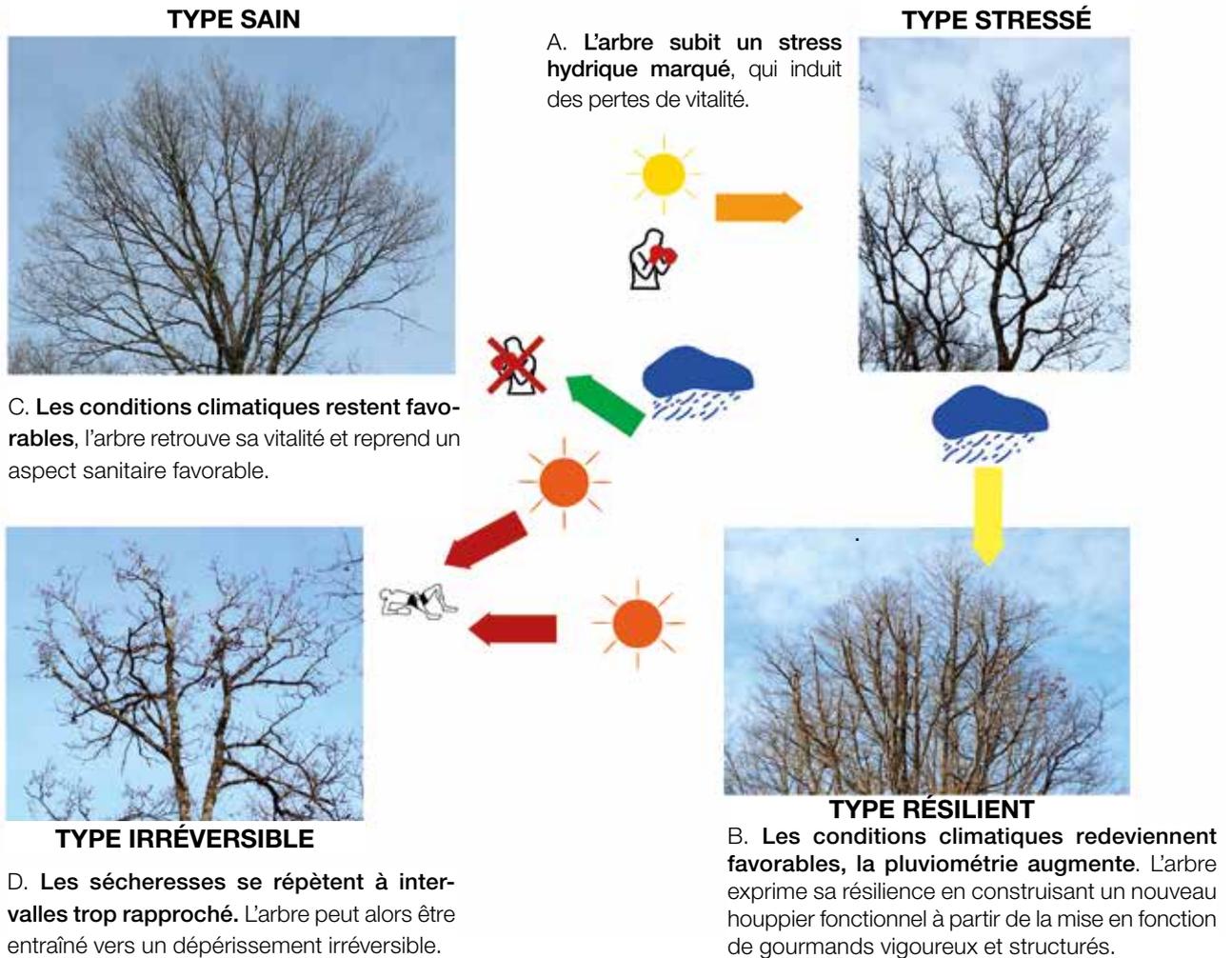
**Qui dit gourmands du chêne dit arbre de mauvaise qualité dans l'esprit du forestier. Pourtant le gourmand est une partie du végétal qui permet à l'arbre de réagir face à un stress et tout particulièrement chez le chêne. Le forestier ne doit donc pas forcément supprimer tous les arbres présentant une descente de cime. Arbres qui sont souvent pour lui synonyme, et à tort, de perte de qualité et d'arbre dépérissant. Par contre dans un contexte de climat changeant, où les stress risquent de se multiplier, il convient de gérer et de maintenir un gainage suffisant au pied des arbres pour éviter la prolifération et l'allongement de la durée de vie des gourmands et autres épïcormiques<sup>1</sup>.**

**Plus que jamais l'adage pour produire un chêne de qualité : « la grume à l'ombre et le houppier au soleil » porte bien son nom.**

1) Lemaire J., 2010.

## Figure 1 - La théorie du boxeur et la résilience des chênes

Les niveaux de résilience des chênes sont déterminés à partir de la clé de détermination ARCHI.



Il importe après un stress marqué de ne pas réagir trop rapidement en éclaircissant des arbres en apparence moribonds. Il faut en effet laisser le temps aux arbres d'exprimer leur résilience, en particulier pour les chênes. Ce processus de récupération peut prendre plusieurs années.

Imaginons maintenant, que les sécheresses se succèdent à un intervalle proche. L'arbre stressé subit des à-coups à répétition ; à tel point qu'il n'est plus en mesure d'émettre de gourmands structurés. Il ne reconstruit plus alors un houppier fonctionnel. Il est alors entraîné vers un déclin irréversible (figure 1 D).

La théorie du boxeur traduit de façon imagée cette évolution : à force de recevoir des coups, il s'affaiblit : un dernier crochet peut le mettre KO. C'est le même concept chez l'arbre, des à-coups climatiques répétés l'affaiblit et un événement supplémentaire, même bénin aux yeux du forestier, peut l'entraîner vers un dépérissement irréversible.

Il est possible qu'à force de sécheresses répétées, l'arbre finisse par mourir de faim en carbone (manque de réserves glucidiques) plu-

tôt que de soif. En effet, en fermant ses stomates, l'arbre régule fortement sa transpiration et limite les pertes en eau. En même temps, il diminue également ses capacités d'absorption de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et par conséquent, ses réserves en sucre. Le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) est en effet transformé en sucre (sève organique) grâce à la photosynthèse. Sève qui sert de réserves glucidiques pour l'arbre et donc d'énergie.

L'arbre, suite aux sécheresses à répétition, ferait ainsi de moins en moins de réserves glucidiques. Cette hypothèse est étayée par différents travaux de recherche, mais elle ne fait pas encore l'objet d'un consensus dans la communauté scientifique<sup>1)</sup>.

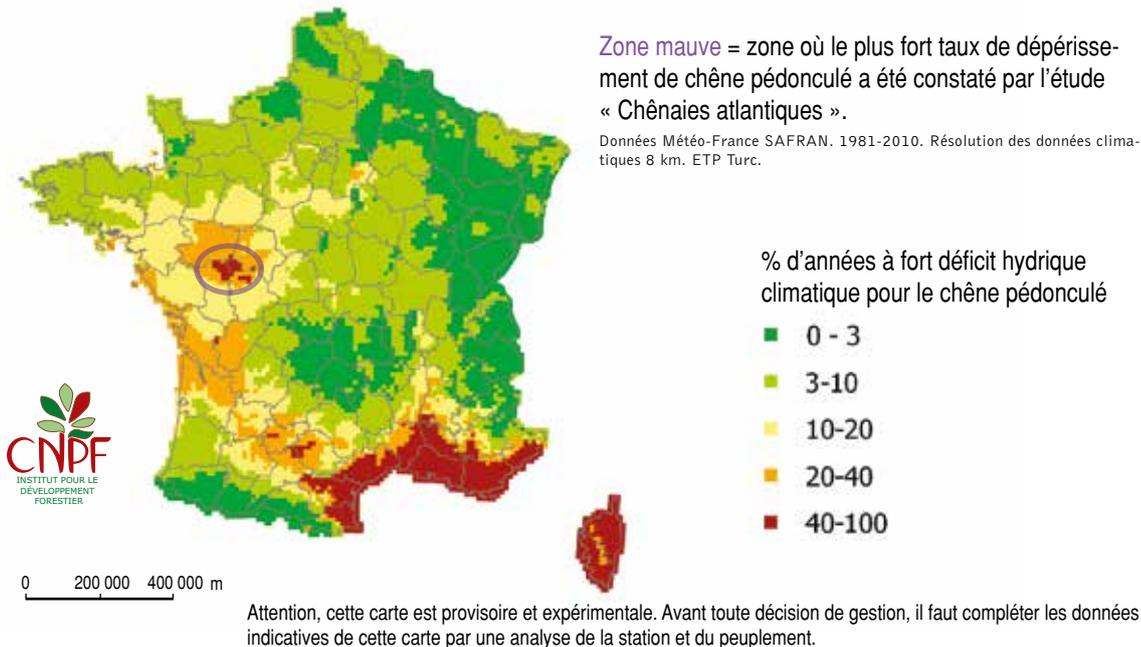
### Répétition des déficits hydriques climatiques, le seuil supporté par le chêne pédonculé

À partir des données Météo-France SAFRAN (spatialisée à l'échelle du 8 km), la récurrence

1) Cailleret M., Sevanto *et al.*, 2013 ; Adams *et al.*, 2013 ; Sala *et al.*, 2010 ; McDowell *et al.*, 2008.

Dans un contexte de climat changeant, un diagnostic climatique s'impose comme une évidence. Ce diagnostic doit tenir compte du climat moyen (normale climatique sur trente ans : températures, précipitations, déficit hydrique climatique). Il doit aussi relever la récurrence des années sèches. La répétition d'extrêmes climatiques peut affaiblir l'arbre et l'entraîner vers un déclin irréversible, c'est la théorie du boxeur. Enfin, le croisement du niveau de vigilance climatique avec le bilan en eau (relevé de terrain indispensable) détermine si l'essence est dans une station favorable ou non.

Figure 2 - Carte de fréquence (1981 – 2010) d'années à déficit hydrique climatique marqué (P-ETP de mai à septembre inférieur à - 320 mm) pour le chêne pédonculé.



des années pour lesquelles le déficit hydrique climatique (P-ETP de mai à septembre) est passé sous le seuil de - 320 mm est ainsi totalisée et exprimée en % sur la période de 1981 à 2010 (figure 2). Une fréquence de 25 % signifie qu'en moyenne une année sur quatre présente un P-ETP de mai à juin inférieur à - 320 mm. Le vert foncé représente les secteurs où aucun déficit hydrique climatique n'est comptabilisé depuis 1981 pour le chêne pédonculé. Le secteur vert clair présente trois sécheresses climatiques marquées (probabilité 3 à 10 %) entre 1981 et 2010.

- > Les secteurs en jaune clair ont connu 4 à 6 sécheresses climatiques marquées (probabilité 10 à 20 %) durant cette période.
  - > La couleur orange correspond aux régions climatiques pour lesquelles 7 à 12 sécheresses climatiques ont été comptabilisées (probabilité 20 à 40 %).
  - > Les secteurs bruns sont les zones où plus de 12 sécheresses ont été enregistrées (probabilité supérieure à 40 %).
- Le secteur du nord de la Vienne (Nord de

Poitiers), à cheval sur les départements des Deux-Sèvres, du Maine-et-Loire et de l'Indre-et-Loire (zone entourée en mauve sur la figure 2) ressort nettement de la carte. Dans ce secteur, la probabilité de sécheresse climatique subie par le chêne pédonculé est environ de 50 %. Une année sur 2, les peuplements de chêne pédonculé y subissent des déficits hydriques climatiques marqués. Cette zone climatique cible la région où le plus fort taux de dépérissement de chêne pédonculé est constaté durant l'étude Chênaies atlantiques (article précédent).

Le seuil critique de récurrence des années à fort déficit hydrique climatique (P-ETP0509 < - 320 mm) supporté par le chêne pédonculé est recherché à partir des placettes mesurées lors du projet « Chênaies atlantiques » (figure 7 de l'article sur les seuils de déficit hydrique pour les chênes). Les placettes bénéficiant d'effets compensateurs ou aggravants liés à la topographie sont logiquement éliminées de l'analyse.

Les massifs et les placettes de chêne pédonculé à tendance dépérisante se situent

## Le savez-vous ?

Un climat moyen, défini par les normales climatiques trentenaires (= moyenne sur trente ans), ne permet pas de connaître les extrêmes climatiques.

### Comparaison du climat de 2 villes proches

Alors que Tours et Poitiers sont deux villes assez proches géographiquement, elles présentent des climats assez similaires si on se réfère à des paramètres classiquement utilisés en gestion forestière :

- température annuelle moyenne 1981-2010 : de 11,5 °C à Poitiers à 11,7 °C à Tours,
- précipitations annuelles : de 623 mm à Poitiers, 656 mm à Tours.

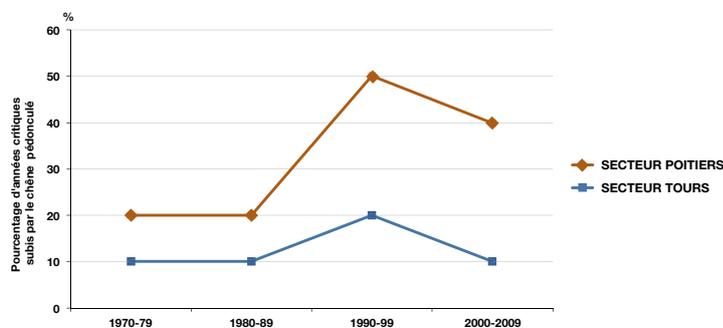
Si on regarde la récurrence d'années à fort déficit hydrique climatique subie par le chêne pédonculé, il n'en est pas de même (*figure 3*). Entre 1970 et 1990, 10 % des années présentent un fort déficit hydrique climatique pour le chêne pédonculé sur le secteur de Tours pour 20 % sur le secteur de Poitiers. Durant les années 90, une année sur deux étaient déficitaires pour le chêne pédonculé sur le nord de la Vienne (Poitiers) contre 20 % à Tours. Le nombre d'années déficitaires est encore élevé entre 2000 et 2009 sur le secteur de Poitiers. 40 % des années ont affiché un P-ETP de mai à septembre inférieur à - 320 mm entre 2001 et 2010.

À Tours, le nombre d'années à fort déficit hydrique climatique pour le chêne pédonculé est de nouveau de 10 % depuis 2000, soit un taux similaire à la décennie 1980-1989.

Poitiers se situe au niveau de vigilance climatique maximale puisque la probabilité de répétition des années sèches est supérieure à 40 %. Le niveau de vigilance climatique à Tours est par contre modéré, puisque moins d'une année sur quatre présente un fort déficit hydrique climatique pour le chêne pédonculé (probabilité de récurrence inférieure à 25 %) voir *tableau 1 page 37*.

Il importe donc d'être doté d'outils performants pour cartographier cette récurrence d'épisodes de sécheresse climatique.

Figure 3 - Évolution du % d'années critiques (en termes de déficit hydrique climatique P-ETP de mai à sept < - 320 mm) par décennie subi par le chêne pédonculé sur les secteurs de Tours et de Poitiers.



dans les zones climatiques où la récurrence des années à fort déficit hydrique climatique dépasse en moyenne 25 % (*figure 4*) ; soit les secteurs climatiques où plus d'une année sur 4 à fort déficit hydrique climatique sont enregistrés.

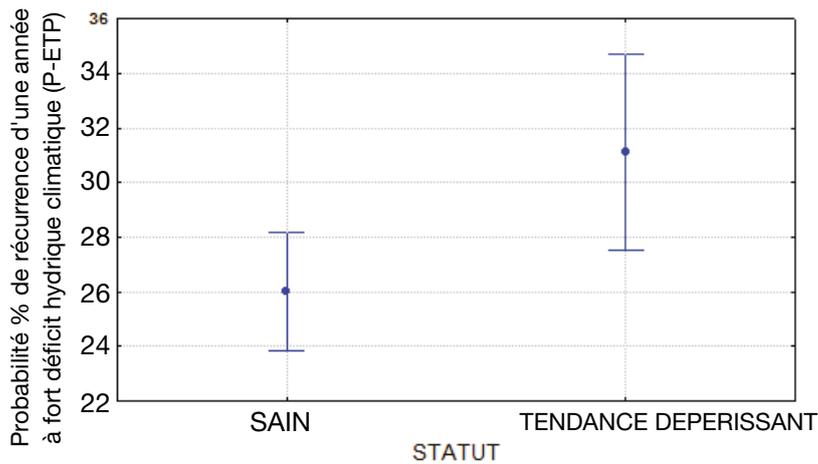
### Construction des cartes de vigilance climatique pour le chêne pédonculé

L'accès aux données météorologiques permet de cartographier à une échelle fine, les

facteurs climatiques, et en particulier la probabilité de répétition des épisodes de forts déficits hydriques. Ce critère est employé pour tracer les cartes de vigilance climatique. Les niveaux de vigilance climatiques sont définis en fonction des seuils de récurrence des sécheresses climatiques (*voir tableau 1 page 37*). **Les cartes ainsi tracées sont probabilistes et ne sont en aucun cas des cartes de dépérissements à proprement parler.** L'article suivant est entièrement dédié aux cartes de vigilance, nous y renvoyons le lecteur (*pages 34 à 39*).

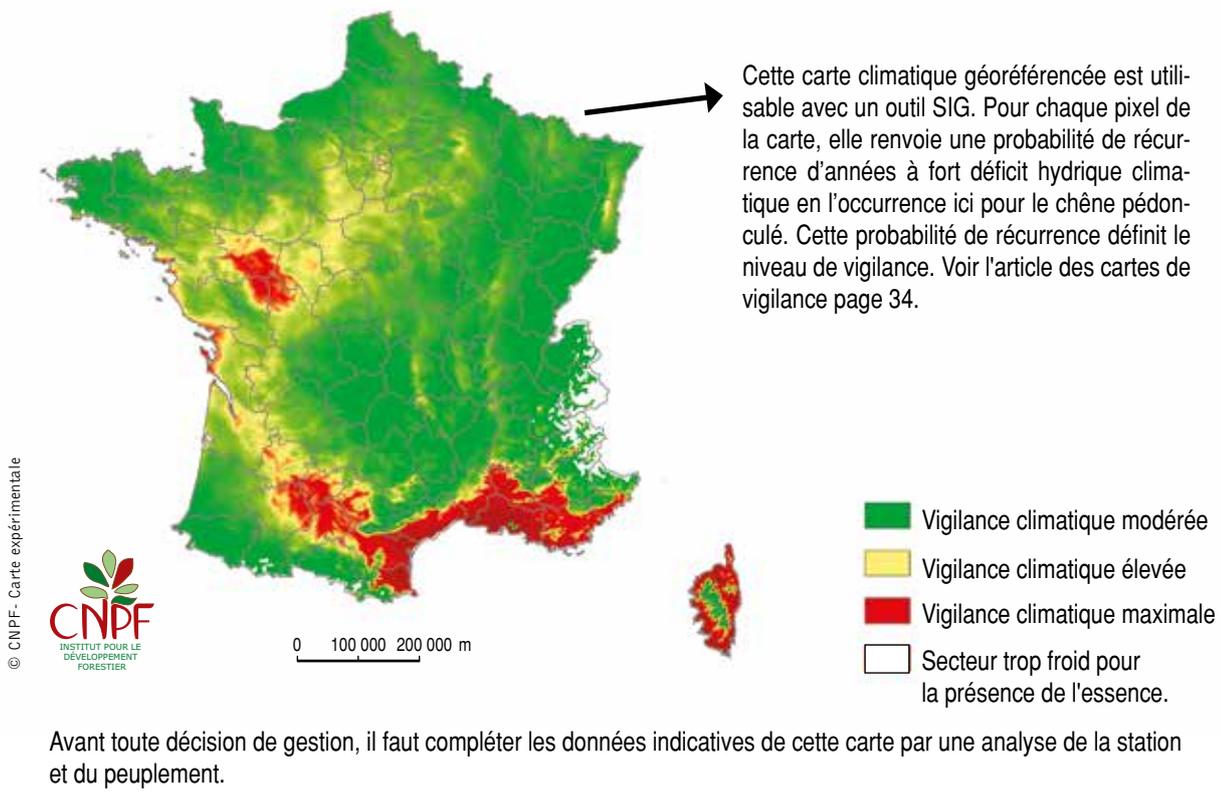
Figure 4 – Comparaison de la probabilité de récurrence des années à fort déficit hydrique climatique des peuplements de chêne pédonculé sain et à tendance dépérissante observée lors de l'étude « Chênaies atlantiques ».

(P = 0,016 test significatif. Barre verticale = intervalle de confiance p=0,95)



© CNPF

Figure 5 - Carte de vigilance climatique du chêne pédonculé établie à partir de la fréquence des années à fort déficit hydrique climatique (P-ETP 0509 < - 320 mm - 1981-2010)



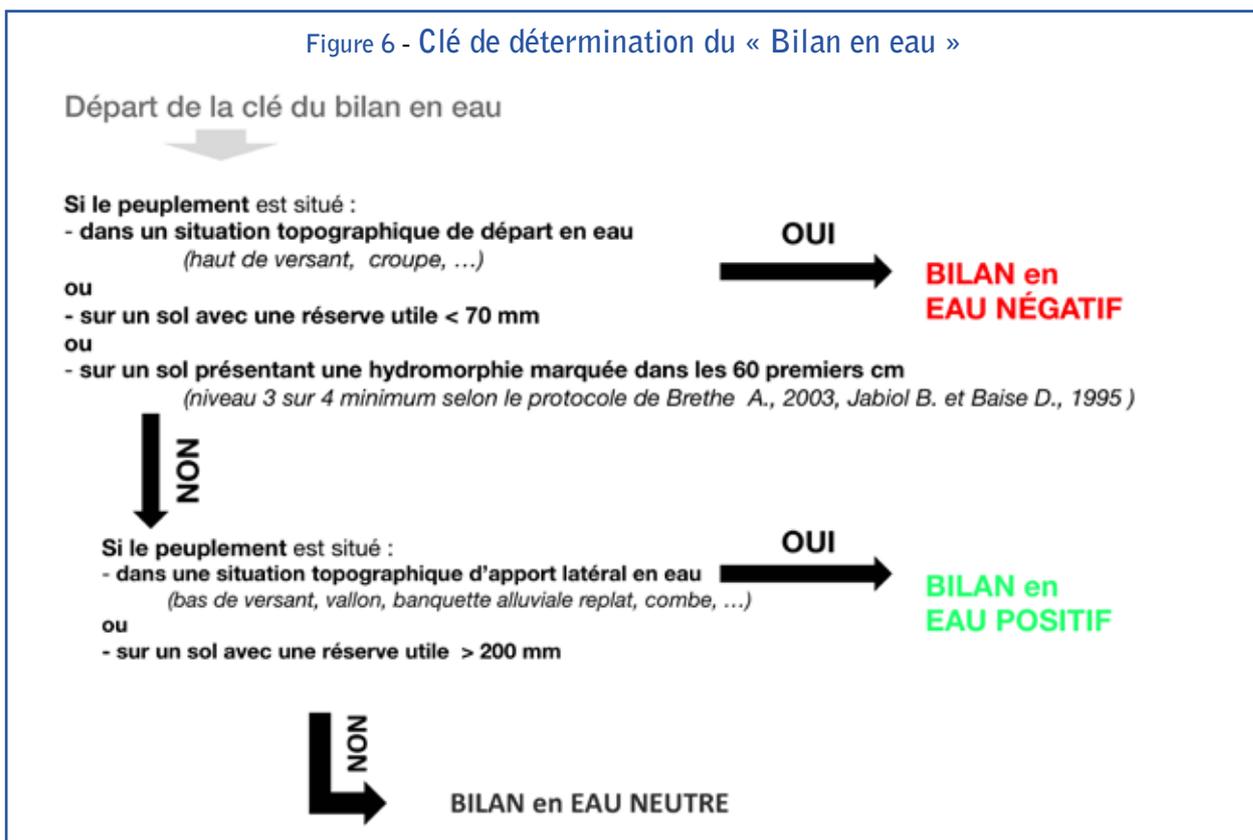
### Intégration des facteurs compensateurs ou aggravants

À partir du programme « Chênaies atlantiques », une clé de détermination est validée (figure 6) pour évaluer le bilan en eau d'une parcelle.

Au final, le croisement du bilan en eau et la carte de vigilance climatique précisent si l'essence est en station ou non (figure 7).

Les cartes de vigilance climatique, comme leur nom l'indique, sont climatiques. Or, lorsqu'un peuplement est soumis à un événement climatique extrême de type sécheresse, les effets compensateurs ou aggravants jouent un rôle important pour limiter ou amplifier la sécheresse.

Figure 6 - Clé de détermination du « Bilan en eau »



1) voir l'article des notions de référence page 12.

La figure 8 présente le résultat du test de cette clé de l'adéquation stationnelle du chêne pédonculé avec le taux de placettes dépérissantes (pour rappel un peuplement est jugé dépérissant si plus de 20 % des tiges inventoriées sont classées en note 3 ou plus selon le protocole DEPEFEU<sup>1)</sup>). Ce test est effectué sur les 84 placettes à dominance de chêne

pédonculé relevées en 2009 lors de l'étude « Chênaies atlantiques ». Dans les stations favorables au chêne pédonculé, 16 % des placettes sont dépérissantes. 27 % sont dépérissantes dans les stations moins favorables contre 50 % dans les stations défavorables.

Il importe donc toujours de croiser le niveau de vigilance climatique avec cette notion de bilan en eau pour définir si l'essence est dans une station qui lui est favorable ou non.

Figure 7 - Clé de détermination de l'adéquation stationnelle pour une essence (croisement de la vigilance climatique avec le bilan en eau)

Zones de vigilance climatique	Bilan en eau		
	négatif	neutre	positif
maximale	■	■	■
élevée	■	■	■
modérée	■	■	■

■ Station défavorable à l'essence  
 ■ Station moins favorable à l'essence  
 ■ Station favorable à l'essence

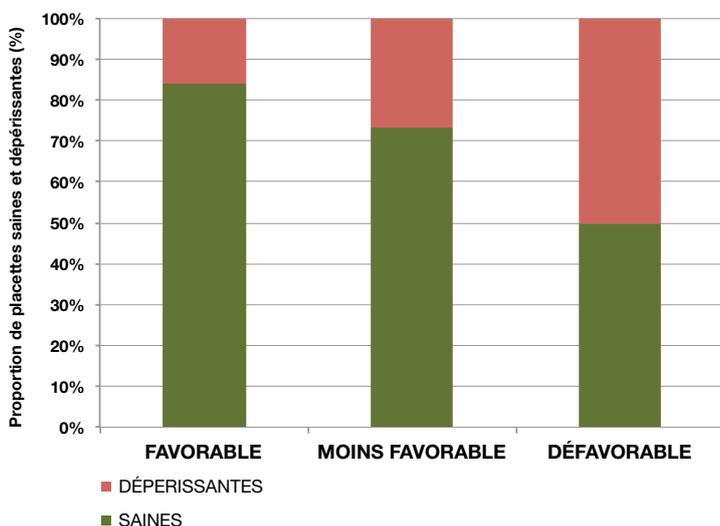
### Discussion et perspectives

L'impact des sécheresses récurrentes sur les pertes de vitalité est bien connu. Cette notion de récurrence est conceptualisée par la théorie du boxeur. Les cartes de vigilance climatiques sont construites sur ce concept à partir de la récurrence des années à fort déficit hydrique spécifique à chaque essence.

C'est cette probabilité de récurrence qui sert de baromètre et d'évaluation d'un risque potentiel lié au changement climatique. Le modèle climatique, qui permet la construction de

Figure 8 – Proportion de placettes saines ou déperissantes en fonction du type de station plus ou moins favorable définie par la clé de détermination de la figure 7.

La proportion de placettes déperissantes augmente de 16 % à 50 % suivant le type de station favorable ou défavorable.



Vrai ou faux ?

ces cartes, est en constante amélioration. Par exemple, il n'intègre pas encore l'effet cumulatif de deux ou trois années de sécheresse, qui se répètent consécutivement et dont l'impact est probablement beaucoup plus marqué sur la vitalité des arbres.

Toutefois, ce modèle permet déjà de prendre en compte les incertitudes liées au changement du climat en précisant et spatialisant le niveau de vigilance climatique. Connaissant les limites climatiques spécifiques à chaque essence, il est possible d'estimer ce niveau de vigilance aujourd'hui et probablement demain en fonction des évolutions climatiques envisagées. ■

**La résilience (capacité de réaction suite à un stress) des chênes est très élevée ?**

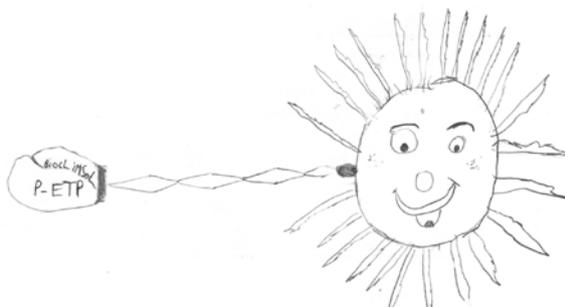
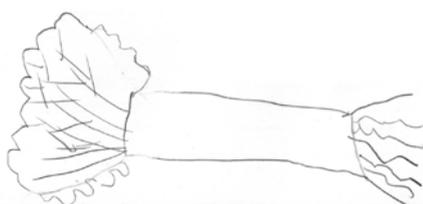
**Vrai.** Les chênes blancs (pédonculé, sessile, tauzin ou pubescent) sont des essences résilientes par excellence. Ils ont un potentiel de réaction très élevé suite à un stress. Ils sont en effet capables de reconstruire un houppier fonctionnel assez rapidement grâce à la mise en place de gourmands structurés, à partir des nombreux bourgeons latents qui couvrent leur houppier ou parfois leur tronc. À l'inverse, le sapin et le douglas sont des espèces moins résilientes. Ainsi dans le Tarn, 10 ans après la canicule de 2003, environ 40 % des douglas sont encore dans un état de stress<sup>1</sup>.

**La résilience entre les arbres de la même espèce est différente ?**

**Vrai.** Au sein d'un peuplement touché par un dépérissement, il est remarquable de constater la présence de sujets résilients et d'arbres incapables de réagir (type ARCHI irréversible). C'est un point important ; avec une formation à cette nouvelle méthode de diagnostic, on peut apprendre aux gestionnaires à sélectionner des sujets plus résilients face au changement climatique<sup>2</sup>.

1) voir l'article l'impact de l'année 2003 sur les douglas page 48.  
2) Drénou C., 2011.

© Dessin de G. Lemaire Pulia



# Cartes de vigilance climatique : concept, usage, communication

par Jean Lemaire CNPF-IDF, Arnaud Guyon CNPF-CRPF Poitou-Charentes, Christian Weben CNPF-CRPF Pays de la Loire

*La mobilisation des CRPF de l'Ouest pour comprendre les dépérissements observés a permis de mieux cerner la sensibilité du chêne pédonculé aux aléas climatiques. Des cartes de vigilance climatique sont tracées, elles sensibilisent les forestiers et les accompagnent dans leurs décisions de gestion.*

prudence quant à un usage inapproprié par rapport à leur objectif initial. Cet article explique la naissance de ce concept de vigilance climatique. Il précise l'objectif de ces cartes et leur mode d'emploi.

## Comment est né le concept des cartes de vigilance climatique ?

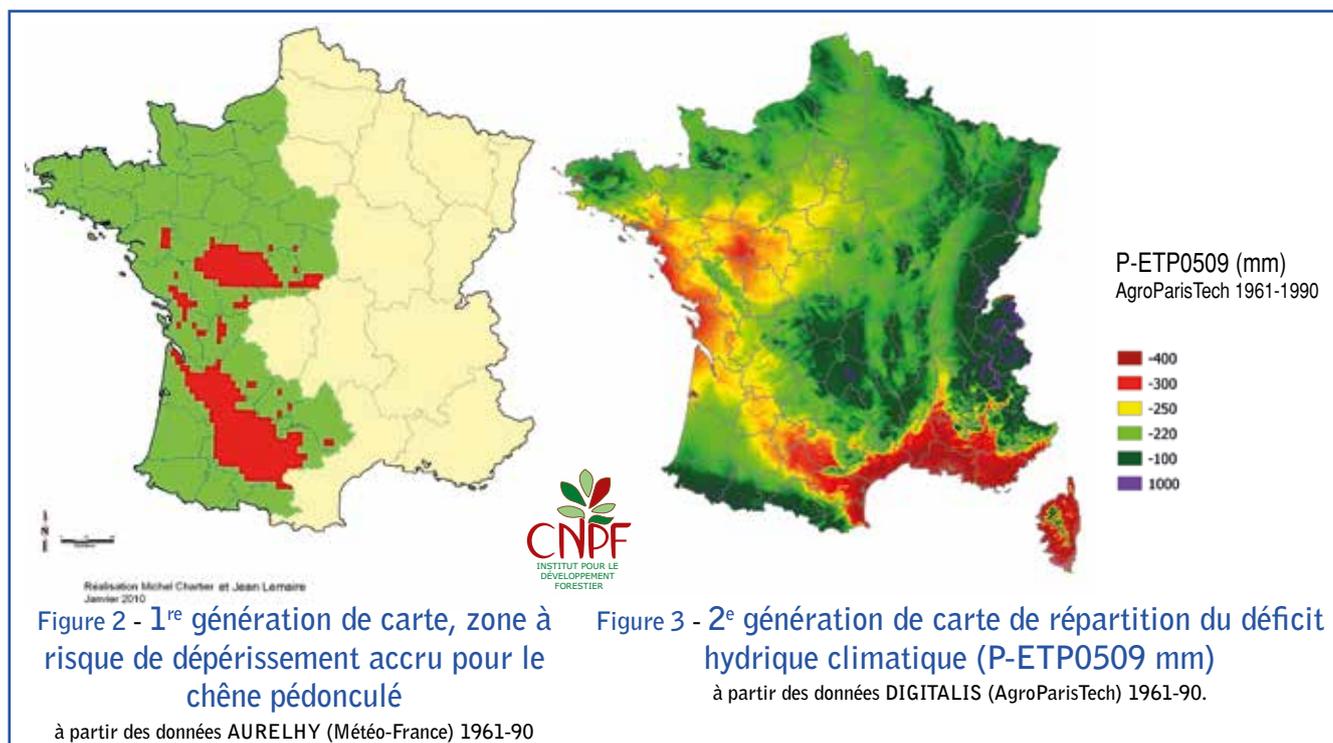
La prise de conscience du changement du climat par le monde forestier s'est réellement concrétisée en 2003. Cette évolution, parfois rapide et abrupte du climat, a renforcé la nécessité de vigilance par rapport aux à-coups climatiques. Cet impératif est conceptualisé par des cartes de vigilance climatique. Cependant, qui dit cartes, dit aussi

Ce concept est né du projet « Chênaies atlantiques face aux changements climatiques globaux ». En 2008, au lancement du programme, la prise de conscience des effets du changement climatique en forêt est déjà une réalité mise en évidence par l'année 2003, mais aussi la succession de sécheresses qui a marqué la

Figure 1 - Le projet interrégional « Chênaies atlantiques » (2008-2013)

Pour consulter les résultats de l'étude : <http://www.foretriveefrancaise.com/la-sylviculture-du-chene-774451.html>





décennie 2001-2010. Cependant, les gestionnaires et techniciens n'ont pas encore intégré la nécessité de réaliser un bilan climatique pour comprendre les mécanismes de perte de vitalité observés.

Très rapidement, les premières analyses des relevés effectuées en Pays de la Loire et en Poitou-Charentes (2009-2010) montrent la nécessité d'intégrer les données climatiques pour comprendre et cartographier le dépérissement des chênaies. Avec l'appui de l'Inra, une première carte de sensibilité climatique du chêne pédonculé est tracée (figure 2). Elle s'appuie sur les données AURELHY de Météo-France. Les études réalisées dans le Sud-Ouest, en particulier en Midi-Pyrénées (2010-2011), démontrent la nécessité de prendre en compte des effets de versant (exposition) pour comprendre la répartition des chênes blancs (chênes pédonculé, sessile et pubescent) et mieux analyser les phénomènes de dépérissement. Cette prise en compte des effets de versant est rendue possible grâce aux nouveaux modèles climatiques de la base DIGITALIS, développés par AgroParisTech<sup>1)</sup>, au pas de 50 m. La deuxième génération de carte est dressée (figure 3).

En 2010-2011, les recherches réalisées montrent que la répétition des années à fort déficit hydrique climatique peut entraîner des dépérissements. C'est la naissance de la théorie du boxeur. Dans les régions où ces à-coups climatiques se répètent une année sur quatre, les peuplements sont fragilisés, stressés par le

climat. En moyenne 20 à 35 % des chênaies pédonculées sont classées dépérissantes. Dans ces peuplements dépérissants, les arbres réagissent différemment aux stress. Certains chênes expriment leur capacité de réaction en construisant un nouveau houppier structuré, dès que les conditions du milieu (en particulier le climat) redeviennent favorables. On parle alors de chênes résilients. D'autres chênes, ayant pourtant bénéficié de la même sylviculture, situés sur une station identique, ne montrent aucune capacité de réaction. Ces chênes non résilients sont classés de type irréversibles, incapables de surmonter le stress subi.

Il apparaît qu'on ne peut pas parler de carte de risque (première dénomination proposée) au sens de la définition scientifique puisque le seuil de vulnérabilité varie fortement d'un arbre à l'autre, ni de carte de dépérissement en tant que tel (*voir encadré Le savez-vous ?*). Un dépérissement est une perte de vitalité durable d'un arbre ou d'un peuplement. Ce dépérissement est souvent lié à une conjonction de phénomènes (sécheresses, attaques d'insectes nuisibles et autres maladies, sylviculture, sol...) qui interagissent, rendant souvent irréaliste la recherche d'une cause unique. À partir de ces bases fondamentales, le concept de carte de vigilance est né. La carte de vigilance climatique vise à prédire la probabilité de récurrence d'années à fort déficit hydrique climatique qui peuvent impacter la vitalité et la croissance des arbres. **Ce seuil de déficit hydrique climatique, défini par sa durée, son intensité et sa fréquence est spécifique à chaque essence.**

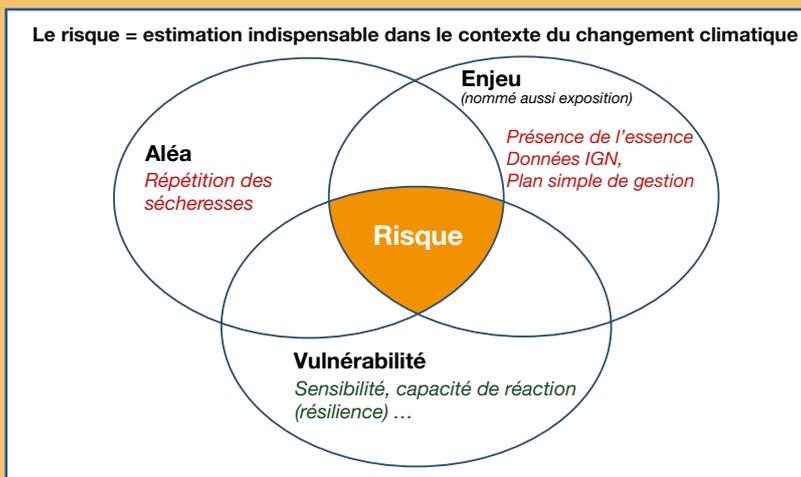
1) <http://silvae.agroparistech.fr/>

## Le savez-vous ?

1) Source Ademe.  
<http://www.pcet-ademe.fr/content/risques-climatiques-et-impacts>

Un risque climatique est défini par l'interaction de trois composantes :

- 1) l'aléa climatique, dans notre cas la répétition de déficit hydrique marqué pouvant provoquer une perte de vitalité significative d'un arbre, d'un peuplement ;
- 2) l'enjeu (on parle aussi d'exposition) d'une forêt ou d'un peuplement à cet aléa ;
- 3) la vulnérabilité d'un arbre d'un peuplement, d'une essence à cet aléa climatique. Le risque équivaut donc à la rencontre de l'aléa climatique, de l'exposition et de la vulnérabilité<sup>1)</sup>.



Pour comprendre ce concept, prenons l'exemple suivant :

15 janvier 2014, Météo-France annonce une alerte rouge à la neige en Limousin. L'aléa climatique, c'est la tempête de neige qui augmente le risque d'accident. Si je me déplace en Limousin, je suis averti que le risque devient plus important, puisque je m'expose à une tempête de neige. Lors de ce déplacement, si j'équipe mon véhicule de pneus neige, je suis moins vulnérable, car ma voiture est équipée. Le risque d'accident est grandement diminué.

En forêt, l'aléa climatique peut être la répétition d'une sécheresse, un gel tardif ou précoce, une tempête ... Les cartes de vigilance climatique cartographient la probabilité de répétition des années à fort déficit hydrique climatique pour une essence. L'exposition ou l'enjeu est le fait que l'espèce soit ou non soumise à cet aléa. Par exemple, le chêne pédonculé est absent de la région PACA, où la répétition des années à fort déficit hydrique climatique est très marquée pour cette essence. Mais comme le chêne pédonculé n'est pas présent, le risque est nul. Enfin, dans un même peuplement, la vulnérabilité des arbres s'exprime en fonction de leur capacité à réagir ou non suite à un stress. La vulnérabilité des arbres varie en fonction de la sylviculture menée, de l'historique du peuplement, mais aussi de leur capacité intrinsèque à réagir liée à leur potentiel génétique. Les cartes de vigilance ne sont donc pas des cartes de risques au sens scientifique du terme car elles ne prennent pas en compte cette vulnérabilité. Elles sont là pour éveiller la vigilance du gestionnaire sur les risques potentiels de perte de vitalité à mettre en lien avec la station et la sylviculture pratiquée. La combinaison des cartes de vigilance climatique couplée à l'estimation de la capacité de réaction des arbres à l'aide de la méthode ARCHI permettent d'appréhender le risque.

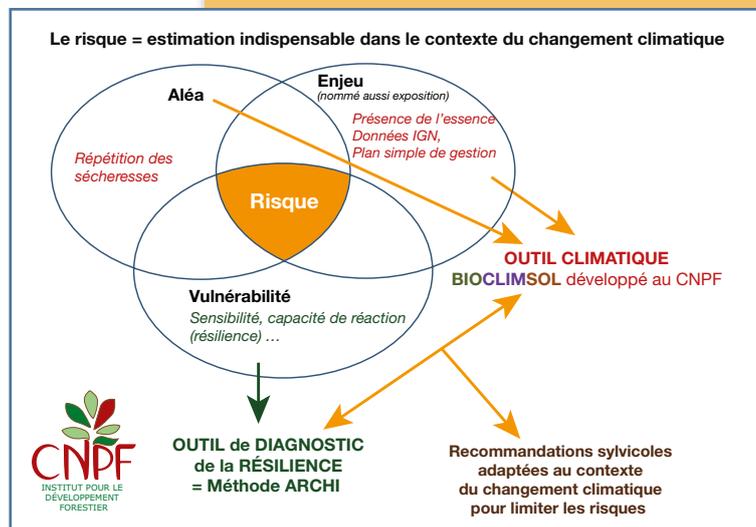
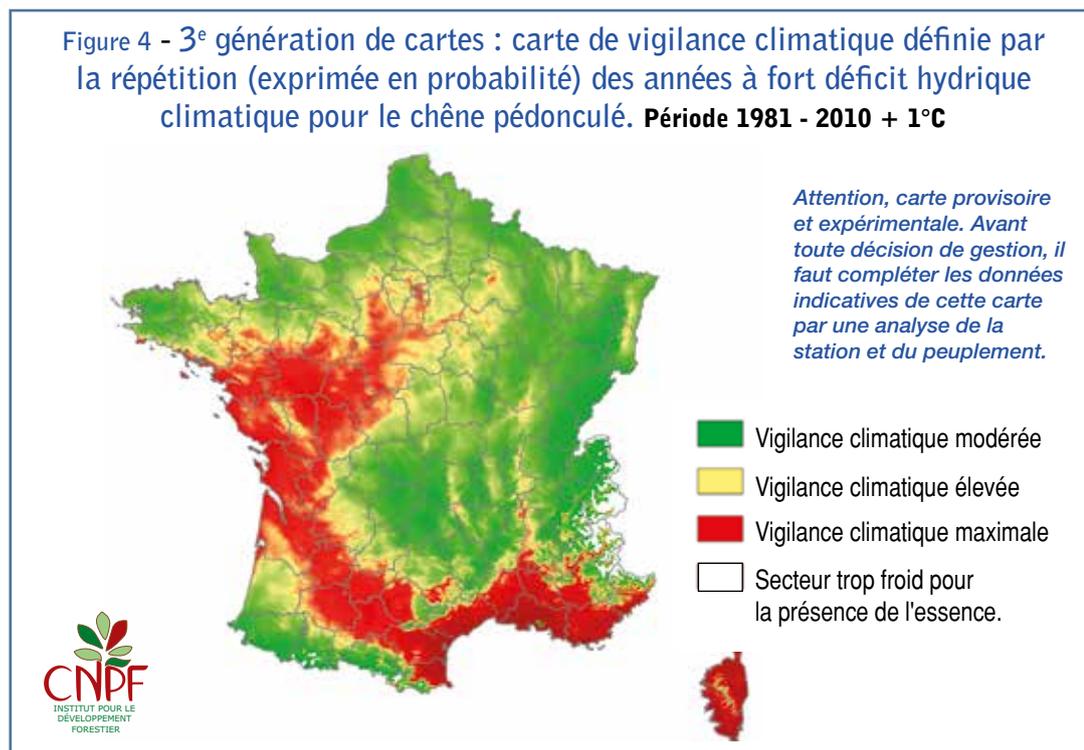


Tableau 1 - Définition des seuils de vigilance climatique en fonction de la récurrence des années critiques en termes de déficit hydrique climatique (P-ETP)

Niveaux de vigilance	Probabilité (%) de récurrence des années critiques en termes de déficit climatique en eau (P-ETP)	
	Sapin pectiné et douglas	Chênes blancs
Modérée	< 15 %	< 25 %
Élevée	15 à 33 %	25 à 40 %
Maximale	> 33 %	> 40 %

Exemple : d'après les résultats du projet « Chênaies atlantiques », le chêne pédonculé se situe en zone de vigilance élevée lorsqu'une année sur quatre (fréquence de répétition = 25 %), le P-ETP de mai à septembre inclus passe sous le seuil de - 320 mm.



### Pour rappel : 1981 – 2010 + 1 °C, c'est quoi ?

Les cartes de vigilance climatique proposées dans ce numéro de Forêt-entreprise n'intègrent pas en tant que tels les scénarii climatiques du GIEC et les modèles climatiques associés.

Les cartes sont basées sur les données climatiques trentenaires 1981-2010, auquel 1 °C est ajouté sur la température moyenne, en partant de l'hypothèse que les pluviométries restent constantes<sup>1)</sup>.

1) Voir les articles des données climatiques pages 9 et 16.

La probabilité de récurrence des sécheresses tolérées par les chênes blancs seraient de 20 à 25 % (soit une année sur quatre à une année sur cinq avec un épisode de déficit hydrique climatique marqué) et de 10 à 20 % pour le

sapin et le douglas vert (Tableau 1).

Il convient de confirmer ces seuils, par d'autres études, pour valider cette différence de résilience entre essences.

La carte de vigilance climatique (figure 4), troisième génération de carte, délimite trois secteurs climatiques en fonction de la probabilité de récurrence des années à très fort risque de déficit hydrique climatique.

### Une carte de vigilance n'est pas une carte de dépérissement

Il est important de comprendre que ce n'est pas parce qu'un peuplement se situe en zone de vigilance maximale, qu'il a 100 % de chances de dépérir. Et ce n'est pas parce qu'un peuplement se situe en zone de vigilance modérée, qu'il n'a aucune chance de dépérir. La carte de vigilance est définie par

1) Riou-Nivert  
P. & Rosa J., 2014.

une probabilité de récurrence des années à fort déficit hydrique climatique. Elle ne détermine pas la présence ou non d'un dépérissement. Par contre, un peuplement situé en zone de vigilance maximale a plus de chances de montrer des signes de perte de vitalité, surtout s'il n'est pas sur une station compensant le déficit hydrique du climat ou bien s'il est géré de façon inadaptée, par exemple un peuplement âgé en retard d'éclaircie.

La carte de vigilance invite donc le technicien à renforcer son diagnostic de terrain en incluant des données climatiques. **Une carte de vigilance climatique ne doit jamais s'imposer au gestionnaire, mais elle est un outil d'aide à la décision pour le choix d'essences et d'itinéraires de gestion sylvicole.** Ces cartes doivent donc toujours être associées à un diagnostic détaillé de terrain. Elles ne peuvent pas être dissociées de la prise en compte des effets compensateurs liés à la station (sol, topographie, ...).

### Pistes de recommandations sylvicoles associées aux zones de vigilance climatique

L'outil BioClimSol est en développement. La confrontation des études en cours dans les régions permettra de proposer des recommandations sylvicoles. Elles seront déclinées en fonction des zones de vigilance climatique, du bilan en eau et du niveau de résilience du peuplement diagnostiqué. L'objectif est de valider

#### À retenir

Les cartes de vigilance climatique veulent attirer l'attention du gestionnaire sur les secteurs climatiques les plus sensibles aux répétitions des déficits hydriques climatiques. Ces cartes de vigilance climatiques (3<sup>e</sup> génération) ne peuvent être dissociées de la prise en compte, sur le terrain, des effets compensateurs ou aggravants liés à la station (sol, topographie, ...). C'est l'analyse complète, niveau de vigilance climatique + bilan en eau + niveau de résilience du peuplement, qui permet d'estimer le risque encouru et de proposer ainsi des recommandations sylvicoles pour le peuplement.

de grandes orientations de gestion qui favorisent la résilience des forêts dans un contexte de climat changeant. Il faut à tout prix éviter l'affolement et l'excès d'anticipation face au changement climatique pour éviter les échecs coûteux. Tout choix sylvicole doit être mûri et analysé en fonction des contraintes économiques, environnementales, des volontés du propriétaire et des incertitudes liées au changement climatique<sup>1)</sup>. Les cartes de vigilance sont un des outils permettant de répondre à cette dernière question. Le lecteur intéressé peut déjà se référer à l'article qui présente des exemples concrets de recommandations sylvicoles pour le douglas vert (voir p. 46).

### Cartes de vigilance climatique et niveau de résolution

Si un train peut en cacher un autre, un pixel rouge peut masquer un pixel vert, tout dépend de l'échelle à laquelle on affiche la carte de vigilance climatique et de sa résolution (1 km, 250 m ou 50 m). La reproduction comme telle (scan, photocopies, ...) des cartes publiées dans ce Forêt-entreprise pour prendre des décisions de gestion est vivement déconseillée. Cela peut engendrer des erreurs conséquentes pour deux raisons :

- la **résolution des cartes** présentées dans ce Forêt-entreprise est **trop faible**, il faut descendre au niveau de la parcelle pour analyser les facteurs du topo-climat et prendre une décision sylvicole. **Un système d'information géographique (SIG) est indispensable pour employer ces cartes.**
- le diagnostic climatique doit **toujours** être **accompagné d'un diagnostic de terrain** qui intègre, en plus du diagnostic climatique, la station (sol, topographie, ...) et le peuplement.

### Exemple d'un peuplement de chêne pédonculé

Prenons l'exemple de la carte vigilance climatique du chêne pédonculé établie pour la période 1981-2010 (figure 5). Affichée à une résolution de 1 km et à une petite échelle, on conclut que le peuplement identifié par le point noir est situé dans une zone de vigilance climatique maximale. En zoomant sur le point (figure 6), on s'aperçoit, à une échelle plus grande, avec une résolution au 50 m, que ce n'est pas le cas. Des nuances de jaune, de vert et de rouge liées à la topographie apparaissent. Ce peuplement, un mélange de chênes pédonculé et pubescent, est situé en bas de versant dans

une zone confinée plus favorable climatiquement. Il ne présente pas de signe de perte de vitalité, ce qui est reflété par le niveau de vigilance modéré de la carte au 50 m.

## Perspectives : un outil en perpétuelle évolution

La grande nouveauté des études forestières liées à l'autécologie ou au changement climatique est l'accès à des données climatiques de plus en plus précises en termes d'échelles spatiale ou temporelle. C'est une évolution majeure, car on est capable de mieux analyser les problématiques forestières liées au climat. Aujourd'hui, dans un contexte de climat changeant, il est nécessaire de réaliser un diagnostic climatique détaillé de sa forêt. Le développement d'outils de cartographie gratuits facilite le transfert et l'accès à ces bases de données climatiques. Mais cette émergence de nouveaux outils de diagnostic en est à son balbutiement. Comme tout outil récent, les outils numériques de diagnostic forestier vont évoluer et se perfectionner rapidement. Leur mise à jour régulière est facilitée par Internet. Mais attention, le bon usage de ces outils impose une formation préalable pour éviter des erreurs conséquentes de diagnostic. ■

### Vrai ou Faux ?

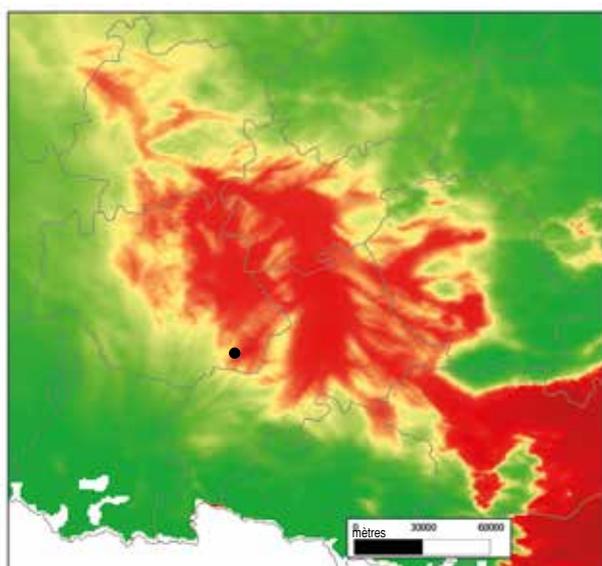
**Une carte de vigilance climatique est-elle une carte de dépérissement ?**

**Faux.** Une carte de vigilance prédit la récurrence des années avec un déficit hydrique climatique (P-ETP) critique pour une essence. La récurrence de sécheresse est cartographiée à partir des données climatiques à l'échelle de la France, elle est définie par une fréquence. Cette carte est uniquement climatique et n'est pas une carte des peuplements dépérissants.

**La carte de vigilance climatique à elle seule permet-elle de réaliser un diagnostic complet de son peuplement ?**

**Faux.** L'analyse climatique est la première étape du diagnostic. Elle doit être associée du diagnostic de la station et du peuplement sur le terrain.

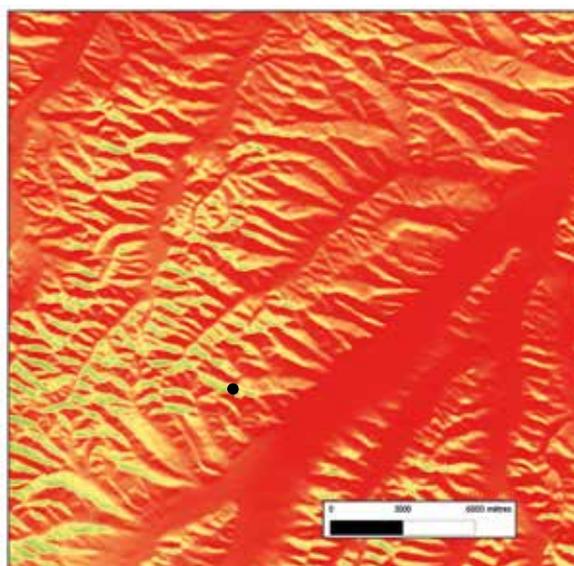
Attention, cartes provisoires et expérimentales. Avant toute décision de gestion, il faut compléter les données indicatives de cette carte par une analyse stationnelle et du peuplement.



**Figure 5 - Carte de vigilance climatique du chêne pédonculé 1981-2010.** Résolution des données climatiques 1 km.

Le point noir ● ciblé est encadré. Il s'agit d'un peuplement en mélange de chênes pédonculé et pubescent sans signe de perte de vitalité.

- Vigilance climatique modérée
- Vigilance climatique élevée
- Vigilance climatique maximale
- Secteur trop froid pour la présence de l'essence.



**Figure 6 - Carte de vigilance climatique du chêne pédonculé 1981-2010.** Résolution des données climatiques 50 m

Le point noir ● ciblé correspond au peuplement de la carte précédente sur lequel on a zoomé.

© CNPF - Carte expérimentale



# Exigences et cartes de vigilance climatique des chênes pédonculé, sessile et pubescent

par Jean Lemaire, CNPF-IDF

Les exigences climatiques des chênes pédonculé, sessile et pubescent sont précisées, elles permettent de tracer des cartes de vigilance climatique.

1) Grâce au soutien de l'État de la région Midi-Pyrénées et du FEDER.

2) Les autres chênes blancs, très rarement rencontrés, ne sont pas concernés par cet article.

Le déficit hydrique climatique (P-ETP) est le paramètre climatique principal d'un bilan hydrique. Il explique en partie la distribution des chênes au sud de leur aire. Dans un contexte de changement climatique, la résistance au stress hydrique n'est pas le seul critère à prendre en compte, les risques liés aux gelées sont tout aussi importants. Cet article précise les exigences climatiques des chênes pédonculé, sessile et pubescent. Les résultats de l'étude « Chênaies atlantiques » réalisée en Midi-Pyrénées<sup>1)</sup> permet de mieux les comprendre. Les cartes de vigilance climatique associées à ces trois espèces sont établies.

## Dépérissement et distribution des chênes en Midi-Pyrénées

En 2011, dans le cadre du programme « Chênaies atlantiques », 77 placettes sont installées dans des peuplements de « chênes blancs » (chêne pubescent, sessile et pédonculé<sup>2)</sup>) en Midi-Pyrénées.

L'objectif de l'étude était double :

- > comprendre et interpréter la répartition de ces trois espèces de chêne en lien avec les caractéristiques stationnelles ;
- > estimer et expliquer le niveau de dépérissement des chênaies.

Les placettes sont installées en les répartissant le plus uniformément possible selon un gradient de déficits hydriques climatiques (P-ETP). Trois classes de P-ETP sont ainsi définies (*figure 1*), en prenant comme seuils les valeurs déterminées en 2010 en Poitou-Charentes et dans les Pays de la Loire.

Ce premier travail de stratification de l'échantillonnage effectué, les peuplements sélectionnés devaient répondre aux caractéristiques suivantes :

- > appartenir à un Plan simple de gestion (PSG) mentionnant la présence de chênes sur plus de 50 % de la surface de la propriété,
- > correspondre à des entités forestières de l'IGN (ex IFN) dont l'intitulé comporte le mot « chêne », être situés ni dans les Causses calcaires (Lot et Aveyron) ni dans le Plantaurel (Ariège) ; l'omniprésence du chêne pubescent y est expliquée par les sols superficiels « séchards » sur roches calcaires.

Figure 1 - Localisation des 77 placettes de l'étude de dépérissement et distribution des chênes en Midi-Pyrénées, mesurées en 2011

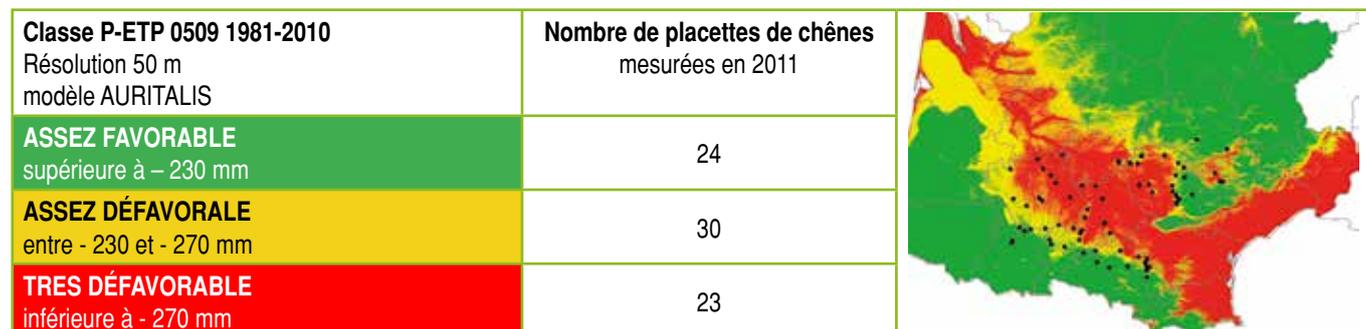
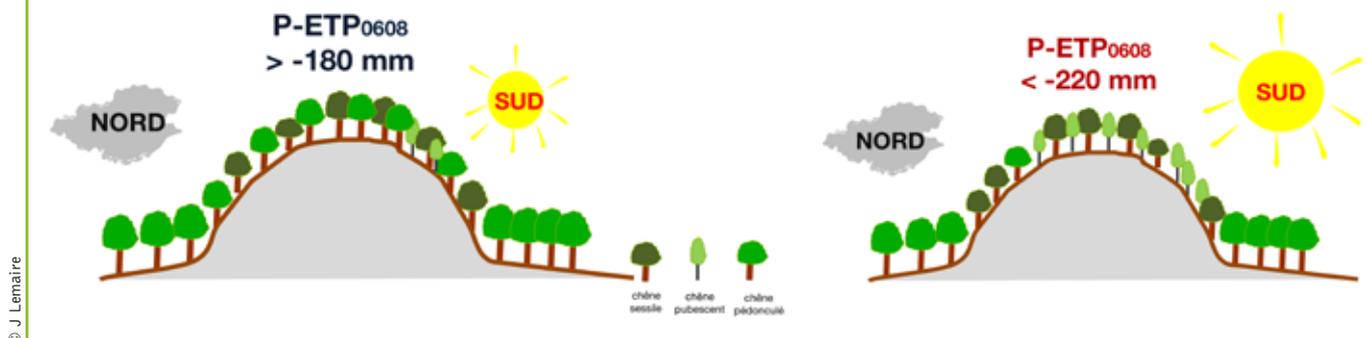


Figure 2 - Distribution des chênes pédonculé, sessile et pubescent en Midi-Pyrénées (sols acides)

Gauche : dans les zones plus fraîches et plus arrosées : P-ETP de juin à août (P-ETP 0608) > - 180 mm

Droite : dans les zones plus chaudes et plus sèches : P-ETP de juin à août (P-ETP 0608) < - 220 mm



Au total, 124 parcelles potentielles sont sélectionnées sur la région. Une fois les parcelles retenues, une maille systématique de 200 m de côté est virtuellement tracée sur les parcelles à l'aide d'un logiciel de cartographie. Les coordonnées des points du maillage ainsi sélectionnées sont téléchargées dans un GPS.

L'opérateur se rendait ensuite sur le terrain, au point exact défini par le maillage. La placette de mesures était installée, si au moins 4 chênes étaient présents dans l'étage dominant dans un rayon de 15 m, si aucune intervention récente, susceptible d'influencer l'état sanitaire des arbres, n'avait été pratiquée et si la hauteur totale moyenne du peuplement dépassait 14 m. L'identification taxonomique<sup>3)</sup> des 1528 chênes a nécessité la mise au point d'une clé de détermination<sup>4)</sup>. L'utilisation de la méthode ARCH1 a permis d'estimer l'état sanitaire des arbres. Au total, 77 placettes de chênes ont été inventoriées.

### Pas ou très peu de dépérissements constatés

D'une façon générale, on constate une très faible proportion de tiges dépérissantes pour l'ensemble des trois espèces de chênes (3,3 % pour le pédonculé, 3,7 % pour le sessile et 9,6 % pour le pubescent) en Midi-Pyrénées. Les dépérissements enregistrés pour le pubescent sont localisés sur des stations particulièrement difficiles, même pour une espèce thermophile (haut de versant ou crête, forte pente, versant sud...). Contrairement à ce qu'aurait pu donc laisser présager les résultats obtenus en Poitou-Charentes en 2009-2010<sup>5)</sup>, le chêne pédonculé présente un très faible taux de dépérissement en Midi-Pyrénées. Il se restreint aux stations pédoclimatiques qui lui conviennent (figure 2). Tout porte à penser qu'un tri climatique s'est déjà opéré dans ces

régions Sud-Ouest au climat contraignant d'un point de vue hydrique. Ce même tri climatique semble être en cours dans la zone de vigilance maximale située à l'intersection des régions Poitou-Charentes, Centre et Pays de la Loire.

### Distribution des chênes pubescent, sessile et pédonculé

Sur les stations où le déficit hydrique estival est marqué (P-ETP de juin à août < - 220 mm), le chêne pédonculé se restreint aux situations topographiques et aux sols compensant le déficit hydrique du climat : versant nord, bas de pente ou sols présentant des traces d'hydromorphie dans les 50 premiers centimètres. Dans les zones climatiques où le P-ETP estival devient favorable (P-ETP de juin à août > - 180 mm), le chêne pédonculé, espèce pionnière, a tendance à être l'essence dominante dans tous les types de sol et quelle que soit la situation topographique rencontrée (figure 2).

Le lecteur attentif remarquera que la période de l'année retenue pour le P-ETP est celle de juin à août (moyenne trentenaire). Dans cette région du Sud de la France, cette période s'est avérée plus discriminante pour expliquer la distribution des chênes blancs que le P-ETP0509 mm (mai-septembre).

Le chêne pubescent présente une distribution à l'inverse de celle du chêne pédonculé, il est absent des sols présentant des traces d'hydromorphie à moins de 50 cm de profondeur. Dans les conditions de P-ETP favorables (P-ETP0608 > - 180 mm), il occupe les stations déficitaires d'un point de vue hydrique : versant sud, haut de versant, croupe, sol superficiel. Dans les autres stations, le pubescent est rarement présent. Quand le P-ETP devient très défavorable (P-ETP0608 < - 220 mm), il

3) Classification en vue d'identification de l'espèce.

4) Bouvier M., 2012.

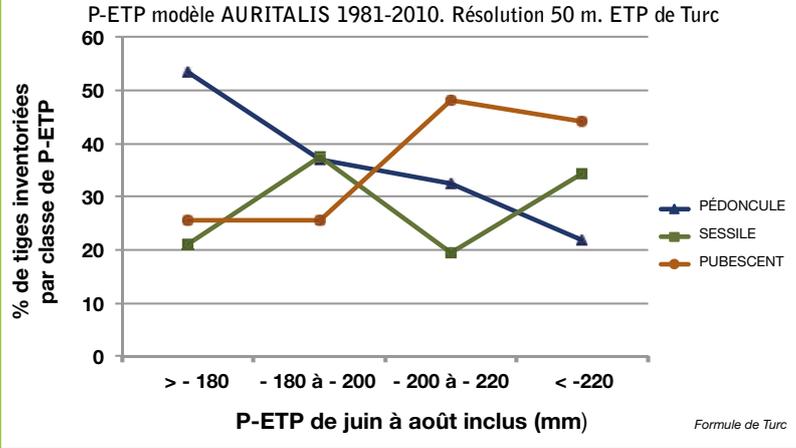
5) voir l'article du lien entre le déficit hydrique et le dépérissement du chêne p. 18.

## À retenir

Les cartes expérimentales de vigilance climatique sont établies pour les 3 espèces de chênes, pédonculé, sessile et pubescent, grâce aux travaux du projet « Chênaies atlantiques ». Les seuils de déficit hydrique et le nombre de jours de gel déterminent leurs différentes limites climatiques. Le chêne pubescent résiste bien aux déficits hydriques estivaux (P-ETP compris entre - 200 et - 290 mm en moyenne trentenaire) et supporte les gelées (mais moins que le pédonculé).

Figure 3 - Répartition du nombre de tiges (1 528 chênes inventoriés au total) par espèce de chênes et par classe de P-ETP de juin à août inclus (mm).

(Test CHI2 P=0.0000 Test très hautement significatif)



1) voir tableau 1 de l'exemple de diagnostic page 55.

occupe tous les types de sols car c'est l'espèce de chêne blanc la mieux armée pour résister aux déficits hydriques sur le secteur. Le chêne sessile est présent en proportion sensiblement équivalente quelle que soit la classe de P-ETP. Cela s'explique par deux raisons. La première est que la limite climatique en termes de P-ETP0608 n'est pas atteinte sur le secteur d'étude pour le chêne sessile. Celle-ci se situerait vers - 240 mm<sup>1)</sup>. La seconde est liée à la gestion et à l'histoire sylvicole des peuplements. Le chêne est rarement géré en futaie dans cette région. La gestion en taillis ou parfois en taillis sous futaie a favorisé les deux pionniers que sont le chêne pédonculé (colonisateur des zones où le P-ETP est favorable) et le chêne pubescent (colonisateur des zones où le déficit hydrique P-ETP est défavorable). Le chêne sessile, essence supportant mieux l'ombrage, est l'espèce climatique qui prédominerait dans beaucoup de forêts si le régime de la futaie avait été appliqué.

### Comprendre la distribution climatique des chênes avec le P-ETP et la tolérance au gel

La figure 4 ci-après synthétise des connaissances acquises sur l'autécologie des trois « chênes blancs ».

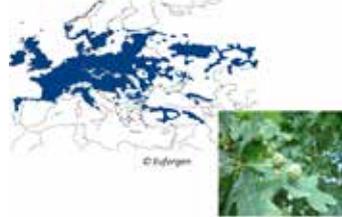
Le chêne pédonculé est le pionnier par excellence. Après la dernière période de glaciation, il y a 18000 ans, il a recolonisé l'Europe à partir du sud de l'Espagne, de l'Italie et des Balkans. Cette reconquête a été facilitée par le geai des chênes. En préférant les glands plus effilés du

chêne pédonculé, il a assuré la propagation de ce colonisateur à travers toute l'Europe. Mais cette reconquête a aussi été possible par sa bonne résistance au gel. Le chêne pubescent est également un pionnier, mais sur des stations plus sèches et plus chaudes. En France, le pubescent est le chêne « jonction » entre les climats plus frais et plus arrosés (climats océaniques ou à tendances continentales) et les climats méditerranéens très chauds et très secs en été. Cette espèce résiste bien aux déficits hydriques estivaux (P-ETP compris entre - 200 et - 290 mm en moyenne trentenaire) et supporte les gelées (mais moins que le pédonculé). Il est beaucoup moins sensible aux froids excessifs que ne le sont les chênes méditerranéens à feuilles persistantes comme le chêne vert ou le chêne liège par exemple.

Dans un contexte de changement du climat, il est donc fort probable que le chêne pubescent soit favorisé, si les tendances au réchauffement se confirment.

Le chêne sessile est climatiquement intermédiaire entre le pédonculé et le pubescent. Cette espèce de demi-ombre est l'essence reine des futaies de chênes dans les climats non méditerranéens (P-ETP de juin à août < - 240 mm), à condition que le sol soit assez profond et ne présente pas d'hydromorphie marquée dans les 40 à 60 premiers centimètres. Il est plus sensible aux gelées que le chêne pédonculé.

Figure 4 - Exigences climatiques des chênes pubescent, sessile et pédonculé

	<b>Quercus robur</b> Chêne pédonculé	<b>Quercus petraea</b> Chêne sessile	<b>Quercus pubescens</b> Chêne pubescent
<b>Aire de répartition</b>			
<b>Bioclimats</b>	Espèce des climats à tendance océanique et continental Absente en climat méditerranéen	Espèce des climats à tendance océanique Absente en climat méditerranéen	Espèce des climats à tendances océanique et méditerranéen
<b>Températures</b>	Bonne	Assez bonne	Assez bonne
Résistance au gel			
<b>Température moyenne</b>			
Limite naturelle de survie	5 °C	7 °C	9 °C
Limite naturelle pour la production	8 °C	9 °C	? °C
<b>Déficit hydrique climatique</b> <b>P-ETP (mm) (formule de Turc)</b>		<b>Moyenne trentenaire</b>	
Mai à septembre inclus (P-ETP0509)	P-ETP > - 250 mm	P-ETP > - 280 mm	P-ETP > - 340 mm
Juin à août inclus (P-ETP0608)	P-ETP > - 200 mm	P-ETP > - 240 mm	P-ETP > - 290 mm
<b>Comportement écologique</b>	Espèce pionnière des climats à faible déficit hydrique climatique (P-ETP0608 > - 200 mm) Espèce climacique des chênaies en zone alluviale	Espèce climacique des climats à faible ou fort déficit hydrique climatique (P-ETP0608 > - 240 mm)	Espèce pionnière des climats à fort déficit hydrique climatique (P-ETP0608 > - 290 mm) Espèce climacique des chênaies en climat mésoméditerranéen
<b>Sensibilité au changement climatique</b>	Très sensible	Sensible	Très sensible en zone méditerranéenne Probablement favorable dans les autres climats

© J. Lemaire, CNPF-IDF

## Les cartes de vigilance climatique

À partir des études réalisées et des connaissances autécologiques, des cartes de vigilance climatiques sont tracées pour les chênes pédonculé, sessile et pubescent.

Ces cartes sont calculées sur la récurrence des années à fort déficit hydrique. Ces cartes sont provisoires et expérimentales. Le lecteur doit se référer à l'article du « concept des cartes de vigilance » pour leur bon usage. Nous rappelons que c'est le croisement du niveau de vigilance avec le bilan en eau qui permet de dire si l'essence est en station ou non<sup>1)</sup>.

## Bilan et perspectives

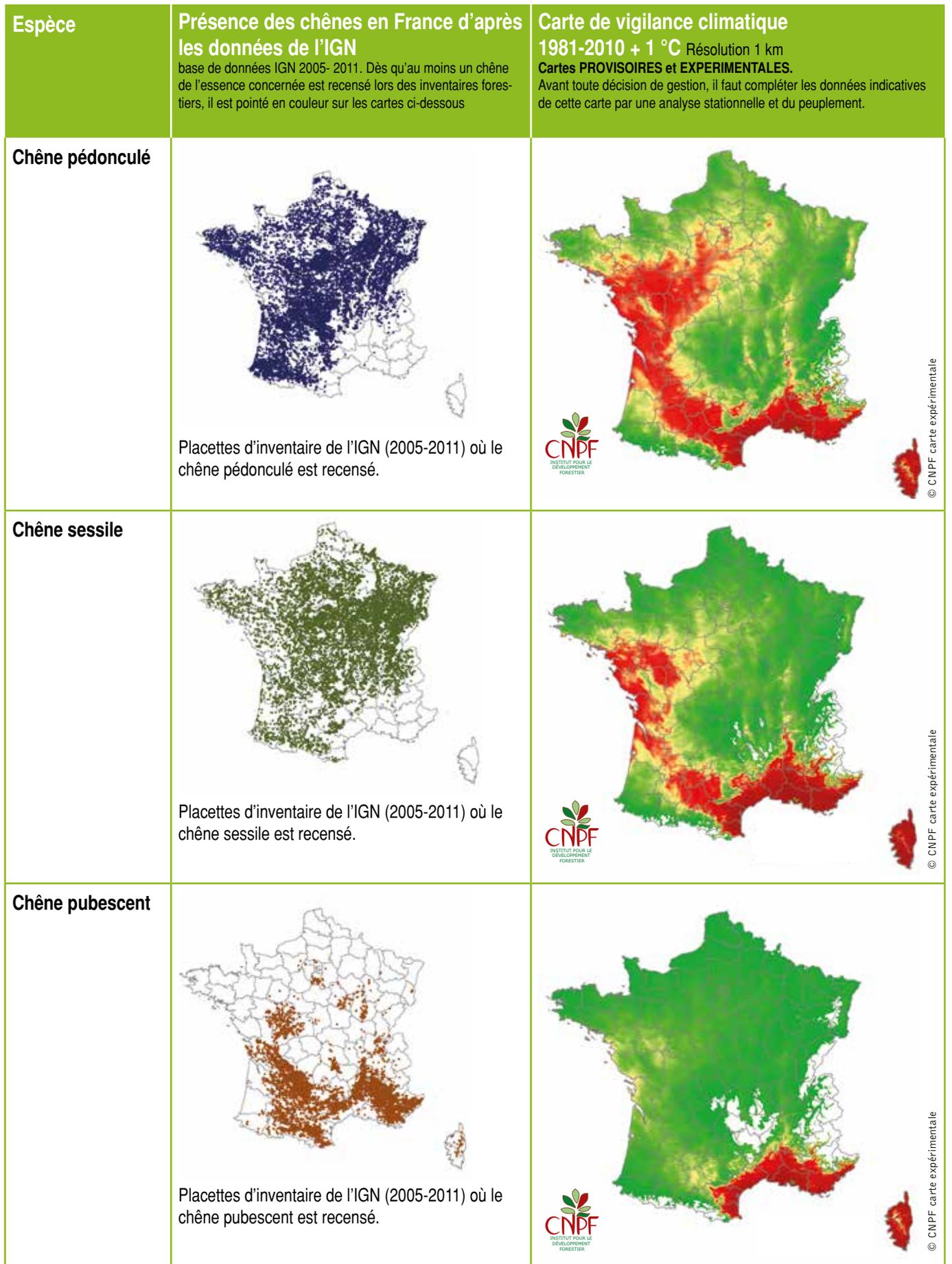
Les chênes pubescent, sessile et pédonculé ont des exigences climatiques distinctes. Le chêne pédonculé est une essence plus résistante au gel mais plus exigeante en eau. Il est actuellement le chêne blanc le plus impacté par les phénomènes de dépérissement, d'autant plus qu'il bénéficie rarement d'une

sylviculture dynamique adaptée à son tempérament exigeant en lumière (héliophile strict). Le chêne pubescent est une essence plus résistante au stress hydrique. Tout porte à croire que si le climat se réchauffe, le chêne pubescent est l'espèce de chêne dont l'aire devrait progresser vers le nord de la France.

1) voir la théorie du boxeur page 32.



Figure 5 - Carte de vigilance climatique des chênes pédonculé, sessile et pubescent.



## Vrai ou faux ?

**Il est facile de distinguer les chênes blancs entre-eux sur des critères morphologiques ?**

**VRAI et FAUX.** Avec l'habitude, la distinction entre les trois chênes est assez aisée ; principalement, entre le chêne pédonculé et les deux autres espèces : le sessile et le pubescent. La reconnaissance est parfois délicate entre le sessile et le pubescent. Le pubescent se distingue principalement du sessile par la présence d'une pubescence<sup>1)</sup> assez marquée sur le rameau de l'année mais ce n'est pas le seul critère. Nous renvoyons le lecteur à l'article de Marine Bouvier<sup>2)</sup> pour apprendre à bien distinguer les espèces de chênes sur le terrain.

**Le chêne sessile est moins résistant au gel que le chêne pédonculé ?**

**VRAI.** Le chêne sessile est davantage une espèce de climat à tendance océanique. Il résiste moins bien aux gelées que le chêne pédonculé.

**Les grumes de chêne pubescent peuvent être valorisées en bois d'œuvre ?**

**VRAI.** Des études sur la qualité de son bois ont été effectuées par l'Inra, le CIRAD et l'École supérieure du bois de Nantes. Le bois de chêne pubescent présente des qualités intéressantes et comparables à celles des autres chênes tant au niveau de ses capacités à être transformé en tonneau que pour les usages en menuiserie et en construction. Plus dense que le chêne pédonculé, une table de séchage spécifique à cette essence est validée par le Cirad<sup>3)</sup>.



*Dans le sud-ouest de la France, il est possible de rencontrer les trois espèces de chênes blancs sur la même parcelle : à gauche chêne pubescent, au milieu chêne sessile, à droite chêne pédonculé. Il est possible d'apprendre à les distinguer aisément. Mais dans certains cas, liés à l'hybridation entre les chênes, la reconnaissance est très délicate.*

1) Poils fins et soyeux notamment sur le dessous des nervures principale et secondaire, le rameau de l'année, le pédoncule court et la cupule du gland.

2) Bouvier M., 2012.

3) Brancheriau L., 2013.

**Remerciements**

L'auteur remercie Christophe Dréno, Marine Bouvier et Grégory Sajdak pour leur participation à l'étude et à l'analyse des résultats. Un grand merci aux personnels du CRPF Midi-Pyrénées et aux propriétaires sans qui cette étude n'aurait pas été possible.

Les essais de qualité de bois démontrent qu'il est possible de valoriser cette essence tant en menuiserie, en construction qu'en tonnellerie à condition d'adapter les tables de séchage<sup>3)</sup>.

Les premières analyses génétiques réalisées dans des peuplements purs de chênes pubescents en Midi-Pyrénées, Aquitaine, Poitou-Charentes, Centre, Languedoc-Roussillon et Pays de la Loire concluent qu'aucun peuplement de pubescent n'est pur génétiquement.

Partant de ce constat, le CRPF Poitou-Charentes, avec le concours de Lisea Biodiversité, de l'État et de la région Poitou-Charentes, s'est saisi de cette question : « N'est-il pas possible de sélectionner des peuplements porte-graines de chêne pubescent plus résistant à la sécheresse, même (et surtout !) si génétiquement ils ne sont pas purs ? ». L'hybridation naturelle entre les chênes blancs paraît en effet une piste d'adaptation à promouvoir pour agir face au changement climatique. ■

3) Brancheriau L., 2013.

# Impact de l'année 2003 sur la vitalité du douglas vert sur le secteur du Parc naturel régional du Haut-Languedoc

par Jean Lemaire<sup>1)</sup>, Gabriel Martin-Horcajo<sup>2)</sup>, Xavier Beaussart<sup>4)</sup>, Pauline Marty<sup>2)</sup>, Jean-Michel d'Orazio<sup>2)</sup>, Michèle Lagacherie<sup>2)</sup>, Jean-Pierre Ortisset<sup>3)</sup>, Pascal Mathieu<sup>3)</sup>, et Raphaële Hemeryck<sup>2)</sup>

1) CNPF-IDF,  
2) CNPF-CRPF  
Languedoc-Roussillon,  
3) CNPF-CRPF Midi-  
Pyrénées,  
4) Parc naturel régional  
du Haut-Languedoc

*L'analyse des photos aériennes de l'IGN, prises juste après la canicule de 2003, sur le secteur tarnais du Parc naturel régional du Haut-Languedoc a permis de préciser les limites climatiques du douglas et de proposer une carte de vigilance climatique pour cette essence.*

Depuis la canicule de 2003 et les sécheresses de 2005, 2007 et 2011, les forestiers sont de plus en plus sensibilisés au changement climatique. Le climat a évolué depuis la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Ces dix dernières années sont particulièrement révélatrices de cette évolution.

Conscient de ce fait, le Parc naturel régional (PNR) du Haut-Languedoc œuvre à la conception d'un atlas pédoclimatique pour conseiller les gestionnaires dans un contexte de climat changeant. Ce projet est réalisé en collaboration entre les CRPF Languedoc-Roussillon et Midi-Pyrénées, l'Institut pour le Développement Forestier, Météo-France et les pédologues locaux<sup>5)</sup>.

## Étude douglas vert en 2013

La forte canicule de l'été 2003 a eu un impact non négligeable sur la vitalité des forêts du PNR. Les peuplements d'épicéa ont été fortement impactés mais également ceux de douglas vert (provenant probablement des États de Washington et d'Oregon sur la côte ouest des États-Unis) ont été touchés cette année 2003. Le douglas est une essence de premier ordre économique sur le territoire du Parc, la première année de l'étude est consacrée à cette essence<sup>6)</sup>.

En 2003, le département du Tarn a bénéficié d'une campagne de photographies aériennes de l'IGN juste après la canicule (figure 1). Les houppiers des douglas rougis dans certaines parcelles, étaient très facilement localisables sur ces images. En 2013, l'analyse de ces photographies aériennes sur SIG a ainsi permis de cartographier *a posteriori* les douglasaies

touchées par de la mortalité en 2003 (parcelles « rougissantes ») et celles non touchées par de la mortalité (parcelles « non rougissantes »). La première phase de l'étude a analysé la corrélation entre la présence de mortalité en 2003, la topographie et les données climatiques fournies par Météo-France.

L'étude des photos aériennes montre que la mortalité sur une parcelle n'était jamais totale. Celle-ci est répartie en taches sur des zones bien définies.

La seconde phase de l'étude a donc pour objectif d'identifier, à condition climatique constante, quels sont les facteurs pédologiques et topographiques qui ont induit ou limité localement la mortalité des douglasaies en 2003. Au total, 39 couples rougissants et non rougissants sont ainsi inventoriés (*encadré ci-contre*).

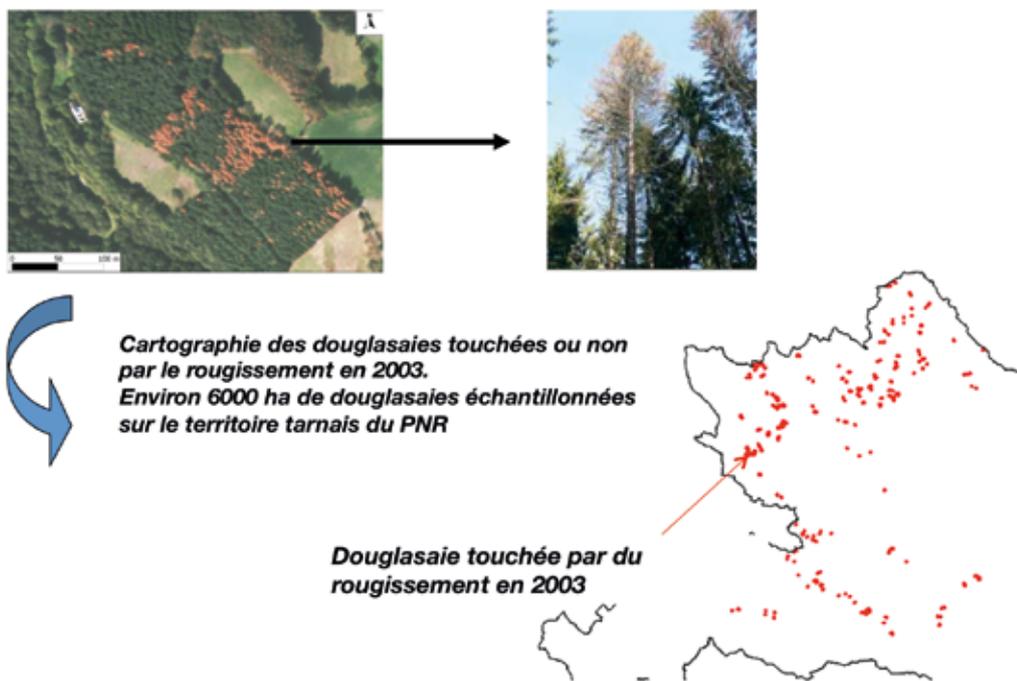
## Résultats pour le douglas vert

6 000 hectares de douglasaie sont repérés à partir de la cartographie des peuplements de l'IGN, dans le Tarn. Les douglasaies ainsi repérées, les taches de dépérissement (zones rougissantes) sont cartographiées grâce à l'analyse de la photographie aérienne IGN de l'année 2003. Nous avons estimé que l'impact climatique de la canicule 2003 a été majeur sur la vitalité des douglas verts. 65 % des parcelles inventoriées sont touchées par de la mortalité diffuse en taches ou en arbres épars sur la parcelle. Cette mortalité est diffuse en 2003. Au total, seuls 3 à 5 % de la surface de douglas sur le Parc sont fortement affectées par une mortalité, soit environ 300 ha.

5) Avec le soutien financier des régions Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon, des conseils généraux du Tarn et de l'Hérault.

6) Martin-Horcajo G. 2013.

Figure 1 - Cartographie des zones rougissantes et non rougissantes des parcelles de douglas à partir des photos aériennes de 2003 de l'IGN sur le territoire tarnais.



### Un système de « couple » pour étudier les facteurs aggravants ou compensateurs du climat

L'analyse des photos aériennes de 2003 démontre que la tranche altitudinale 500 – 750 m comprenait un nombre équivalent de placettes rougissantes et non rougissantes. Les zones rougissantes ne concernent pas forcément l'ensemble d'une parcelle. Elles sont plutôt localisées en « taches ». C'est dans cette tranche altitudinale que des couples sont installés pour étudier les effets compensateurs ou aggravants du sol et de la microtopographie sur la mortalité. Entre 500 et 750 m, 39 parcelles touchées par du rougissement sont sélectionnées aléatoirement à partir de l'étude des photos aériennes.

La placette non rougissante est ensuite identifiée à proximité de la zone affectée par de la mortalité en 2003. Ces deux placettes situées dans les mêmes parcelles sont donc soumises à des conditions climatiques identiques. Des mesures sont ensuite effectuées dans chacune de deux placettes : relevé de l'état sanitaire (méthode ARCHI), mesures dendrométriques (hauteur dominante, croissance, surface terrière, âge), relevés pédologique et de topographie.



Source : ©IGN, 2003. Réalisation : PNRHL, Gabriel MARTIN-HORCAJO. 2013

Figure 2 - Installation des couples rougissants non rougissants

Le couple est installé à partir de l'analyse de la photo aérienne de 2003. La zone rougissante repérée, les coordonnées GPS sont enregistrées pour installer une placette de mesures. La zone non rougissante est localisée au plus près de la parcelle rougissante (même condition climatique). Les coordonnées de ces placettes identifiées, l'opérateur se rend sur le terrain avec le GPS à l'endroit précis défini sur le SIG.

## Le savez-vous ?

Une leçon d'écologie

Le douglas est une essence introduite en France en 1848. Son extension s'est grandement accrue dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, grâce aux aides du Fonds Forestier National. Le douglas est introduit artificiellement dans le Haut-Languedoc. Il n'a donc pas ou peu été soumis à une sélection imposée par des extrêmes climatiques comme c'est le cas des essences indigènes (chênes blancs et hêtre par exemple). L'épisode caniculaire de 2003, mais aussi les sécheresses répétées<sup>1)</sup> entre 2005 et 2011, ont mis en évidence les seuils de résistance climatique de cette essence. Un tri climatique s'est donc opéré, cela doit guider le gestionnaire pour éviter de répéter des erreurs, que l'on sait maintenant évitables.

1) Sergent A.-S. *et al.*, 2013

Figure 3 - 1<sup>re</sup> clé de détermination des limites climatiques ayant favorisé la mortalité du douglas vert sur le territoire du PNR du Haut-Languedoc suite à la canicule de 2003

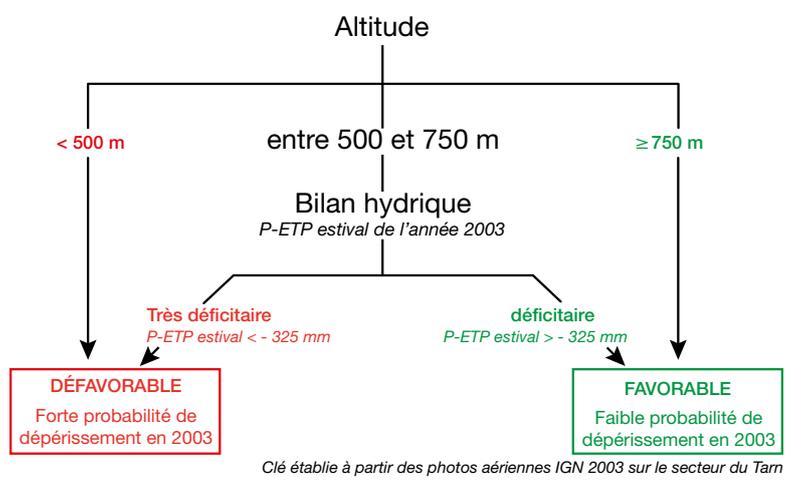
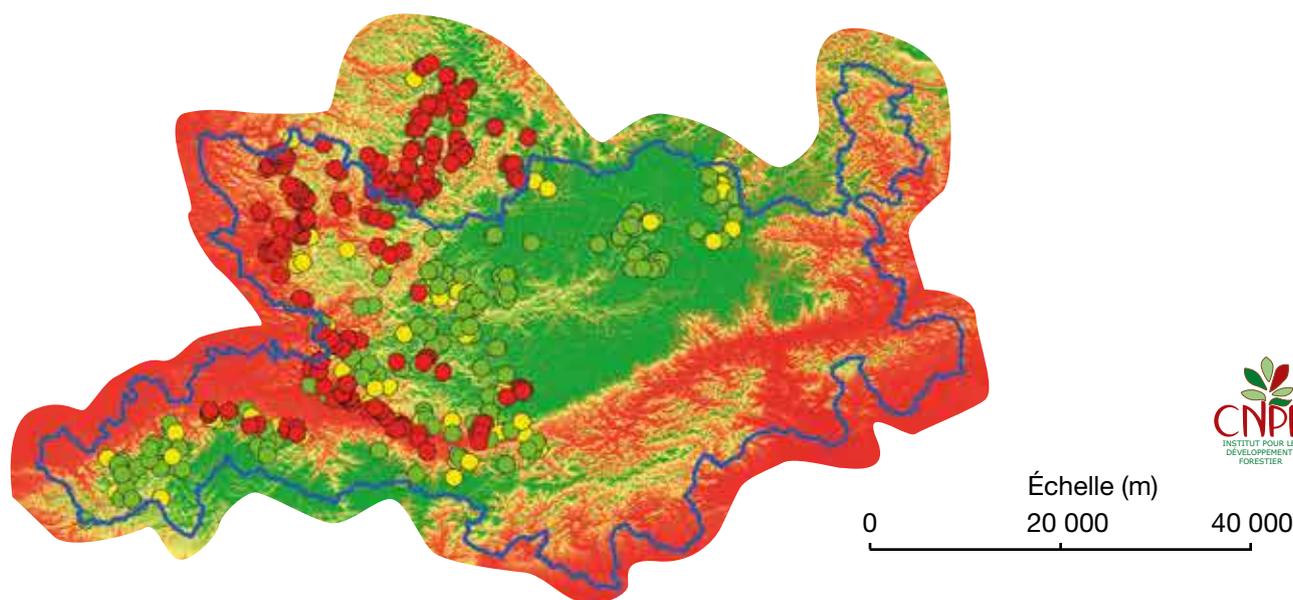


Figure 4 - Carte de vigilance climatique du douglas vert (probablement d'origine de l'Oregon et de Washington) sur les secteurs du PNR du Haut-Languedoc. Elle représente la probabilité de présence de mortalité sur la parcelle suite à un événement climatique extrême du type 2003. La résolution spatiale est de 25 m.



Sur cette carte, les 422 parcelles de douglas identifiées grâce aux données IGN sont reportées.

Leur état sanitaire en 2003 juste après la canicule est symbolisé :

Sans rougissement = ● points verts

Avec des arbres épars rougissants = ● points jaunes

Présence de taches de rougissement = ● points rouges.

Attention, carte provisoire et expérimentale. Avant toute décision de gestion, il faut compléter les données indicatives de cette carte par une analyse de la station et du peuplement.

### Légende

Les codes couleurs représentent la probabilité (%) que le peuplement soit affecté par de la mortalité (rougissement) suite à un événement climatique extrême similaire à l'année 2003. Cette carte climatique intègre les facteurs compensateurs ou aggravants liés à la topographie et à l'exposition mais pas les caractéristiques du sol.

- **Zone de vigilance climatique modérée**  
Probabilité assez faible de mortalité en 2003 (moins de 30 % de probabilité)
- **zone de vigilance climatique élevée**  
Probabilité assez élevée de mortalité en 2003 (de 30 à 70 % de probabilité)
- **zone de vigilance climatique maximale**  
Probabilité très élevée de mortalité en 2003 (plus de 70 % de probabilité)
- Limite du Parc naturel régional du Haut-Languedoc

## Limite climatique du douglas

À partir des zones rougissantes recensées, les conditions climatiques favorables à la mortalité en 2003 sont précisées grâce à des analyses statistiques. Les critères liés au bilan hydrique sont ressortis (*figure 3*) comme facteurs déclencheurs : l'altitude et la disponibilité en eau mesurées par le bilan hydrique (P – ETP) de juin à août de l'année 2003 sur la zone étudiée (valeur disponible à partir des données SAFRAN de Météo-France).

## Prise en compte des facteurs compensant ou aggravant le climat

L'analyse des zones affectées par des dépérissements sur les photos aériennes 2003 démontre l'importance de l'effet du climat sur la mortalité. Toutefois, le caractère diffus de ces mortalités en 2003 indique que d'autres facteurs du milieu (topographie, exposition, sol) ont compensé les contraintes liées aux très forts déficits hydriques climatiques en eau et aux températures élevées subies par les douglas en 2003. Le système des couples est utilisé pour mieux comprendre ces facteurs de compensation liés au milieu. Il en ressort, dès lors qu'un effet aggravant du bilan hydrique est enregistré sur les parcelles situées en zone climatique défavorable (*figure 3*), la placette est quasi systématiquement affectée par de la mortalité. Ces facteurs d'aggravation sont la position topographique (croupe, haut de versant, forte rupture de pente), l'exposition sud, le pourcentage important de roches affleurantes (plus de 15 % de la surface couverte par des roches affleurantes) attestant souvent de sols peu profonds (moins de 100 mm de réserve utile). À l'inverse, les parcelles localisées sur des stations au sol profond, confinées ou exposées au nord, sont peu marquées par les phénomènes de mortalité en 2003, alors qu'elles étaient situées en zone climatique défavorable (principe même des couples).

## Carte de vigilance climatique

Fort de ces résultats, une carte de vigilance climatique est tracée sur la base du modèle numérique de terrain (MNT) au 25 m. Elle intègre l'altitude et les effets de compensation ou d'aggravation du climat liés à l'exposition et la position topographique (*figure 4*). Les hauts de versants marqués sont considérés comme défavorables pour le douglas, quelle que soit la zone de vigilance climatique. Cette carte de vigilance climatique prédit le risque qu'une parcelle

de douglas soit affectée par de la mortalité si un événement comme 2003 venait à se reproduire. Elle n'intègre pas la géologie ni le sol.

La validité de cette carte sur l'ensemble des peuplements purs de douglas du Tarn cartographiés par l'IGN a été testée. Elle prédit 8 fois sur 10 la présence ou l'absence de mortalité, cela montre la pertinence de l'analyse.

## Une carte de vigilance climatique comme outil d'aide à la décision

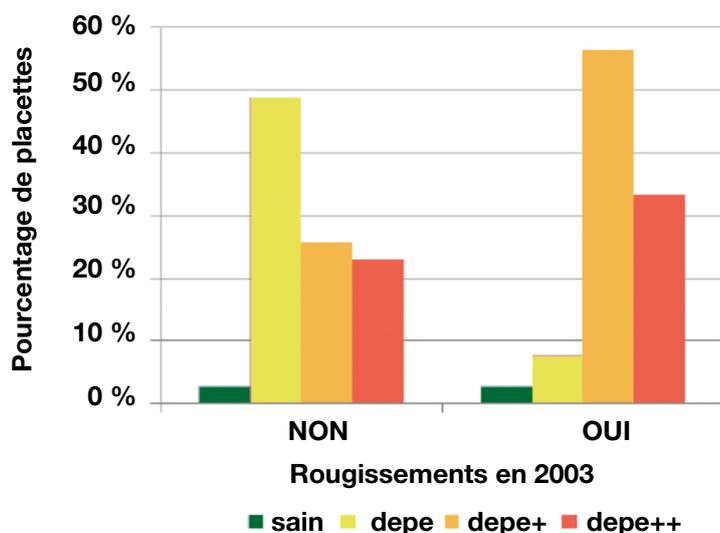
La carte de vigilance climatique définit les secteurs de risques de perte de vitalité liés à la récurrence des sécheresses climatiques encourues par une essence. Pour le douglas vert, cette carte (*figure 4*) représente la probabilité que le peuplement soit affecté par de la mortalité en 2003 suite à un événement climatique extrême. Elle a l'intérêt d'être directement utilisable sur le terrain avec un GPS, une tablette numérique équipée pour la cartographie voire un Smartphone. Cette carte de vigilance climatique n'est qu'un des éléments du diagnostic. Elle ne doit jamais s'imposer au gestionnaire et doit toujours être associée à un diagnostic de terrain détaillé. Pour mieux appréhender les étapes indispensables d'un diagnostic adapté sur une parcelle, nous renvoyons le lecteur à la lecture de la fiche BioClimSol page 59 à 62. La carte ci-contre intègre les effets liés à l'exposition et à la position topographique. Ceux liés à la nature du sol ne sont pas intégrés, ce sera la prochaine étape du projet.

Dès maintenant, nous proposons quelques recommandations sylvicoles en fonction des zones de vigilance climatique sur le secteur d'étude.

## Zone de vigilance maximale

Il s'agit des zones rouges de la carte de la *figure 4*. Les conditions hydriques y sont très déficitaires pour le douglas vert. Le sol et la topographie compensent très difficilement le déficit hydrique du climat. Il est vivement déconseillé d'implanter les variétés « classiques » de douglas vert (Luzette-VG, Darrington-VG, Washington2-VG, Francex-VG) d'origine de l'Oregon ou de Washington. D'autres provenances de douglas, comme la variété Californie-VG, sont actuellement testées sur ce secteur climatique, néanmoins, ces essais sont trop récents pour en tirer des préconisations. Pour les peuplements sains en place dans cette zone, il convient de mener une sylviculture dynamique en vue de raccourcir le terme d'exploitabilité.

Figure 6 - Comparaison de l'état sanitaire en 2013 des 39 couples non rougissants et rougissants en 2003 (Méthode ARCHI).



À partir des photos aériennes de 2003, les zones rougissantes sont repérées. En 2013, un diagnostic sanitaire est effectué en comparant l'état des zones rougissantes en 2003 et non rougissantes les plus proches = couple (encadré page 47). Pour rappel, ces placettes sont quasi exclusivement situées dans la tranche altitudinale de 500 à 750 m.

Le graphique représente le classement sanitaire en 2013 des couples rougissants et non rougissants en 2003.

**SAIN** si la notation ARCHI < 20 % de morts + irréversibles + stressés

**DEPE** si la notation ARCHI entre 20 % et 40 % de morts + irréversibles + stressés

**DEPE +** si la notation ARCHI entre 40 % et 60 % de morts + irréversibles + stressés

**DEPE ++** si la notation ARCHI > 60 % de morts + irréversibles + stressés.



Si le peuplement présente des signes de pertes de vitalité, il est recommandé de réaliser un diagnostic de l'état sanitaire détaillé à l'aide de la méthode ARCHI. Si le peuplement contient au minimum 100 tiges/ha saines ou résilientes et de qualité, il est préconisé de les favoriser en effectuant à leur profit un détournement léger. Il est également vivement conseillé lors du reboisement de diversifier les peuplements en favorisant le mélange avec des essences feuillues ou résineuses plus résistantes à la sécheresse (cèdre, pins...).

#### Zone de vigilance modérée

Dans cette zone où la température est plus faible et la pluviométrie augmente, le climat est favorable à la bonne croissance du douglas vert de provenance Washington et Oregon. Peu de cas de dépérissements sont recensés en 2003 dans cette tranche altitudinale (zone verte sur la carte) à condition que le sol soit favorable au douglas (sol profond sans stagnation d'eau, sol avec réserve utile minimale d'au moins 100 mm et avec une richesse chimique suffisante). Pour les peuplements sains, il est conseillé de pratiquer une sylviculture dynamique, puis de favoriser la régénération et le rajeunissement des peuplements.

Dans ces conditions climatiques, même si c'est plus rare, certains peuplements peuvent néanmoins présenter des signes d'affaiblissement. Il est recommandé de réaliser un diagnostic de l'état sanitaire détaillé à l'aide de la méthode ARCHI. Si le peuplement présente au minimum 100 tiges/ha saines ou résilientes, il est préconisé de les favoriser en effectuant un détournement léger de ces tiges.

#### Zone de vigilance élevée

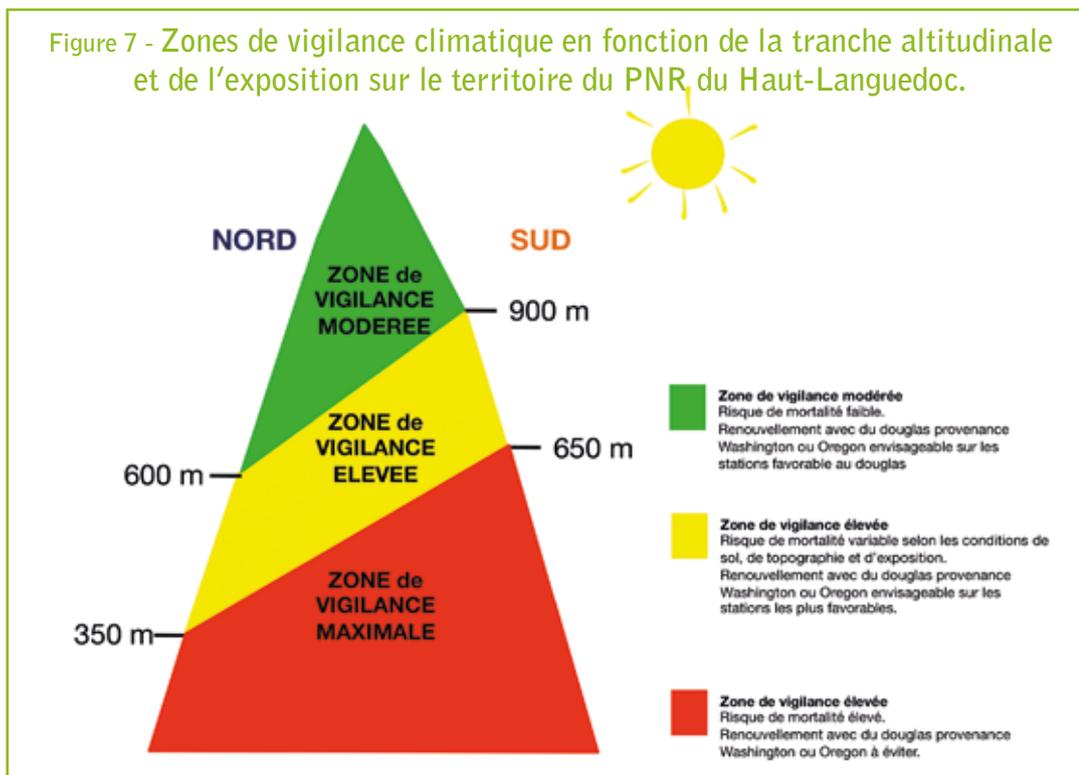
C'est la zone climatique intermédiaire où les risques climatiques sont variables selon les conditions de sol ou de topographie rencontrées. L'analyse stationnelle doit être particulièrement approfondie, de façon à évaluer au mieux les facteurs correctifs du climat liés au sol.

Dans cette zone climatique (zone jaune sur la carte), les variétés « classiques » de douglas vert (Luzette-VG, Darrington-VG, Washington2-VG, Francex-VG) d'origine Washington et d'Oregon sont envisageables sur les stations les plus favorables. Dès qu'un facteur aggravant est constaté au niveau du sol ou de la topographie, il est vivement conseillé lors du reboisement de diversifier les peuplements en favorisant le mélange avec des essences feuillues ou résineuses plus résistantes à la sécheresse (cèdre, pins...). Si le peuplement présente des signes de pertes de vitalité, il est recommandé de réaliser un diagnostic détaillé de l'état sanitaire à l'aide du protocole ARCHI. Si le peuplement contient au minimum 100 tiges/ha saines ou résilientes, il est préconisé de les favoriser en effectuant un détournement léger de ces tiges.

#### Un état sanitaire qui continue à se dégrader

La cartographie des zones rougissantes à partir des photographies aériennes de 2003 montre que la mortalité a affecté 3 à 5 % de la surface de douglas sur le territoire du PNR du

Figure 7 - Zones de vigilance climatique en fonction de la tranche altitudinale et de l'exposition sur le territoire du PNR du Haut-Languedoc.



Haut-Languedoc. Ceci est finalement assez faible et rassurant. La répétition des sécheresses dans les années 2001-2010 a fortement marqué l'ensemble des douglaies.

En effet, l'état sanitaire des placettes non rougissantes en 2003, mais situées à proximité des zones rougissantes (système de couple voir encadré page 47), est évalué en 2013 à l'aide de la méthode ARCHI Douglas. Cette méthode, développée par l'IDF, permet d'estimer la réaction des arbres ayant subi des stress climatiques (figure 6).

45 % des placettes non rougissantes en 2003 étaient encore en état de stress en 2013!

Dit autrement, elles n'ont pas rougi en 2003 car il y avait des facteurs compensateurs assez importants. Par contre, la succession des sécheresses de 2003 et des années suivantes ont « marqué » la vitalité des arbres. Ce stress est toujours élevé 10 ans plus tard.

## Bilan

L'ensemble des résultats de l'étude menée sur le territoire tarnais du Parc naturel régional du Haut-Languedoc démontre que les peuplements de douglas vert sont fragilisés par la succession des années sèches durant la décennie 2000 et particulièrement par l'année 2003. Des solutions sont proposées pour évaluer les risques encourus en cas de récurrence des sécheresses. Nous sommes dans une étape intermédiaire du travail sur l'Atlas pédo-climatique, l'objectif étant d'affiner les outils de diagnostic pour les principales essences présentes sur le territoire du Parc et de proposer à terme une méthode de diagnostic novatrice

pour le choix des essences de reboisement, mais aussi lister des recommandations sylvicoles pour les peuplements en place dans un contexte de climat changeant.

Les premiers résultats montrent déjà l'importance d'intégrer le diagnostic climatique dans la gestion forestière. La carte de vigilance climatique proposée pour le douglas vert permet de mieux prendre en compte les épisodes de sécheresses extrêmes amenés à se répéter avec le changement climatique. ■

## À retenir

Sur le territoire du PNR du Haut-Languedoc, le douglas vert est fortement impacté par la canicule de 2003 et les sécheresses qui se sont accumulées durant la décennie 2001-2010. Une cartographie fine des zones de vigilance climatiques a pu être tracée à partir de l'étude de photographies aériennes prises en 2003, juste après la canicule. Cette carte intègre les conditions climatiques, la topographie et l'exposition. Des propositions de recommandations sylvicoles sont alors proposées.

# BioClimSol :

## de la théorie à la pratique, un exemple de diagnostic de la vigilance climatique

par Jean Lemaire, CNPF-IDF et Pascal Mathieu, CNPF-CRPF Languedoc-Roussillon

*Comment se présente concrètement une fiche de diagnostic BioClimSol ? Quelles données l'opérateur intègre-t-il ? Voilà les informations que vous apporte la fiche BioClimSol.*

**BioClimSol** est un outil d'aide à la décision pour la gestion des peuplements dans un contexte de climat changeant. Un exemple concret et complet de diagnostic est réalisé avec l'outil BioClimSol sur une parcelle de douglas située sur le territoire du Parc naturel régional du Haut-Languedoc, dans le Tarn. Les différents points évoqués :

- données climatiques,
- prise en compte des effets de compensation ou d'aggravation du climat,
- carte de vigilance climatique,
- descriptif du sol,
- diagnostic de résilience du peuplement avec la méthode ARCHI sont rassemblés dans une fiche.

**Le lecteur doit garder à l'esprit son côté provisoire, y compris sa présentation.** Cette fiche sera améliorée au gré des avancées, des résultats de la recherche et des retours des utilisateurs sur le terrain. L'objectif final est d'aboutir à une fiche disponible en version numérique (tablette, PC, GPS, Smartphones et assimilés).

### L'organisation de la fiche

Afin de comprendre le fonctionnement de l'outil, nous présentons de la page 59 à 62 un exemple de diagnostic réalisé sur une parcelle de douglas vert dans le Tarn. Dans un premier temps, nous en détaillons le mode d'emploi, à travers **cette note explicative du contenu de la fiche et de son usage.**

La fiche de diagnostic BioClimSol est composée de **8 rubriques** :

1. Références de la parcelle ;
2. Données climatiques trentenaires associées à la parcelle visitée ;
3. Facteurs de compensation ou d'aggravation du climat ;
4. Bilan climatique ;
5. Diagnostic du sol ;
6. Bilan pédoclimatique ;
7. Diagnostic du peuplement ;
8. Pistes de recommandations sylvicoles.

L'intitulé « Pistes de recommandations sylvicoles » est privilégié, car préciser finement des recommandations sylvicoles au regard des incertitudes liées au changement du climat est, à ce jour, impossible. Il est important de rappeler que BioClimSol est un outil d'aide à la décision, qui ne permet qu'une représentation simplifiée d'une réalité souvent très complexe en forêt. Il convient de toujours l'utiliser dans cet esprit et de garder en mémoire **qu'il ne peut jamais s'imposer au gestionnaire, lequel doit toujours effectuer un diagnostic de terrain détaillé de sa parcelle avant de prendre ses décisions de gestion.**

### Les observations et mesures réalisées sur le terrain

L'opérateur note les références de la parcelle : - relevé des coordonnées GPS du point visité en précisant bien le système de coordonnées utilisé (*rubrique 1*), - nom du propriétaire..., - type de peuplement. Cette géolocalisation précise permet d'effectuer un bilan climatique (*rubrique 4*) à partir des données locales (*rubrique 2*). Ensuite, il évalue et quantifie les facteurs de compensation et d'aggravation du climat (*rubrique 3*) : exposition, pente, confinement, apport ou perte en eau lié à la position topographique.

Le technicien estime également le niveau de richesse chimique du sol, la présence et l'intensité d'hydromorphie ainsi que la réserve utile à l'aide d'une tarière pédologique, ou mieux d'une fosse pédologique (*rubrique 5*). L'ensemble des données climatiques, topographiques et pédologiques récoltées lui permet de dresser un bilan pédoclimatique (*rubrique 6*).

Pour les peuplements sur pied, il effectue également un relevé dendrométrique classique (âge, hauteur dominante, surface terrière, nombre de tiges par hectare, diamètre moyen...). Le cas échéant, il note et quantifie le niveau de résilience du peuplement avec la méthode ARCHI (*rubrique 7*).

## Cheminement par rubrique

### Rubrique 1 - Références de la parcelle

L'objectif de l'outil est d'aider la décision du gestionnaire au niveau de la parcelle forestière, unité de gestion définie par l'aménagement forestier ou le Plan simple de gestion. Si la parcelle présente des conditions écologiques variées, il est conseillé de multiplier les relevés pour appréhender la diversité des conditions de stations, ou de la subdiviser si les conditions stationnelles sont trop variables.

X et Y font référence aux coordonnées géographiques : X pour l'abscisse c'est-à-dire la longitude, Y pour l'ordonnée c'est-à-dire la latitude. Ces coordonnées sont relevées avec le GPS. La projection Lambert 93 (X Lambert 93 et Y Lambert 93) sert actuellement de référence en France. Elle est donc la plus couramment utilisée, à l'échelle du territoire, pour de nombreuses données géoréférencées. Dans notre cas, les données climatiques et le modèle numérique de terrain sont projetés dans ce système de coordonnées. Le relevé des coordonnées à l'aide du GPS en WGS 84 impose donc que les valeurs soient converties en coordonnées Lambert 93, avec le logiciel libre comme CIRCE © IGN par exemple.

### Rubrique 2 - Données climatiques 1981-2010

Les données climatiques sont obtenues en croisant la localisation de la parcelle avec les données climatiques trentenaires géoréférencées. L'outil informatique utilisé pour effectuer ce diagnostic climatique peut être le logiciel libre Qgis. Les données climatiques trentenaires, issues du « modèle hydride » AURITALIS (AURELHY et DIGITALIS)<sup>1)</sup>, correspondent à des moyennes calculées pour la période 1981-2010. La signification des abréviations des indices climatiques employés, ainsi que leur source et leur résolution, sont retranscrits en deuxième page de la fiche.

### Rubrique 3 - Facteur de compensation ou d'aggravation du climat

L'opérateur indique la présence de facteurs locaux aggravant ou compensant le climat. Il relève l'altitude (en m), l'exposition (en degré), la pente (en %), le confinement (en %), la position topographique pour effectuer le bilan entre les pertes et les apports en eau. Pour le douglas, les facteurs de compensation ou d'aggravation du climat liés à l'altitude, à l'exposition et à la position topographiques<sup>2)</sup> sont directement inclus dans les cartes de vigilance climatique. Pour les autres essences, les travaux sont en cours pour intégrer directement ces facteurs.

### Rubrique 4 - Bilan climatique

Le bilan climatique se décompose en deux parties.

1. Le bilan climatique sur les moyennes trentenaires. Ce premier bilan est effectué à partir des moyennes trentenaires 1981-2010. Il définit si l'essence se situe, en moyenne, dans des conditions climatiques acceptables pour sa présence. Cette première étape du diagnostic, la moins précise, sert à éviter les plus grosses erreurs de gestion au moment du reboisement, en prédisant si l'essence est située ou non dans sa niche climatique.
2. La deuxième partie précise les niveaux de vigilance climatique associés à la parcelle visitée. Pour rappel, chaque carte de vigilance est spécifique à l'essence diagnostiquée. Elle précise le risque de récurrence des épisodes de forts déficits hydriques climatiques. Pour les résineux comme le douglas, elle détermine également la probabilité de mortalité suite à un événement climatique extrême, comme celui de 2003.

#### Partie 1 : bilan climatique à partir des moyennes trentenaires

Les données climatiques trentenaires permettent de positionner l'essence dans sa niche climatique actuelle, voire future. Pour la définir, trois paramètres climatiques sont retenus, à savoir :

- le risque lié au gel (température moyenne minimale de mars TN03),
- les valeurs de P-ETP d'avril à octobre inclus (P-ETP0410),
- et de juin à août (P-ETP0608).

Ils sont mentionnés en gras sur fond jaune dans la rubrique 2 « Données climatiques 1981-2010 ». Les trois valeurs **en gras** de **couleur rouge** sur fond jaune correspondent aux paramètres du climat actuel, selon la moyenne trentenaire de 1981-2010. Les deux valeurs de couleur **orange entre parenthèses** correspondent aux données de référence du déficit hydrique climatique (P-ETP), si la température moyenne augmente d'un degré supplémentaire<sup>3)</sup>.

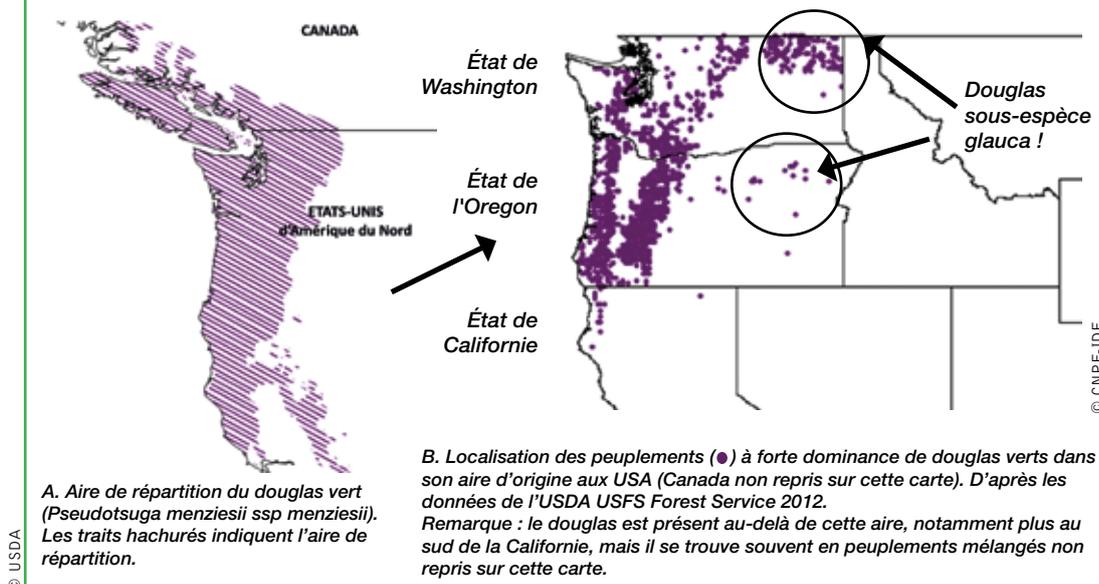
Le diagnostic climatique repose sur les hypothèses selon lesquelles seules les températures évoluent, mais pas la pluviométrie, ni sa répartition selon les mois de l'année. Avec l'augmentation d'un degré en moyenne annuelle sur trente ans, le déficit hydrique P-ETP d'avril à octobre diminue en moyenne de 40 mm. Cette baisse est de 30 mm sur les mois les plus chauds. Le risque de gelée retenu correspond à celui des années 1981-2010. Il est à remarquer que si les informations liées aux stress hydriques sont de plus en plus détaillées, les références sur les risques chiffrés liés aux gelées sont peu nombreuses.

1) voir l'article des données climatiques page 16.

2) voir l'article de l'impact de l'année 2003 sur le douglas page 46.

3) voir l'article BioClimSol les acquis page 8.

Figure 1 - L'aire de répartition (A) dresse un contour dans lequel l'essence est présente, sans toutefois mentionner la probabilité de présence de l'espèce à l'intérieur de cette aire. Ainsi sur la figure B, on voit qu'à l'intérieur de cette aire, le douglas est absent sur une grande zone, notamment au centre (zones de plaine plus chaudes et sèches).



1) Hijmans R.J. *et al.*, 2005.

Le tableau 1 reprend les valeurs limites calculées pour chaque essence sur la base des trois paramètres climatiques : TN03, P-ETP0410 et P-ETP0608. Les valeurs limites sont calculées à partir du croisement des données climatiques 1961-1990 *Worldclim*<sup>1)</sup> et des aires de répartition (EUFORGEN, USDA ...) géoréférencées de chaque essence. Les seuils climatiques sont définis sur le critère d'absence ou de présence de l'espèce, en prenant comme valeur seuil le premier décile pour ces trois critères climatiques. Dit autrement, seuls 10 % des points étudiés dans l'aire de répartition ont un TN03, un P-ETP0410 ou P-ETP0608 inférieur aux valeurs mentionnées, volontairement arrondies à la dizaine inférieure pour les déficits hydriques (P-ETP).

Ces seuils climatiques sont définis à partir de l'étude de l'aire de répartition de chaque essence. Celle-ci dresse un contour dans lequel l'essence est présente, sans toutefois préciser (*figure 1*) sa probabilité de présence de l'espèce à l'intérieur de cette aire. Partant de ce constat, la valeur du premier décile est retenue empiriquement, car la comparaison des valeurs climatiques limites fournies par l'étude de l'essence sur son aire de répartition et par celles en France montrent que le seuil défini par le premier décile constitue un bon compromis. En complément pour certaines essences, ces seuils climatiques en termes de P-ETP sont précisés plus finement à partir d'études menées à l'échelle du territoire français. Dans ce cas, le terme « validé » est rajouté après le nom de l'essence pour signifier ce niveau d'information supplémentaire. À ce jour, un travail est entrepris pour employer une seule valeur de P-ETP de référence, à savoir le P-ETP

de mai à septembre inclus plutôt que les deux P-ETP (avril à octobre et juin à août inclus).

Les seuils climatiques permettent de tracer les trois histogrammes du bilan climatique pour la moyenne trentenaire (*rubrique 4, 2<sup>e</sup> page de la fiche*).

#### Rubrique 4 - Histogramme

Les données climatiques des trois paramètres TN03, P-ETP0410 et P-ETP0608 attachés à la parcelle diagnostiquée sont comparées aux limites climatiques spécifiques à chaque essence pour ces trois critères. L'essence est exclue si elle ne répond pas à un des trois paramètres climatiques définissant la niche climatique pour les valeurs 1981-2010 (valeur **en gras de couleur rouge sur fond jaune** de la rubrique 2). Le bâtonnet de l'histogramme relatif à cette essence devient rouge. Lorsqu'elle n'est pas retenue en tenant compte du réchauffement probable de + 1 °C pour les critères liés au déficit hydrique climatique (P-ETP selon les valeurs indiquées en orange gras), l'essence est déconseillée. Le bâtonnet lié à cette essence apparaît en orange.

#### Rubrique 4 - Tableau des essences retenues pour le bilan climatique trentenaire

Si l'essence est exclue pour l'un des trois critères climatiques lié au risque de gel (TN03) ou aux déficits hydriques climatiques (P-ETP), elle est notifiée en police **rouge gras** et barrée doublement dans le tableau des essences retenues pour le bilan climatique trentenaire 1981-2010.

Si elle est déconseillée dans le contexte du réchauffement climatique (moyenne 1981-2010 + 1 °C), elle est colorée **en orange gras** et barrée simplement.

Tableau 1 - Valeurs seuils en lien avec les risques de gelée et de déficit hydrique climatique permettant de dresser le bilan climatique en moyenne trentenaire 1981-2010

TN03 1 <sup>er</sup> décile			P-ETP0410 (mm) 1 <sup>er</sup> décile			P-ETP0608 (mm) 1 <sup>er</sup> décile		
<i>Picea abies</i>	Épicéa commun	-28,8	<i>Quercus suber</i>	Chêne liège	-700	<i>Quercus suber</i>	Chêne liège	-450
<i>Betula pendula</i>	Bouleau verruqueux	-15,9	<i>Cedrus atlantica</i>	Cèdre de l'Atlas	-650	<i>Cedrus atlantica</i>	Cèdre de l'Atlas	-430
<i>Pinus strobus</i>	Pin de Weymouth	-13,9	<i>Sorbus domestica</i>	Cormier	-550	<i>Pinus pinaster</i>	Pin maritime	-380
<i>Populus tremula</i>	Peuplier tremble	-12,6	<i>Pinus nigra</i>	Pin noir	-520	<i>Pinus nigra</i>	Pin noir	-370
<i>Acer negundo</i>	Erable negundo	-12,4	<i>Pinus pinaster</i>	Pin maritime	-520	<i>Sorbus domestica</i>	Cormier	-350
<i>Tilia cordata</i>	Tilleul à petites feuilles	-11,1	<i>Sorbus torminalis</i>	Alisier torminal	-460	<i>Sorbus torminalis</i>	Alisier torminal	-290
<i>Ulmus laevis</i>	Orme lisse	-10,5	<i>Quercus pubescens validé</i>	Chêne pubescent validé	-350	<i>Quercus pubescens validé</i>	Chêne pubescent validé	-290
<i>Thuja plicata</i>	Thuja géant	-9,1	<i>Malus sylvestris</i>	Pommier sauvage	-340	<i>Malus sylvestris</i>	Erable champêtre	-260
<i>Quercus robur</i>	Chêne pédonculé validé	-7,8	<i>Pinus sylvestris</i>	Pin sylvestre	-330	<i>Thuja plicata</i>	Thuja géant	-260
<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne commun	-7,7	<i>Acer campestre</i>	Erable champêtre	-300	<i>Malus sylvestris</i>	Pommier sauvage	-250
<i>Larix decidua</i>	Mélèze d'Europe	-7,3	<i>Pinus taeda</i>	Pin à l'encens	-290	<i>Pinus taeda</i>	Pin à l'encens	-210
<i>Malus sylvestris</i>	Pommier sauvage	-7,2	<i>Juglans nigra</i>	Noyer noir	-280	<i>Juglans nigra</i>	Noyer noir	-230
<i>Juglans cinerea</i>	Noyer cendré	-7,1	<i>Tilia cordata</i>	Tilleul à petites feuilles	-280	<i>Platanus occidentalis</i>	Platane occidentale	-220
<i>Pyrus pyrasier</i>	Poirier sauvage	-7	<i>Castanea sativa</i>	Châtaignier commun	-280	<i>Castanea sativa</i>	Châtaignier commun	-220
<i>Prunus avium</i>	Erable champêtre	-6,3	<i>Quercus petraea validé</i>	Chêne sessile validé	-280	<i>Liquidambar styraciflua</i>	Copalme d'Amérique	-210
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglas vert (plantation France)	-5,9	<i>Prunus avium</i>	Merisier	-270	<i>Tilia platyphyllos</i>	Tilleul à grandes feuilles	-210
<i>Alnus glutinosa</i>	Aulne glutineux	-4,1	<i>Thuja plicata</i>	Thuja géant	-260	<i>Pinus taeda</i>	Pin à l'encens	-210
<i>Populus occidentalis</i>	Platane occidentale	-3,9	<i>Tilia platyphyllos</i>	Tilleul à grandes feuilles	-260	<i>Tilia cordata</i>	Tilleul à petites feuilles	-210
<i>Juglans nigra</i>	Noyer noir	-3,9	<i>Liquidambar styraciflua</i>	Copalme d'Amérique	-260	<i>Prunus avium</i>	Merisier	-200
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Erable sycamore	-3,7	<i>Platanus occidentalis</i>	Platane occidentale	-260	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Erable sycamore	-200
<i>Prunus avium</i>	Merisier	-3,5	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Erable sycamore	-260	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglas vert (plantation France)	-200
<i>Pinus nigra</i>	Pin noir	-3,3	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglas vert (plantation France)	-250	<i>Quercus robur validé</i>	Chêne pédonculé validé	-200
<i>Liriodendron tulipifera</i>	Tulipier de Virginie	-3,3	<i>Quercus robur validé</i>	Chêne pédonculé validé	-250	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglas vert (plantation France)	-200
<i>Fagus sylvatica</i>	Hêtre commun	-3,2	<i>Liriodendron tulipifera</i>	Tulipier de Virginie	-240	<i>Juglans cinerea</i>	Noyer cendré	-170
<i>Tilia platyphyllos</i>	Tilleul à grandes feuilles	-2,8	<i>Betula pendula</i>	Bouleau verruqueux	-200	<i>Liriodendron tulipifera</i>	Tulipier de Virginie	-170
<i>Sorbus torminalis</i>	Alisier torminal	-2,4	<i>Fagus sylvatica</i>	Hêtre commun	-180	<i>Betula pendula</i>	Bouleau verruqueux	-170
<i>Quercus petraea</i>	Chêne sessile	-2,4	<i>Juglans cinerea</i>	Noyer cendré	-170	<i>Fagus sylvatica</i>	Hêtre commun	-160
<i>Quercus pubescens</i>	Chêne pubescent	-2,2	<i>Abies alba validé</i>	Sapin pectiné validé	-140	<i>Picea abies</i>	Épicéa commun	-140
<i>Cedrus atlantica</i>	Cèdre de l'Atlas	-2,2	<i>Picea abies</i>	Épicéa commun	-120			
<i>Castanea sativa</i>	Châtaignier commun	-1,9	<i>Pinus strobus</i>	Pin de Weymouth	-110			
<i>Sorbus domestica</i>	Cormier	-0,8	<i>Larix decidua</i>	Mélèze d'Europe	-50			
<i>Liquidambar styraciflua</i>	Copalme d'Amérique	0,6	<i>Populus tremula</i>	Peuplier tremble				
<i>Pinus pinaster</i>	Pin maritime	1,2	<i>Ulmus laevis</i>	Orme lisse				
<i>Quercus ilex</i>	Chêne vert	2	<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne commun				
<i>Pinus taeda</i>	Pin à l'encens	3	<i>Alnus glutinosa</i>	Aulne glutineux				
<i>Quercus suber</i>	Chêne liège	4						

Seuls 10 % des points étudiés dans l'aire de répartition ont un TN03, un P-ETP0410 ou P-ETP0608 inférieurs aux valeurs mentionnées. « Validé » signifie que le seuil est validé par une étude sur le territoire français, sur la base d'un protocole similaire à celui utilisé pour « Chênaies atlantiques » (encadré page 19). Un grand nombre de valeurs n'ont pas donc encore été validées à l'échelle du territoire français, elles sont à prendre avec beaucoup de précaution. Tous les ETP de références mentionnées sont calculées selon la formule de Turc.

Dans le cas où l'essence est acceptée « climatiquement », elle est retranscrite en **gras, en verte**. Ce premier diagnostic positionne l'essence dans sa niche climatique. Il est surtout utile au moment du renouvellement de peuplement (reboisement, régénération naturelle) et pour les essences pour lesquelles on ne dispose pas encore de carte de vigilance climatique.

Exemple de la fiche<sup>1)</sup> : TN03 = 2,1. Les essences exclues sont les chênes liège et vert, le pin à l'encens (*Pinus taeda*). Elles sont reprises en rouge et barrées doublement dans le tableau des essences retenues pour le bilan climatique trentenaire.

Pour le P-ETP d'avril à octobre inclus, le bilan est positif pour la moyenne 1981-2010 avec + 3 mm et légèrement négatif pour la moyenne 1981-2010 + 1 °C avec - 37 mm (+ 3 mm - 40 mm = - 37 mm). Aucune des essences n'est rejetée sur le déficit hydrique climatique d'avril à octobre inclus.

Le P-ETP de juin à août inclus (P-ETP0608) est de - 155 mm en moyenne de 1981 à 2010. Les essences exclues (barre de l'histogramme en rouge) selon ce critère sont le mélèze d'Europe, le pin de Weymouth, le sapin pectiné et l'épicéa commun. Elles sont reprises en rouge et barrées doublement dans le tableau des essences retenues du bilan climatique moyenne trentenaire.

En cas d'augmentation de 1°C de la température moyenne, le P-ETP0608 moyen serait de - 185 mm (- 155 mm - 30 mm). Les essences

déconseillées (barre de l'histogramme en orange) sont le hêtre commun, le bouleau verruqueux, le copalme d'Amérique et le noyer cendré. Elles sont notifiées dans le tableau en couleur orange barré simplement. Les essences en vert (et donc non barrées) sont acceptées au regard de ce premier bilan climatique.

Dans le cas de la parcelle diagnostiquée, le douglas n'est pas exclu ni déconseillé sur la base de ce premier bilan climatique, lequel reste toutefois insuffisant pour définir le niveau de vigilance.

**Partie 2 - Carte de vigilance climatique**

La prise en compte des effets des à-coups climatiques<sup>2)</sup> et leur récurrence est particulièrement importante dans un contexte de climat changeant. La partie du diagnostic climatique est basée sur les valeurs trentenaires. Il est important de comprendre que ces données ne permettent pas de prendre en compte finement des à-coups climatiques pouvant engendrer des pertes de vitalité. En effet, la moyenne des données sur trente ans lisse les effets liés aux extrêmes du climat.

**L'à-coup climatique étant un événement plutôt rare voire très rare pour l'instant (exemple de l'année 2003), il n'est pas directement détectable à partir de moyennes climatiques trentenaires.**

1) page 59

2) voir la théorie du boxeur page 26.

2) 3<sup>e</sup> page de la fiche.

1) voir l'article des cartes de vigilance page 34.

3) voir l'article de l'impact de 2003 sur le douglas page 46

La deuxième partie du diagnostic est associée directement aux cartes de vigilance et vise à définir le niveau de vigilance pour l'essence étudiée en tenant compte des à-coups climatiques. Dans le cas spécifique du douglas sur le Tarn et l'Hérault, deux niveaux de vigilance sont définis. Le premier niveau de vigilance (figure 2) est déterminé par la probabilité de récurrence d'une année à fort déficit hydrique climatique. Les seuils de vigilance sont donc définis en fonction de la répétition des années à fort déficit hydrique, soit des années pour lesquelles le P-ETP de juin à août inclus passe sous le seuil de - 260 mm, avec un maximum de 15 % pour la vigilance modérée, 33 % pour la vigilance élevée et plus de 33 % pour la vigilance maximale<sup>9)</sup>. À cet égard, la parcelle visitée se situe actuellement en zone de vigilance modérée (1981-2010). Suivant l'hypothèse de l'augmentation moyenne des températures annuelles de 1 °C (hypothèse 1981-2010 + 1 °C), le douglas resterait sur ce critère en zone de vigilance modérée, avec une probabilité de récurrence des années à fort déficit hydrique de 13 %.

Ce niveau de vigilance, lié à l'épisode extrême, est également représenté par la carte de vigilance du bilan climatique<sup>9)</sup>. Cette carte, basée sur le modèle numérique de terrain, est définie à la résolution de 25 m. Elle prend en compte l'altitude, l'exposition, la position topographique (facteurs de compensation ou d'aggravation du climat)<sup>9)</sup>.

*Exemple de la fiche :* Le peuplement de douglas est situé à une altitude assez élevée (718 m), généralement favorable à cette essence dans le Tarn. Mais son exposition sud, sa situation à mi-versant et sur une pente de 18 % a accentué les effets climatiques lors d'épisodes de forte canicule en 2003. Le peuplement de douglas diagnostiqué est situé en zone de vigilance élevée. Cela signifie que, si un événement climatique comme 2003 se reproduisait, il est probable que le peuplement soit affecté par de la mortalité.

### Rubrique 5 – Diagnostic du sol

La rubrique n° 5 permet de diagnostiquer la présence de facteurs aggravants liés au sol. Y a-t-il présence d'une hydromorphie marquée dans les 60 premiers centimètres de sol. La richesse chimique et la disponibilité en eau sont représentées sur l'écogramme de la Flore forestière française. La réserve utile (RU) est quantifiée à l'aide d'une tarière pédologique, ou mieux d'une fosse pédologique. Vu la difficulté d'estimation de la réserve utile, trois grandes classes de réserve utile ont été retenues :

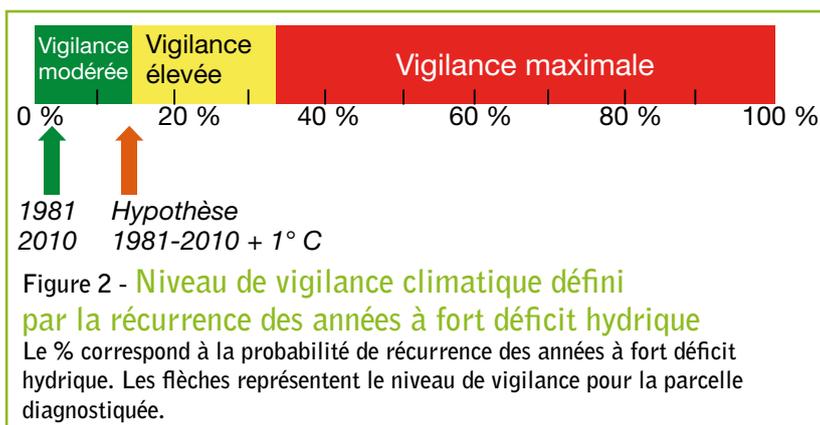
- sol superficiel RU < 70 mm, sol profond RU > 200 mm et RU de 70 à 200 mm pour les situations intermédiaires.

### Rubrique 6 – Bilan pédoclimatique

Lorsqu'un peuplement est soumis à un événement climatique extrême de type sécheresse, les effets compensateurs ou aggravants jouent un rôle important pour limiter ou amplifier les effets de la sécheresse. Le bilan en eau d'une parcelle est évalué à partir de la clé de détermination présentée à la figure 6 p. 32. Les critères nécessaires à l'usage de cette clé sont la position topographique (rubrique 3), l'hydromorphie et la réserve utile (rubrique 5).

C'est au final, le croisement du bilan en eau et de la zone de vigilance climatique qui détermine le bilan pédoclimatique et précise ainsi si l'essence est en station ou non (3<sup>e</sup> page rubrique 6).

*Exemple de la fiche :* Le peuplement de douglas est situé à mi-versant, il n'y a pas d'hydromorphie et la réserve utile est de 190 mm. Le bilan en eau est NEUTRE (clé de détermination figure 6 p. 32). Le croisement du bilan en eau NEUTRE et la zone



Le deuxième niveau de vigilance correspond à la probabilité que le peuplement de douglas vert soit affecté par une mortalité suite à un déficit hydrique climatique et des températures extrêmes similaires à celles de l'année 2003. Ce niveau de vigilance est défini par la figure ci-dessous.

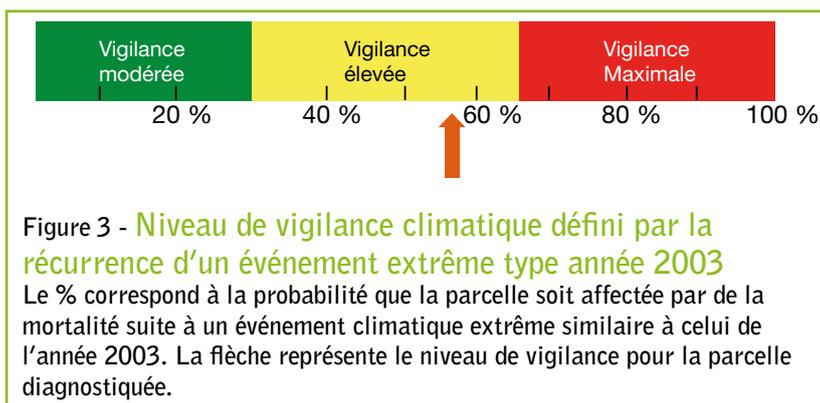
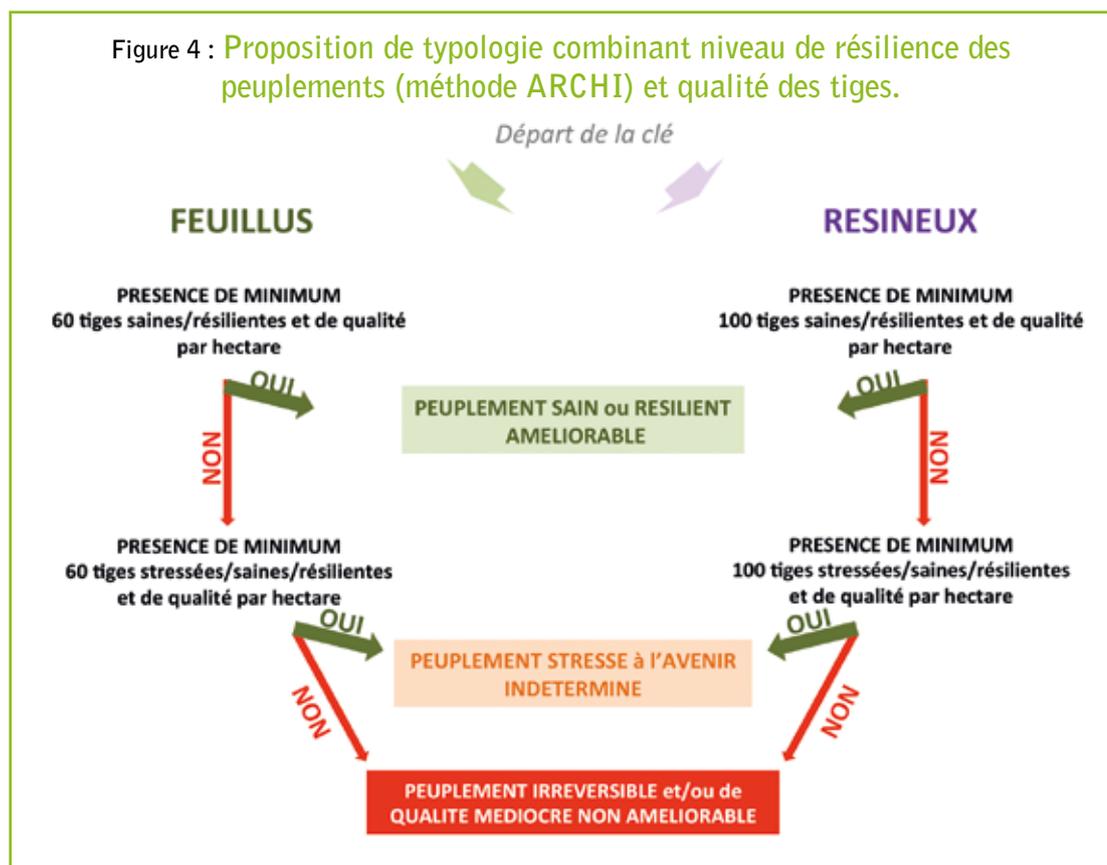


Tableau 2 : Caractéristiques dendrométriques du peuplement

	Très favorable	Favorable	Moyenne	Médiocre	
Indice de fertilité	1	2	3	4	
Classement des grumes sur pied	A	B	C	D	
	Faible	Optimale	Elevée	Très élevée	
Surface terrière (m <sup>2</sup> / ha)	< 20	20 - 35	35 - 45	> 45	
	Diam moyen < 30 cm	Diam moyen 30 à 50 cm	Diam moyen 50 à 65 cm	Diam moyen > 65 cm	Futaie irrégulière
Diamètre moyen des grumes	Petit bois	Bois Moyen	Gros bois	Très gros bois	Diam des bois variables

Figure 4 : Proposition de typologie combinant niveau de résilience des peuplements (méthode ARCHI) et qualité des tiges.



de vigilance climatique ELEVEE nous indique que la station est moins favorable au douglas. Le douglas est donc en limite stationnelle.

un diamètre de grume exploitable. Le niveau de compétition est élevé entre les tiges, la surface terrière est supérieure à 45 m<sup>2</sup> / ha.

## Rubrique 7 – Diagnostic du peuplement

### 7.1 - Dendrométrie

Un relevé dendrométrique de la parcelle est vivement conseillé pour connaître la croissance, la productivité (indice de fertilité), les dimensions (diamètre, voire volume) et la densité de la parcelle (nombre de tiges par hectare et surface terrière).

Il est aussi intéressant de noter la qualité des bois sur pied (classement visuel des grumes sur pied) (tableau 2).

Exemple de la fiche : Le peuplement équienné de douglas examiné se situe sur une classe de fertilité favorable (Indice de fertilité 2). Âgé de 45 ans, il atteint un diamètre de 50 cm en moyenne, soit

### 7.2 - Le niveau de résilience du peuplement défini par la méthode ARCHI

La méthode ARCHI diagnostique le niveau de résilience du peuplement. Elle permet d'évaluer le potentiel de réaction suite à un stress. Une clé de détermination est développée pour chaque essence étudiée. Son utilisation nécessite une formation préalable. À ce jour, ce type de clé existe pour les chênes blancs, le douglas, le sapin et le châtaignier. À défaut de clé ARCHI pour l'essence étudiée, nous préconisons d'utiliser le protocole DEPEFEU<sup>1)</sup>.

Le diagnostic ARCHI est effectué sur les 20 arbres dominants et co-dominants situés autour du centre de la placette, les arbres dominés n'étant jamais pris en compte. À partir de la

1) voir les notions de référence p. 14.

**Les outils d'aide à la décision comme BioClimSol sont complémentaires des catalogues des stations**

**VRAI.** La nouveauté de l'outil BioClimSol est principalement axée sur l'intégration du risque lié aux évolutions du climat en tenant compte du peuplement en place (méthode ARCHI), des données climatiques locales et des facteurs de compensation ou d'aggravation du climat. La première entrée de l'outil de diagnostic est donc le climat, puisqu'il a déjà changé et variera durant les prochaines décennies. À l'inverse, pour les catalogues de stations, les éléments du diagnostic sont souvent floristiques, pédologiques et topographiques. Le risque lié à l'évolution climatique n'est généralement pas pris en compte.

**Il est possible, à l'aide des données climatiques fournies par Météo-France, de cartographier des événements climatiques extrêmes (exemple l'année 2003) à des échelles fines (résolution à la taille de parcelle)**

**FAUX.** Par définition, les événements climatiques extrêmes sont rares et difficiles à prédire. L'année 2003 a été marquée par une sécheresse et des températures estivales records, sur une très grande majorité du territoire. Il est impossible, actuellement, de spatialiser ces données climatiques extrêmes à une échelle plus fine que 8 km x 8 km en utilisant les données Météo-France. Pourtant, le lecteur attentif aura remarqué que la carte de vigilance proposée page 61 est à la résolution de 25 m. Cela est rendu possible par l'usage du modèle numérique de terrain (et non par l'emploi des données météorologiques), croisé avec les photos aériennes de 2003 pour l'exemple du douglas dans le Tarn. Ces photos ont permis de cartographier finement les parcelles de douglas affectées par de la mortalité (article p. 46). En tenant compte des effets compensateurs liés à l'exposition et à la topographie, cette carte permet de diagnostiquer 8 fois sur 10 les peuplements touchés par de la mortalité.

1) voir l'article p. 46.

**Remerciements**

L'élaboration de cette fiche de vigilance est rendue possible par le travail en cours sur le territoire du Parc naturel régional du Haut-Languedoc. Elle est le fruit d'une collaboration étroite entre les services du Parc, les CRPF Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon, l'IDF, les pédologues locaux et Météo-France. Elle a bénéficié des financements des régions Midi-Pyrénées, Languedoc-Roussillon, des conseils généraux de l'Hérault et du Tarn. Ces travaux devraient aboutir à une version finalisée de BioClimSol adaptée à ce territoire. Nous remercions tout particulièrement J.-P. Barthès, A. Delaunois, G. Martin-Horcajo, P. Marty, X. Beaussart, P. Bertrand, E. Rouyer, J.-P. Ortisset, M. Lagacherie, J.-M. D'Orazio et R. Heymerick. Nous remercions également Météo-France et AgroParisTech pour la fourniture des données météo et la relecture de la fiche.

mesure des 20 arbres, il est possible de définir le niveau de résilience de la placette en traçant un graphique circulaire en camembert. Ce graphique définit la proportion des différents types ARCHI. Rapportée à la densité, cette proportion permet de connaître la densité des tiges dominantes et co-dominantes par type ARCHI et ainsi d'estimer le niveau de résilience du peuplement (Figure 4 p. 57). Cette typologie est encore provisoire et sera améliorée avec l'accumulation des résultats et des diagnostics ARCHI réalisés durant la phase de développement de l'outil.

*Exemple de la fiche :* 65 % des tiges diagnostiquées sur la parcelle sont de type « stressé » selon la méthode ARCHI. La densité par hectare des tiges co-dominantes et dominantes est de 252 tiges/ha. Moins de 100 tiges par hectare sont résilientes ou saines. 164 douglas par hectare dominants ou co-dominants sont classés stressés et de qualité. Le peuplement est logiquement classé en état de stress à l'avenir indéterminé.

**Rubrique 8 - Pistes de recommandations sylvicoles**

L'ensemble du diagnostic, associé à l'analyse des sept rubriques de la fiche, permet de proposer des recommandations sylvicoles. Il ne s'agit en aucun cas d'un itinéraire technique détaillé, mais de suggestions que le gestionnaire doit intégrer à sa réflexion et adapter au contexte local. Les pistes de recommandations sylvicoles sont ex-

traites de l'étude du douglas dans le Tarn<sup>1)</sup>. Elles tiennent compte du niveau de vigilance climatique et du niveau de résilience du peuplement.

**Perspectives**

La fiche de vigilance climatique met l'accent sur la nécessité de prendre en compte le climat comme première entrée du diagnostic. Les évolutions récentes et prévisibles du climat imposent ce choix. Ce diagnostic souhaite intégrer la notion d'incertitude liée à ces évolutions climatiques, évaluée par le niveau de vigilance et donc la probabilité de récurrence d'événements climatiques pouvant marquer durablement la vitalité des arbres. Le climat n'est bien entendu pas l'unique facteur à observer et la présence de facteurs aggravants ou compensant le climat (sol, topographie, ...) doit être prise en compte dans l'outil de diagnostic. Le niveau de résilience du peuplement et de chaque arbre est estimé avec la méthode ARCHI. Ce diagnostic permet d'estimer la réaction des arbres face au stress qu'ils subissent. La fiche proposée pour le douglas est très détaillée, car elle a bénéficié d'études approfondies, notamment dans le cadre du travail en cours dans le Parc naturel régional du Haut-Languedoc. Ce niveau de précisions n'est hélas pas encore atteint pour la grande majorité des essences. C'est donc là un travail majeur qui reste à conduire pour que BioClimSol devienne opérationnel sur le plus grand nombre possible d'essences. ■

## 1. Références de la parcelle

X Lambert 93 : 657 XXX

Y Lambert 93 : 627XXXX

(les coordonnées ne sont pas retranscrites dans leur intégralité)

Y WGS84 : N 43.XXXX

X WGS84 : E 2.XXXX

Département : 81

Commune : XXXXXX

Lieu-dit : XXXXX

Propriétaire : M Dupont A.

Type de peuplement : Futaie de douglas vert



## 2. Données climatiques 1981-2010\*

TMAN °C	11,0
TN3 °C	2,1
PAN mm	1345
P0410 mm	684
ETPAN mm	808
P-ETP0410 mm	3 (- 37)
P-ETP0608 mm	- 155 (- 185)

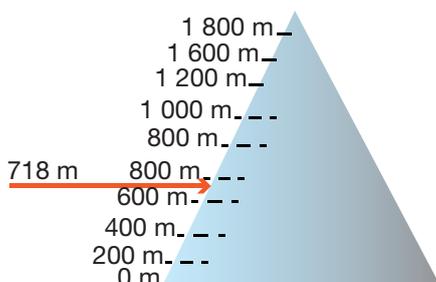
Remarques : les valeurs sur fond jaune équivalent aux valeurs retenues pour le bilan climatique. Elles correspondent aux données de 1981-2010 pour TN3 (pas d'évolution du risque de gelées) et aux données 1981-2010 en rouge et 1981-2010 + 1 °C en orange pour les données du déficit hydrique climatique (P-ETP)

1°C en + → P-ETP0410 : données 1981-2010 - 40 mm

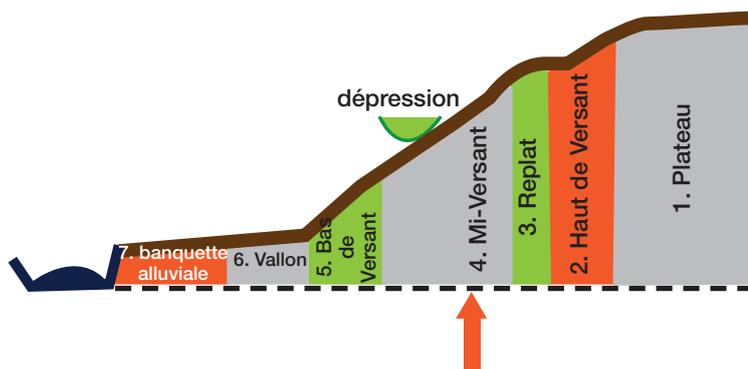
→ P-ETP0608 : données 1981-2010 - 30 mm

## 3. Facteurs de compensation ou d'aggravation du climat

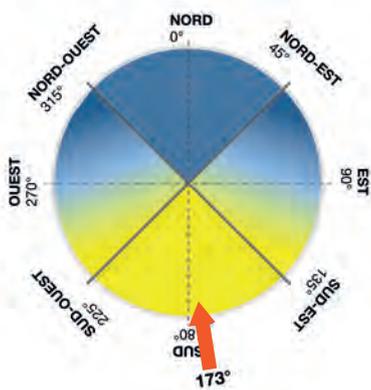
A. Altitude : 718 m



E. Topographie : 4. MI-VERSANT



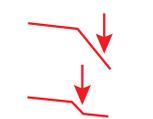
B. Exposition : 173 °



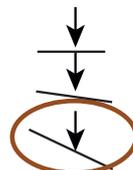
F. Topographique : apport ou perte en eau :

2. APPORT = PERTE

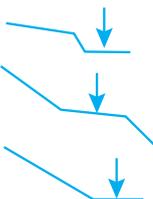
1. Perte > Apport



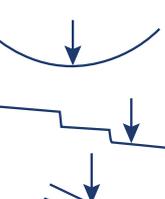
2. Apport = Perte



3. Apport > Perte



4. Apport >> Perte



1 Perte d'eau latérale

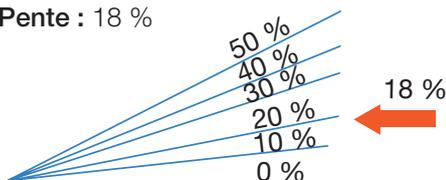
2 Apport = Perte

3 Apport > Perte

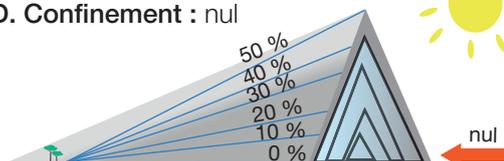
4 Approvisionnement en eau important

© d'après Jabiol et al.

C. Pente : 18 %



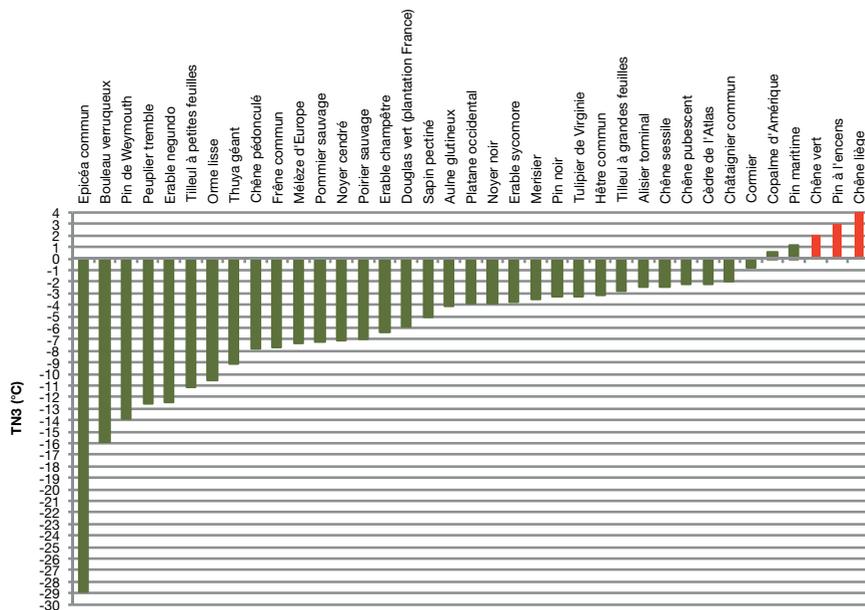
D. Confinement : nul



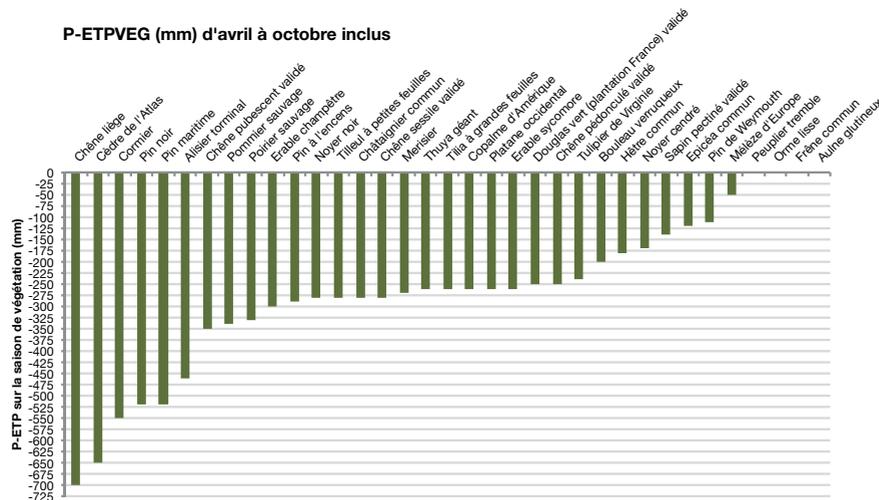
## 4. Bilan climatique

Moyenne trentenaire 1981-2010 + 1°C

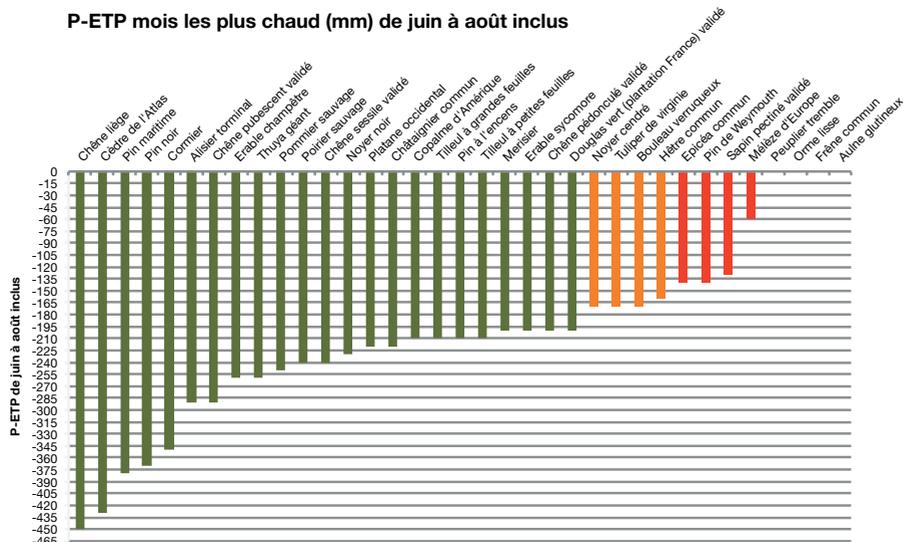
Température minimale de mars (moyenne trentenaire)



P-ETPVEG (mm) d'avril à octobre inclus



P-ETP mois les plus chaud (mm) de juin à août inclus



### Essences retenues pour le bilan climatique trentenaire liste non exhaustive

- |                                     |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Alisier torminal                    | Frêne commun- (essence-azonale)      |
| Aulne glutineux- (essence-azonale)- | Hêtre commun                         |
| Bouleau verruqueux                  | Mélèze d'Europe                      |
| Cèdre de l'Atlas                    | Merisier                             |
| Châtaignier commun                  | Noyer cendré                         |
| Chêne liège                         | Noyer noir                           |
| Chêne pédonculé validé              | Orme lisse- (essence-azonale)-       |
| Chêne pubescent validé              | Peuplier tremble- (essence-azonale)- |
| Chêne sessile validé                | Pin à l'encens                       |
| Chêne vert                          | Pin de Weymouth                      |
| Copalme d'Amérique                  | Pin maritime                         |
| Cormier                             | Pin noir                             |
| Douglas vert validé                 | Platane occidental                   |
| Epicéa commun                       | Poirier sauvage                      |
| Érable champêtre                    | Pommier sauvage                      |
| Érable negundo- (essence-azonale)-  | Sapin pectiné- validé                |
| Érable sycomore                     | Thuya géant                          |
|                                     | Tilleul à grandes feuilles           |
|                                     | Tilleul à petites feuilles           |
|                                     | Tulipier de Virginie                 |

Pour les stations situées en position topographique 6 et 7 (schéma B page précédente) les apports latéraux en eau étant élevés, le P-ETP n'est plus un critère prépondérant pour le choix des essences.

- Barré double = essence exclue ;
- Barré simple : essence déconseillée

#### voir données climatiques page 59

#### \* Signification, source et résolution des données climatiques

**TMAN °C** : température moyenne annuelle (moyenne trentenaire) - résolution 1 km source Aurelhy (Météo-France) période 1981-2010

**TN3 °C** : température moyenne minimale du mois de mars (moyenne trentenaire) - Résolution 1 km, source Aurelhy (Météo-France) période 1981-2010

**PAN mm** : précipitation annuelle de janvier à décembre inclus (moyenne trentenaire) - Résolution 1 km, source Aurelhy (Météo-France) période 1981-2010

**P0410 mm** : précipitation d'avril à octobre inclus (moyenne trentenaire) Résolution 1 km, source Aurelhy (Météo-France) période 1981-2010

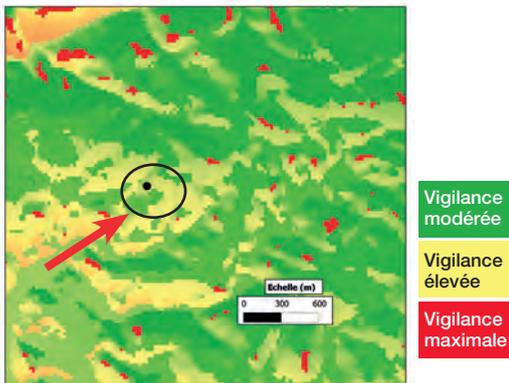
**ETPAN mm** : évapotranspiration potentielle annuelle (moyenne trentenaire). ETP Turc. Résolution 50 m source modèle hybride Aurelhy (Météo-France) et Digitalis (AgroParisTech). Période 1981-2010

**P-ETP0410 mm** : déficit hydrique climatique en eau d'avril à octobre inclus (moyenne trentenaire). ETP Turc. résolution P 1 km et ETP 50 m source modèle hybride Aurelhy (Météo-France) et Digitalis (AgroParisTech). Période 1981-2010 = différence entre P0410 et ETP0410 (moyenne trentenaire)

**P-ETP0608 mm** : déficit hydrique climatique en eau durant les mois les plus chauds (juin à août inclus) (moyenne trentenaire) ETP Turc. Résolution 50 m source modèle hybride Aurelhy (Météo-France) et Digitalis (AgroParisTech). Période 1981-2010 = différence entre P0608 et ETP0608 (moyenne trentenaire).

## 4. Carte de vigilance du douglas vert :

Zoom sur la parcelle étudiée à l'aide du logiciel de cartographie

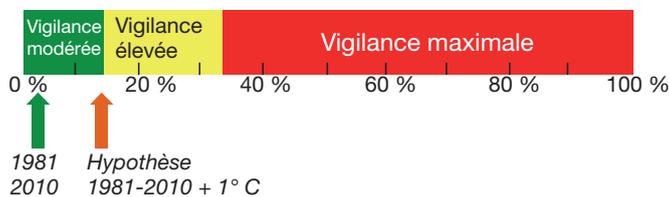


Cette carte de vigilance climatique représente la probabilité de présence de mortalité sur la parcelle suite à un événement climatique extrême comme 2003. Elle est validée sur le secteur du Tarn et de l'Hérault. (Projet Atlas pédoclimatique sur le PNR Haut-Languedoc voir page 46).

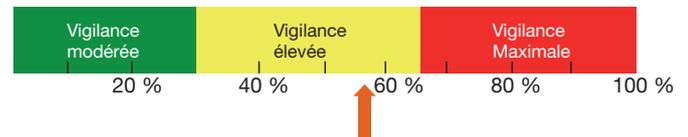
Cette carte est basée sur le modèle numérique de terrain de l'IGN. Résolution au 25 m. Prise en compte de l'effet de l'exposition et altitude. Les hauts de versant sont mis en zones de vigilance maximale car ce sont des situations topographiques où les départs en eau latéraux sont importants. Cette carte ne prend pas en compte le sol.

Attention, carte provisoire et expérimentale. Avant toute décision de gestion, il faut compléter les données indicatives de cette carte par une analyse de la station et du peuplement.

Niveau de vigilance climatique déterminé par la probabilité de récurrence d'une année à fort déficit hydrique climatique :



Niveau de vigilance climatique déterminé par la probabilité que le peuplement de douglas vert soit affecté par la présence de mortalité suite à un déficit hydrique climatique et des températures extrêmes similaires à l'année 2003 :



## 5. Diagnostic-sol

### 5.1 Hydromorphie



### 5.3 Réserve utile

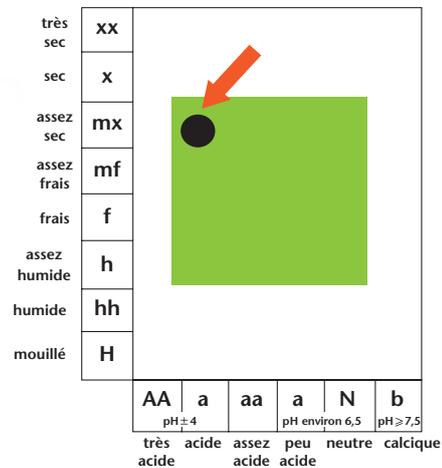
RÉSERVE UTILE (mm) : moyenne



190 mm

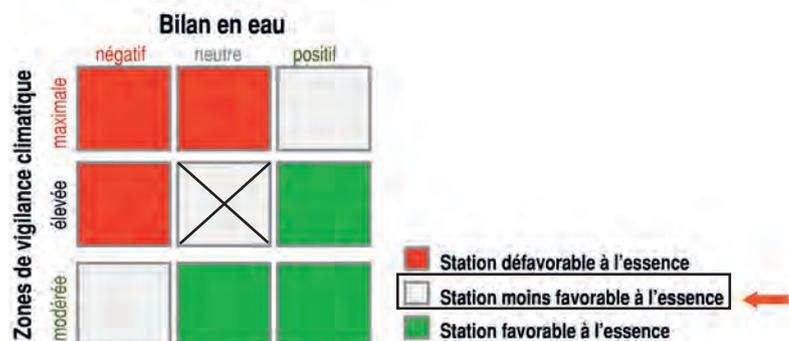
Pas de contraintes particulières au niveau de la richesse chimique du sol. Le bilan en eau du sol est classé neutre (classement à partir de la clé figure 6 page 32)

### 5.2 Richesse chimique



Aire favorable à la production de bois d'œuvre de qualité

## 6. Bilan pédoclimatique

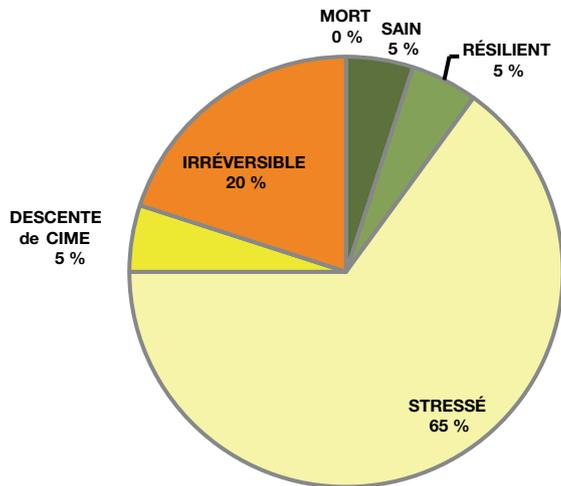


## 7. Diagnostic du peuplement

### 7.1 Dendrométrie

Âge (ans)	45	Hauteur dominante (m)	32
Indice de fertilité	2	Nombre de tiges/ha dominantes ou co-dominantes	220
Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	45	Diamètre moyen (cm)	50
Qualité moyenne des grumes sur pied	B		

### 7.2 Niveau de résilience du peuplement défini par le protocole ARCHI



TYPE	Nombre de tiges par hectare dominantes ou codominantes
SAIN	13
RESILIENT	13
STRESSE	163
DESCENTE de CIME	13
IRREVERSIBLE	50
MORT	0



**Peuplement en état de stress**



© G. Martin-Horcajo

Type ARCHI sain



© G. Martin-Horcajo

Type ARCHI résilient



© G. Martin-Horcajo

Type ARCHI irrésilient



© G. Martin-Horcajo

Type ARCHI stressé



© C. Drénou

Type ARCHI descente de cime



© G. Martin-Horcajo

Type ARCHI mort

## 8. Pistes de recommandations sylvicoles

Ce peuplement est situé en zone de vigilance modérée en termes de répétition de déficit hydrique fort, même en prenant l'hypothèse de l'augmentation de 1 °C de la température moyenne (normale 1981-2010). Ce peuplement est en versant sud (effet aggravant du climat). Il est situé en zone de vigilance élevée, si une anomalie climatique extrême de type année 2003 se reproduisait (carte de vigilance p. 60). Ce peuplement est d'ailleurs classé en état de stress (méthode ARCHI), à l'avenir indéterminé selon la clé proposée page 57. Le sol ne présente pas de contrainte particulière défavorable au douglas vert. Le diamètre d'exploitabilité commercialisable pour le douglas (ø130 > 50 cm) est atteint.

Le panachage de zones de vigilance élevée (couleur jaune de la carte page précédente) et modérée (couleur verte de la carte page 60) sur la même parcelle démontre l'importance des effets compensateurs sur le risque de mortalité lorsqu'un événement de type extrême comme 2003 se produit. Dans la zone de vigilance élevée (majoritaire sur cette parcelle exposée au sud), si le peuplement est renouvelé, il paraît pertinent de préconiser un mélange de douglas avec des essences plus résistantes à la sécheresse comme le cèdre de l'Atlas ou les pins maritime et laricio pour améliorer la résilience du peuplement.

Dans la zone de vigilance modérée, le douglas vert peut encore être renouvelé à condition de mener une sylviculture adéquate.

# Les perspectives pour l'outil BioClimSol

par Thomas Formery

**T**out est perfectible, voire contestable, mais sans éléments de base, il n'est pas possible de construire.

BioClimSol se veut un outil de diagnostic sylvo-climatique de terrain, élaboré pour répondre aux interrogations des sylviculteurs et appuyer l'expertise de terrain face au risque de dépérissements.

Il a pour objectif de cartographier les « zones de vigilance climatique », de les coupler au diagnostic de la station et du peuplement et ainsi d'affiner les conseils et orientations à adopter pour la sylviculture.

Les travaux de construction de l'outil ont principalement porté sur le traitement des données climatiques et leur traduction sur le terrain, l'observation des limites climatiques d'essences comme les chênes ou le douglas, l'interaction avec les données pédologiques et stationnelles, et les conséquences en termes de sylviculture.

D'autres essences seront étudiées progressivement. La grande force de BioClimSol est sa capacité d'adaptation au fur à mesure des validations de terrain. De plus, il est construit par déclinaisons régionales qui permettent de l'affiner et l'adapter ; ainsi les techniciens du développement forestier peuvent aisément se l'approprier.

Mobilisés par l'adaptation des forêts au changement climatique, les personnels du CNPF travaillent ensemble à l'amélioration de cet outil, afin d'être en phase avec les attentes et besoins concrets des forestiers.

Les correspondants climatiques de chaque CRPF partagent l'information, animant ainsi un réseau actif en mutualisant leurs compétences. Cette synergie ainsi enclenchée confirme des intuitions ou des innovations dans la compréhension des dépérissements observés et la prise en compte de l'évolution du climat.

À terme, un outil numérique utilisable sur le terrain *via* un GPS, un ordinateur portable ou une tablette numérique sera mis au point.

Ce développement de l'outil numérique s'impose pour BioClimSol pour 4 raisons :

> l'accès aux bases de données géoréférencées s'élargit sans cesse : climat, sol,...

- > l'usage de données géoréférencées et cartographiées impose l'emploi du GPS et d'un logiciel de cartographie ;
- > l'évolution des connaissances facilite la mise à niveau régulière des cartes de vigilance climatique et donc de l'outil ;
- > bien sûr, la facilité d'emploi et d'interactivité sur le terrain.

L'outil BioClimSol est en développement, en évolution constante pour être décliné par essence. Dès à présent, il constitue un complément à l'expertise de terrain du technicien et un appui aux décisions de gestion du sylviculteur.

J'adresse mes vifs remerciements pour l'important travail accompli par l'ensemble du personnel du Centre national de la propriété forestière. Mes remerciements vont également aux financeurs et partenaires scientifiques qui rendent ce travail possible.

## Remerciements

Les auteurs remercient pour leurs appuis techniques et leurs relectures :

- > Vincent Badeau (Inra), Jean-Charles Bastien (Inra), Véronique Chéret (École d'Ingénieurs de PURPAN), Hugues Claessens (Université de Liège – Gembloux), Ian Ondo (AgroParisTech) et Christian Piedallu (AgroParisTech) ;
- > Jacques Becquey, Thomas Brusten, François Charnet, Michel Chartier, Philippe Couvin, Christophe Drénou, Thomas Formery, Sylvain Gaudin, Sabine Girard, Pierre Gonin, Arnaud Guyon, Éric Hincelin, Laurent Larrieu, Patrick Lechine, David Mourisset, Jean-Paul Nebout, Claude Nigen, Julie Pargade, Bruno Pasturel, Céline Perrier, Olivier Picard, Jean-Baptiste Reboul, Philippe Riou-Nivert, Bruno Rolland, Emmanuel Rouyer, Jérôme Rosa, Éric Sevrin, Samuel Six et Philippe Thévenet du CNPF ;
- > Elisabeth et Jacques Berry, Marie-France Crave, Daniel Égré, Michel Hubert, Bertrand Le Nail, Jérôme Loutrel, Roland Martin, Francis Mathieu, Alain de Montgascon, membres du comité de lecture de Forêt-entreprise ;
- > ainsi que les propriétaires forestiers qui ont contribué aux expérimentations sur le terrain.

## Bibliographie

- Adams H.D. et al., 2013. *Nonstructural leaf carbohydrate dynamics of pinus edulis during drought-induced tree mortality reveal role of carbon metabolism in mortality mechanism*. New phytologist 197: 1142-1151.
- Allen C.D. et al., 2010. *A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests*. Forest Ecology and Management 259 (2010) 660-684.
- Baize D., Jabiol B., 1995 & 2011. *Guide pour la description des sols*. Inra Éditions, 376 p. 2<sup>e</sup> édition revue et augmentée, Quae 2011, 430 p.
- Becker M. & Levy G., 1983. *Le dépérissement du Chêne. Les causes écologiques. Exemple de la forêt de Tronçais et premières conclusions*. Revue Forestière française 35, n° 5, pp. 341-356.
- Becker M. & Levy G., 1982. *Le dépérissement du Chêne en forêt de Tronçais. Les causes écologiques*. Annales des Sciences Forestières 39, n° 4, 1982, pp. 439-444.
- Berger C., 2013. *Détermination de la sensibilité au changement climatique du Chêne pubescent en région PACA*. Bordeaux Sciences Agro. 34 p.
- Bouvier M., 2012. *Les trois chênes indigènes et leurs intermédiaires, des critères pour y voir plus clairs*. Forêt-entreprise n° 207, pp. 13-20.
- Brancherieu L., 2013. *Comparaison du comportement au séchage entre chêne pubescent et chêne pédonculé*. Cirad, 19 p.
- Bréda N et Peiffer M., 1999. *Étude du bilan hydrique des chênaies hydriques de la forêt de la Harth et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes*. Rapport scientifique, convention ONF-Inra, 60 p.
- Bréda N., 1999. *Analyse rétrospective de la croissance radiale des chênes de la forêt domaniale de La Harth (Haut Rhin)*. Rapport scientifique, convention ONF-Inra, 50 p.
- Bréda N. 1994. *Analyse du fonctionnement hydrique des chênes sessile et pédonculé en conditions naturelles ; effets des facteurs du milieu et de l'éclaircie*. Inra Nancy I, Thèse de doctorat, 59 p.
- Bréda N., Lefevre Y., Badeau V., 2002. *Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation*. La Houille Blanche, 3-2002, Forêts et Eau, pp. 25-40.
- Brendan Choat et al., 2012. *Global convergence in the vulnerability of forests to drought*. Nature vol 491, pp. 752-755.
- Brethe A., 2003. *Les relevés des paramètres du sol en vue d'une estimation des contraintes et de ses aptitudes pour la mise en valeur forestière*. ONF, DT, 32 p.
- Cailleret M., 2011. *Causes fonctionnelles du dépérissement et de la mortalité du sapin pectiné en Provence*. Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, 366 pages.
- Charru M., 2012. *La productivité forestière dans un environnement changeant. Caractérisation multi-échelle de ses variations récentes à partir des données de l'Inventaire Forestier National (IFN) et interprétation environnementale*. Thèse de doctorat AgroParisTech, 417 p.
- Courbet F., Lagacherie M., Ladier J., Ripet C., Riou-Nivert Ph., Huard F., Amandier L., Paillassa E., 2013. *Le Cèdre en France face au changement climatique : bilan et recommandations*. RMT Aforce, 29 p.
- Delatour C., 1983. *Les dépérissements de Chênes en Europe*. Revue Forestière Française Vol. XXXV n°3, pp. 265-282.
- Drénou Ch., Bouvier M., Lemaire J., 2011. *La méthode de diagnostic ARCHI, application aux chênes pédonculés dépérissants*. Forêt-entreprise n°200, pp. 4-15.
- Drénou Ch., Bouvier M., Lemaire J., 2012. *Rôles des gourmands dans la résilience des chênes pédonculés dépérissants*. Forêt wallonne n°116, pp. 42-55.
- Drénou Ch., 2012. *La méthode ARCHI*. Forêt-entreprise n°203, pp. 29-31.
- Drénou Ch., Lambert J., Chéret V., 2014. *Jumelle et satellites : des outils pour la surveillance sanitaire des forêts*. Forêt-entreprise n°214, pp. 12-21.
- Granier A., Badeau V., Bréda N., 1995. *Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers*. Revue Forestière Française. vol. 47, n° spécial, pp.59-68.
- Gravier H., 2012. *Étude du dépérissement des sapinières du Livradois Forez*. École supérieure des sciences agronomiques de Bordeaux Aquitaine. Mémoire de fin d'études, 52 p.
- Guyon A., Weben Ch., Lemaire J., Drenou Ch., 2013. *Le programme « Chênaies atlantiques face au changement climatique : comprendre et agir »*. Forêt-entreprise n°211, pp. 34-37.
- Hijmans R.-J., Cameron S.E., Parra J.-L., Jones P.G. & Jarvis A., 2005. *Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas*. International Journal of Climatology 25: 1965-1978.
- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailles J., Hilal M., Wavresky P., 2010. *Les types de climats en France, une construction spatiale*. Cybergeog: European Journal of Geography, pp.1-21.
- Lebourgeois F., Aussenac R., Lemaire J., Nequier T., Righi J.M., 2013. *Croissance de la Châtaigneraie limousine et climat. Réflexion sur la place du Châtaignier dans les prochaines décennies*. Revue Forestière française vol. 64, n°6, p. 751-764.
- Lebourgeois F., Piedallu C., 2005. *Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques*. Revue Forestière française vol. LVII n°4, pp. 331-356.
- Lebourgeois F., Rathgeber C., Ulrich E., 2010. *Effet de la variabilité climatique et des événements extrêmes sur la croissance de Abies alba, Picea abies et Pinus sylvestris en climat tempéré français*. Revue Forestière Française. vol. 62, n°1, pp. 7-23.
- Lebourgeois F., 2006. *Climate response of fir (Abies Mill.) and spruce (Picea abies (L.) Karst.) in the RENECOFOR network*. Revue Forestière. Française vol. 58, pp. 419-432.
- Lebourgeois F., Piedallu Ch., 2005. *Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques*. Revue Forestière Française Vol. 57, n°4, pp. 331-356.
- Lelou D., 2010. *Les dépérissements du pin sylvestre et du sapin pectiné dans les Alpes-Maritimes après la canicule de 2003 : une approche spatiale et leur déterminisme*. AgroParisTech, 92 p.
- Lemaire J., Maréchal N., 2011. *Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques : comprendre et agir*. Forêt-entreprise n°198, pp. 48-50.
- Lemaire J., 2008. *Autécologie du châtaignier : un fougueux qui craint la sécheresse !* Forêt-entreprise n°179, pp. 18-24.
- Lemaire J., Lacoutre Y., Soleau M., Weben Ch., Mounier M., Guyon A., 2010. *Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques globaux : comprendre et agir*. Forêt-entreprise n°191, pp. 50-53.
- Lemaire J., 2010. *Le chêne autrement. Produire du chêne de qualité en moins de cent ans en futaie régulière*. IDF 178 p.
- Lemaire J., 2011. *L'autécologie du chêne pédonculé est mieux cernée*. Forêt-entreprise n°201, pp. 5-12.
- Lemaire J., 2012. *Le climat change. Les forestiers agissent et anticipent*. Forêts de France n°552, pp. 15-17.
- Lemaire J., 2013. *Comment intégrer le risque de sécheresse dans la gestion du douglas*. Forêt-entreprise n°208, pp. 37-42.
- Martin-Horcajo G., 2013. *Caractérisation des limites pédoclimatiques du Douglas (Pseudotsuga menziesii) sur le territoire du Parc naturel régional du Haut-Languedoc en prenant compte de l'évolution du climat*. Bordeaux Sciences Agro, 34 p.
- Matias L., Alistair S. Jump., 2012. *Interactions between growth, demography and biotic interactions in determining species range limits in a warming world: the case of Pinus sylvestris*. Forest Ecology and Management 282 (2012) pp.10-22.
- Mc Dowell et al., 2008. *Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?* New phytologist 178: 719-739.
- Mercadier C., 1997. *Étude des dépérissements de chênes dans les Deux-Sèvres et la Vienne*. DSF, Rapport de stage, 34 pages + annexes.
- Merian P., Lebourgeois F., 2012. *Principes et méthodes de la dendrochronologie*. AgroParisTech, 88 p.
- Mérian P., 2012. *Variations spatio-temporelles de la réponse au climat des essences forestières tempérées : quantification du phénomène par approche dendroécologique et influence de la stratégie d'échantillonnage*. Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois, 451 p.
- Nageleisen L.-M., 2005a. *Les sécheresses, principal facteur déclenchant de dépérissement au cours du XX<sup>e</sup> siècle*. Forêt-entreprise n°162, pp. 35-37.
- Nageleisen L.-M., 2005b. *Dépérissement du Hêtre : présentation d'une méthode symptomatologique de suivi*. Revue Forestière Française vol. LVII n°2, pp. 255-262.
- Nageleisen L.-M., 1994. *Dépérissement actuel des chênes*. Revue Forestière Française n° spécial Vol 46 n°5, pp. 504-511.
- Nageleisen L.-M., Hartmann G. Landmann G., 1991. *Dépérissements d'essences feuillues en Europe Occidentale : cas particulier des chênes rouvre et pédonculé*. Revue Forestière Française n° hors série, vol. 2, pp. 301-306.
- Nageleisen L.-M., Piou D., Sainthonge F.-X., Riou-Nivert Ph., 2010. *La santé des forêts. Maladie, insectes et accidents climatiques*. IDF, 608 p.
- Nageleisen L.M., 1994. *Dépérissement actuel des Chênes*. Revue Forestière Française vol. XLVI n°5, pp. 504-511.
- Nageleisen L.M., 2008. *Actualités sur les dépérissements du "chêne"*. DSF, 7 p.
- Piedallu C., 2012. *Spatialisation du bilan hydrique des sols pour caractériser la distribution et la croissance des espèces forestières dans un contexte de changement climatique*. Inra LERFOB, 281 p.
- Piedallu C., Perez V., Gégout J.C., Lebourgeois F., Bertrand R., 2009. *Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France*. Revue Forestière Française vol. 61, n°6, pp. 567-594.
- Piedallu C., Gégout J.C., 2007. *Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation*. Annals of Forest Science n°64, pp. 899-909.
- Piedallu C., Gégout J.C., 2008. *Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models agricultural and forest meteorology*. pp. 1696-1706.
- Richard J.-B., 2011. *Caractérisation de la contrainte hydrique des sols à l'aide de cartes numériques pour prendre en compte les effets potentiels du changement climatique dans les catalogues de stations forestières : application aux plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne et Bourgogne*. AgroParis-Tech-ENGREF Nancy et CRPF Champagne-Ardenne, Mémoire de fin d'études 160 p.
- Riou-Nivert Ph., Rosa J., 2014. *Du diagnostic à l'action, démarche à la décision du sylviculteur*. Forêt-entreprise n°214, pp. 22-41.
- Rodriguez A., 2009. *Le chêne pédonculé face aux changements climatiques*. Mémoire de fin d'études. AgroParisTech, 114 p.
- Sainthonge F.-X., 1998. *Une enquête de terrain confirme l'ampleur des dépérissements de chênes dans le Centre-Ouest de la France*. Cahier du DSF n°1, pp. 39-40.
- Sala et al., 2010. *Physiological mechanisms of drought-induced tree mortality are far from being resolved*. New Phytologist, n°186, pp. 274-281.
- Sergeant A.-S., Bréda N., Nageleisen L.-M., 2013. *Chronique de dépérissements de douglas en France depuis 1989*. Forêt-entreprise n°208, pp. 16-18.
- Sergeant A.-S., Bréda N., 2013. *Récent dépérissement du douglas : des sécheresses extrêmes et récurrentes en cause*. Forêt-entreprise n°208, pp. 19-23.
- Sevanto et al., 2013. *How do trees die? A test of the hydraulic failure and carbon starvation hypotheses*. Plant cell and environment, pp. 153-164.
- Thabeet. A., 2008. *Réponse du Pinus sylvestris aux changements climatiques récents en région méditerranéenne française : spatialisation et quantification par la télédétection et la dendrochronologie*. Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, 268 p.
- Thauvin G., 2011. *Essai de détermination des causes de dépérissement des pins sylvestres et du sapin pectiné à l'échelle de la France et des Alpes maritimes*. AgroParisTech, 122 p.
- Urii M., 2013. *Réponse des arbres forestiers aux changements globaux. Approches biogéographique et écophysologique*. Université de Bordeaux I, 294 p.
- Vennetier M., 2012. *Changement climatique et dépérissements forestiers*. In Corvol A. (éd.) *Changement climatique et modification forestière*, CNRS, Paris, p. 50-60.