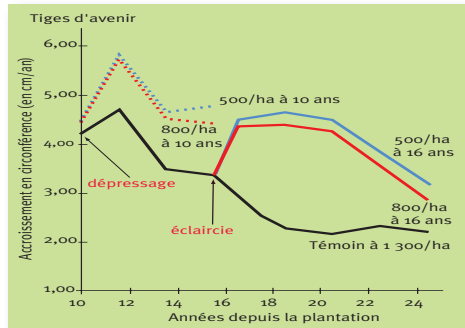


Jérôme Rosa
Philippe Riou-Nivert, Éric Paillassa

Guide de l'expérimentation forestière

Principes de base
Prise en compte du changement climatique



Guide de l'expérimentation forestière

Principes de base
Prise en compte du changement climatique

Jérôme Rosa (CRPF Île-de-France-Centre)

Philippe Riou-Nivert (CNPFF-IDF), Éric Paillassa (CNPFF-IDF)

Coordination : CNPFF-IDF

Partenaires : CRPF, INRA, Cemagref, DSF, FCBA, ONF

*Cet ouvrage a été subventionné par le Réseau Mixte
Technologique Aforce « Adaptation des forêts au
changement climatique » et par le Ministère de
l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche,
de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire*

AFORCE
RMT Adaptation des forêts
au changement climatique





Mise en place de protections sur un essai d'évaluation de clones d'ormes.

Photos de la couverture :

- mesure d'un noyer noir : © A. de Lauriston (CRPF Île-de-France-Centre)
- essai peuplier : © É. Paillassa (CNPf-IDF)
- graphique : © P. Riou-Nivert (CNPf-IDF)
- essai douglas : © J. Rosa (CRPF Île-de-France-Centre)

Suivi d'édition : Samuel Six

Édition-diffusion : Alexandra Tronchot, François Kuczynski

Graphisme, mise en page : Sophie Saint-Jore assistée de Marie de Grossouvre

CNPf/IDF, 23 avenue Bosquet, 75007 Paris - Tél. : 01 40 62 22 80 - Fax : 01 40 62 22 87

www.foretriveefrancaise.com

Dépôt légal : décembre 2011

Imprimé par l'imprimerie Champagnac avec des encres végétales,
sur papier provenant de forêts gérées durablement.



reflexnature



Remerciements

De nombreuses personnes ont participé à ce travail collectif. Les auteurs tiennent ici à les remercier très sincèrement.

Comité de pilotage: Christel ANGER (INRA); Patrick BLANCHARD (CRPF Pays de la Loire); Alexis DUCOUSSO (INRA); Daniel MICHAUD (FCBA); Brigitte MUSCH (ONF); Sandrine PERRET (Cemagref); Céline PERRIER (IDF); Claudine RICHTER (ONF).

Rédactions ou relectures: Vincent BADEAU (INRA); Nadia BARUCH (CRPF Bourgogne); Jacques BECQUEY (IDF); Isabelle BILGER (Cemagref); Michel CHARTIER (IDF); Christian GINISTY (Cemagref); Sabine GIRARD (IDF); Pierre GONIN (IDF); Dominique MERZEAU (IDF); Wulfran MIRLYAZ (IDF); François-Xavier SAINTONGE (DSF); Christophe VIDAL (IDF); les membres du PEFPP (Pôle Expérimentations Forêt Privée Française).

Participation à l'iconographie: merci à tous les auteurs de photos, de graphiques, de plans ou de cartes, trop nombreux pour être cités ici, qui ont mis gracieusement leurs documents à notre disposition.

Mise en forme: service diffusion de l'IDF avec une mention particulière pour Sophie SAINT-JORE qui est venue à bout d'une maquette complexe.

Notre gratitude va également à nos familles qui ont supporté et soutenu un travail qui a largement débordé sur les activités personnelles.

Nous dédions ce manuel aux techniciens forestiers de tous organismes qui se sont succédé depuis cinquante ans et qui, animés par le désir de toujours mieux comprendre les lois de la nature, ont forgé les bases de l'expérimentation forestière moderne.

Nous avons une pensée particulière pour Gérard ARMAND, pionnier du développement forestier et expérimentateur infatigable.

Les auteurs

Préfaces

Les forêts malmenées pendant la seconde guerre mondiale, la mévente des petits bois, la mauvaise réputation faite aux taillis sous futaie et la création en 1948 du Fonds forestier national, subventionnant les reboisements, ont amené les forestiers à se poser de multiples questions.

C'est pourquoi, à partir de 1960, les CETEF (Centres d'études techniques forestières), nouvellement créés en forêt privée, se lancèrent, avec l'aide de leurs techniciens, dans l'expérimentation afin d'apporter des réponses adaptées à leurs problèmes régionaux et spécifiques.

Cette activité fut utile, créa des références de terrain, contribua à la formation des techniciens et des sylviculteurs. Mais elle présenta quelques faiblesses car trop d'expérimentations manquèrent de rigueur ou du suivi nécessaire et la formation à ce type d'activité très technique était insuffisante.

La forêt, les techniques, l'environnement et les sylviculteurs évoluent, d'autres questions se posent ou se poseront à l'avenir. L'expérimentation, tout en restant simple, doit donc se poursuivre et faire l'objet d'une plus grande rigueur.

La « Méthodologie de l'expérimentation » présentée dans ce manuel par Jérôme ROSA, Philippe RIOU-NIVERT et Éric PAILLASSA, experts dans ce domaine, est donc la bienvenue.

Michel HUBERT
Ingénieur général des Ponts, des Eaux et des Forêts
Ancien directeur technique de l'IDF

Tout propriétaire forestier sylviculteur doit faire face à des décisions très importantes lorsqu'il s'agit d'améliorer, de régénérer ou de replanter sa forêt. Ces décisions sont difficiles à prendre car elles vont impacter les 50 années, voire le siècle suivant. Elles demandent donc une réflexion approfondie en amont.

Cette réflexion doit s'appuyer sur deux piliers :

- la connaissance du site concerné : études du sol et du climat, utilisation des catalogues de stations, prise en compte des évolutions à venir, en particulier s'agissant de l'économie en eau ;
- l'analyse du passé : l'expérience acquise sur d'autres sites est alors indispensable, lorsqu'il s'agit par exemple de choisir une essence à implanter ou une sylviculture à mettre en œuvre.

Et là, le sylviculteur n'a qu'un moyen pour se décider : entreprendre la visite de dispositifs expérimentaux mis en place depuis de nombreuses années par les organismes de Recherche ou de Développement. Seules ces expérimentations très variées peuvent nous orienter dans notre choix, en nous montrant des parcelles dont la gestion pourrait convenir sur notre propriété.

Ces essais peuvent démontrer la qualité du matériel végétal, permettre de mieux connaître l'autécologie et les performances des essences locales ou de découvrir des essences nouvelles, identifier les provenances adaptées au stress hydrique ou encore visualiser les effets de différentes sylvicultures.

Ce ne doit être qu'après avoir visité ces parcelles expérimentales et en avoir étudié les résultats que le sylviculteur pourra prendre une décision raisonnable et raisonnée.

L'expérimentation forestière s'appuie sur un travail de longue haleine mais représente une mine d'informations incontournable pour orienter la gestion forestière et la production de bois d'œuvre. Elle constitue un outil essentiel entre les mains du forestier pour relever le plus grand défi auquel devra faire face la forêt de demain : s'adapter au changement climatique.

Yannick BOURNAUD
Sylviculteur
Président du CRPF Midi-Pyrénées

Sommaire

INTRODUCTION	9
CHAPITRE 1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE DE L'EXPÉRIMENTATION EN FORÊT	10
LES DIX RÈGLES D'OR POUR LA RÉUSSITE D'UNE EXPÉRIMENTATION	12
L'EXPÉRIMENTATION FORESTIÈRE, POUR QUOI FAIRE ?	13
TYPLOGIE DES DISPOSITIFS	14
La référence mesurée	14
Le dispositif expérimental	16
Le réseau	17
PLAN D'EXPÉRIENCE	20
Généralités et principes	20
Les différents plans d'expérience	22
Influence du plan d'expérience sur les traitements statistiques possibles	24
Facteur testé	25
Durée de l'expérimentation	27
Évaluation du temps nécessaire pour l'installation et le suivi	28
Protocole	30
PRÉPARATION ET MISE EN PLACE D'UN DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	31
Importance du propriétaire	31
Choix du site	31
Choix de l'emplacement du dispositif sur le site	32
Surface des placettes	33
Emplacement des placettes	36
Installation d'un essai au stade plantation	37
Signalisation	39
Plan de l'essai	42
DESCRIPTION DU DISPOSITIF ET SUIVI	44
Historique et conditions d'installation	44
Description de la station	44
Suivi des interventions	47
Suivi des adversités	47
Photographies	47

MESURES	49
Identification des arbres mesurés	49
Prise des mesures	50
Variables de base	53
Autres variables	58
TRAITEMENT DES DONNÉES	59
Organisation des données	59
Analyses descriptives	60
Analyses statistiques	69
Synthèse des principales analyses possibles par type d'expérimentation	70
CHRONOLOGIE DE L'INSTALLATION D'UN DISPOSITIF EN FORÊT	71
CHAPITRE 2. MÉTHODOLOGIES PARTICULIÈRES LIÉES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	72
MATÉRIEL VÉGÉTAL	74
Le cadre réglementaire	75
Connaissance de l'origine du matériel végétal expérimenté	76
Mode d'élevage des plants	78
Précautions particulières	80
DONNÉES PÉDOLOGIQUES	82
DONNÉES CLIMATIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES	85
Données climatiques	85
Données météorologiques	88
Périodicité des mesures	96
VARIABLES SPÉCIFIQUES LIÉES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	97
Notation de problèmes phytosanitaires	97
Phénologie	102
Dendrochronologie	109
CHAPITRE 3. EXPÉRIMENTATIONS CONSACRÉES À L'ÉTUDE DES ADAPTATIONS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	118
INSTALLATION D'UNE EXPÉRIMENTATION AU STADE DE LA PLANTATION	121
Test d'élimination	121
Test de comportement	128
Test d'itinéraires techniques pour une unité génétique donnée	133

INSTALLATION D'UNE EXPÉRIMENTATION SUR PEUPEMENT EXISTANT	135
Valorisation des expérimentations existantes	135
Dispositif de suivi de dépérissement de peuplements	136
Dispositif d'acquisition de connaissances sur l'autécologie d'une essence	138
Expérimentation de scénarios sylvicoles « adaptatifs »	141
Temps d'installation et de suivi de placettes sur peuplement existant	143
ANNEXES	144
ANNEXE A - 10 RECOMMANDATIONS POUR RATER À COUP SÛR SON EXPÉRIMENTATION	146
ANNEXE B - PLAN TYPE DE PROTOCOLE	147
ANNEXE C - SUIVI INDIVIDUALISÉ DE TOUS LES ARBRES. SUIVI D'UN ÉCHANTILLON REPRÉSENTATIF DU PEUPEMENT	150
ANNEXE D - ÉCHANTILLONS SPÉCIFIQUES	161
ANNEXE E - VARIABLES SUPPLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DE LA MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	165
ANNEXE F - COMPLÉMENTS À LA MÉTHODOLOGIE PARTICULIÈRE LIÉE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (CLIMATOLOGIE, PHÉNOLOGIE)	171
ANNEXE G - CONSEILS PRATIQUES POUR LA RÉALISATION DES MESURES DE HAUTEUR	188
ANNEXE H - PROTOCOLE DE DESCRIPTION DES STATIONS FORESTIÈRES	191
ANNEXE I - EXEMPLE DE FICHE SYNTHÉTIQUE DE PRÉSENTATION ET DE TRAITEMENT DES DONNÉES MESURÉES	214
ANNEXE J - EXEMPLE DE CONVENTION	217
ANNEXE K - BIBLIOGRAPHIE	220
Liste des sigles et acronymes	224

INTRODUCTION

La mise en place de toute expérimentation nécessite de respecter des règles claires **afin d'éviter des erreurs de conception et de réalisation**, et ainsi obtenir des résultats fiables et rigoureux.

L'expérimentation forestière comporte en outre des difficultés spécifiques :

- lourdeur de mise en place ;
- maîtrise toute relative d'un objet expérimental vivant ;
- durée importante de suivi ;
- exposition aux risques nombreux que subit la forêt (tempêtes et extrêmes climatiques, attaques de parasites, dégâts de gibier...).

Elle présente en moyenne un ratio de « un essai perdu avant son terme pour deux essais installés ». Afin d'optimiser les réalisations et de répondre à des questions toujours plus nombreuses, les organismes de recherche et de développement se coordonnent de plus en plus au sein de réseaux thématiques. Ces rapprochements permettent des synergies significatives, mais nécessitent **une harmonisation des pratiques expérimentales**. Ce guide s'appuie sur l'**expertise acquise lors des dernières décennies par ces organismes**, qui ont tous contribué, à un niveau ou à un autre, à sa rédaction. Il fournit un appui méthodologique et un langage commun aux techniciens forestiers, mais aussi aux enseignants et aux étudiants qui auront à expliquer ou comprendre le fonctionnement de la forêt. Il aborde plus particulièrement, dans ce cadre, les questions relatives au changement climatique, qui seront cruciales pour la forêt future.

Le **chapitre 1** rappelle les bases de l'**installation de dispositifs expérimentaux en forêt**. Quel qu'en soit l'objectif, s'assurer de leur fiabilité permettra d'utiliser les données mesurées y compris pour des traitements et utilisations autres que ceux prévus initialement, et en particulier dans le cadre de réseaux expérimentaux multi-sites, voire multi-organismes.

Le **chapitre 2** précise les informations et **précautions supplémentaires** à prendre lors d'installation d'expérimentations dans le cadre de **problématiques liées aux changements climatiques**. Il développe les questions relatives au matériel végétal, à la pédologie, à la climatologie, aux problèmes sanitaires, à la phénologie et à la dendrochronologie.

Le **chapitre 3** propose des **exemples types d'expérimentations relatives au changement climatique** :

- **évaluation d'essences/provenances en plantation** : comment installer un test d'élimination, un test de comportement ?
- **évaluation sur peuplement existant** : comment suivre l'évolution d'essences autochtones parfois en difficultés ou d'essences introduites potentiellement adaptées aux changements annoncés ? Comment évaluer l'influence d'un itinéraire technique sur la résistance aux stress attendus ?

Les **annexes** fournissent des **fiches pratiques et des précisions complémentaires** sur divers points de protocoles.

Méthodologie générale de l'expérimentation en forêt

L'expérimentation forestière, quel que soit le thème étudié, obéit à des règles générales qui permettent d'éviter bien des erreurs.

Quel type de dispositif choisir en fonction des objectifs visés ? Quelle stratégie expérimentale adopter ? Comment traiter au mieux les aspects pratiques (installation, suivi, mesures, traitement des données...) ?

Les dix règles d'or pour la réussite d'une expérimentation, qui ouvrent le propos, peuvent être utilisées comme une « check-list ». Elles sont reprises et développées tout au long de ce chapitre, qui se termine par un résumé chronologique des étapes à respecter lors de l'installation d'un essai.

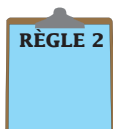
LES DIX RÈGLES D'OR POUR LA RÉUSSITE D'UNE EXPÉRIMENTATION



RÈGLE 1

- Définir clairement l'objectif de l'expérimentation
- Choisir le type de dispositif le plus approprié

pages 13, 14 et 20



RÈGLE 2

- Envisager une possible intégration dans un réseau
- S'assurer des moyens humains, matériels et financiers pour l'installation et le suivi

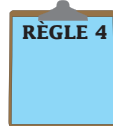
pages 17, 23 et 28



RÈGLE 3

- Identifier le(s) facteur(s) testé(s)
- Définir les modalités étudiées

pages 25 et 26



RÈGLE 4

- Rédiger un protocole clair
- Fixer une durée d'expérimentation

pages 27 et 30



RÈGLE 5

- Choisir soigneusement un site approprié

page 31



RÈGLE 6

- Installer des placettes de surface suffisante

page 33



RÈGLE 7

- Matérialiser durablement les placettes et les arbres
- Dresser un plan d'installation précis

pages 39 et 42



RÈGLE 8

- Enregistrer les caractéristiques descriptives du dispositif à l'installation

page 44



RÈGLE 9

- Suivre les arbres individuellement avec des variables clairement définies

pages 49 et 53



RÈGLE 10

- Vérifier la cohérence des données
- Les stocker le plus sûrement possible
- Prévoir leur traitement et leur analyse

pages 24, 59 et 60

L'EXPÉRIMENTATION FORESTIÈRE, POUR QUOI FAIRE ?

Dans un domaine où le retour d'expérience est long, l'expérimentation permet au forestier de concrétiser et de valider sur le terrain des connaissances acquises ou en cours d'acquisition, de tester des hypothèses nouvelles, mais aussi de comparer et d'échanger des résultats d'une région à l'autre.

RÈGLE 1

*objectif
clair*

La mise en place et le suivi d'une expérimentation forestière doit **répondre à une question précise, posée à un instant donné**. Les problématiques évoluant dans le temps, il est important de **définir clairement l'objectif visé et de conserver cette définition**.

Le sujet étudié peut être par exemple :

- la comparaison du comportement de diverses essences ou de l'efficacité de techniques sylvicoles ;
- la quantification des effets de la variation d'un facteur (intensité d'éclaircie...);
- la vérification d'une hypothèse non démontrée jusqu'alors en condition réelle (adaptation à la station...);
- le suivi sur le long terme de l'évolution d'un phénomène (phénologie...).

La définition précise de l'objectif est indispensable pour :

- identifier le facteur à tester ;
- définir les modalités à étudier ;
- établir le plan d'expérience ;
- choisir les variables à mesurer ;
- estimer la durée nécessaire de l'expérimentation ;
- prévoir le traitement des données.



© P. Riou-Nivert (CNPF-IDF)

Le conseiller indique des choix de gestion possibles mais le propriétaire, logiquement méfiant, ne sera convaincu que par les résultats d'une expérimentation concrète.



TPOLOGIE DES DISPOSITIFS

Il existe deux grands types de dispositifs expérimentaux en forêt, qui se différencient par les objectifs et les moyens mis en œuvre :

- la **référence mesurée** : seul un cas de figure est représenté sur le même site ;
- le **dispositif expérimental** proprement dit : plusieurs modalités sont comparées sur le même site, avec un plan d'expérience pouvant permettre des analyses descriptives, voire statistiques.

Un **réseau d'essais** peut ensuite regrouper ces deux types.

La référence mesurée

Définition

Une référence mesurée permet d'**illustrer une seule modalité d'un facteur** (une essence, une sylviculture, une densité de plantation...) par le biais d'**une placette** dont les contours sont matérialisés et sur laquelle les arbres sont mesurés plus ou moins périodiquement.

Une référence mesurée est plus simple et plus rapide à installer qu'un dispositif expérimental, et demande peu de moyens.

Exemples :

- suivi d'un peuplement de thuya géant sur sol limono-argileux ;
- suivi d'un peuplement de cèdre de l'Atlas sur sol sableux.

Qu'apporte une référence mesurée ?

Le premier objectif d'une référence est de servir d'**outil de vulgarisation**. L'effet démonstratif est donc privilégié, des données chiffrées permettant d'étayer l'aspect visuel.

Au final, l'ensemble des références constitue un catalogue de sites potentiels de visites, sur lesquels l'historique est connu et des données dendrométriques, voire économiques, sont disponibles.

La **facilité de mise en place des références mesurées permet leur multiplication** et donc une bonne répartition géographique, adaptée à une vulgarisation de proximité.

Intégrées au sein d'un réseau, des références correctement mises en place avec un **protocole commun**, représentent autant de « répétitions » de modalités d'un facteur étudié, et permettent d'évaluer la variabilité de ce facteur en fonction des sites.

Par exemple, pour une essence donnée, la référence apporte des informations sur son comportement dans des situations locales, mais seule la mise en place d'un réseau multi-sites permet de préciser son autécologie ou l'effet des conditions d'installation (voir pages 17 et 23).

Quand installer une référence mesurée ?

Deux principales raisons peuvent être identifiées :

- illustrer un point précis lors d'une réunion de vulgarisation ;
- suivre un peuplement ou une technique remarquable ou originale.

**1 référence mesurée = 1 seule placette mesurée et suivie,
dont les données peuvent être utilisées au sein d'un réseau
avec d'autres références et/ou des expérimentations**



© J. Rosa (CRPF Île-de-France-Centre)

Réunion de vulgarisation dans une référence sur douglas.

Le dispositif expérimental

Définition

Le **dispositif expérimental**, plus simplement appelé **expérimentation** ou **essai**, a pour objectif de **valider ou non une ou plusieurs hypothèses de départ**. Il teste, sur un même site, **deux ou plusieurs modalités d'un facteur** étudié par le biais de **placettes** dont les contours sont matérialisés et sur lesquelles les arbres sont mesurés périodiquement.

L'installation d'un dispositif doit toujours répondre à une problématique clairement énoncée et formalisée dès le départ, en particulier à destination des personnes qui auront à intervenir au cours du suivi. L'expérimentation doit avoir un « intitulé » clair et précis.

Exemples :

- essai de comparaison de 3 densités de plantation de chêne sessile;
- essai de comparaison de 4 essences;
- essai de comparaison de 3 scénarios d'éclaircie sur douglas.

Dans les cas les plus complexes, il est possible d'étudier, sur une même expérimentation, plusieurs facteurs comme par exemple l'essence et la densité de plantation.

L'ensemble des modalités peut être répété sur le même site, constituant alors des « **répétitions** » (voir page 20), mises en place afin de fiabiliser les données obtenues.

Qu'apporte une expérimentation ?

Sur un site le plus homogène possible (station, conditions locales...), l'expérimentation permet d'établir une **comparaison entre plusieurs modalités d'un même facteur** et donc de **quantifier l'influence de ce facteur**, « toutes choses égales par ailleurs ».

Quand installer une expérimentation ?

Une expérimentation se justifie lorsqu'on souhaite vérifier une hypothèse, en comparant par exemple une essence ou une technique par rapport à d'autres.

**1 expérimentation = au moins 2 placettes mesurées.
L'objectif est de quantifier l'effet d'un facteur par la comparaison de plusieurs modalités de ce facteur, « toutes choses égales par ailleurs »**

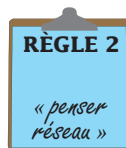
© P. Riou-Nivert (CNPFF-IDF)



Dispositif de comparaison d'éclaircie sur pin laricio, 8 ans après la coupe (IDF, GIS Coop., Mello, 60) : À gauche, témoin non éclairci (2 000 tiges/ha) ; à droite, éclaircie forte (500 tiges/ha).

Le réseau

Une des contraintes majeures de l'expérimentation en forêt est la **durée du suivi**. Contrairement à l'expérimentation sur plantes annuelles, comme par exemple sur les céréales en agriculture, il n'est pas aisé en forêt, pour un même expérimentateur, de reproduire un essai autant de fois qu'il serait nécessaire pour en valider le résultat. Il est possible de palier à cette difficulté par la **mutualisation des efforts** dans le cadre d'un réseau d'essais.



Objectif et définition d'un réseau d'essais

L'objectif d'un réseau d'essais est de **regrouper les données d'expérimentations et/ou de références traitant d'un même thème**, à condition qu'elles aient été installées et suivies selon un **protocole commun**.

Lors de la constitution d'un réseau d'essais, une réflexion doit être menée sur ses objectifs, afin de déterminer le protocole d'installation et de suivi, les modalités testées et si possible une **stratification de l'échantillonnage**. Celle-ci répartit les placettes en strates ou catégories logiques (région, type de sol...) et prévoit un nombre de placettes souhaitable par strate.

Qu'apporte un réseau d'essais ?

En expérimentation forestière, le réseau permet une **meilleure validation de l'expérimentation** en étendant le champ d'étude, par exemple à l'échelle régionale ou nationale. Il est ainsi possible de confirmer ou d'infirmer, et donc de généraliser ou de nuancer, les résultats obtenus sur un site. Le réseau ouvre par ailleurs la porte à la **modélisation** (par exemple mise en équations) des phénomènes observés.

En plus de l'estimation plus précise des conséquences sur un peuplement de la variation du facteur étudié, la multiplication des expérimentations permet d'étudier la variabilité de ces conséquences dans différents environnements et donc de travailler sur l'interaction « **facteur étudié x milieu** » à plus grande échelle.

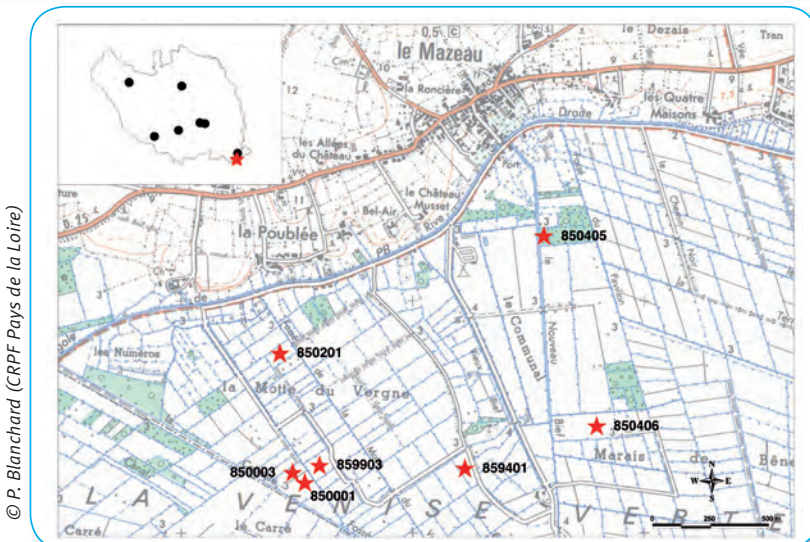
Cette **optimisation organisationnelle** rentabilise les efforts de mise en place et de suivi des dispositifs expérimentaux en forêt, pénalisés par l'importance du facteur temps. Le regroupement de l'ensemble des expérimentations portant sur un même thème permet ainsi de couvrir une plus large gamme de conditions d'installation et de stades d'évolution.

Quand constituer un réseau d'essais ?

Un réseau s'avère pertinent lorsqu'il existe un souhait de mutualisation des ressources entre différentes régions ou organismes, afin d'**élargir le domaine de validité de l'information expérimentale, tout en augmentant sa robustesse**. Le réseau, en raison des gains qu'il apporte par une économie d'échelle, permet une valorisation accrue de la démarche expérimentale locale.

Le GIP Ecofor travaille aujourd'hui pour mettre à disposition de la communauté forestière un **Catalogue en ligne des Sources d'Information sur la Forêt**, dont notamment les réseaux d'expérimentations : le Ca-SIF (<http://www.casif.gip-ecofor.org>).

Un réseau d'essais mutualise des expérimentations et/ou des références installées sur un thème donné avec un protocole commun

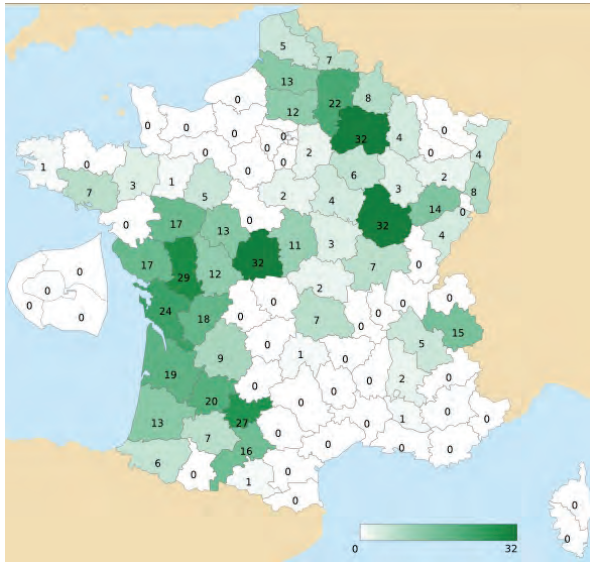


© P. Blanchard (CRPF Pays de la Loire)

Exemple d'un réseau local peuplier du CRPF Pays de la Loire dans une commune de Vendée (Le Mazeau, 85).

Deux exemples de réseaux nationaux

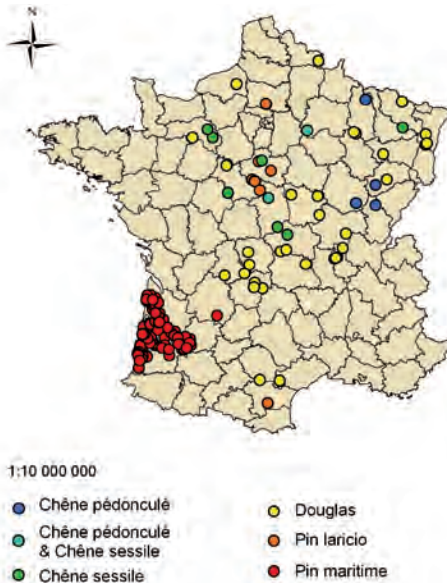
Localisation des essais du réseau peuplier du PEFPP, en 2010



Le réseau peuplier du PEFPP (Pôle expérimentations forêt privée française) regroupe 542 dispositifs expérimentaux suivis, mis en place en Forêt Privée par plus de 20 organismes forestiers sur l'ensemble du territoire. Ces essais poursuivent le même objectif qui est la « comparaison des cultivars de peuplier » et suivent le même protocole expérimental.

© E. Paillassa (CNPFF-IDF)

Localisation des essais du GIS "Coopérative de données", en 2010



Les organismes forestiers de recherche et de développement ont mis en place depuis 1994 un réseau d'expérimentations sylvicoles sur certaines essences (chênes sessile et pédonculé, pins maritime et laricio, douglas) dans le cadre d'un Groupement d'Intérêt Scientifique, le GIS « Coopérative de données » sur la croissance des peuplements forestiers ». Cette initiative a ainsi permis la rédaction de protocoles communs et la mutualisation de la collecte et du traitement des données. L'objectif poursuivi est la modélisation de la croissance des peuplements forestiers.

© I. Seynave (GIS Coopérative de données)

PLAN D'EXPÉRIENCE



En avant-propos, il convient ici de bien définir l'**unité expérimentale étudiée**, qui est généralement un **groupe d'arbres ou une placette** (le cas de dispositif mono-arbre, non traité dans cet ouvrage est spécifique à la Recherche). Cette notion est fondamentale car elle régit, en fonction du plan d'expérience choisi, les possibilités d'utilisation de tests statistiques de comparaison.

Généralités et principes

En matière d'expérimentation, il existe trois principes fondamentaux pour augmenter la précision de l'évaluation et garantir la validité de l'expérience: la **randomisation**, la **répétition** et le **contrôle local**. Ces trois principes permettent d'éviter l'erreur systématique et de limiter l'erreur aléatoire.

La randomisation

La randomisation, ou attribution aléatoire de l'emplacement d'une modalité sur le site d'expérimentation, garantit, en principe, l'élimination des erreurs systématiques. Elle permet de s'affranchir des influences visuelles, parfois inconscientes, lors de l'installation des modalités testées.

La procédure d'allocation des modalités sur le site se fait par tirage au sort.

La répétition

La répétition d'une modalité ouvre la porte aux traitements statistiques. Elle est indispensable pour introduire l'interaction entre facteurs dans les analyses de variance.

Elle peut se concevoir à deux échelles :

- **sur le site expérimental**, le nombre de répétitions est le nombre de placettes testant la même modalité;
- **au sein d'un réseau** (régional, national), le nombre de répétitions est le nombre d'expérimentations intégrant la même modalité et installées dans des conditions les plus proches possibles.

Le nombre de répétitions nécessaire dépend de nombreux facteurs : homogénéité du matériel végétal, nombre d'arbres mesurés, degré de précision souhaité...

Pour permettre les traitements statistiques les plus poussés, trois répétitions sur le même site sont généralement nécessaires. En l'absence de répétitions sur un même site, une modalité doit être répétée au moins à cinq reprises sur d'autres sites, dans le cadre d'un réseau

Le contrôle local

Le contrôle local a pour objet de **maîtriser les facteurs d'hétérogénéité autres que ceux étudiés par l'expérimentation**. Il fiabilise la quantification de l'influence du facteur testé, en réduisant les effets parasites difficilement maîtrisables (erreur expérimentale).

- **Cas d'une expérimentation sans répétition sur un même site**

Le contrôle local est alors assuré par l'installation des modalités sur une zone particulièrement homogène (voir page 33).

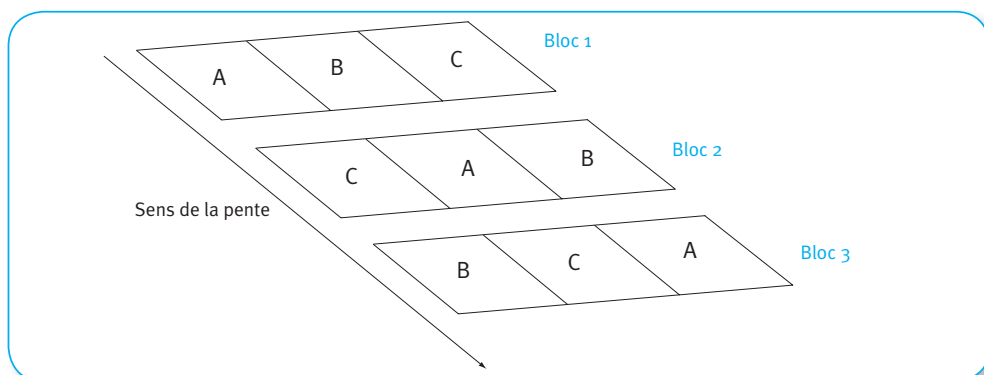
- **Cas d'une expérimentation avec répétitions sur un même site**

Si une hétérogénéité de la station ou du peuplement de départ est suspectée, la mise en place de blocs peut permettre de la « contrôler » d'une manière statistique, **lorsqu'elle reste modérée**, et d'améliorer l'évaluation du facteur testé. Dans le cas inverse, il est préférable d'installer plusieurs essais distincts.

Chaque modalité testée est alors installée aléatoirement au sein d'un bloc, et chaque bloc contient l'ensemble des modalités testées (= blocs complets randomisés). Sur chacun des blocs, la station et l'état initial doivent être les plus homogènes possibles. Si plusieurs équipes participent à la plantation, à l'installation de l'essai ou aux mesures, toutes les opérations effectuées sur les modalités d'un même bloc doivent l'être par la même équipe.

Ce type d'installation en blocs est particulièrement adapté aux **hétérogénéités stationnelles légères qui suivent un gradient**, comme par exemple une légère pente.

Dans ce cas, chacun des blocs doit être installé sur une même position topographique et les modalités sont donc déclinées perpendiculairement à la pente, afin de conserver une homogénéité stationnelle au sein de chaque bloc.



Exemple d'installation d'un dispositif à blocs complets sur légère pente (3 modalités : A, B et C).

Lors du traitement de données, si l'analyse des mesures révèle une trop forte différence entre blocs, « l'effet bloc » est assimilé à un facteur de variation à part entière. Il est alors conseillé de considérer les blocs comme autant d'expérimentations différentes situées sur des stations différentes.

L'installation de blocs peut en revanche entraîner des contraintes :

- ils accroissent la superficie de l'essai (surtout en cas de placettes de traitement de grande surface) et donc aussi les risques d'hétérogénéité qu'ils sont sensés maîtriser. Ce problème est d'autant plus important que le nombre de modalités étudiées est élevé. Les « blocs incomplets » permettent de limiter la surface totale, si la répartition des modalités au sein des blocs est bien réfléchi ;
- ils impliquent un temps de suivi plus important (matérialisation, mesures, entretiens, traitements sylvicoles distincts...);
- les différents blocs subissent parfois des évolutions contrastées et non prévues, sous l'effet d'aléas divers (consignes non respectées, dégâts de tempêtes ou de gibier...). L'expérimentation présente alors au final autant de « modalités » que de placettes, ce qui compromet l'intérêt des blocs ;
- si la mise en place de blocs induit une réduction des surfaces des placettes unitaires, elle augmente le pourcentage d'arbres en lisière de placettes, influencés par les placettes voisines (selon la largeur de l'isolement) ;
- l'aspect visuel est moins démonstratif du fait de placettes unitaires souvent plus petites.

Le concours d'un organisme de Recherche dans la conduite d'un dispositif avec blocs est recommandé pour son installation, son suivi et l'analyse des résultats.

Les différents plans d'expérience

Les différents plans d'expérience peuvent être regroupés en quatre grands types.

Le dispositif sans répétition

C'est le plus simple : une seule placette est installée par modalité testée. Cependant, pour avoir un résultat fiable, ce plan d'expérience nécessite une attention particulière en ce qui concerne l'homogénéité de la station et du peuplement initial éventuel.

Le dispositif avec répétitions

Ce dispositif, plus complexe, comporte plusieurs placettes par modalité, avec parfois un contrôle d'hétérogénéité (blocs).

Les plans d'expérience particuliers

Nous ne détaillerons pas ici les plans d'expérience complexes qui peuvent être utilisés, en fonction des besoins, par des organismes de Recherche. Ils comportent des contrôles d'hétérogénéité supplémentaires (carré latin, carré gréco-latin), ou une disposition des modalités intra-bloc non aléatoire (confounding, split-plot, criss-cross...). Pour plus de détails sur ces plans d'expérience, on se reportera aux ouvrages spécialisés cités en bibliographie.

Les réseaux multi-sites

Dans le cas d'un réseau, un même facteur est testé sur différents sites (par exemple: « provenance » pour une essence), avec bien entendu des **modalités harmonisées** entre les essais. Par contre, les conditions locales, elles, ne sont plus fixes entre les sites et peuvent varier de façon plus ou moins importante.



Il s'agit alors de déterminer les caractéristiques spécifiques des sites (station, état initial...) pouvant constituer des causes de variation, afin de les normaliser et de permettre ensuite une analyse multi-sites en regroupant judicieusement les essais.

Ce type d'analyse permet d'**élargir** ou, à l'inverse, de **relativiser les résultats obtenus isolément** sur quelques sites. Il est d'autant plus aisé que les modalités testées ont été réparties de manière équilibrée dans les différentes classes de causes de variation.

C'est la **stratification de l'échantillonnage**.



Essai de comparaison de cultivars du réseau peuplier de la Forêt Privée (Aveluy, 80).

© É. Paillassa (CNPF-IDF)

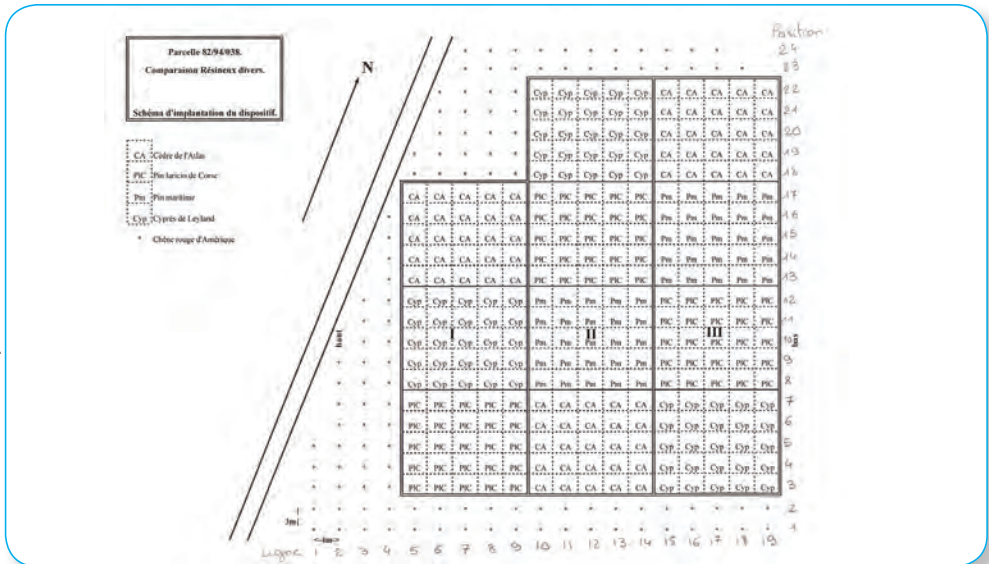
La validité des résultats issus d'un site expérimental est limitée aux conditions – notamment stationnelles – semblables à celles de ce site. Un réseau permet de dépasser cette limitation et de généraliser les résultats. Les expérimentations deviennent alors de bonnes illustrations locales des différences mises en évidence grâce au réseau

Influence du plan d'expérience sur les traitements statistiques possibles



En fonction des variables mesurées et de la présence ou non de répétitions, les possibilités d'utilisation de tests statistiques de comparaison seront différentes (voir le tableau de synthèse, page 70).

Par exemple, pour des variables « peuplement » comme la hauteur dominante H_0 , la circonférence moyenne C_g , la surface terrière G , l'unité expérimentale est la placette. Sans répétition de celle-ci à l'échelle du site, les tests statistiques (analyses de variance, tests de signification) sont impossibles et la portée des résultats est limitée, sauf en cas d'intégration dans un réseau (une placette = une répétition).



Plan d'un test de comparaison de 4 essences en trois blocs incomplets permettant un contrôle d'hétérogénéité.

Facteur testé

Cas général : un seul facteur testé

Lors de l'installation d'une expérimentation, **dans la grande majorité des cas, un seul facteur est testé** et varie entre les placettes. Selon le thème choisi, ce peut être l'essence, les conditions d'installation, l'itinéraire sylvicole... Chaque variation du facteur étudié est appelée « **modalité** ».



Exemple : s'il s'agit d'une expérimentation sur la provenance des plants, seule la provenance est différente entre les modalités. Les autres facteurs ayant une influence sur la croissance des arbres sont censés ne pas varier : station, préparation du sol, espacements de plantation, type de plant et de plantation, entretiens... Tous ces autres facteurs sont dits « **contrôlés** ».

Ce principe doit donc permettre d'expliquer les variations observées entre les modalités, uniquement par le facteur étudié.

Cas de facteurs associés au facteur testé

FACTEUR SYNTHÉTIQUE

Il est possible de considérer un ensemble cohérent de facteurs associés comme un seul facteur testé.

Exemple : itinéraire sylvicole global appliqué à une placette (densité de plantation + dépressage + élagage + éclaircies).

FACTEUR IMPLICITE

Certains facteurs testés peuvent inclure implicitement des facteurs qui leur sont liés de façon quasi indissociable.

Exemple : dans une expérimentation de comparaison d'essences, à certaines essences correspondent parfois des types de plants (en conteneurs...) ou des itinéraires techniques implicites qui diffèrent de ceux des autres essences. Les caractéristiques diverses liées à l'essence font alors partie du seul facteur testé « essence » et il est alors acceptable d'envisager une comparaison entre essences même si tous les facteurs élémentaires ne sont pas identiques.

Cas particulier : plusieurs facteurs testés

Il est possible, dans certains cas, de tester deux facteurs, voire plus. Il devient alors nécessaire, pour discriminer l'effet de chaque facteur, d'installer autant de modalités que de croisements possibles (mais réalistes).

Exemple: pour étudier un facteur « génétique » (deux provenances) et un facteur « densité de plantation » (trois densités), il est nécessaire d'installer six modalités pour évaluer l'effet de la densité, l'effet génétique et l'effet des deux cumulés.

Ce type de dispositif est complexe à mettre en place d'un point de vue pratique, notamment du fait qu'il accroît de manière significative les surfaces nécessaires. Par ailleurs, son analyse statistique cumule des interactions délicates à interpréter.

L'installation d'un tel dispositif est déconseillée sans l'appui d'un organisme de Recherche.

**Il est recommandé de ne retenir qu'un seul facteur à étudier.
Seul ce dernier varie entre les différentes modalités
d'une expérimentation**

Choix des modalités du facteur testé

RÈGLE 3

*modalités
étudiées*

Les modalités du facteur testé doivent être clairement définies avant l'installation de l'essai et suffisamment tranchées pour mettre en évidence des différences significatives.

Exemple: pour étudier l'effet d'un dépressage, on installe au moins deux modalités: « témoin sans dépressage » et « dépressage très dynamique ».

L'intitulé de chaque modalité doit si possible pouvoir se synthétiser dans un libellé court, facile à utiliser par la suite sur un plan, des tableaux ou des graphiques de résultats.



Dispositif de comparaison d'éclaircie sur douglas, 10 ans après la coupe (IDF, GIS Coop., Fréteval, 41). De gauche à droite, 3 modalités (TEMO : témoin sans intervention, B 800 : éclaircie à 800 tiges/ha, C 500 : éclaircie à 500 tiges/ha).

© J. Rosa (CRPF Île-de-France-Centre).

Durée de l'expérimentation

Il est indispensable de se **fixer une durée minimum de suivi dès l'installation du dispositif**. Cette durée peut être définie par exemple par un nombre d'années ou par un laps de temps jusqu'à une intervention programmée. **La durée de l'expérimentation est fonction de l'objectif, de l'essence et du facteur testé**. Elle doit être suffisante pour que des différences puissent s'exprimer entre les modalités de ce facteur.



Une fois cette période écoulée, le traitement des données doit permettre un bilan.

Cependant, même si des différences sont apparues, permettant ainsi de répondre aux questions posées au départ, il peut tout de même être intéressant de **poursuivre le suivi** de certains dispositifs, afin d'atteindre des objectifs supplémentaires tels que :

- s'assurer que les différences observées initialement persistent au fil du temps ;
- étudier l'impact du facteur testé sur des caractéristiques s'exprimant tardivement (qualité du bois...);
- avoir les données à l'échelle de la révolution, pour un suivi économique ;
- répondre à de nouvelles questions posées par l'itinéraire testé (exploitation, régénération...);
- expérimenter d'autres facteurs (impact du changement climatique...) sur des sites à historique connu.

La décision de prolongement est prise en se posant les questions suivantes :

- la période étudiée a-t-elle permis de répondre à la question posée au départ ?
- une validation, sur un plus long terme, du résultat obtenu sur la période est-elle nécessaire ?
- le suivi sur une plus longue période apportera-t-il des informations supplémentaires intéressantes ?
- le plan d'installation initial des placettes permet-il un prolongement de l'expérimentation ?

Le **nombre d'arbres restants** et la **largeur de l'isolement** - calculés au départ pour une durée d'expérimentation limitée - **ne permettent souvent pas la poursuite du suivi dans des conditions de validité satisfaisantes**.

Évaluation du temps nécessaire pour l'installation et le suivi

L'adéquation entre le temps nécessaire à l'installation et au suivi d'une expérimentation d'une part, et les moyens humains et financiers disponibles d'autre part, est indispensable.

Ce temps doit être évalué dès le début du projet. S'il s'avère que les moyens disponibles sont insuffisants, le projet d'expérimentation doit être redimensionné ou abandonné.

RÈGLE 2

moyens disponibles

À titre indicatif, le tableau page 29 répertorie les temps généralement constatés nécessaires pour chacune des étapes d'installation et de suivi d'une expérimentation au stade de la plantation, avec la seule mesure des variables de base (état, hauteur et circonférence).

Par ailleurs, il est évident que les temps nécessaires dépendent étroitement :

- du type de dispositif (nombre de modalités, de répétitions, de blocs) et de la surface des placettes ;
- de l'origine du peuplement (plantation, semis artificiel, régénération naturelle), influant fortement sur la matérialisation et notamment l'identification des arbres ;
- du stade de développement : les peuplements très jeunes peuvent être très denses et nécessiter la mise en place de sous-placettes d'inventaire (voir **annexe C**) ;
- des variables à mesurer (les mesures de hauteur nécessitent par exemple d'autant plus de temps que la hauteur augmente et que le peuplement est dense) ;
- de l'environnement : localisation, nature du terrain, végétation d'accompagnement...

Le temps passé à la mise en place d'un dispositif ou d'une référence mesurée est d'autant mieux valorisé que la durée de l'expérimentation est longue. Bien s'assurer des moyens de suivi avant l'installation

Temps moyens constatés (à moduler selon les conditions d'accès, la météorologie...) pour l'installation de dispositifs en plantation et le suivi de placettes de mesure de l'ordre de 100 tiges, avec mesure uniquement des variables de base (état, hauteur et circonférence).

Journées ETP (Équivalent temps plein) y compris déplacement (< 100 km)		Référence mesurée	Expérimentation avec 3 modalités sans répétition (3 placettes)	Expérimentation avec 3 modalités et 3 répétitions (9 placettes)
Installation	Établissement du protocole	0,5	1	2
	Recherche de site, contact propriétaire, rédaction de la convention, recherche de l'historique	2	3 à 5	4 à 7
	Piquetage, matérialisation de l'essai	1 (= 0,5 x 2 p*)	2 (= 1 x 2 p*)	2 à 4 (= 1 à 2 x 2 p*)
	Réception des plants et assistance à la plantation	0,5	0,5 à 1	2 à 3
	Contrôle de reprise et mesures de départ ; peinture	1 (= 0,5 x 2 p*)	2 (= 1 x 2 p*)	2 à 4 (= 1 à 2 x 2 p*)
	Saisie, compte rendu d'installation	0,5	1	2
Suivi**	Mesures, matérialisation et observations	1 (= 0,5 x 2 p*)	2 à 4 (= 1 à 2 x 2 p*)	4 à 8 (= 2 à 4 x 2 p*)
	Saisie, compte rendu	0,5	1	2
	Observations diverses, imprévus	0 à 0,5	0 à 1	0 à 3
Autres interventions	Désignation d'arbres d'avenir	1 (= 0,5 x 2 p*)	2 (= 1 x 2 p*)	4 (= 2 x 2 p*)
	Martelage d'éclaircies	1 (= 0,5 x 2 p*)	1 à 2 (= 0,5 à 1 x 2 p*)	4 à 6 (= 2 à 3 x 2 p*)

* x 2 p : 2 personnes obligatoires (doublant ainsi le nombre de jours ETP).

** : le temps consacré aux mesures de suivi est très variable selon l'itinéraire sylvicole adopté, et notamment l'intensité des éclaircies (qui réduisent au fil du temps le nombre d'arbres à mesurer de certaines placettes).

NB : un second tableau (chapitre 3, page 143) précise les temps moyens à prévoir pour une installation sur peuplement existant.

Protocole



Une expérimentation forestière se déroulant sur un certain nombre d'années, il est nécessaire que l'ensemble des caractéristiques du projet soient regroupées dans **un document simple appelé « protocole » qui décrit les objectifs et le plan d'expérience**. Cela permettra aux différents expérimentateurs qui se succéderont, d'assurer une cohérence dans le suivi de l'essai.

Ce document doit notamment indiquer :

- l'auteur du protocole et la date de mise à jour ;
- l'objectif de l'essai, les essences concernées, les facteurs testés et les résultats attendus ;
- la description du site ;
- les modalités étudiées ;
- le plan d'expérience (nombre de placettes, répétitions, nombre de tiges et surface des placettes, isolement...);
- les variables mesurées (sur quels échantillons, à quelles périodicités...);
- la signalisation utilisée ;
- les travaux à programmer ;
- la durée prévue de l'essai ;
- le traitement des données envisagé ;
- l'évaluation du temps nécessaire pour l'installation et le suivi ;
- la liste des annexes (convention, plans d'accès et d'installation, fiches de relevés...);

Voir pour plus de détails le plan type proposé **en annexe B**.

PRÉPARATION ET MISE EN PLACE D'UN DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Importance du propriétaire

Il faut tout d'abord apporter une grande considération à l'avis et aux contraintes propres du propriétaire et/ou du gestionnaire du site. Sa motivation et l'assurance de sa collaboration pour le suivi sont des éléments clés de la réussite de l'opération sur le long terme.

Sa compréhension du dispositif est primordiale : objectifs visés, moyens mis en œuvre pour les atteindre, itinéraires testés, durée prévue, surfaces nécessaires, répartition des rôles (travaux, entretiens...). Il doit avoir été prévenu des éventuelles contraintes imposées par l'essai (maintien d'une placette témoin sans intervention par exemple, ou de placettes en croissance libre impliquant des pertes de production, risques spécifiques) et les avoir acceptées. En forêt privée notamment, il est nécessaire de matérialiser cet accord par une convention simple précisant les engagements de chacun, à laquelle sont annexés le plan de l'essai, la liste des modalités testées et les itinéraires correspondants ainsi qu'un échéancier des travaux ou des mesures. Ce document non contraignant peut être utile lors d'une succession ou d'une vente, pour informer le nouveau propriétaire de l'existence de l'essai (voir modèle en annexe J).



© J. Fiquetron (CNPF-IDF)

Les essais installés chez des propriétaires actifs et intéressés sont toujours mieux suivis.

Choix du site

La répartition géographique de l'ensemble des expérimentations d'un organisme doit être réfléchie : on peut opter soit pour le regroupement de « pôles » de placettes par thème sur un secteur donné (pour permettre des visites groupées des sites lors de réunions ou pour faciliter les campagnes de mesure), soit pour une dispersion des essais afin d'assurer la couverture de l'ensemble d'un territoire.

Le site doit présenter une surface potentielle d'accueil de l'expérimentation suffisamment grande (généralement 2 à 3 fois la surface du dispositif) pour permettre de choisir un emplacement précis d'implantation selon les critères présentés au paragraphe suivant.

RÈGLE 5

*choix
du site*

Les **conditions d'accès** doivent être correctes (chemin carrossable, distance raisonnable entre le parking et la parcelle). Ces critères sont importants pour un bon suivi des mesures, mais aussi pour les visites éventuelles de groupes.

Pour les essais mis en place au stade plantation, l'état de la parcelle est un élément essentiel à prendre en compte et à mettre en regard avec les moyens disponibles. En particulier, sur site de reboisement, l'état du chantier en fin d'exploitation et/ou la **densité de souches** peuvent apparaître comme des facteurs limitants pour la mise en place d'une expérimentation dans de bonnes conditions, à moins de disposer de moyens financiers permettant de prendre en charge une remise en état du terrain compatible avec l'expérimentation.

Enfin, il est indispensable de veiller à identifier les sources potentielles de perturbation sur lesquelles une action est possible, et en particulier le **gibier**. Pour les essais en plantation, la présence notable de ce dernier (cerf, chevreuil, sanglier, lapin, lièvre) est un élément de risque qui peut condamner le choix du site s'il n'est pas possible de mettre en place une protection efficace (qui peut multiplier le coût d'installation par 2 à 4!).



Essai bien desservi.

© J. Rosa (CRPF Île-de-France-Centre)



Présence de chevreuil : un risque fréquent à prendre en compte.

© M. Battie (CNPFI-IDF)

Il ne faut pas hésiter à reporter l'installation d'une expérimentation lorsqu'aucun site potentiel ne répond aux critères fixés

Choix de l'emplacement du dispositif sur le site

L'environnement du dispositif ne doit pas perturber les résultats de l'expérimentation. Une **distance minimale aux peuplements voisins** doit être respectée lors de l'installation. En effet, une lisière trop proche, avec des arbres hauts, aura un effet sur la croissance des tiges

en bordure de l'essai. Cette distance doit être **au moins égale à la hauteur des arbres situés en lisière**, prioritairement en ce qui concerne les bordures sud.

Le dispositif doit être installé sur une station la plus homogène possible. La végétation préexistante est dans un premier temps un indicateur synthétique à prendre en compte. Pour les essais installés sur peuplements déjà en place, les écarts de hauteur des arbres donnent, en première approche, une bonne idée de l'hétérogénéité stationnelle.

L'homogénéité de la station est ensuite plus précisément garantie par :

- un antécédent cultural identique ;
- une situation topographique uniforme ;
- pour les terrains plats, une absence de variations microtopographiques ;
- des caractéristiques hydriques voisines ;
- une texture du sol sans modifications importantes ;
- une profondeur de sol peu variable.

Pour les trois derniers points, des sondages pédologiques sont donc à répéter sur le site pressenti. Ils sont à effectuer avant toute préparation du sol (dont ils constituent un élément de décision). Une description plus fine de la station est effectuée ultérieurement, une fois la position du dispositif précisée (voir page 44).

Un propriétaire motivé et dynamique et un site accessible, homogène et sans contrainte majeure, sont impératifs pour assurer la pérennité et la fiabilité de l'expérimentation

Surface des placettes

Chaque modalité est étudiée sur une **placette de traitement**. Celle-ci comprend une **placette de mesure**, centrale, entourée par une **bande d'isolement** (non mesurée).



Placette de mesure

La surface de la placette de mesure (et donc le nombre d'arbres mesurés) doit être définie afin de permettre un traitement statistique fiable des données jusqu'à la fin de l'expérimentation. Elle dépend donc :

- **de la durée prévue de l'essai** : cette durée conditionne plus particulièrement le nombre d'arbres encore présents en fin d'expérimentation (disparition par éclaircie et/ou mortalité).

- **du plan d'expérience**: nombre de modalités, présence ou non de répétitions (l'absence de répétitions implique des surfaces unitaires de placettes plus importantes);
- **de la variabilité de la mesure**, qui détermine le nombre d'individus nécessaire à la fiabilité statistique. Cette variabilité est dépendante de l'essence, du moment où est effectuée la mesure, de la (ou des) variable(s) étudiée(s) et du type de mesure. Dans l'idéal, elle devrait être connue avant chaque installation;
- **de la précision** de mesure recherchée.

En matière forestière, l'ensemble de ces considérations aboutit à retenir généralement **un nombre de 30 arbres mesurés en fin d'expérimentation, pour chaque population étudiée, comme un minimum nécessaire d'un point de vue statistique.**

Dans le cas de mélange d'essences, ce raisonnement doit être appliqué à chaque essence afin d'étudier l'influence du facteur testé par essence. De même, si l'on souhaite estimer des variables par statut sylvicole (arbres d'avenir, arbres élagués...), 30 arbres de chaque statut doivent au minimum être mesurés.

De manière générale, **une forme de placette de mesure proche du carré** (longueur < 1,5 x largeur, selon la surface homogène disponible) est préférable, notamment pour les suivis de plantations. Cette forme minimise la surface des bandes d'isolement et le nombre d'arbres de bordure.

Sur un même essai, les **placettes de mesure peuvent avoir des surfaces différentes**, qui sont variables selon les densités finales des modalités étudiées. Une placette « témoin » sans intervention peut par exemple avoir une surface plus petite que des placettes éclaircies. Il est toutefois préférable d'éviter d'installer sur un même site des placettes **avec des écarts de surface trop importants** (un facteur multiplicateur inférieur à trois est conseillé).

Bande d'isolement

La bande d'isolement correspond à quelques lignes non mesurées mais soumises au même traitement que la placette de mesure. Elle permet de limiter les influences des traitements voisins. La largeur de l'isolement doit être d'autant plus importante que la durée prévue de l'essai est longue. Dans l'idéal, elle est **supérieure à la moitié de la hauteur probable des arbres à la fin de l'expérimentation** avec un minimum de **10 mètres** (avec modulation possible dans le cas particulier des tests d'élimination de courte durée: voir chapitre 3, page 126).

Placette de traitement

La placette de traitement est constituée de la placette de mesure, entourée de la bande d'isolement. L'ensemble des arbres y sont soumis au même traitement (même modalité du facteur testé). Sa surface est en général de l'ordre du double de celle de la placette de mesure.

Le tableau suivant indique, selon la densité prévue en fin d'expérimentation, les surfaces usuelles de placettes carrées permettant de conserver, sur la durée de suivi, 30 tiges mesurées.

Densité prévue en fin d'expérimentation (nb/ha)	Nombre final d'arbres mesurés	Surface de la placette de mesure (ares)	Largeur de l'isolement (m)	Surface de la placette de traitement (ares)	Surface de l'isolement (ares)
Nf	Nm	$S_{mesure} = (100 / Nf) \times Nm$	Liso	$Strait = S_{mesure} + S_{iso}$ $= \frac{(\sqrt{S_{mesure} \times 100 + 2 \times Liso})^2}{100}$	$S_{iso} = Strait - S_{mesure}$
70	30	42,86	10	73,04	30,19
100		30,00		55,91	25,91
150		20,00		41,89	21,89
200		15,00		34,49	19,49
250		12,00		29,86	17,86
300		10,00		26,65	16,65
350		8,57		24,28	15,71

Exemple :

Pour bien se rendre compte de l'influence de la durée prévue de l'essai sur la surface de la placette de mesure, voici le calcul de cette surface pour le suivi d'une plantation à 1 100 plants/ ha selon deux durées :

- durée de 10 ans sans prévision de dépressage, et en considérant 10 % de pertes naturelles : placette de mesure de 3 ares.
- durée de 50 ans en considérant une densité à terme de 250 tiges/ha : placette de mesure de 12 ares (soit quatre fois plus grande que pour un suivi sur 10 ans).

En intégrant un isolement de 10 m dans le premier cas, et de 15 m dans le second, on obtient en surface de traitement : 14 ares pour 10 ans de suivi, contre 42 ares pour 50 ans de suivi (soit trois fois plus de surface).

Inversement, on part souvent de la surface homogène disponible sur le terrain pour installer les placettes. On peut alors en déduire la durée maximum de suivi pour un traitement donné. Ainsi, dans l'exemple précédent, si la surface homogène pour une placette (isolement

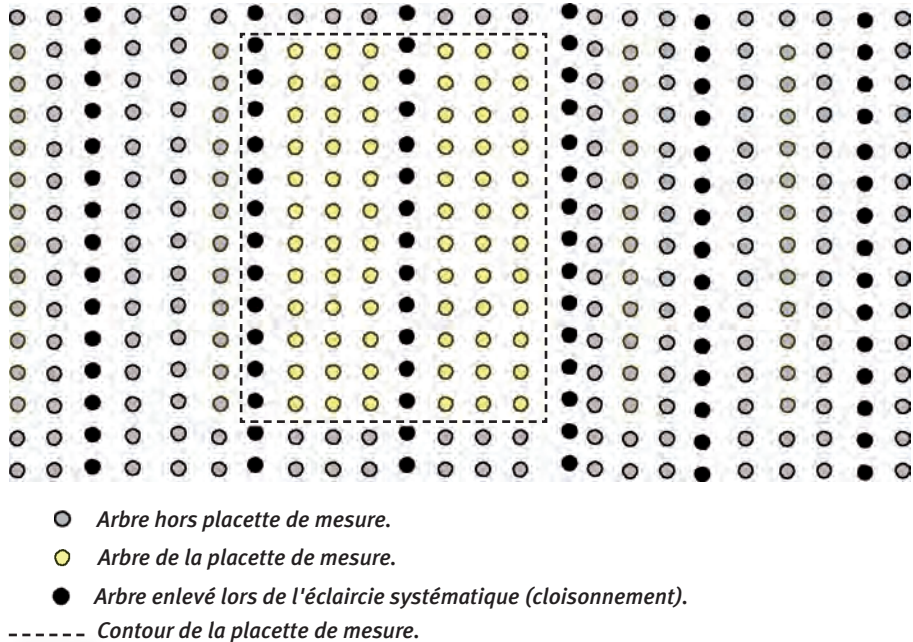
compris) n'est que de 30 ares (soit 12 ares mesurés), une modalité ne pourra faire l'objet d'un traitement statistique fiable jusqu'à la fin de l'expérimentation que si la densité excède au final 250 tiges/ha (voir tableau, page 35). Un itinéraire dynamique ne pourra donc pas être testé.

La surface de la placette de mesure doit permettre de mesurer 30 arbres au minimum sur toute la durée de l'expérimentation. Un isolement entre les placettes de mesure doit être prévu afin de limiter l'influence entre modalités jusqu'en fin d'expérimentation

Emplacement des placettes

Une fois définis le nombre de modalités, les éventuelles répétitions, et les surfaces unitaires de chaque placette, le schéma d'implantation du dispositif peut être dressé (sur la partie du site reconnue comme homogène), en privilégiant le tirage au sort pour la répartition des modalités.

En cas d'installation sur une plantation, la limite de placette doit passer entre deux lignes (et entre deux plants) de manière à ce que la densité initiale soit la même pour chaque placette.



Exemple de plan d'installation d'une placette de mesure sur une plantation avec un cloisonnement une ligne sur 4.

Attention : en cas de cloisonnements ou d'andains, la proportion de ceux-ci dans les placettes de l'expérimentation doit être identique à la proportion dans le peuplement étudié (voir schéma, page 36). De même, en cas d'espacements irréguliers, les densités initiales entre placettes et dans le peuplement de départ doivent être voisines.

Installation d'un essai au stade plantation

Certains types d'essais imposent de **maîtriser la mise en place des placettes bien avant la plantation** (exemples : essai de densité ou de comparaison de matériel génétique...). Il est alors nécessaire d'**être spécialement attentif aux différentes étapes d'installation**, en conformité avec le plan d'expérience.

Ces attentions particulières sont développées au chapitre 2, page 74 et au chapitre 3, page 124.

Les principales étapes de l'installation d'un essai au stade plantation sont les suivantes :

- **Préparation du terrain**

Il s'agit de préparer le terrain pour les plants mais aussi pour la mise en place expérimentale. Les travaux à réaliser sont fonction de l'antécédent cultural : boisement ou reboisement.

- Pour un **boisement**, les travaux peuvent être un **broyage de la végétation** et un **travail du sol** plus ou moins important, à adapter aux différentes situations (sous-solage, labour, disquage, hersage, culti-sous-solage...). Si le sous-solage est uniquement réalisé sur la ligne, il est nécessaire de pré-piqueter les lignes.

Pour faciliter le piquetage, qui peut parfois être complexe, une bonne finition du travail du sol comme le hersage est conseillée.

- Pour un **reboisement**, un **nettoyage approfondi** des rémanents est en général utile afin de faciliter la circulation sur la parcelle (mais la présence ou non de rémanents peut être aussi l'objet de l'expérimentation...).

- **Piquetage**

Le piquetage se réalise en trois temps :

- mise en place des piquets d'angle des placettes ;
- marquage des extrémités de ligne ;
- marquage des emplacements sur la ligne.

- **Réception et stockage des plants**

Il convient de prévoir une protection et une surveillance des plants durant le stockage (risque de vols, de dégradation). Les moyens de stockage doivent permettre une conservation des plants dans des conditions optimales de température et d'humidité.

© P. Blanchard (CRPF Pays de la Loire)



Préparation du terrain par broyage avant plantation.



Piquetage.

© S. Girard (CNPF-IDF)

© A. Ducouso (INRA)



Réception des plants.



Distribution de cagettes de plants dans un test de descendances de douglas.

© S. Matz (Cemagref)

© A. Ducouso (INRA)



Mise en terre.



Protection individuelle contre le chevreuil.

© F.-X. Saintonge (DSF)

- **Distribution des plants et plantation**

Pour les dispositifs complexes avec une grande quantité de plants, une organisation spécifique de la distribution des plants par modalité doit permettre d'éviter les erreurs et d'optimiser le temps de travail des planteurs. Les racines des plants devront alors être protégées du dessèchement.

- **Protections individuelles ou clôture**

Si une clôture est envisagée, elle doit être posée avant plantation et après piquetage afin de limiter les erreurs d'implantation (vérifier qu'elle ne renferme pas d'animaux). En revanche, la protection individuelle s'installe après plantation. Attention, les protections individuelles peuvent gêner la surveillance de l'état des plants et les premières mesures.

Signalisation...

Voir schéma page 41.

...de la placette de traitement

Les contours de la placette de traitement sont matérialisés, dès que possible. Les **arbres extérieurs** les plus proches de la placette sont marqués à la peinture vers l'intérieur tandis que les **arbres intérieurs** les plus proches de la limite sont marqués vers l'extérieur. **Ce marquage doit être visible de l'intérieur et de l'extérieur de la placette.** Il doit en effet signaler à des intervenants étrangers au dispositif (exploitants, élagueurs...) qu'ils pénètrent dans une zone particulière.



...de la placette de mesure

Les quatre coins de la placette de mesure sont matérialisés par des **piquets durables** (robinier, châtaignier) de 1,20 m, peints aux extrémités. Ils permettent de visualiser facilement la surface mesurée.

Les arbres extérieurs les plus proches de la placette sont marqués, dès que leur taille le permet, et forment une ligne plus ou moins complète entourant la placette de mesure. **Le marquage doit être visible de l'intérieur de la placette** afin de permettre à la personne qui effectue les mesures de se rendre compte rapidement de la fin d'une ligne. Les arbres de coin peuvent être marqués d'une croix.



© S. Girard (CNPF-IDF)

Gros piquet de châtaignier matérialisant le coin d'une placette et portant le nom du traitement testé (ici dans un essai comparant plusieurs variétés de douglas, la placette concerne la variété France 1-VG).

...des arbres mesurés

Chaque arbre mesuré en circonférence est **marqué à la peinture d'un trait horizontal** (en principe à 1,30 m de hauteur) permettant d'effectuer la mesure toujours au même niveau. Le numéro de certains arbres (par exemple en bout de ligne) peut également être matérialisé sur le tronc. Tous les arbres sont numérotés dans le cas de peuplements âgés (arbres peu nombreux et espacés) ou irréguliers, dans lesquels l'identification des tiges ne peut se faire facilement à l'aide des lignes de plantation. Il est aussi possible d'installer des étiquettes portant les numéros d'arbres.



© C. Giništy (Cemagref)

Niveau de mesure permanent à 1,30 m et numérotation individuelle par étiquette gravée en aluminium et ressort – Dispositif chêne du GIS Coopérative de données (Saint-Palais, 18).

...du premier arbre de la placette de mesure

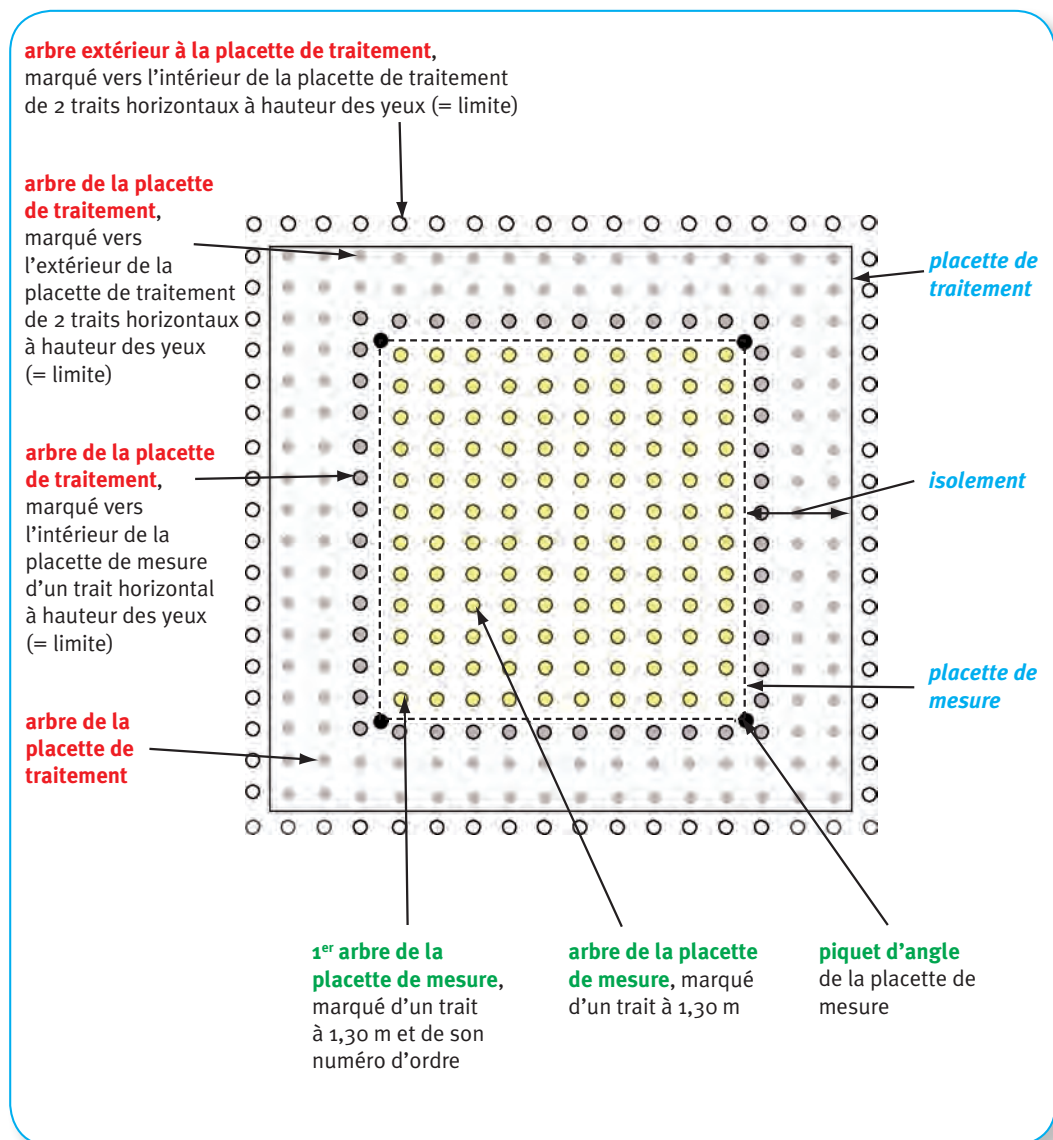
Le premier arbre vivant de la placette de mesure est **marqué de son numéro d'ordre** et d'un **identifiant de la modalité**, soit à la peinture, soit à l'aide d'une étiquette. Les mesures devront en principe commencer par lui.

Entretien des signalisations

Le marquage doit être entretenu et les marques refaites dès que le besoin s'en fait sentir (effacement naturel de la peinture, exploitation d'un arbre portant une marque de limite, piquets d'angle détruits lors de l'exploitation...). Il faut prévoir de **refaire les peintures tous les trois à cinq ans en moyenne** (privilégier les peintures longue durée). Le temps consacré au marquage facilite les mesures suivantes et limite les erreurs.

Une signalisation homogène et entretenue facilite le suivi. Ne pas hésiter à reprendre le marquage avant qu'il ne soit plus visible (tous les 3 à 5 ans)

Matérialisation d'une modalité dans un dispositif



RÈGLE 7

plan de l'essai

Plan de l'essai

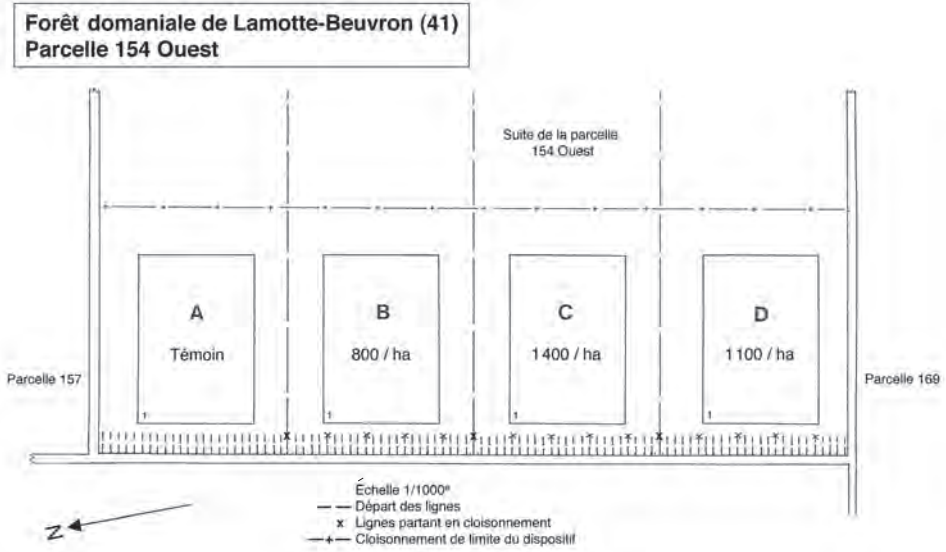
Un plan localisant précisément les placettes est établi une fois pour toutes à l'installation. Il comporte :

- l'intitulé de l'essai et son numéro de référencement ;
- la position des placettes les unes par rapport aux autres ;
- la localisation de chemins, ou autres points pérennes facilement identifiables sur le terrain ;
- pour les placettes de traitement : les distances et/ou le nombre de lignes ;
- pour les placettes de mesure : les distances et/ou le nombre de lignes ;
- la position des piquets d'angle ;
- la signification du marquage et des couleurs de peinture utilisées ;
- la position du premier arbre et la direction de progression lors des mesures ;
- les cloisonnements éventuels ;
- la direction du nord ;
- l'échelle du plan ;
- l'environnement (nature des parcelles voisines...) ;
- la date de réalisation du plan et l'auteur ;
- le géoréférencement du « point d'entrée » du dispositif (en précisant le référentiel).

Le plan d'accès à l'expérimentation (extrait de carte Michelin ou carte informatisée, plan de la forêt avec N° de parcelles éventuels...) doit également être annexé. Une photo aérienne (Google earth) peut être ajoutée.

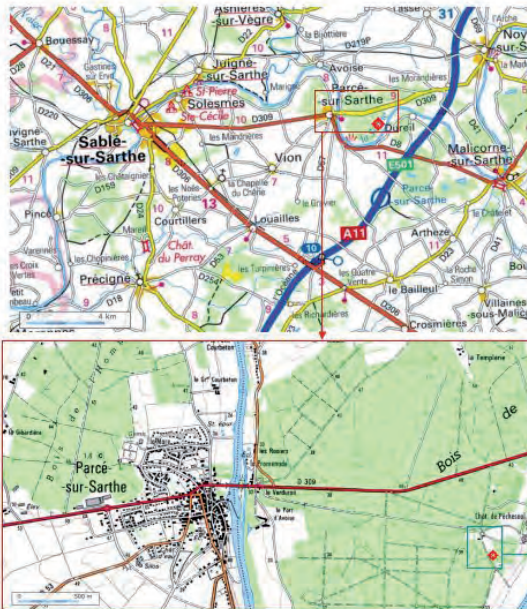
Le plan de l'essai facilite le suivi du dispositif et le passage de relais d'un opérateur à un autre

Source : S. Perret (Cemagref)



Plan d'un essai d'éclaircie sur pin laricio de Corse (Cemagref, GIS Coopérative de données, Lamotte-Beuvron, 41).

Source : CRPF Pays de la Loire



Essai 7210003 :
Cèdre de l'Atlas de 1956
à Avoise (72)

Coordonnées Lambert 93 :
X = 4630
Y = 6753

Exemple de plan d'accès à une référence mesurée. Il est rappelé que les accès aux parcelles forestières sont toujours soumis à autorisation du propriétaire.

DESCRIPTION DU DISPOSITIF ET SUIVI

RÈGLE 8

*description
du dispositif*

Parallèlement aux mesures, les informations suivantes sont précieuses pour les analyses futures. Elles doivent figurer dans **un compte rendu d'installation** et être renseignées le plus précisément possible, de préférence au moment où l'information est disponible. Leur informatisation doit être standardisée.

Ce compte rendu ainsi que le plan de l'essai et les différentes fiches le concernant (fiche station, fiche de suivi...) sont à insérer dans un dossier tenu à jour régulièrement.

Historique et conditions d'installation

Toutes les opérations effectuées sur la parcelle avant ou à l'installation doivent être décrites et datées, en particulier s'il s'agit d'un essai au stade plantation. Les informations économiques doivent si possible être enregistrées et ramenées à l'hectare (temps et types de travaux) :

- antécédent culturel (terre agricole, prairie, friche, peuplement...);
- type de nettoyage et/ou préparation du terrain (broyage, travail du sol...);
- essence et provenance (ou cultivar) des plants utilisés;
- type de plants (âge et mode de culture);
- conditions d'installation des plants ou des semis;
- difficultés lors de l'installation (conditions climatiques...) pouvant influencer sur la reprise des plants;
- le cas échéant, interventions sylvicoles: dégagements, tailles, élagages (hauteur, nombre de tiges...), dépressages ou éclaircies (nombre de tiges et volumes exploités, date d'exploitation...).

Description de la station

Pour chaque dispositif, une description stationnelle plus précise que celle effectuée lors de la présélection (voir page 33) doit être réalisée.

La période la plus propice à cette description est généralement le **printemps, sur sol ressuyé**. Elle doit se faire à l'aide d'une **fosse d'au moins 40 cm de profondeur** (creusée à la pioche et à la bêche), réalisée en un point représentatif du dispositif, complétée si nécessaire en fond de fosse par un sondage à la tarière pédologique. Des sondages par placette sont utiles pour déceler d'éventuelles variations par rapport au profil obtenu sur la fosse; on indique sur le plan leur localisation.

La référence à un éventuel catalogue ou guide de stations sera mentionnée.

On trouvera page 46 un exemple de **fiche simplifiée** de relevé, élaborée par le Pôle Expérimentations Forêt Privée Française. En **annexe H** figure un protocole détaillé de description stationnelle, qui fournit des précisions utiles pour remplir les rubriques de cette fiche (régime hydrique, profil pédologique, formes d'humus...).

Dans le chapitre 2 (pages 83 et 84), une **fiche de description plus détaillée** est proposée, utilisant le même protocole.

Une description homogène et codifiée des stations permet, lors de l'analyse, de regrouper plus facilement les sites d'un réseau par grands types synthétiques stationnels



© P. Gomin (CNPFF-IDF)

Une petite fosse.



© M. Battie (CNPFF-IDF)

Matériel pour examen du sol : mesure de pH.

FICHE SIMPLIFIÉE DE DESCRIPTION DE STATION

Dispositif n°

Auteur(s)

Date mesure

Renseignements généraux (bureau)

Propriétaire

Surface dispositif suivi, en ha

Département

Commune

Forêt

Altitude

Caractérisation de la station (en juin, si eau présente en hiver)

Point GPS (centre placette mesure) : référentiel longitude latitude

Exposition (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO, sans si pente < 10%)

Topographie crête, sommet de croupe plateau, terrasse

bas de versant dépression

haut de versant vallon

milieu de versant plaine alluviale

replat autres (préciser)

Pente en %

pH à 10 cm de profondeur

Niveau hydrique estimé

xx	très sec	f	frais
x	sec	ft	assez humide
mx	assez sec	hh	humide
mf	assez frais	H	très humide (trs inondé)

Niveau trophique estimé

AA	très acide (très pauvre)	a	peu acide (assez riche)
A	acide (pauvre)	n	neutre (riche)
aa	assez acide (assez pauvre)	b	calcaire

Forme d'humus :

Profil pédologique

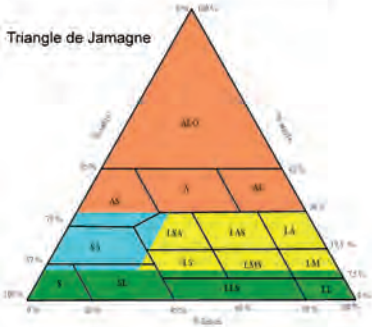
entre .. et .. cm	Texture	Hydromorphie	Calcaire actif	Charge cailloux	Couleur
0 à					
..... à					
..... à					
..... à					
..... à					
..... à					
..... à					

- Note hydromorphie (taches rouille)**
- 0 = aucune tache ou presque (0 à 2 %, engorgement nul ou faible)
 - 1 = un peu décoloré + qqs taches diffuses sur 2 à 15 % (eng. temp.)
 - 2 = partiellement décolorée + taches abondantes > 15 % (eng. temp.)
 - 3 = entièrement décolorée + taches rouille et grises (eng. temp.)
 - 4 = gley (engorgement permanent)

- Note calcaire actif (HCI dilué à 10 %)**
- 0 = pas effervescence
 - 1 = légère effervescence
 - 2 = forte effervescence

- Note charge cailloux**
- 0 = absence
 - 1 = présence faible (< 40 %)
 - 2 = présence forte (> 40 %)
 - 3 = abondance (blocage)

- Note couleur**
- 1 = Brun foncé à noir,
 - 2 = Brun, Brun jaunâtre, Jaune brunâtre, Brun très pâle,
 - 3 = Blanchâtre, Blanc,
 - 4 = Brun grisâtre, Gris, Gris clair
 - 5 = Gris bleu, Gris verdâtre
 - 6 = Ocre, Rouille
 - 7 = Bariolé (ausant de taches d'oxydation que de décoloration)
 - 8 = Tacheté (taux de taches rouille < 40%)



Arrêt Volontaire forcé

Contrainte

- ▣ profondeur en cm
- ▣ nature
- nappe
- substrat, roche
- horizon compact
- autre (alios, ...)
- pas d'obstacle identifié

Type de sol, si connu

Régime hydrique

- départ d'eau > apports
- apports et départs équilibrés
- apports faibles à moyens > départs
- apports importants > départs
- nappe permanente ou dépression tourbeuse

- Anneau réalisable (argile > 30 %)
- Anneau fissuré à 1/2 de la fermeture (limon > argile)
- Anneau fissuré à 1/4 de la fermeture (argile > limon)
- Pas de boudin possible (argile < 10%)

Nom catalogue station

Type station

Remarques :

Exemple de fiche de description stationnelle utilisée par le Pôle Expérimentations Forêt Privée Française.

Suivi des interventions

- **Toutes les opérations effectuées sur les placettes** depuis l'installation du dispositif doivent être datées (mois et année) et décrites en précisant les **temps passés**, les **matériels** utilisés, les **conditions climatiques** ayant pu influencer sur leur réalisation. Il s'agit des opérations **expérimentales** (visites de contrôle, campagnes de mesure, entretien de la signalisation...) et des opérations **sylvicoles** (tailles, élagages, dépressages, éclaircies...). Ces informations sont consignées dans **une fiche de suivi** chronologique simple mais mise à jour périodiquement.
- **Des informations économiques** sont si possible relevées : temps de travaux, coûts et recettes (ramenés à l'ha, et/ou au m³), mode de vente (sur pied ou bord de route...), différenciées par modalité de traitement (isolement compris).

Il convient cependant de signaler que, dans la majorité des cas, il est difficile d'obtenir des informations économiques fiables par modalité, les placettes étant en général de surface trop réduite (0,5 ha serait un minimum), et les conditions d'exploitation ne permettant souvent pas un tri et un cubage des produits par modalité.

À chaque passage sur le dispositif, on indique la **date théorique prévue pour le prochain passage** et les opérations à réaliser, informations qu'il est souhaitable de transmettre au propriétaire en même temps que les résultats du suivi.

Suivi des adversités

Les adversités survenues entre deux campagnes de mesure doivent être relevées et consignées dans la fiche de suivi : type d'adversité (tempête, gel, sécheresse, dégâts de gibier...), date de l'événement (mois et année), dégâts occasionnés. Une campagne de mesure supplémentaire peut être déclenchée en cas de fait marquant, en utilisant notamment la variable « notation de problèmes phytosanitaires » (voir chapitre 2, page 97).

Photographies

La prise de photographies est toujours intéressante pour montrer l'évolution des peuplements depuis l'installation. Il est conseillé de réaliser les clichés en identifiant clairement la modalité, le ou les arbres pris en photo (ou la direction visée), et l'emplacement de l'opérateur (piquet, arbre...) afin de permettre le renouvellement de la photo les années suivantes.



© M. Laporte et J. Rosa (CRPF Île-de-France-Centre)

Photographies prises du même point en 2000, 2005 et 2010 dans une placette d'expérimentation de dégagement de régénération naturelle de chênes (Précy, 18).

MESURES

Identification des arbres mesurés

Principe d'individualisation



Un des principes de base de l'expérimentation en forêt est l'**individualisation des arbres mesurés**. Il est donc nécessaire d'**identifier clairement les tiges, sur le terrain et lors du stockage informatique des données**. Cette individualisation est peu coûteuse en temps (à faire une seule fois à l'installation du dispositif). Elle permet une **valorisation optimale des résultats** (par exemple : possibilité de calcul des accroissements individuels), mais aussi facilite le repérage lors des campagnes de mesure successives et minimise les risques d'erreurs (cohérence des accroissements mesurés : voir « vérification des données » page 59).

Chaque arbre suivi doit être identifié par un numéro et si possible une caractéristique de localisation (par exemple, en plantation, numéro de ligne et numéro d'ordre sur la ligne). Si cette variable de localisation est impossible à définir simplement, une matérialisation sur le terrain du numéro d'arbre est alors indispensable (numéro à la peinture, étiquette...).

Dans le cas d'un mélange d'essences, l'essence doit aussi être renseignée pour chaque arbre.

Le suivi d'un peuplement par l'identification des arbres mesurés est développé en **annexe C**.

Cas des échantillons

Chaque fois que cela est matériellement possible, il est **conseillé de suivre tous les arbres** de la placette de mesure. Cependant, lorsque le suivi individuel est difficilement concevable (régénération naturelle les premières années), la **mesure d'un échantillon peut remplacer le suivi complet durant une période limitée**. Ce cas est traité en **annexe C**.

Des **échantillons spécifiques** peuvent aussi être définis parmi les arbres mesurés s'ils font l'objet d'**opérations particulières** (arbres désignés, arbres élagués). Ce cas est traité en **annexe D**.

Des échantillons peuvent enfin être **constitués pour la mesure de certaines variables** lorsque celle-ci n'est pas réalisable sur l'ensemble des tiges à un coût raisonnable (par exemple les mesures de hauteur : voir page 56). Les principes de constitution des échantillons doivent alors être précisés lors de la définition de chaque variable.

Quel que soit l'échantillon, l'**individualisation de la mesure doit être la plus précise possible**.



© J. Rosa (CRPF Île-de-France-Centre)

Essai d'éclaircie de taillis de chêne sessile avec individualisation des arbres désignés (Le Châtelet, 18).

Cas des inventaires

Les inventaires exhaustifs sans individualisation des arbres, adaptés à des études ponctuelles, **ne sont pas conseillés dans le cas des expérimentations avec un suivi dans le temps**. L'absence de contrôle possible de la validité des mesures est le principal défaut de cette méthode, qui ne permet en outre qu'un gain de temps faible. Ils permettent cependant de fournir ponctuellement des données « peuplement » lorsque l'individualisation est temporairement impossible (régénération naturelle : voir **annexe C**) ou en complément d'un suivi d'échantillons spécifiques (arbres désignés : voir **annexe D**).

L'individualisation des arbres mesurés garantit le suivi précis des peuplements dans le temps

Prise des mesures

Première mesure

Dans le cas d'une installation au stade plantation, **la première mesure se fait avant le démarrage de la première année de végétation**. En cas de travail du sol préalable, il est souhaitable que le niveau de ce dernier soit stabilisé au pied du plant.

Pour certaines essences (par exemple les résineux monocycliques), la première mesure de hauteur peut être faite après un an de croissance, ce qui permet de mesurer à la fois les hauteurs à l'installation, les hauteurs après un an de pousse, et la mortalité.

Dans le cas d'une installation dans un peuplement déjà en place, la **première mesure doit se faire impérativement avant l'intervention sylvicole** marquant le début des itinéraires testés (s'il y en a une), et en **période de repos végétatif**.

Période de mesure

- les mesures de croissance sont impérativement prises **hors période de végétation** (donc en général d'octobre à mars) ;
- en cas d'intervention sylvicole programmée, toutes les variables susceptibles d'être influencées sont mesurées **avant et après l'intervention** sur les arbres concernés par celle-ci.

Exemple: si la branchaison est étudiée, il est important de la noter avant et après élagage de branches vertes.



© F. Milano (Cemagref)

2^e éclaircie expérimentale dans un essai pin laricio de Corse (Verneuil sur Avre, 27).

Datation

L'année mesurée est considérée comme étant l'année de végétation au cours de laquelle s'est effectuée la dernière période de croissance :

- si la mesure a lieu en fin d'année n (de la fin de l'automne au 31 décembre), l'année de végétation mesurée est l'année n ;
- si la mesure a lieu en début d'année n (du premier janvier au début de printemps), l'année de végétation mesurée est l'année n-1.

Dans tous les cas, il est impératif de noter sur les fiches de mesure au minimum le mois et l'année de chaque campagne de mesure, ainsi que le nom des opérateurs

Périodicité

La périodicité des mesures doit être définie dans le protocole; elle est fonction des objectifs de l'essai, des variables mesurées, mais aussi de la dynamique de croissance du peuplement.

La périodicité doit permettre de **suivre dans le temps l'évolution du facteur mesuré**. Elle doit être adaptée à ce facteur de manière à ne pas manquer une évolution importante. Inversement, il est inutile de mesurer trop fréquemment un facteur à évolution lente. Pour la croissance par exemple, une **périodicité de trois ans** constitue en général un bon compromis, mais elle peut être ramenée dans certains cas à un an (peuplier), ou au contraire portée à cinq ans (chêne).



© É. Paillassa (CNP-IDE)



© P. Blanchard (CRPF Pays de la Loire)

Bien adapter le rythme des mesures à la vitesse de croissance des arbres : à gauche ; essai peuplier de 4 ans (1998) à Sainte-Hermine (85), à droite le même essai peuplier à 17 ans (2011) avant exploitation.

Si un pas de temps régulier fixé selon le type d'expérimentation est conseillé, des mesures intermédiaires sont parfois nécessaires, notamment avant une intervention sylvicole (éclaircie, élagage, dégagement...), afin d'en évaluer l'effet. Dans le cas d'une éclaircie, il est particulièrement important de **mesurer les placettes juste avant la coupe, pour ne pas perdre l'accroissement depuis la dernière mesure des arbres marqués en éclaircie**. Cette campagne permet alors de relever la note « état = e » de ces derniers avant abattage. On s'assurera cependant de la réalisation effective de l'éclaircie avant la reprise de la végétation car, si elle était différée, une nouvelle mesure serait à programmer.

La vérification individuelle de l'abattage des arbres martelés est souvent effectuée lors de la campagne de mesure suivante.

Contrôle de validité

D'un point de vue pratique, chaque campagne de mesure doit être effectuée à l'aide d'une **fiche** (ou d'un outil informatique de saisie) **rappelant les données de la campagne de mesure précédente**. Ce principe présente l'intérêt de limiter les doutes et les erreurs sur le terrain pour la campagne en cours, et permet de corriger d'éventuelles erreurs de la campagne précédente. Si un outil informatique est utilisé (par exemple « psion workabout »), il est utile de mettre en place des contrôles de validité automatiques (fourchettes de mesures acceptables, signalement d'accroissements négatifs...).

Variables de base

Sur chaque individu, une ou plusieurs variables sont mesurées. Les variables de base, mesurées quel que soit le type de dispositif installé (sauf exception) sont :

- l'« état », noté sur l'ensemble des arbres ;
- la circonférence des arbres à 1,30 m, prise sur l'ensemble des arbres (dès que sa mesure est possible) ;
- la hauteur totale, prise le plus souvent sur un échantillon de tiges représentatif de la gamme des circonférences ;
- une variable « observation », regroupant des informations ponctuelles (accidents...).



« État »

- **Principe**

Cette variable, qui traduit l'état de l'arbre (vivant, mort, éclairci...) peut être codée par des lettres. La planche de la page 54 fournit un certain nombre d'exemples de codes.

- **Échantillon**

Tous les arbres.

- **Périodicité**

À chaque passage en mesure.

- **Utilisation**

Suivi de la mortalité naturelle ou accidentelle ; quantification de l'intensité d'une intervention sylvicole.

Exemples de codes de la variable « État »



© P. Riou-Nivert (CNPFF-IDF)

a : arbre vivant.



© F. Milano (Cemagref)

e : pins sylvestres marqués en éclaircie (en rouge). Ils deviendront « *s* » à la prochaine campagne de mesure (après la coupe).



© P. Riou-Nivert (CNPFF-IDF)

c : chablis (arbre totalement déraciné). Il deviendra « *s* » à la prochaine campagne de mesure.



© P. Blanchard (CRPF Pays de la Loire)

v : volis (bris à moins de la moitié de la hauteur). Il deviendra « *s* » à la prochaine campagne de mesure.



© P. Riou-Nivert (CNPFF-IDF)

m : arbre mort. Il deviendra « *s* » à la prochaine campagne de mesure.



© J. Rosa (CRPF Île-de-France-Centre)

s : sans statut, emplacement devenu vide (emplacement théorique de plantation ou ancien emplacement d'un arbre qui a disparu).

Circonférence des arbres à 1,30 m

- Principe

La circonférence est **mesurée à 1,30 m au ruban, au cm près** (arrondi au cm le plus proche), dans un plan perpendiculaire à l'axe de la tige (donc pas forcément horizontalement), à l'endroit repéré à cet effet à la peinture.

Quelques cas particuliers peuvent néanmoins se présenter :

- lorsqu'un défaut déforme nettement la tige à 1,30 m, un niveau de mesure marqué à la peinture (au-dessus ou au-dessous du défaut) est choisi, et permet de remesurer l'arbre toujours au même endroit ;
- lorsqu'une fourche est présente au-dessous de 1,30 m, c'est la circonférence du brin le plus gros qui est retenue. La variable « observation » est alors renseignée de cette particularité.

- Échantillon

Pour une expérimentation sur jeune peuplement, la mesure de circonférence débute **lorsque plus des $\frac{3}{4}$ des arbres dépassent 10 cm de circonférence**. Tous les arbres dépassant 1,30 m de hauteur sont alors mesurés en circonférence (et en hauteur une dernière fois). Tant qu'un arbre n'a pas atteint 1,30 m, sa hauteur totale est mesurée jusqu'à ce qu'au moins une année de mesure comporte à la fois la mesure de sa hauteur et celle de sa circonférence.

- Périodicité

Elle est fonction des objectifs de l'essai, mais aussi de la dynamique de croissance du peuplement. Il est inutile d'avoir des suivis trop proches quand le peuplement a une croissance faible. Une périodicité de l'ordre de 3 ans convient en général.

- Utilisation

La circonférence est une donnée indispensable pour suivre précisément les accroissements individuels des arbres. De même, elle permet de calculer des variables synthétiques indicatrices de la croissance et de la production du peuplement telles que la circonférence de l'arbre moyen ou la surface terrière (voir page 61).



Mesure de la circonférence à 1,30 m en octobre dans un essai de dépressage sur chênes sessile et pédonculé (Précy, 18).

Hauteur totale

- Principe

La hauteur totale est la **distance verticale entre le sol et la base du bourgeon le plus haut de l'arbre** (sans redresser l'extrémité de la tige). La précision est le cm le plus proche jusqu'à 5 m de hauteur et le dm le plus proche au-delà. Le matériel utilisé est en général la règle ou la perche pour les arbres d'une hauteur inférieure à 10 m, le dendromètre au-delà.

En **annexe G** sont détaillées les précautions à prendre pour la réalisation des mesures de hauteur.

- Échantillon

Pour les expérimentations installées en jeune peuplement, tant que **les $\frac{3}{4}$ des arbres n'ont pas dépassé 10 cm de circonférence à 1,30 m, tous les individus sont mesurés en hauteur. Passé ce stade, lorsqu'un arbre a toujours une hauteur inférieure à 1,30 m, sa hauteur totale est mesurée jusqu'à ce qu'au moins une année de mesure comporte à la fois la mesure de sa hauteur et celle de sa circonférence.**

Ensuite, notamment pour les placettes présentant un grand nombre de tiges (placettes de plus de 10 ares), les mesures de hauteur sont limitées à **un échantillon de tiges couvrant au mieux la variabilité des circonférences.**

Exemple de mode opératoire :

L'échantillon des hauteurs à mesurer comporte 20 tiges, choisies après mesure des circonférences. La liste des circonférences de la placette est découpée en 5 classes de même amplitude. Il suffit alors de choisir quatre tiges (si possible bien réparties spatialement, non fourchues ni penchées, et non cassées en cime) représentatives de chaque classe et de mesurer leur hauteur.

Le suivi dans le temps des mêmes arbres est en général privilégié, sous réserve qu'ils restent représentatifs du peuplement. Dans le cas contraire ou en cas de disparition, certains arbres devront être remplacés par d'autres tiges de classes de circonférence sous-représentées.

- Périodicité

De préférence à chaque passage en mesure et au minimum avant chaque coupe.

- Utilisation

Cet échantillonnage permet d'établir, par une régression (linéaire ou curviligne), une relation hauteur/circonférence.



© CRPF Aquitaine

Mesure de hauteur à la perche télescopique.



© CRPF Aquitaine

Mesure de hauteur au dendromètre (Vertex).

Cette relation permet ensuite d'estimer graphiquement ou à l'aide de la formule de régression calculée, la **hauteur dominante** ou la **hauteur moyenne** (voir définitions plus loin page 62). La hauteur dominante est classiquement utilisée pour comparer les fertilités entre placettes.

Cette relation peut également servir pour estimer la hauteur totale de chaque arbre (à l'aide de sa circonférence et de la formule de régression), et ainsi utiliser les tarifs de cubage à double entrée pouvant exister pour l'essence.

« Observation »

- Principe

Cette variable peut être renseignée par du texte libre, notant une particularité ou un événement subi par l'arbre.

- Échantillon

Certains arbres, lorsque l'opérateur y voit un intérêt.

- Périodicité

À chaque passage en mesure.

- Utilisation

Cette variable donne des informations non normalisées, et bien souvent non utilisées dans les traitements de données. Elle a pour vocation de garder en mémoire des observations non prévues par le protocole. Elle peut cependant permettre d'interpréter certaines évolutions individuelles non explicables par les variables mesurées.

Autres variables

Les variables de base peuvent être le cas échéant complétées par des **variables supplémentaires** quantitatives (cubage, inclinaison...) ou qualitatives (forme, rectitude, état sanitaire...). Dans ce dernier cas, elles doivent être estimées avec prudence, en utilisant un protocole précis qui permette à la mesure de rester objective.

Le choix des variables supplémentaires est fonction de l'objectif visé : elles doivent caractériser au mieux les critères permettant d'évaluer le facteur testé et leur estimation doit être la plus simple et précise possible.

Exemple : si l'on souhaite tester l'effet de différentes densités de plantation sur la qualité des arbres, des mesures de la forme des tiges et de la branchaison doivent être effectuées.



© C. Couteau (Cemagref)

Un grand nombre de variables peuvent être envisagées, mais il faut garder à l'esprit que **la durée d'une campagne de mesure sur un essai est directement fonction du nombre de variables mesurées.**

Il est préférable de mesurer des variables utilisées sur plusieurs dispositifs avec le même protocole afin de permettre la comparaison entre expérimentations.

Une liste de variables supplémentaires figure en **annexe E**.

NB : Dans le cas d'une variable qualitative, il est conseillé d'éviter de retenir un nombre impair de notes possibles, qui amène le notateur à privilégier la note centrale.

Mesures sur tige abattue dans une modalité d'éclaircie de pin sylvestre (Brinon sur Sauldre, 18).

Pour toute expérimentation, les variables de base doivent être mesurées : état, circonférence, hauteur totale et observations.

Des variables supplémentaires, choisies pour caractériser au mieux les critères évaluant le facteur testé, peuvent être ajoutées

TRAITEMENT DES DONNÉES

Toutes les placettes expérimentales, une fois la validité des données vérifiée et leur stockage effectué, se prêtent au calcul de variables synthétiques et à une analyse descriptive des résultats, permettant des comparaisons simples entre modalités.

Les répétitions, sur site ou au sein d'un réseau, offrent de plus la possibilité d'utiliser les analyses statistiques pour préciser la significativité des différences observées.

Organisation des données

Vérification des données

Avant le stockage définitif, une vérification de la fiabilité des données est indispensable. Pour chaque année mesurée, un calcul automatique des accroissements depuis la campagne précédente, pour tous les arbres, est par exemple utile. Sont alors mises en évidence les valeurs aberrantes (accroissements négatifs ou accroissements étonnamment forts) qui peuvent résulter d'une erreur de saisie ou de mesure.

Des arbres peuvent par ailleurs être éliminés de certains calculs, notamment lorsqu'ils ont été notés en observation des accidents ou blessures.



Stockage

Le stockage des données (informations administratives, description des modalités testées, données stationnelles, mesures...) sous **format informatique** facilite leur accessibilité, leur utilisation, leur diffusion et leur pérennité (à condition de prévoir des systèmes de sauvegarde multiples et multiloaux). Une copie des fichiers **en format texte** (fichiers ASCII), y compris pour les données mesurées, doit être effectuée systématiquement afin de s'assurer, sur le long terme, de la possibilité d'importation vers n'importe quel logiciel.

La conservation des documents **sur papier** (plan d'installation, fiches de mesures...) reste cependant indispensable.

Pour un traitement optimal et facilité des données mesurées, le stockage doit se faire sous la forme d'un tableau tel que celui de l'exemple ci-dessous :

Référence de l'essai	Année de végétation mesurée	Bloc	Modalité	N° arbre	Ligne	Colonne	Circonférence	Hauteur	État
18 97 001	2000	1	témoin	1	1	1	36	11,0	a
18 97 001	2000	1	témoin	2	1	2	40	12,5	a
18 97 001	2000	1	témoin	3	1	3	37	12,0	m

Analyses descriptives

RÈGLE 10

données analysées

Ces analyses sont généralement utilisées pour présenter visuellement les caractéristiques principales de chaque modalité, sous forme de tableaux ou de graphiques. Elles doivent permettre des comparaisons simples et rapides (voir exemple de fiche synthétique en **annexe I**).

De telles analyses doivent être faites dès l'installation, de manière à déceler d'éventuelles différences initiales entre modalités. Ces différences devront être prises en compte lors des bilans ultérieurs afin de ne pas les confondre avec celles qui résulteraient des modalités du facteur testé.

Analyses simples à partir des variables mesurées, pour une campagne de mesure

- **Données quantitatives**

Des calculs statistiques basiques, à partir des grandeurs mesurées pour tous les arbres d'une même placette, permettent d'évaluer les valeurs centrales (moyenne, médiane) et les variables de dispersion (étendue, variance et écart type, écart interquartile...) pour chaque variable.

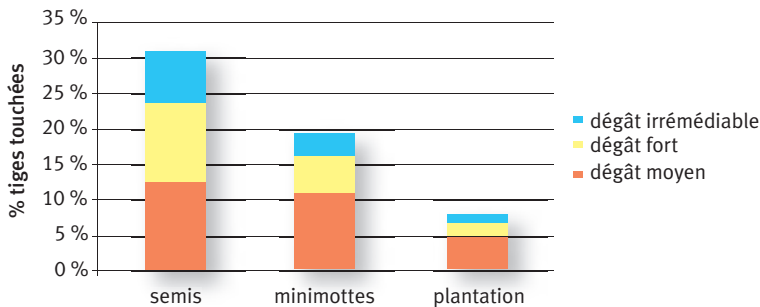
Exemple: calcul de la circonférence arithmétique moyenne (\bar{C}) et écart type autour de cette dernière (fréquemment utilisée pour les essais peuplier).

- **Données qualitatives**

Des moyennes ne pouvant être calculées pour les variables qualitatives, les données sont le plus souvent présentées sous forme d'histogrammes (empilés ou non) de répartition des notes. Ces traitements peuvent s'accompagner de tests de comparaison de proportions ou de répartition.

Exemples: proportion de dégâts de gibier, notes de rectitude de tiges...

Source : D. Mezeau (CNP-F-IDF-CPFA)



Histogramme de notes de dégâts de cerf sur un essai de pin maritime de 8 ans, selon les modalités d'installation.

Construction de variables synthétiques

- **Données quantitatives**

À partir des données individuelles, le calcul de variables synthétiques permet de caractériser le peuplement et facilite les comparaisons entre modalités.

Ces variables peuvent être calculées à chaque campagne de mesure, pour l'ensemble des arbres d'une modalité ou par sous-populations, par exemple par statut sylvicole (arbres éclaircis, élagués, arbres d'avenir...) ou statut social (arbres dominants, dominés...).

Les variables les plus fréquemment utilisées sont :

- **densité des tiges N** (nombre d'arbres à l'hectare) :
Nombre d'arbres sur la placette de mesure divisé par la surface de celle-ci (en hectare) ;
- **mortalités** naturelle et accidentelle : nombre d'arbres disparus sur la placette divisé par la surface de celle-ci (en hectare) ; elles peuvent-être exprimées en % de la densité initiale ;
- **surface terrière G** (somme des sections des tiges à 1,30 m). Elle se calcule de deux manières :

$$1) G = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i^2}{4 \times \pi}}{S} \quad \text{(somme des surfaces terrières individuelles des arbres divisée par la surface de la placette en hectare) ;}$$

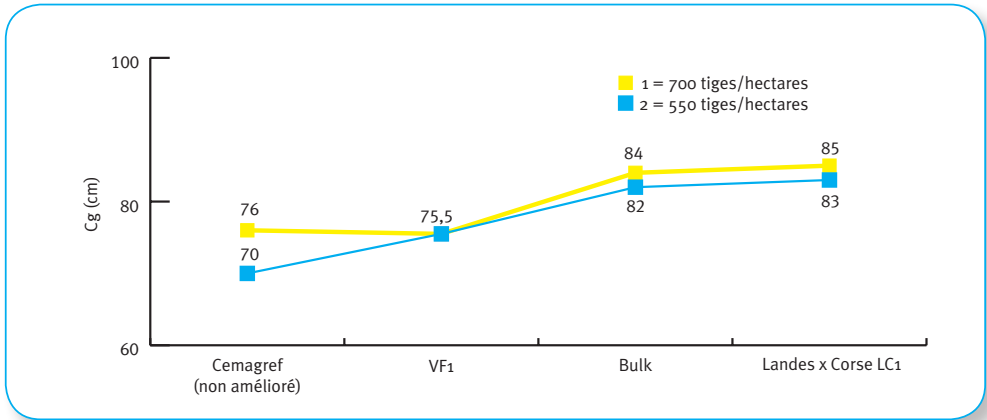
$$2) G = \frac{N \times C_g^2}{4 \times \pi} \quad \text{(à partir de la densité et de la circonférence quadratique moyenne).}$$

- **circonférence de l'arbre moyen C_g** (circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne ou circonférence quadratique moyenne). Elle peut être calculée de deux façons :

$$1) C_g = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i^2} \quad \text{(moyenne quadratique des circonférences = racine carrée de la moyenne des valeurs au carré) ;}$$

$$2) C_g = \sqrt{\bar{C}^2 + \sigma^2} \quad \text{(racine carrée de la somme de la moyenne arithmétique des circonférences au carré avec l'écart-type au carré).}$$

Exemple: comparaison de C_g ou de la mortalité entre modalités.



Source : D. Merzeau (CNPFF-IDF-CPFA)

Exemple de graphique de comparaison de C_g à 18 ans, pour 4 origines génétiques de pin maritime et 2 densités (Mimizan, 40).

- **circonférence dominante C_o** (moyenne quadratique de la circonférence des cent plus gros arbres à l'hectare). Pour une placette de n ares, on utilise les $(n-1)$ plus gros arbres ;
- **hauteur moyenne H_g** (hauteur de l'arbre de circonférence moyenne). Elle se calcule de préférence à partir de la relation hauteur-circonférence établie par placette à chaque campagne (voir graphique page 63), ou par moyenne arithmétique des hauteurs des arbres mesurés si la distribution de leurs circonférences est représentative du peuplement ;
- **hauteur dominante H_o** (hauteur de l'arbre de circonférence dominante). Elle se calcule de préférence à partir de la relation hauteur-circonférence établie par placette à chaque campagne (voir graphique page 63), ou par moyenne arithmétique des hauteurs des cent plus gros arbres à l'hectare bien répartis (pour une placette de n ares, on utilise les $(n-1)$ plus gros arbres).

- **Données qualitatives**

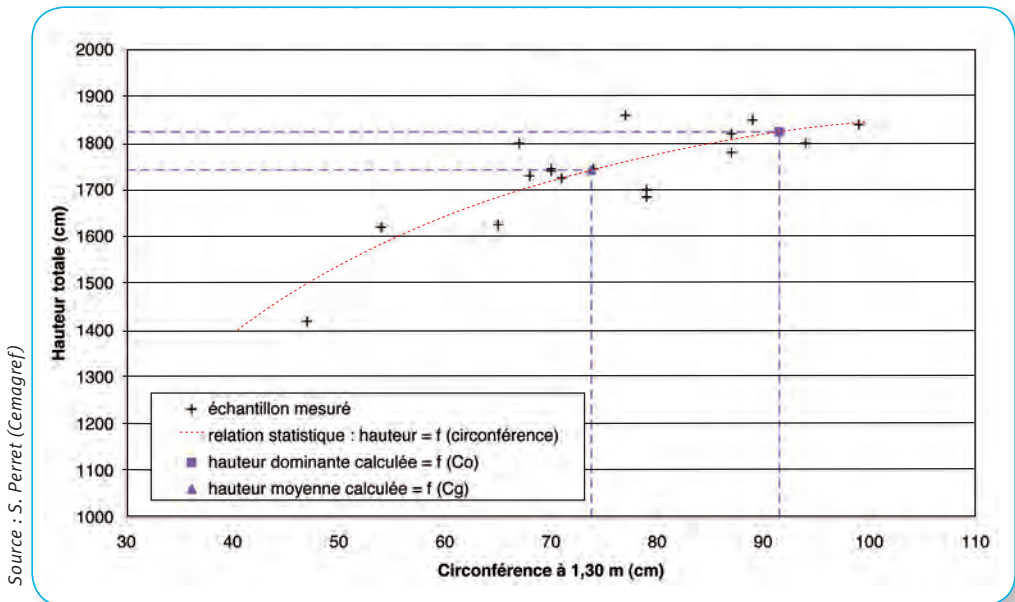
Les variables qualitatives peuvent donner lieu à différents traitements comme la création de classes à partir des données quantitatives.

Exemple: histogramme de répartition de la proportion d'arbres selon la note de forme par classes de circonférence.

Croisement de variables à partir des données individuelles

Les variables mesurées ou calculées peuvent être croisées entre elles à partir des données individuelles d'une même campagne afin de faire apparaître des corrélations. Les croisements possibles sont multiples et sont fréquemment présentés sur des **graphiques** (x, y). En voici quelques exemples :

- **relation hauteur-circonférence.** Celle-ci est notamment utilisée pour le calcul des hauteurs moyenne ou dominante, ou pour estimer la hauteur d'autres catégories d'arbres.



Relation hauteur-circonférence dans une placette d'un essai de dépressement de pin sylvestre (Haguenau, 67). Mesurer en hauteur un échantillon d'arbres bien répartis dans l'histogramme des circonférences permet d'établir une relation statistique entre circonférence et hauteur, puis d'estimer à partir de cette relation la hauteur dominante, la hauteur moyenne, ainsi que celle de chaque arbre si on le souhaite.

- **relation accroissement en circonférence-circonférence initiale.**
- **croisement qualitatif-quantitatif:** circonférences par note de forme, accroissement en circonférence par note de taille des branches...

Étude de l'évolution dans le temps des variables mesurées

- **Évolution des variables**

Toutes les variables précédentes évoluent d'une campagne de mesure à l'autre.

Cette évolution peut être traduite de façon dynamique par **des graphiques (x, y) en fonction du temps**. Sur ces graphiques, il est intéressant de faire figurer les différentes modalités comparées afin de mieux apprécier les écarts dus au traitement. Il est aussi possible d'y apprécier les effets d'évènements connus (intervention sylvicole, évènement climatique particulier, attaque parasitaire...).

L'évolution des variables peut également s'apprécier en fonction de la hauteur dominante, ce qui permet de gommer en partie d'éventuelles différences de fertilité initiales.

- **Évolution des accroissements des variables**

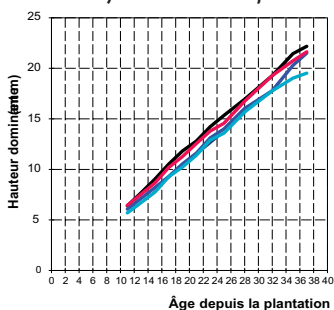
L'évolution des variables dans le temps peut donner lieu au calcul d'accroissements :

- **accroissements courants** : d'une campagne à l'autre, ramenés à l'année ;
- **accroissements moyens** : de la première à la dernière campagne.

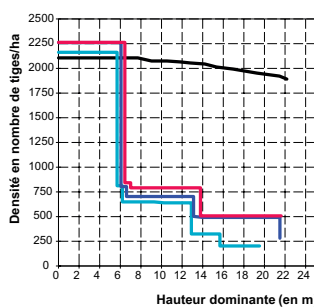
L'analyse des accroissements depuis l'installation permet de contrôler en partie l'influence des éventuelles différences initiales entre modalités.

Pour certaines variables très sensibles au traitement sylvicole et notamment aux éclaircies (circonférence, surface terrière...), il convient de différencier l'**accroissement technique** (augmentation brutale des valeurs moyennes la même année, avant et après intervention, par simple variation de l'effectif) et l'**accroissement biologique** (calculé en considérant la population après intervention seule, entre deux passages en mesure). L'accroissement apparent est alors la somme des deux précédents.

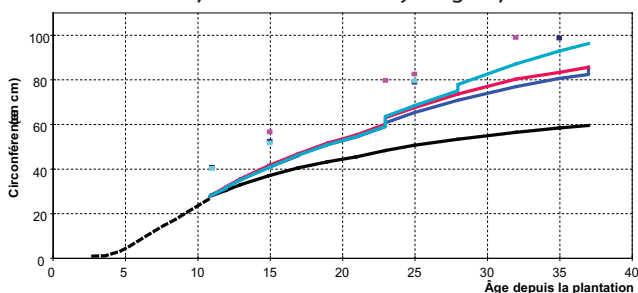
Évolution de la hauteur dominante H_o en fonction du temps



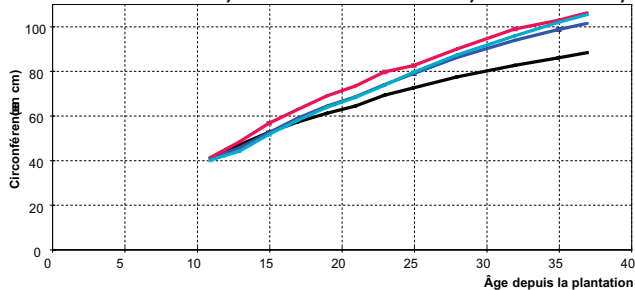
Évolution de la densité N en fonction de la hauteur dominante H_o



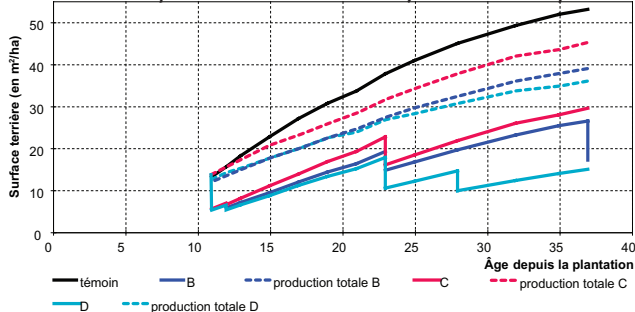
Évolution de la circonférence de l'arbre moyen C_g en fonction du temps



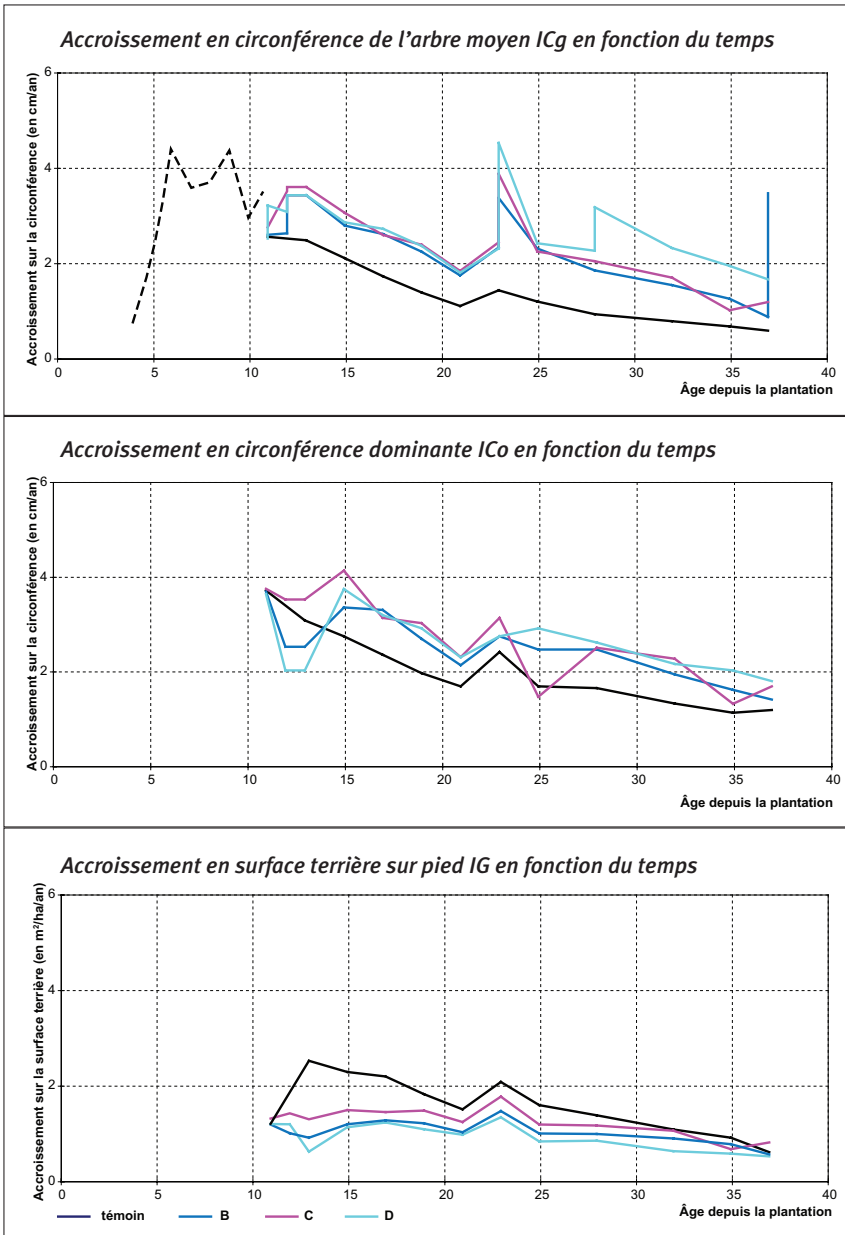
Évolution de la circonférence dominante C_o en fonction du temps



Évolution de la surface terrière totale sur pied G et de la production totale en G en fonction du temps



Évolution des variables synthétiques sur un essai « dépressage-éclaircie » de pin laricio de Corse suivi depuis 26 ans. On remarque l'effet des coupes à 11, 23, 28 et 37 ans; l'évolution de C_g de 0 à 11 ans est obtenue par analyse de rondelles (pointillés noirs). Essai IDFGIS Coopérative de données (Chaumont s/Tharonne, 41).



Source : M. Chartier (CNPFF-IDF)

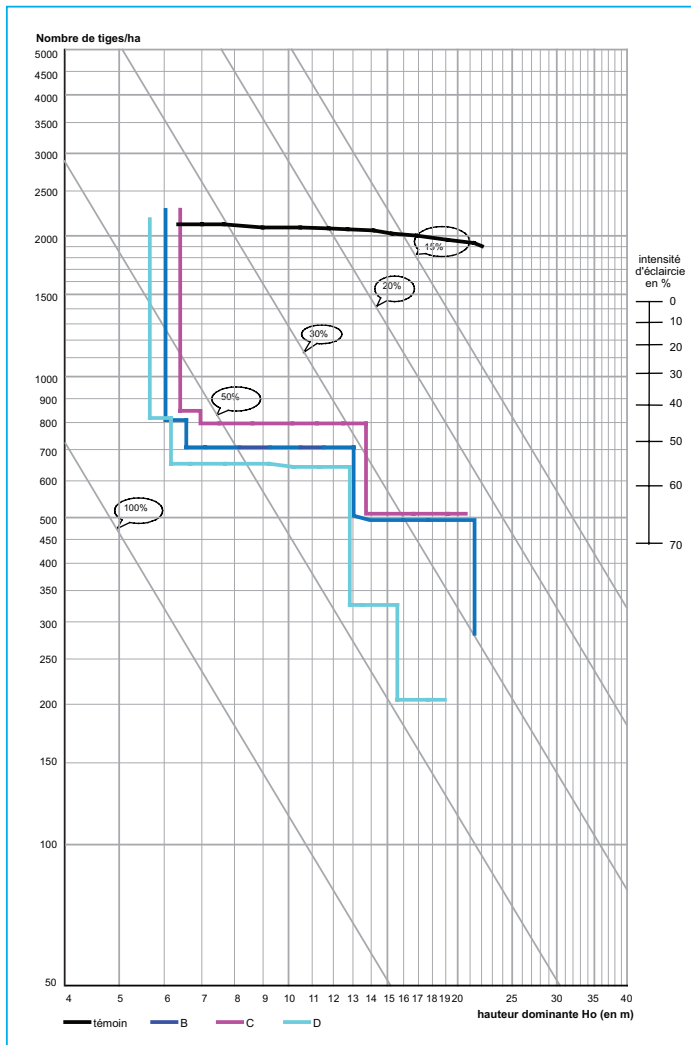
Évolution des accroissements courants des variables synthétiques sur un essai « dépressage-éclaircie » de pin laricio de Corse suivi depuis 26 ans. On remarque, notamment sur ICg l'effet technique des éclaircies à 11, 23, 28 et 37 ans ; l'évolution de ICg de 0 à 11 ans est obtenue par analyse de rondelles. Essai IDF GIS Coopérative de données (Chaumont s/Tharonne, 41).

• Évolution conjointe de plusieurs variables

De multiples associations de variables peuvent être faites et permettent de différencier les modalités. Nous présentons deux exemples, à titre illustratif :

- évolution du facteur d'espacement

Le facteur d'espacement $S\%$ est l'espacement moyen a entre les tiges, en % de la hauteur dominante : $S\% = a/Ho$. Il peut se calculer par ailleurs en fonction de la densité d'arbres vivants sur pied à l'aide de la formule : $S\% = 10\,746/(Ho \times \sqrt{N})$. Il augmente brutalement à chaque coupe et diminue ensuite lentement avec la croissance en hauteur. Il peut être représenté sur l'abaque d'Eeckmann (Cemagref) en fonction de N et Ho .

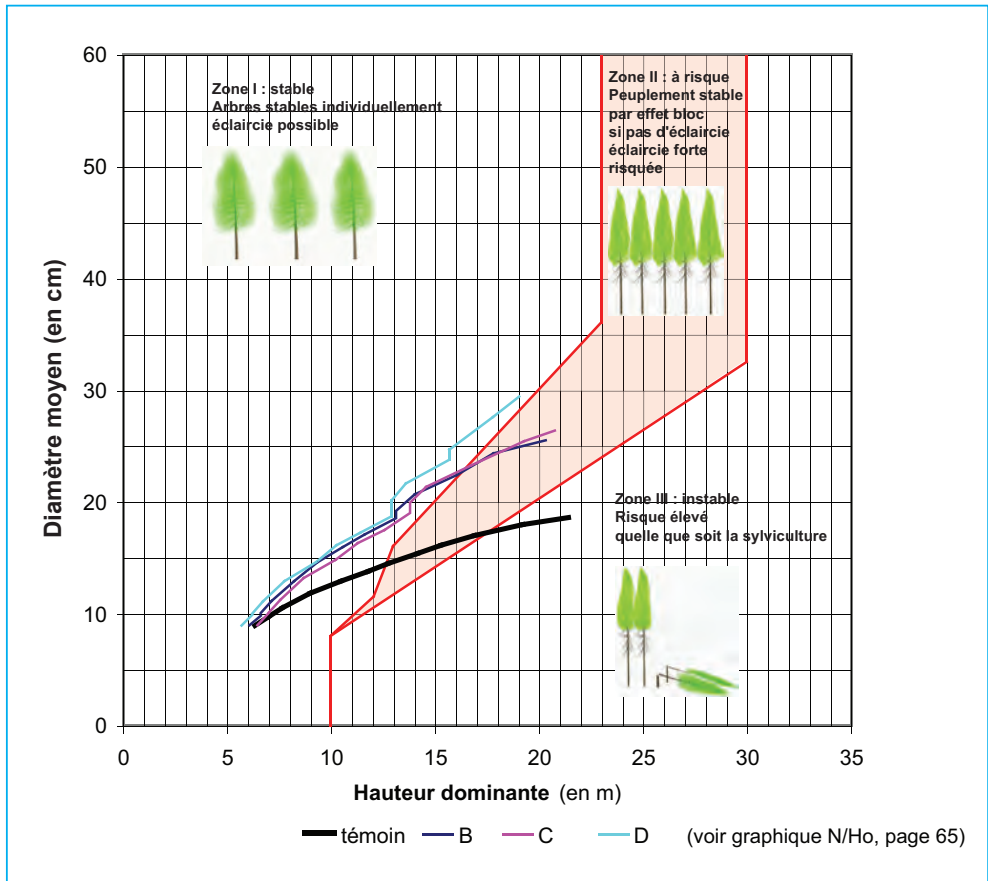


Évolution du facteur d'espacement sur un essai « dépressage-éclaircie » de pin laricio de Corse suivi depuis 26 ans. Un $S\%$ constant est représenté par une droite oblique sur laquelle figure sa valeur. On remarque l'effet brutal des éclaircies. Essai IDF Coopérative de données (Chaumont s/Tharonne, 41).

Source : M. Chartier (CNP-F-IDF)

- évolution dans les « zones de stabilité au vent IDF »

Cette présentation permet d'évaluer l'évolution de la stabilité au vent d'un peuplement selon la sylviculture appliquée, grâce à un simple graphique Cg/Ho. Plusieurs études après tempête ont permis de valider cette approche graphique de la stabilité pour les résineux excepté pour le pin maritime. La signification des trois zones est expliquée sur le graphique.



Source : M. Chartier (CNP-F-IDF)

Évolution dans le temps de la stabilité au vent du peuplement selon la sylviculture pour un essai « dépressage-éclaircie » de pin laricio de Corse suivi depuis 26 ans. On remarque l'effet important du scénario sylvicole, qui conditionne la forme des tiges . Essai IDF GIS Coopérative de données (Chaumont s/Tharonne, 41).

De nombreux autres traitements peuvent être effectués. Une représentation spatialisée des données et de leur évolution est notamment permise par l'individualisation des mesures. Un exemple est fourni pour les circonférences de l'essai pin laricio utilisé pour les graphiques précédents, en **annexe C**.

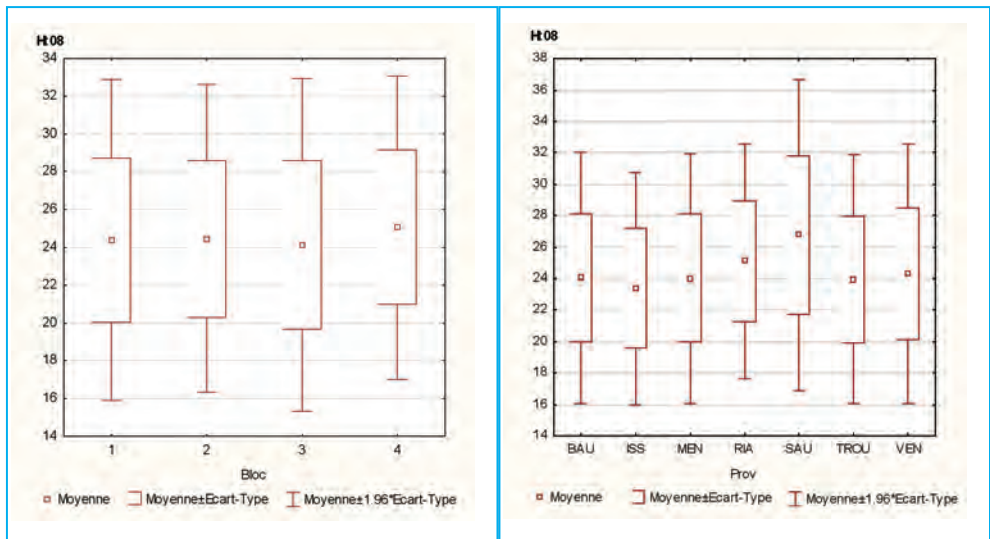
Analyses statistiques

Les paramètres de dispersion (variance, écart type...) calculés sur une placette, représentent la variabilité des dimensions des arbres au sein de la modalité (où les individus sont interdépendants) et non la variabilité issue du traitement testé. Cette dernière ne peut se calculer que si l'on dispose de **répétitions sur site ou au sein d'un réseau** (cas sans inter-dépendance entre les placettes).

Il est alors possible d'effectuer des **tests statistiques**, qui permettent de définir le niveau de significativité des différences obtenues, et surtout d'étudier les interactions entre facteurs.

Les tests et analyses statistiques sont nombreux, et font l'objet de manuels spécialisés, cités en bibliographie. Le choix d'un test ou d'un type d'analyse doit prendre en compte :

- la taille des échantillons ;
- le type de variable traitée (quantitative, qualitative) ;
- la vérification de la conformité ou non de la distribution à une loi normale (tests paramétriques ou non paramétriques) ;
- le type de traitement envisagé : sur une variable, ou sur plusieurs variables (analyses multifactorielles...).



Source : B. Chopart (ONF)

Traitement d'un essai comparant la hauteur à 8 ans de 6 provenances de cèdre en 4 blocs. À gauche, moyennes et écarts types par blocs, toutes provenances confondues ; à droite, moyennes par provenances, tous blocs confondus.

Synthèse des principales analyses possibles par type d'expérimentation

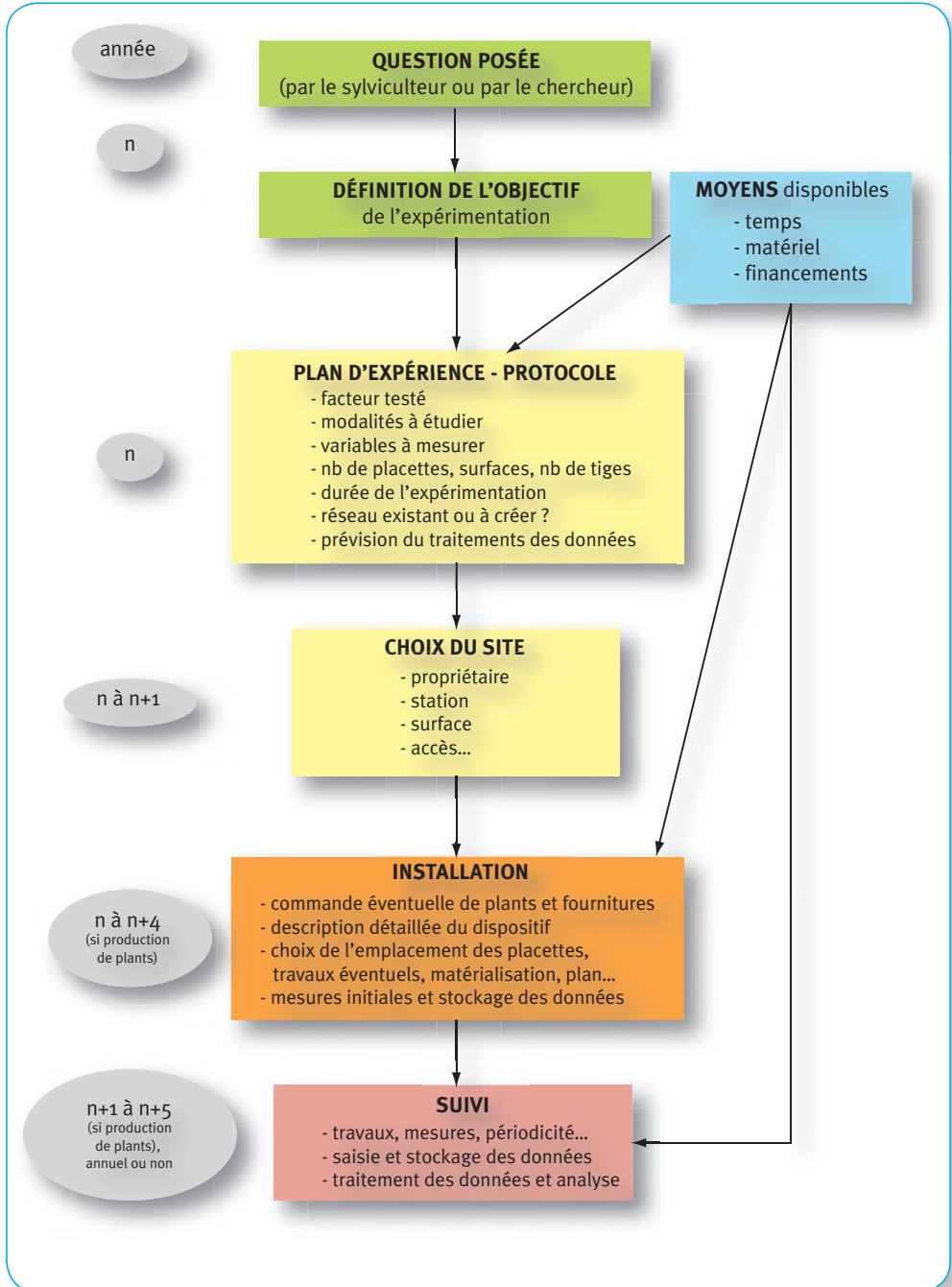
Analyse possible	Référence mesurée	Expérimentation sans répétition intra site	Expérimentation avec au moins trois répétitions intra site
Données synthétiques « peuplement » par modalité	Valeurs moyennes, mais pas d'évaluation possible de la dispersion de la donnée synthétique et donc de sa robustesse		Valeurs moyennes, avec évaluation possible de la dispersion de la donnée synthétique et donc de sa robustesse
Comparaison des différentes modalités sur le site	Non (une seule modalité testée)	Oui, mais sans analyse de variance permettant de déterminer le niveau de significativité des différences	Oui, avec analyse de variance possible permettant de déterminer le niveau de significativité des différences
Analyse des données individuelles	Oui statut social, accroissement des tiges selon les variables mesurées, calcul de moyennes, médianes et de dispersion des données individuelles (étendue, écart interquartile, variance, écart type...)		
Comparaison de différentes modalités au sein d'un réseau	Oui... si protocole commun et si stratification satisfaisante des placettes		
Modélisation des effets d'un facteur au sein d'un réseau	Oui... si protocole commun et si stratification satisfaisante des placettes		



© P. Riou-Nivert (CNP-F-IDF)

Placette de douglas éclaircie de 1 300 à 800 tiges/ha (essai IDF, Fréteval, 41).

CHRONOLOGIE DE L'INSTALLATION D'UN DISPOSITIF EN FORÊT



Chapitre 2

Matériel végétal

p. 74

Données pédologiques

p. 82

Données climatiques
et météorologiques

p. 85

Variables spécifiques liées au
changement climatique

p. 97



© L. Burnet (INRA)



© J.-P. Nebout (CRPF Auvergne)



© A. Ducourso (INRA)

Méthodologies particulières liées au changement climatique

La problématique du changement climatique impose des précautions spécifiques et le recueil d'informations supplémentaires par rapport à la méthodologie de l'expérimentation habituellement pratiquée en forêt et développée au chapitre 1. Le protocole expérimental doit être exécuté de façon particulièrement soignée : identification précise du matériel végétal, description détaillée des facteurs édaphiques et climatiques.

Des variables supplémentaires susceptibles d'être affectées par les évolutions climatiques peuvent aussi être mesurées : état phytosanitaire, phénologie.

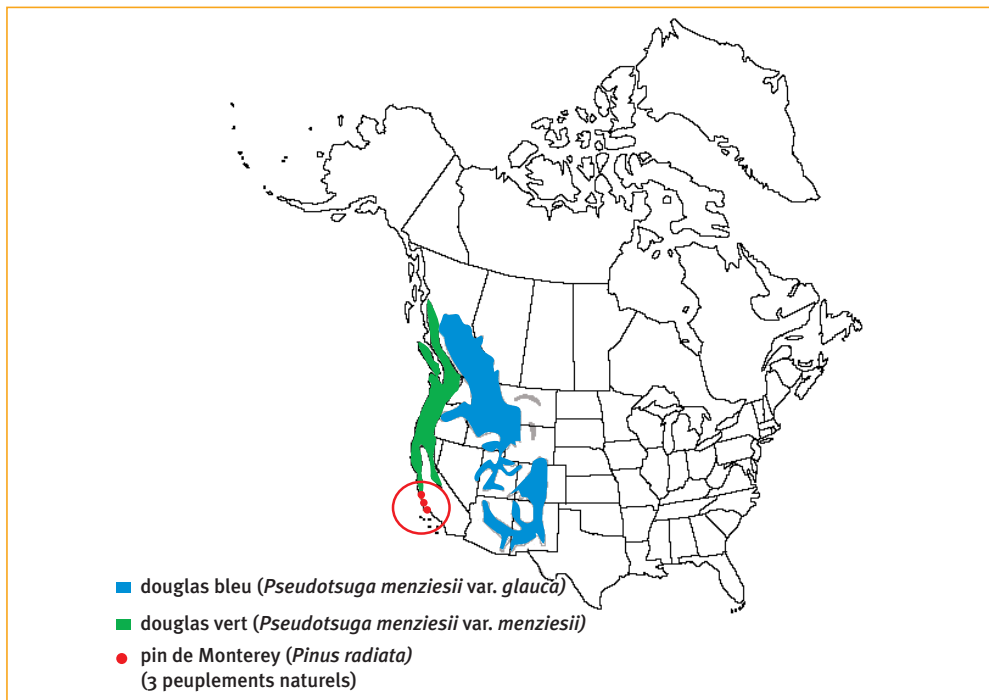
L'approche dendrochronologique permet en outre d'étudier plus finement les corrélations entre les données météorologiques et la croissance.

MATÉRIEL VÉGÉTAL

Contribution de Sabine Girard (CNPF-IDF)
et d'Isabelle Bilger (Cemagref)

Dans le cadre de l'évaluation d'une **unité génétique** (essence, provenance, variété, cultivar...), la **caractérisation précise du matériel végétal**, et notamment de son origine, est primordiale.

En effet, si l'**aire géographique d'origine** de l'essence est très étendue et présente des caractéristiques climatiques et édaphiques variées, la pression de sélection exercée par le milieu au cours du temps n'aura pas été partout identique et les caractères adaptatifs sélectionnés au fil des générations peuvent différer. C'est ce qui explique par exemple que les pins maritimes des Landes de Gascogne aient résisté aux gels intenses de l'hiver 1985, alors que les pins de la même espèce issus de graines récoltées au Portugal n'y ont pas survécu. Pour une essence donnée, les résultats d'une expérimentation portant sur l'adaptation au changement climatique peuvent donc être différents selon l'origine géographique du matériel testé.



L'aire géographique d'origine d'une essence peut être très variable : l'aire du douglas (avec ses deux variétés, "vert" et "bleu") s'étend en continu sur plus de 2 500 km de latitude le long de la côte ouest des États-Unis, tandis que celle du pin de Monterey n'occupe que quelques stations côtières en Californie. Ce sont pourtant deux des principales essences de reboisement utilisées dans le monde en zone tempérée.

Par ailleurs, la **variabilité génétique individuelle** est très forte au sein même d'un peuplement d'une essence donnée et peut constituer en elle-même un sujet d'étude car elle est un des atouts adaptatifs majeurs des arbres.

Le cadre réglementaire

Rappelons au préalable que le commerce des graines et des plants forestiers est réglementé au niveau européen. Tous les cultivars et variétés homologués en France ainsi que l'ensemble des peuplements sélectionnés du territoire sont inscrits dans le « **Registre national des matériels de base** ». Cette réglementation, qui garantit la traçabilité des caractéristiques génétiques de ces graines et plants, prévoit également un **cadre pour le matériel destiné à des expérimentations**.

Des **mesures dérogatoires** particulières permettent ainsi d'expérimenter du matériel non homologué en France ou dans un autre pays de l'Union européenne ou bien ne respectant pas les normes extérieures en vigueur.

Ces expérimentations doivent être menées par ou en liaison avec les **organismes scientifiques nationaux** (INRA, Cemagref, AgroParisTech, FCBA, CGAF, Cirad) qui bénéficient d'une autorisation permanente pour tester ce type de matériel¹. Ces organismes tiennent et actualisent annuellement des documents permettant d'identifier et de localiser les matériels expérimentés, documents qui peuvent être soumis à contrôle.

Par ailleurs, lors de chaque projet de plantation expérimentale de matériels non homologués, l'organisme responsable doit informer par courrier le préfet (Draaf) du lieu de plantation.

La réglementation prend également en compte les **risques sanitaires** liés à l'importation de matériel végétal, en particulier les risques d'introduction de parasites.

La réglementation du matériel végétal est complexe et en perpétuelle évolution. Le site du ministère de l'Agriculture <http://agriculture.gouv.fr> fournit les informations relatives à ces sujets (liste des essences réglementées, Registre national des matériels de base, contrôles phytosanitaires à l'importation...)

¹ D'autres structures publiques ou privées peuvent également demander au préfet de région dont elles relèvent, de les autoriser, par arrêté préfectoral, à mener sur le territoire national des expérimentations sur du matériel non admis.

Connaissance de l'origine du matériel végétal expérimenté

Les éléments relatifs à l'identité du matériel expérimenté doivent impérativement être connus et archivés.

Les plants des essences réglementées que l'on trouve sur le marché appartiennent obligatoirement à l'une des quatre catégories réglementaires matérialisées par une « couleur d'étiquette » (voir encadré ci-dessous). Ils portent le nom de leur région de provenance, voire celui du cultivar, du verger à graines ou du peuplement d'origine.

Autre élément d'identification important, le numéro du « certificat maître », un code à 10 caractères porté sur le document remis par le fournisseur (marchand grainier ou pépiniériste), permet de remonter au lieu et à la date de récolte des graines ou des boutures.

Essences réglementées : les quatre catégories

- **catégorie testée** accompagnée d'une « étiquette bleue ». Les graines et les plants vendus dans cette catégorie correspondent à du matériel dont la qualité génétique est très bien connue, dans la mesure où ses performances ont été démontrées dans plusieurs tests réalisés en forêt. Il s'agit de tous les cultivars de peuplier et de merisier, ainsi que du matériel récolté dans certains vergers à graines ou peuplements ;
- **catégorie qualifiée** accompagnée d'une « étiquette rose ». Elle concerne du matériel issu de certains vergers à graines, dont la qualité génétique est bonne *a priori* puisque tous les parents ont été sélectionnés sur les critères recherchés, mais dont les performances restent toutefois à démontrer sur le terrain ;
- **catégorie sélectionnée** accompagnée d'une « étiquette verte ». Il s'agit de matériel issu de peuplements sélectionnés visuellement et regroupés en « régions de provenance ». L'information sur la qualité génétique de ce matériel est moindre, comparativement aux cas précédents, dans la mesure où leurs performances en forêt n'ont pas été mesurées et où la qualité des parents n'est qu'imparfaitement connue (sélection d'un peuplement et non d'individus) ;
- **catégorie identifiée** accompagnée d'une « étiquette jaune ». Dans ce cas, seule la localisation géographique est connue, la qualité du peuplement d'origine n'a fait l'objet d'aucun contrôle.

Les tableaux suivants récapitulent les éléments à recueillir et archiver lorsqu'une expérimentation est mise en place avec une **espèce soumise à la réglementation** (page 77) ou bien avec du **matériel non homologué** (page 78). Dans le premier cas, ce matériel peut provenir d'une **région de provenance** (un ou plusieurs peuplements dont on a mélangé les graines), d'un **peuplement forestier** (sélectionné ou testé), d'une **variété forestière** produite dans un verger à graines ou d'un **cultivar** obtenu par reproduction végétative d'un individu particulier.

Unité génétique expérimentée	Éléments à archiver	Exemples	
Région de provenance	Catégorie réglementaire	Étiquette verte (catégorie sélectionnée)	Étiquette jaune (catégorie identifiée)
	Dénomination officielle	QPE 212 pour du chêne sessile de la région de provenance «Est du Bassin Parisien»	FAN 700 pour du frêne oxyphylle de la région de provenance «Région méditerranéenne»
	N° du certificat maître*	F21-08R016	F93-08R002
Peuplement sélectionné ou testé	Catégorie réglementaire	Étiquette verte (catégorie sélectionnée)	Étiquette bleue (catégorie testée)
	Dénomination du peuplement dans le Registre national des matériels de base	QPE106-001 pour le peuplement sélectionné de chêne sessile de la forêt de Bercé dans la Sarthe qui appartient à la région de provenance du secteur ligérien	CAT-PP-003 pour le peuplement testé de cèdre de l'Atlas dit « Saumon », dans les Alpes-de-Haute-Provence
	N° du certificat maître*	F52-05R012	F93-08R014
Variété	Catégorie réglementaire	Étiquette bleue (catégorie testée)	Étiquette rose (catégorie qualifiée)
	Dénomination officielle	PLO-VG-001 pour le verger à graines de pin laricio de Corse «Sologne Vayrières»	PAV-VG-003 pour le verger à graines de merisier d'Avessac
	N° du certificat maître*	F73-05R019	F53-09R005
Cultivar	Catégorie réglementaire	Étiquette bleue (catégorie testée)	Étiquette bleue (catégorie testée)
	Dénomination officielle	cv. Ameline pour le cultivar «Ameline» de merisier	cv. I-214 pour le cultivar euraméricain de peuplier
	N° du certificat maître*	F25-08R001	F31-08R011

Informations à recueillir pour un matériel végétal homologué.

Remarque : ces mêmes éléments doivent être demandés dans le cas de matériel récolté dans les autres pays de l'Union européenne.

* Ce N° est donné par le contrôleur des ressources génétiques au moment de la récolte de graines ou du prélèvement de boutures. Il est composé de 10 caractères : la lettre F pour toutes les graines récoltées en France, un code à 2 chiffres correspondant à un code officiel de la région administrative du lieu de récolte, un tiret, deux chiffres correspondant à l'année de récolte, les lettres R, V ou M selon qu'il s'agit d'une certification de Récolte de graines ou de boutures (R), d'une multiplication en Vrac (V) ou d'un Mélange de plusieurs récoltes (M), enfin un numéro d'ordre à 3 chiffres. Pour « décoder » ce N° et notamment connaître le peuplement précis qui a été récolté, le mieux est de s'adresser au contrôleur des ressources génétiques forestières.

Unité génétique expérimentée	Éléments à archiver	Exemples
Provenance	Localisation géographique (l'idéal étant le géoréférencement) et altitude du peuplement récolté. En France : département, commune, massif forestier voire parcelle, région naturelle IFN. À l'étranger, informations similaires	Pin de Salzmann, Forêt domaniale de St-Guilhem le désert (Hérault), Cirque du Bout du Monde, Parcelle XXX, 3°23' de longitude Est, 43°47' de latitude Nord, 485 m d'altitude
	Année de récolte des graines	2007
Famille de 1/2 frères (1)	Identité ou localisation précise de l'arbre sur lequel les graines ont été récoltées et, si possible, indication des arbres pollinisateurs	F2027Luzette : famille de demi-frères de douglas récoltée sur l'arbre n°2027 du verger de La Luzette pollinisé librement par les autres arbres du verger
	Année de récolte des graines	1997
Famille de pleins frères (2)	Identité et localisation des deux parents	F2027x2029Luzette : famille de plein frères de douglas récoltée sur l'arbre n°2027 du verger de La Luzette pollinisé artificiellement par l'arbre n°2029 du verger
	Année de récolte des graines	1996
Clone	Numéro d'identification (s'il existe) et localisation géographique précise de l'arbre d'origine, altitude	Clone FRA.US.083 de la collection nationale d'orme champêtre
	Année de récolte des boutures	2002

Informations à recueillir pour un matériel végétal non homologué.

(1) obtenue à partir des graines récoltées sur un seul arbre (la mère) pollinisé, généralement librement, par un ensemble d'autres arbres plus ou moins faciles à identifier et/ou à localiser.

(2) obtenue après avoir déposé artificiellement sur un arbre identifié, le pollen d'un autre (= croisement dirigé). Le père et la mère sont donc connus précisément.

Quel que soit le cas de figure, il est important de connaître l'**année de récolte** des graines d'où sont issus les plants installés en expérimentation et de savoir si celles-ci ont fait l'objet de **traitements particuliers**, notamment d'un stockage de longue durée. De telles informations seront particulièrement pertinentes lorsqu'il s'agira d'analyser les résultats expérimentaux obtenus en intégrant la notion de diversité génétique du matériel testé, diversité qui peut avoir été affectée par certains traitements.

Mode d'élevage des plants

Il est conseillé au responsable de la mise en place d'expérimentations de venir voir les plants en pépinière pour s'enquérir du bon déroulement des opérations. Une **visite au mois de septembre précédant la plantation** est particulièrement recommandée ; elle permet de dresser l'inventaire des plants disponibles et de préciser les critères de tri à appliquer au moment de la constitution des lots (voir plus loin). Dans le cas où la production de plants est confiée à une pépinière privée, la signature d'un **contrat de culture** précisant les attentes particulières de l'expérimentateur (étiquetage individuel des plants par exemple, critères de tri, devenir

des plants non utilisés...) permettra au pépiniériste d'ajuster au mieux ses itinéraires de production.

Le mode d'élevage des plants installés dans des dispositifs expérimentaux doit également être décrit précisément et archivé.

Voici les principaux éléments à enregistrer :

- le lieu de production des plants (nom de la pépinière, adresse, altitude) ;
- l'âge et le mode de production des plants (voir encadré ci-dessous) ; dans le cas de plants en conteneurs, on précisera le volume de ces derniers ;

Types de plants

Il est d'usage de désigner les types de plants forestiers par des chiffres associés à des signes et des lettres.

Exemples : 0-1G ; 2+1 ; 1S1

- le premier chiffre correspond au nombre de saisons de végétation passées à l'état de semis ; 0 indique que le plant n'a pas été produit à partir d'une graine mais d'une bouture ;

- le signe qui suit indique les opérations racinaires subies par le semis ou la bouture : « + » pour un repiquage, « S » pour un soulèvement et « - » en l'absence d'intervention ;

- le chiffre suivant indique le nombre de saisons de végétation passées en pépinière après ces éventuelles interventions sur le système racinaire ;

- enfin, lorsque le code se termine par la lettre **G** (godet), il s'agit de plants produits en conteneurs.

Décodage des exemples :

0-1G correspond à un plant de 1 an issu de bouture et élevé en conteneur (type de plant souvent disponible dans le cas d'expérimentations de cultivars de merisier) ; 2+1 correspond à un plant de 3 ans élevé en pleine terre, repiqué après deux saisons (type de plant souvent disponible dans le cas d'expérimentations de résineux comme le douglas) ; 1S1 correspond à un plant de 2 ans élevé en pleine terre et soulevé après la première saison de végétation.



© P. Gonin (CNPFF-IDF)

Plant de cèdre 0-1G en conteneur de 400 cm³.



© J.-P. Ortisset (CRPF Midi-Pyrénées)

Botte de plants de douglas 2+1 racines nues.

- **les critères de choix des plants pour le dispositif expérimental** (hauteurs minimales, catégories de hauteurs, proportion retenue de la population de plants en pépinière, critères de tri d'une partie de cette population...). Signalons ici que le tri des plants en pépinière peut induire des différences en termes de représentativité des unités génétiques testées. En effet, la tentation est forte de trier plus sévèrement des lots d'unités génétiques où le nombre de plants disponibles est important et de ne pas trier du tout des lots d'unités génétiques où ce nombre est juste suffisant pour l'expérimentation.

Dans l'idéal, il convient de dresser un inventaire des tailles des plants en pépinière et de prélever, quelle que soit la hauteur moyenne des unités génétiques à tester, un **échantillon correspondant, pour chacune d'elles, à la même partie de la population** (le plus souvent, la plus « poussante ») ;



© É. Paillassa (CNPF-IDF)

Une visite préalable en pépinière est recommandée.

- **les interventions particulières** telles que l'application d'un traitement phytosanitaire (contre l'hylobe par exemple) ou d'une fertilisation, l'utilisation d'un substrat particulier, une mycorhization contrôlée... ;

- **la date d'arrachage des plants** dans le cas d'une culture en pleine terre ;

- **les conditions** (température et conditionnement) et **la durée d'un éventuel stockage au froid** en pépinière.

Précautions particulières

Les précautions suivantes s'appliquent pour tout essai installé au stade de la plantation, mais avec une vigilance accrue si le matériel végétal est l'objet même de l'expérimentation :

- afin de préserver au mieux la qualité des plants, le responsable doit veiller à **organiser le chantier** de façon à ce qu'ils soient installés très rapidement après leur arrivée sur le site et si possible le jour même. Dans le cas contraire, il prévoit leur **mise en jauge** en attendant qu'ils soient plantés. S'il y a un retard important du chantier par rapport aux prévisions initiales, il avertit le pépiniériste pour différer la livraison ;

- le jour de la livraison, le responsable s'assure que les plants livrés correspondent à la demande (en termes de quantité, dimensions, demandes particulières) et conserve le document du fournisseur remis par le livreur ;
- le responsable vérifie que les plants n'ont subi aucun dégât durant le transport (dessèchement et gel notamment). Pour éviter le dessèchement qui pourrait survenir dans le cas de plants à racines nues, ceux-ci doivent être conditionnés correctement dès la pépinière (sacs plastique...). Dans le cas de plants élevés en godet, l'humidité du substrat est vérifiée et éventuellement réajustée par arrosage.



© P. Van Lerberghe, (CNPF-IDE)

Sacs plastiques de transport des plants.



© A. Ducausso (INRA)

Mise en jauge avant plantation (à n'utiliser qu'exceptionnellement dans le cadre d'une expérimentation).

Les informations concernant le matériel végétal (origine et mode d'élevage) doivent être le plus précisément possible maîtrisées, connues et archivées.

L'expérimentateur doit s'assurer que la réception et l'installation des plants n'induirait aucun biais à l'expérimentation

DONNÉES PÉDOLOGIQUES

Contribution de Pierre Gonin (CNPFF-IDF)

Un protocole complet de description stationnelle est proposé en **annexe H**. Son niveau de précision est adapté pour une utilisation lors d'installation d'expérimentations liées au changement climatique.

Pour ces expérimentations, il est vivement conseillé de procéder aux descriptions de sol à l'aide d'une **fosse pédologique** (voir chapitre 1, page 44). Dans le cas d'installation au stade de la plantation (milieux ouverts ou remaniés par des travaux), les **relevés floristiques** sont en général peu pertinents car le caractère indicateur de la flore est limité. Ces relevés complètent par contre utilement la description pédologique dans le cas d'installation sur peuplement existant.

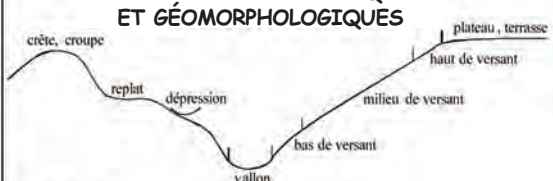

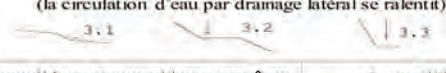
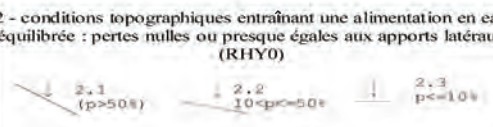
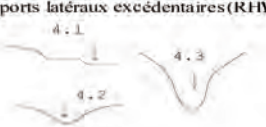
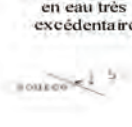
La fiche descriptive proposée ci-après, plus complète que celle fournie précédemment (voir chapitre 1, page 46), peut être remplie grâce au protocole de l'**annexe H**.



© P. Ribou-Nivert (CNPFF-IDF)

© CRPF Pays de la Loire

Description d'un profil dans une fosse pédologique.

<p>FICHE DE DESCRIPTION DES STATIONS</p>	<p>date : _____ relevé n° _____</p> <p>Évènement climatique récent :</p>																																																						
<p>RÉFÉRENCE ADMINISTRATIVE</p> <p>Département : _____ Commune : _____</p> <p>Sylvoécocorégion IFN : _____</p> <p>Forêt, propriété : _____</p> <p>Parcelle ou lieu-dit : _____</p> <p>coordonnées GPS / Référentiel _____</p>	<p>Réf. Catalogue de station : _____</p> <p>Type de station : _____</p> <table border="1" style="float: right; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>XX</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>X</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>m</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>m</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>r</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>h</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>hh</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>ll</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>AA</td><td>A</td><td>aa</td><td>a</td><td>n</td><td>v</td></tr> </table> <p>Habitat : actuel = _____</p> <p>potentiel = _____</p>	XX						X						m						m						r						h						hh						ll						AA	A	aa	a	n	v
XX																																																							
X																																																							
m																																																							
m																																																							
r																																																							
h																																																							
hh																																																							
ll																																																							
AA	A	aa	a	n	v																																																		
<p>PLAN DE LOCALISATION, croquis topo.</p>	<p>RÉFÉRENCE GÉOGRAPHIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES</p>  <p>Plaine, autre : _____</p> <p>Expo. = _____ Alt. (m) = _____</p> <p>Pente (%) = _____ Pente opposée (%) = _____ Confinement = 0 - 1 - 2</p> <p>Forme versant : concave - convexe - plan</p>																																																						
<p>RÉGIME HYDRIQUE</p>																																																							
<p>1 - conditions topographiques défavorables à l'alimentation en eau : pertes par drainage > apports latéraux (RHY-)</p> 	<p>3 : conditions topographiques favorables à l'alimentation en eau : apports latéraux > pertes par drainage (RHY+)</p> <p>(la circulation d'eau par drainage latéral se ralentit)</p> 																																																						
<p>2 - conditions topographiques entraînant une alimentation en eau équilibrée : pertes nulles ou presque égales aux apports latéraux (RHY0)</p> 	<p>4 : conditions topographiques entraînant une alimentation en eau excédentaire : apports latéraux excédentaires (RHY++)</p> 	<p>5 : conditions d'alimentation en eau très excédentaires</p> 																																																					
<p><u>Régime hydrique</u> : submersion périodique - engorgement temporaire - engorgement permanent - profil drainé</p> <p><u>Cause excès d'eau</u> : pluie - crue - ruissellement - source - imbibition capillaire - nappe temp. / nappe perman. obs. à = _____ cm</p>																																																							
<p>OBSERVATIONS DIVERSES</p>																																																							
<p><u>Érosion et apport de terre</u> : érosion en nappe / localisée - apport par érosion / ruissellement / alluvionnement</p> <p><u>Influence humaine et animale</u> : _____</p>																																																							

Source : P. Goin (CNPF-IDF)

GÉOLOGIE - DESCRIPTION DU PROFIL PÉDOLOGIQUE

date :
relevé n° :

Roche sous-jacente (carte géologique) : Réf. carte géol. =

Nature et disposition des couches :

Roche mère, si différente de la roche sous-jacente :

Degré de démantèlement de la roche :

Affleurement rocheux : Nature = Origine = éboulis - blocs isolés - affl. rocheux Importance = % de recouvrement

Type de sol :

Profondeur arrêt tarière par EG / C (cm)	FORME D'HUMUS				
Épaisseur prospectable (cm) :	* eumull / mésomull / oligomull / dysmull Qualificatifs : carbonaté – calcique				
Réserve utile maximale =	* hémimoder / moder / dysmoder autres :				
Facteurs limitants et contraintes à l'enracinement :	* mor				
	* amphimus				
	* hydromull / hydromoder / hydromor / tourbe / anmoor				
pH en A (eau - KCl / labo - pHmètre color.) =	Horizon OL, OF, OH	Épaisseur – continuité	Turri- cules	Transition O - A	Compléments : éléments grossiers – divers...
Autres pH (eau - KCl / labo - pHmètre color.) =					
Mode d'observation du profil pédologique :				brutale / progressive	
fosse = tarière =					
Arrêt : volontaire - forcé, cause =					

Horizon	Prof.	Hum.	Couleurs teinte, %, nature	Hydro- morphie	Texture	Structure	Compacité	Porosité	HCl terre fine	Éléments grossiers %, dimension, nature

Horizon	Prélèvements pour analyse : n° échantillons et prof.	Racines	Concrétions (%, couleur, dureté)	Autres éléments particuliers	Remarques

DONNÉES CLIMATIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES

Contribution de Vincent Badeau (INRA)

L'acquisition de **données climatiques** (données moyennes dites « normales ») et **météorologiques** (séries temporelles) doit avant tout être raisonnée en fonction de l'usage que l'on souhaite en faire. Le choix des paramètres météorologiques et de leur pas de temps est conditionné par la question posée et les mesures recueillies sur le terrain :

- à l'**installation d'un nouveau dispositif**, l'acquisition de séries météorologiques complètes n'est en général pas nécessaire, mais il est essentiel de connaître les **grandes lignes du climat local ou régional**. La partie « **Données climatiques** » présente les sources les plus utilisées pour obtenir ces données afin de caractériser un site expérimental ;

- **pour l'analyse d'un essai et le bilan d'expérimentations**, des données annuelles, mensuelles, voire journalières, sont indispensables selon le type d'analyse (survie, performances de croissance...). La partie « **Données météorologiques** » aborde cet aspect.

Enfin, différents **outils récents** d'interrogation de bases de données, mis à la disposition des utilisateurs pour acquérir des données météorologiques ou climatiques (*Climathèque* et *Publithèque* de Météo-France, *SigEco* de l'INRA Nancy), ainsi que le site BILJOU[®] de l'INRA Nancy qui permet aux forestiers d'avoir accès à des calculs de bilan hydrique, sont présentés en **annexe F**.

Données climatiques

Le climat est défini comme la moyenne et la variance du « temps qu'il fait » sur une période et sur une zone donnée. **L'ambiance climatique d'un site expérimental** peut être caractérisée depuis le microclimat local (avec prise en compte des effets de versant ou du couvert forestier par exemple) jusqu'au climat régional (essentiel dans les comparaisons multi-sites).

On peut être tenté de se procurer des séries météorologiques complètes (températures minimum et maximum, précipitations, rayonnement global, vitesse du vent, humidité relative) et d'établir soi-même des statistiques sur ces données. Étant donné la très faible densité du réseau d'observations météorologiques dans les espaces forestiers, il sera alors nécessaire de se procurer des données sur plusieurs postes tout autour du dispositif, ce qui peut s'avérer long et coûteux. De plus, la comparaison multi-postes et multi-paramètres, voire la spatialisation, relèvent d'un travail spécialisé de climatologie. Nous présenterons ici les **principales sources de données permettant de caractériser, à moindre frais, les climats locaux et régionaux**.

Climatologie générale - Météo-France

Météo-France propose, via les sites de la *Climathèque* et de la *Publithèque*, des **fiches climatologiques**¹ (ou climatologies de référence) pour toutes les stations du réseau d'observation métropolitain ayant au moins dix années de mesures. Ces fiches présentent les tableaux des données moyennes (= normales) 1971-2000, les statistiques calculées sur la période de mesure des données, et les records.

Divers ouvrages sont également disponibles (voir liste en **annexe F**).

Données climatiques spatialisées - Météo-France

- **Principe**

À partir des données issues d'observations selon un maillage de stations météorologiques, des **spatialisations** (extrapolations des observations pour les zones situées entre les stations) peuvent être effectuées afin de couvrir tout le territoire. La précision de ces spatialisations dépend d'une part du maillage des stations utilisées et d'autre part de la variabilité climatique sur le territoire étudié, dépendant notamment de la topographie. Plusieurs sources de ce type existent (dont certaines sont gratuites, voir **annexe F**), mais nous présentons ici principalement les données **AURELHY** qui ont l'avantage de prendre en compte le relief.

- **Les données AURELHY (contact : serv-fdp@meteo.fr)**

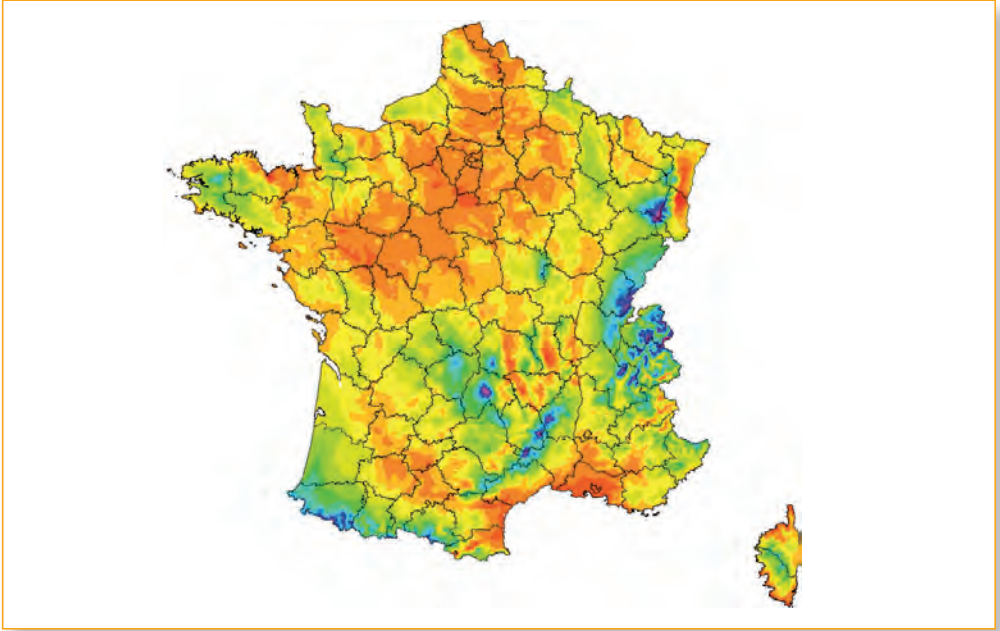
À partir de la fin des années 1980, Météo-France a développé un outil de spatialisation des observations pour tout le territoire français. Calibrée initialement sur les champs pluviométriques, la méthode est maintenant appliquée aux températures. Elle est connue sous le nom d'**AURELHY** (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie).

Trois réseaux de mesure sont utilisés (169 stations synoptiques, 1 000 stations automatiques, 3 500 postes climatologiques : voir carte page 87) pour interpoler les champs météorologiques en prenant en compte l'influence du relief (défini par une quinzaine de « vecteurs paysages » calculés sur un domaine de 50 x 50 km centré sur les points d'observations). Des **normales climatiques** (ou moyennes trentenaires) sont calculées à la **résolution de 1 km** et pour quatre périodes (voir **annexe F**).

Des **cartes AURELHY** sont disponibles à différentes échelles², mais on peut acquérir aussi les valeurs ponctuelles des stations.

1 Fin 2011, une fiche climatologique était facturée 33,40 € HT.

2 Fin 2011, le prix unitaire d'une carte de France était de 175 € HT (soit un paramètre mensuel pour 551 716 points de grille) ou de 45 € pour une surface inférieure ou égale à 6 000 points de grille (équivalent à un département).



Source : Météo-France, 2011

Carte AURELHY de pluviométrie annuelle (pluviosité croissante : du rouge < 600 mm, vers le bleu foncé > 900 mm).

De façon complémentaire, Météo-France propose des cartes d'évapotranspiration potentielle (ETP Penman-Monteith, voir encadré page 94)¹. La résolution spatiale de la grille d'ETP est de l'ordre de 10 km. Comme pour les données AURELHY, et aux mêmes tarifs, ces valeurs ETP sont aussi disponibles pour chaque station.

Les données climatiques permettent de caractériser un site. Avec les données pédologiques, elles sont utilisées lors de la stratification d'un échantillonnage, ou pour regrouper des expérimentations lorsque l'on souhaite étudier l'effet de différentes variables climatiques.

Il est souvent inutile d'investir trop de moyens dans l'acquisition de ces données

¹ Les cartes sont calculées à partir de la spatialisation de chaque paramètre entrant dans le calcul de l'ETP.

Données météorologiques

Ces données, à caractère parfois très local, nécessitent de **déterminer la ou les stations météorologiques de référence** les plus proches et les plus représentatives du site expérimental. Il suffit ensuite de commander les données nécessaires, seulement au moment de l'analyse du dispositif. Les pas de temps à choisir sont à adapter aux questions posées, à la périodicité des mesures sur le site et aux interprétations envisagées.

Les sources de données

- **Diverses sources de données gratuites**

Si l'on souhaite des données de qualité, les possibilités d'obtention de séries météorologiques sont assez limitées, tant en nombre de postes, qu'en pas de temps ou qu'en nombre de paramètres. On peut cependant citer les sources suivantes :

⇒ La *Publithèque* de Météo-France (<https://public.meteofrance.com>) permet d'accéder en partie gratuitement à certaines données :

- **données météorologiques de 42 stations** en métropole ;

- **bulletins climatologiques départementaux** présentant les données moyennes mensuelles et journalières des précipitations et températures. L'intérêt de ces bulletins est qu'ils font état des phénomènes divers (orages, grêle, neige, tempêtes) même lorsqu'ils n'ont été observés que localement, qu'ils résument les faits marquants du mois en situant le mois par rapport aux moyennes antérieures, et qu'ils comprennent des cartes de précipitations à l'échelle du département ;

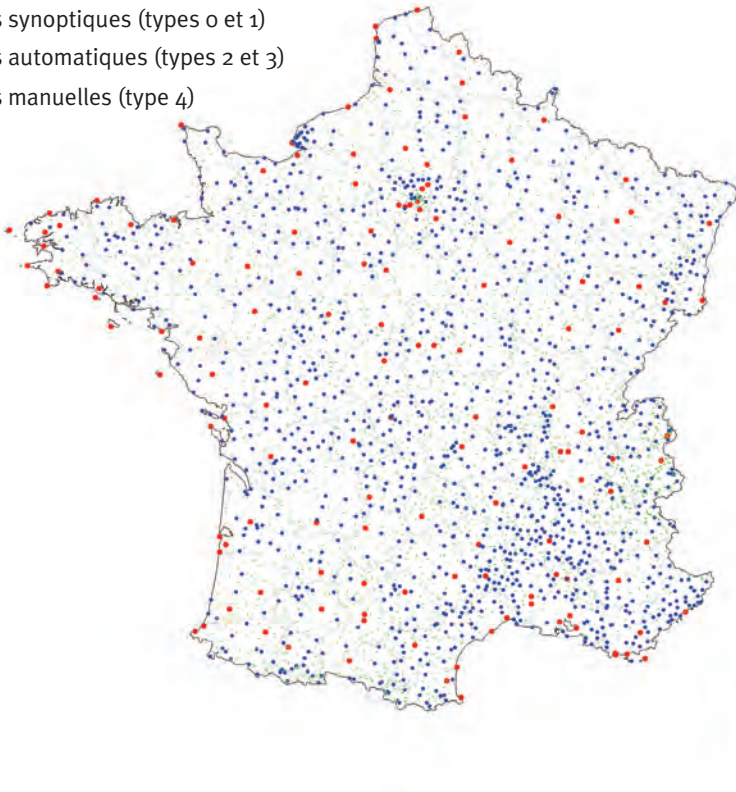
- **liste des postes d'observations** (dont les données sont, elles, payantes) permettant de sélectionner librement des postes en fonction d'un grand nombre de critères : région, département, commune, localisation géographique, altitude, paramètre recherché, dates d'observation, etc. Cette liste est disponible sous forme de carte ou de fichier.

⇒ Le site internet *Météociel* (www.meteociel.fr) permet d'obtenir des données mensuelles de températures et de précipitations pour 144 postes météo français (voir onglet Climatologie/Tableaux et graphiques par ville pour accéder à des tableaux de données). Des données horaires et journalières sont également disponibles.

⇒ Le site internet du projet *Évaluation du Climat Européen* (European Climate Assessment and Dataset, <http://eca.knmi.nl>) permet d'obtenir des données journalières pour toute l'Europe (2 311 postes). Pour la France, 63 postes sont disponibles (voir onglet *Daily Data*).

Source : Météo-France, <http://climatheque.meteo.fr>

- Stations synoptiques (types 0 et 1)
- Stations automatiques (types 2 et 3)
- Stations manuelles (type 4)



Carte des stations météorologiques disponibles en 2011.

Définition des types de stations météorologiques

- Les **stations synoptiques** effectuent des observations humaines du temps (couverture nuageuse, visibilité, vent, température...), données et transmission horaires et quotidiennes.

Type 0 : station professionnelle avec observation par du personnel formé à cet effet.

Type 1 : observation humaine non professionnelle ou réalisée à distance.

- Les **stations automatiques** effectuent des mesures issues de capteurs et non des observations du temps comme les nuages (données horaires et quotidiennes).

Type 2 : temps réel = transmission quotidienne des données.

Type 3 : temps différé = transmission et exploitation différées.

- Les **stations manuelles** de type 4 fournissent des mesures issues de relevés manuels (données quotidiennes uniquement). Transmission quotidienne ou différée.

⇒ Le service agroclimatique de l'INRA (AGROCLIM, INRA Avignon), recueille depuis plus de 35 ans des données climatiques sur un réseau de 47 sites dans l'hexagone. Ce réseau de stations instrumentées couvre essentiellement les grands bassins de production agricoles et viticoles. Cette base est ouverte aux partenaires extérieurs (demande à adresser à support-climatik@avignon.inra.fr).

⇒ D'un point de vue plus forestier, l'Office national des forêts met à disposition les données météorologiques enregistrées sur les placettes du réseau RENECOFOR (soit une trentaine de sites). Toute demande doit être adressée au responsable du réseau à Fontainebleau.

- **Les données Météo-France payantes**

Ces données climatologiques et météorologiques sont accessibles depuis le portail « *Données publiques* », à l'exception des produits ETP (évapotranspiration potentielle), des DJU (degrés jours unifiés¹) et des sommes de températures qui restent accessibles via la *Climathèque* (<http://climatheque.meteo.fr>). Mais il est indispensable de prendre contact auprès du service client de Météo-France pour négocier les tarifs, les coûts d'abonnement dépendant de l'utilisation faite des données (recherche, enseignement, utilisation non commerciale, utilisation commerciale, etc.).

- **Choix d'une station météorologique pour une commande de données météorologiques payantes**

Le réseau de stations météorologiques (synoptiques ou automatiques) de Météo-France regroupe plus de 1 000 stations en métropole.

L'utilisateur pourra cependant être frustré de ne pas trouver dans l'environnement immédiat de son dispositif LA station qui lui conviendrait, mais c'est un cas classique pour les zones forestières. **Nous recommandons donc de choisir les stations météorologiques « au mieux »** (c'est-à-dire au plus près, à la même altitude, etc.) tout en sachant que :

- **le rayonnement global** (ou la durée d'ensoleillement) **varie très peu spatialement** et varie de façon homogène ;
- **la température varie « assez peu »** : même s'il existe une différence de quelques dixièmes de degrés entre postes, les variations temporelles restent synchrones ;
- **les niveaux de précipitations peuvent par contre varier énormément** (la pluie est un phénomène discontinu spatialement, de manière non synchrone).

Le choix des stations est conditionné par l'utilisation que l'on souhaite faire des données météorologiques et par le **pas de temps analysé** (voir plus loin) :

- si l'on s'intéresse à **des gels ou des coups de chaleur**, il faut sélectionner soigneusement les postes mesurant la température **en fonction de leur altitude** ;

1 Pour une période de 24 heures, le nombre de degrés jours unifiés (DJU) est égal à la différence entre une température de référence (18 °C) et la température extérieure moyenne de la journée (plus l'indice DJU augmente, puis il fait froid).

- si l'on s'intéresse à des **calculs de bilan hydrique**, il faut choisir une station de référence dite « **station ETP** » (en général il s'agit des stations du réseau synoptique, mais pas uniquement) où tous les paramètres sont disponibles (rayonnement, températures minimale et maximale, humidité relative, vitesse du vent, précipitations) et un lot de plusieurs « **stations précipitations** », choisies au plus près et autour des sites, qui permettront de faire varier les calculs de bilan hydrique, voire d'établir des gradients de précipitations sur un massif forestier. Le bilan hydrique d'un peuplement est avant tout conditionné par les précipitations ; il est donc nécessaire de les caractériser au mieux, surtout pendant la période estivale, quand les précipitations orageuses, très localisées, peuvent avoir une influence énorme sur le niveau de déficit de l'année.

The screenshot shows a web interface for consulting meteorological station information. On the left is a table listing various stations with columns for INSEE, E, T, Alt., Nom de la station, and Latit. On the right is a detailed view for the station 'Bourges' (INSEE 18033001), showing its characteristics and history, including opening and closing dates, coordinates, and measurement parameters.

INSEE	E	T	Alt.	Nom de la station	Latit.
18033001	C	0	181	BOURGES	47.592N
18092001	C	0	175	AVORD	47.080N
18172002	F	2	170	ORVAL - PEAGE	46.716N
18125004	C	2	139	LERE	47.457N
18135001	C	2	219	MAISONNAIS	46.672N
18066002	C	2	148	CIVRAY	46.992N
18015003	C	2	179	AUBIGNY/NERE	47.500N
18172003	C	2	165	ORVAL RAD	46.731N
18175003	C	2	221	OUROUER	46.925N
18176001	C	2	257	PARASSY	47.230N
18087003	C	2	167	DUN-SUR-AURON	46.905N
18187004	C	2	462	PREVERANGES	46.425N
18190002	C	2	128	QUINCY_SA	47.136N
18197004	C	2	177	ST-AMAND-MTROND	46.737N
18223003	C	2	200	ST-MARTIN-D'A.	47.216N
18047001	C	2	190	CHAPELLE-D'ANG_SAPC	47.373N
18241002	C	2	240	SANCERRE	47.336N
18251001	C	2	205	SEVRY	47.138N
18262002	C	2	195	THAUVENAY_SA	47.302N
18269003	C	2	226	VAILLY/SAULDRE	47.453N
18279005	C	2	155	VIERZON	47.237N
18134001	F	4	140	LURY-SUR-ARNON	47.126N
18139001	F	4	171	MARSEILLE - BG	47.066N
18139002	F	4	164	MARSEILLE-LES-A	47.071N
18142001	F	4	195	MEILLANT	46.771N

Copie d'écran de consultation des informations sur les stations météorologiques (<http://climatheque.meteo.fr>).

Attention :

- Dans tous les cas, il n'est absolument pas recommandé de mélanger des données provenant de plusieurs stations : les différents champs météorologiques, ainsi que leurs évolutions, sont tous corrélés. En mélangeant les données, on détériore ces corrélations et on peut obtenir des résultats incohérents (notamment pour l'ETP).

- De la même façon, une série météorologique longue ne doit pas être construite en raboutant plusieurs petites séries. De telles données existent à Météo-France, il s'agit des « **données homogénéisées** » : données mensuelles de pluies (332 postes), de température (91 postes) et d'insolation (18 postes) de 1900 à 2010. Les séries homogénéisées sont des séries constituées à partir des observations de plusieurs postes et qui prennent en compte, par exemple, les problèmes de déplacement des sites de mesures ou les changements de capteurs¹.

1 Coût approximatif d'une série fin 2011 (un poste et un paramètre) : 20 € HT.

L'ouverture d'un compte client peut être mutualisée entre plusieurs partenaires, l'abonnement donnant accès à un volume de données en général très supérieur à ce qui peut être utilisé raisonnablement en une année : une convention sera alors signée entre les utilisateurs et Météo-France ; un référent pourra être désigné¹.

- **Pas de temps et données météorologiques principalement utilisées**

Selon l'objectif de l'expérimentation, le type de variables mesurées et le type d'analyses effectuées, le pas de temps et les données météorologiques à obtenir sont à adapter :

- **pour l'analyse globale d'un essai en continu ou après plusieurs années** (survie, mortalité, etc.), des **données annuelles** peuvent s'avérer suffisantes. Les principales données annuelles à obtenir sont : nombre de jours de gel, gels tardifs, précipitations annuelles, nombre de jours consécutifs avec des températures supérieures à un seuil, température moyenne et précipitations durant la période de végétation ;

- **pour analyser des performances de croissance**, il est préférable de s'orienter vers des **données mensuelles**. Les principales données mensuelles à obtenir sont : précipitations, températures minimum, maximum et moyenne, nombre de jours de gel ;

© L.-M. Nagelisen (DSF)



Dégât de gel sur plant de hêtre et rouge physiologique sur douglas : deux accidents à mettre en relation avec des données météorologiques journalières.



© D. Adam (DSF)

¹ L'unité de facturation est le lot de 10 données (10 températures horaires ; 10 précipitations annuelles ; etc.).

- pour des analyses dendroécologiques plus poussées, des études de réponse à un aléa particulier (gel, sécheresse édaphique, coup de chaleur...) ou encore des analyses phénologiques, des données journalières sont utiles, voire indispensables. Les principales données journalières à obtenir sont : précipitations, températures minimales et maximales (qui permettent de calculer une température moyenne de référence T_{moy}^1), humidité relative (ou déficit de saturation de l'air), vitesse du vent.

- Les indices climatiques

Si le choix des stations de référence est primordial pour permettre la comparaison des résultats, il en est de même pour les indices climatiques utilisés. Ceux-ci sont des variables synthétiques qui caractérisent le climat local et sont construites à partir des données météorologiques. Ils peuvent alors être corrélés avec les données de croissance ou de survie. En agronomie, une évapotranspiration potentielle de référence (ET_0) a été choisie ; en conséquence **tous les acteurs parlent le même langage** (de la recherche aux agriculteurs) et les résultats sont comparables d'une étude à l'autre. Un effort identique doit être fait chez les forestiers.

De très nombreux indices climatiques combinant précipitations et températures – le plus connu étant probablement l'indice d'aridité de de Martonne : $P/(T_{moy} + 10)$ – ont vu le jour dans la première moitié du XX^e siècle, utilisant les données facilement accessibles à l'époque. Ils permettent de classer des climats à des échelles supranationale et mondiale (classification des climats méditerranéens par Emberger par exemple), mais sont peu utilisés dans le cadre de l'analyse du fonctionnement d'une espèce.

Des **variables plus intégratrices** doivent être utilisées de préférence et notamment l'**évapotranspiration potentielle (ETP)**.



© O. Baubet (DSF)

Coups de soleil sur peupliers : ce phénomène est lié à la température maximale estivale et à l'exposition.

1 $T_{moy} = (T_{min} + T_{max})/2$. On peut définir ainsi une température moyenne pour tous les postes même en l'absence de mesures horaires ou semi-horaires continues.

L'ETP, son calcul, son intérêt...

DÉFINITION DE L'ETP

C'est la quantité maximale d'eau (en mm) pouvant être perdue par évapotranspiration (évaporation du sol + transpiration de la végétation) pendant une période de temps donnée, indépendamment de la nature du sol (supposé constamment alimenté en eau) et de la végétation (pourvu qu'elle ait un recouvrement de 100 %), et sous la seule dépendance des facteurs physiques de l'atmosphère.

CALCUL DE L'ETP

Plusieurs formules de calcul ont été proposées :

- les formules les plus simples n'utilisent que la température (ETP Blaney & Criddle par exemple) ;
- à un niveau de complexité supérieur, elles peuvent utiliser soit le rayonnement calculé par une fonction dépendant de la latitude du lieu (ETP Thornthwaite), soit le rayonnement mesuré (ETP Turc).

Ces formules sont des estimations statistiques, c'est-à-dire des relations empiriques entre des quantités d'eau évaporées et des paramètres météorologiques ;

- les ETP Penman et Penman-Monteith (variante de Penman, intégrant la résistance des végétaux au niveau des stomates à l'évaporation de l'eau). que nous préconisons, sont à l'inverse des formules physiques basées sur les échanges d'énergie et de matière. En plus des températures et du rayonnement, ces formules prennent en compte le déficit de saturation de l'air et la vitesse du vent (paramètres essentiels pour quantifier l'évaporation dans tout le domaine méditerranéen par exemple).

Le calcul de ces ETP pouvait paraître inaccessible aux forestiers, mais ce n'est plus le cas aujourd'hui : l'ETP Penman est directement disponible auprès de Météo-France à tous les pas de temps. Des outils, en outre, ont été élaborés pour calculer soi-même son ETP Penman, comme le logiciel BILJOU© de l'INRA Nancy (voir annexe F), qui utilise les données fournies par l'utilisateur (fichier de caractéristiques du peuplement et fichier de données météorologiques quotidiennes).

INTÉRÊT DE L'ETP ET DE P-ETP

L'ETP permet de caractériser la « demande » en eau de l'atmosphère. Cette demande peut, ou non, être satisfaite en fonction de l'état du couvert végétal et de la réserve en eau du sol.

Si la demande n'est pas satisfaite, le système est en déficit. On peut alors calculer un « déficit atmosphérique » correspondant à la somme des précipitations moins la somme des ETP, sur une période de temps donnée (semaine, décade, mois, année, etc.). Dans ce cas, on ne prend en compte ni le couvert végétal, ni la réserve en eau du sol. L'estimation peut être affinée par le calcul de la grandeur (RU+P-ETP), ce qui permet de « tamponner » les variations de précipitations par la réserve utile en eau du sol.

L'étape suivante est le calcul d'un « déficit édaphique » qui prend en compte tous les compartiments (sol, plante, atmosphère). Il faut alors estimer l'évapotranspiration réelle (ETR), à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Pour bon nombre de cultures, l'estimation de cette ETR peut se faire au moyen de coefficients culturaux qui intègrent la saison, les stades phénologiques, la couverture du sol, la hauteur de la végétation, son albédo, etc. : $ETR = \text{coefficient} \times ETP$. Malheureusement, si ces coefficients sont bien documentés pour tous les secteurs de l'agronomie, aucun n'est satisfaisant pour les couverts forestiers.

- Instrumentation sur site

Si la prise en compte d'un effet topographique s'avère indispensable dans l'analyse d'un dispositif (gradient d'altitude, adret/ubac), l'instrumentation sur site peut être nécessaire. De très nombreuses possibilités sont offertes, depuis une **instrumentation lourde** (type stations PULSONIC du réseau RENECOFOR) jusqu'à l'utilisation de **capteurs autonomes**, permettant la récolte d'une année de données (type HOBO datalogger).

Le coût de ces stations est fonction des données relevées, de la fréquence des relevés, de leur capacité de stockage, du mode de transmission des données et de l'autonomie énergétique des appareils.

Certaines stations de petite taille et peu coûteuses (quelques dizaines d'euros) permettent l'enregistrement de la température et de l'humidité ambiante. Mais la pluviométrie ou la vitesse et la direction du vent, plus sensibles aux variations locales, restent les variables les plus intéressantes à mesurer.



© L. Croisé (ONF)

Stations météorologiques du réseau RENECOFOR.



© L. Croisé (ONF)

Périodicité des mesures

La périodicité des mesures à faire sur les essais indiquée au chapitre 1 reste valable en « régime de croisière », mais doit être adaptée en cas d'évènements climatiques exceptionnels (gel, canicule, sécheresse...).

Une visite du site doit être alors effectuée après l'évènement et, si nécessaire, une ou plusieurs mesures ou observations supplémentaires peuvent être faites (notamment mortalité, notations sanitaires). En effet, l'objectif n'est alors plus de suivre une dynamique de croissance potentielle (comme par exemple une réaction à une éclaircie), mais de détecter une conséquence possible (bénéfique ou néfaste) sur les arbres.



© F. Maugard (DSF)

Dégâts de grêle suivis d'une attaque de sphaeropsis des pins sur un essai de pin laricio : des mesures exceptionnelles doivent être effectuées !

L'utilisation de données météorologiques peut permettre d'étudier l'effet de l'évolution du climat sur la croissance ou la survie des arbres.

Leur choix et leur acquisition restent délicats et leur utilisation est encore complexe pour refléter au mieux les situations locales (notamment pour la pluviométrie).

L'indice climatique ETP Penman et les précipitations sont, sans doute, les données météorologiques que le forestier devra évaluer pour appréhender la problématique du changement climatique dans ses expérimentations

VARIABLES SPÉCIFIQUES LIÉES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La mise en place de dispositifs, en lien avec le changement climatique peut induire le suivi plus précis de données qui étaient notées seulement en « observations » pour les dispositifs classiques, comme l'état sanitaire. Il peut être aussi nécessaire de suivre des variables supplémentaires permettant d'initier des études de phénologie ou de dendrochronologie.

Un complément sur la notation de ces variables spécifiques figure en **annexe F**.

Notation de problèmes phytosanitaires

Contribution de François-Xavier Saintonge (DSF)

Objectifs visés

L'installation et le suivi de dispositifs expérimentaux en vue de mettre en évidence d'éventuels impacts des changements climatiques ne peut se dispenser d'observations phytosanitaires, au moins basiques.

En effet, certaines situations vont générer des échecs, et il convient d'en connaître aussi précisément que possible les causes : **il ne faudrait pas attribuer systématiquement aux changements climatiques tous les maux des peuplements suivis**. Inversement, l'apparition ou le développement de certains problèmes phytosanitaires peuvent être influencés par le changement climatique. Leur prise en compte est donc indispensable, au même titre qu'une description fine de la station.

Mais à la différence du sol qui varie peu durant le suivi, les problèmes phytosanitaires peuvent, comme les événements climatiques extrêmes, intervenir à tout moment. Ils sont potentiellement très divers, parfois discrets, malgré des conséquences importantes et dans certains cas visibles pendant un laps de temps court. Leur évaluation par des non-spécialistes, qui ne peuvent y consacrer qu'un temps restreint, a donc des limites.

Le protocole suivant, spécifiquement conçu pour les expérimentations, propose une **notation à l'échelle de l'arbre, d'une gamme réduite d'observations de symptômes**, parmi les plus courants, destinée à décrire la cinétique d'éventuels échecs. Le diagnostic précis des causes et de leur succession dans un processus de mortalité est souvent une question complexe, et il conviendra alors de faire appel à des spécialistes.

Par ailleurs, les observations individuelles faites sur des dispositifs expérimentaux suivis régulièrement peuvent permettre d'acquérir des informations intéressantes concernant l'effet des facteurs du milieu, plus ou moins modifiés par le sylviculteur, sur la dynamique de certains problèmes phytosanitaires.

Le recours à l'expertise du **correspondant-observateur du DSF** est toujours souhaitable en cas de problème important (plus de 10 % d'arbres sérieusement affectés) ou quand cela mérite un diagnostic précis (symptôme inhabituel).

L'observation des houppiers des arbres adultes

L' « Évaluation de l'aspect des houppiers des essences feuillues » (protocole « DEPEFEU »), la « Mortalité de branches dans la partie supérieure du houppier » ou le « Déficit foliaire par rapport à un arbre de référence » (utilisé en général pour les résineux) illustrent des méthodes définies et employées par le Département santé des forêts pour décrire l'état sanitaire des peuplements. Ces notations nécessitent une formation et un étalonnage et s'appliquent parfois difficilement aux expérimentations, notamment en plantation. Elles peuvent être cependant utilisées dans certains cas (voir chapitre 3, page 135 : cas des peuplements existants). Ces protocoles sont disponibles auprès du Département santé des forêts, et le « Guide de gestion des forêts en crise sanitaire » (Gauquelin, 2010) en fait une présentation simplifiée.

Principe de notation

Le principe de notation arbre par arbre présenté ici repose sur une **codification des symptômes les plus fréquemment rencontrés, affectant l'aspect « normal » d'un ou plusieurs organes.**

L'évaluation de l'importance d'un symptôme est toujours délicate sans une formation spécifique et une calibration régulière. On préconise ici une approche « semi-quantitative » à partir d'appréciations globales.

Un symptôme sur une tige n'est noté que s'il est significativement présent, c'est-à-dire par exemple, **s'il affecte plus de 25 % du feuillage ou du pourtour du tronc.**

Un arbre peut être atteint par plusieurs symptômes, et la notation de certains d'entre eux (sur les feuilles en particulier) n'est pertinente qu'une partie de l'année. N'est alors noté que le **couple organe/symptôme** correspondant à l'intensité la plus forte (voir tableau page 99). Les symptômes moins importants peuvent être indiqués en observation.

Codification

La codification en 5 lettres est composée d'une première lettre (ou deux) pour l'organe, suivie de trois ou quatre lettres pour le symptôme sur l'organe concerné.

Organe	Symptôme	Code
Feuilles ou aiguilles	consommation	FCONS
	changement de couleur (partielle, par taches ou totale)	FCOUL
	changement de forme (y compris réduction de taille)	FFORM
	manque (ou chute)	FMANQ
Bourgeons	consommation	BOCON
	dessèchement	BODES
Branches	dessèchement (y compris galeries sous-corticales)	BMORT
	déformation (chancre, nécrose corticale...)	BDEFO
	écorçage	BECOR
	manque (y compris bris)	BMANQ
Tronc	dessèchement (y compris galeries sous-corticales)	TDESS
	déformation (chancre, nécrose corticale, fente...)	TDEFO
	écorçage (gibier)	TECOR
	blessure (mécanique)	TBLES



© D. Adam (DSF)

L'hylobe est le principal ravageur des jeunes plantations résineuses. La surveillance des essais doit en tenir compte et une protection par produits phytosanitaires est conseillée si le risque est élevé.



© F.-X. Saintonge (DSF)

Notation d'une attaque d'hylobe sur un essai pin maritime.

Exemples de notation de symptômes



Consommation de feuilles : FCONS 3.



Changement de couleur de feuilles : FCOUL 4.



Dessèchement de branches : BMORT 5.



Manque de branches : BMANQ 4.



Déformation du tronc par un chancre : TDEFO 3.



Tronc attaqué par des scolytes : TDESS 5.

Quantification

La grille de quantification ci-dessous précise l'ampleur des symptômes décrits, par différents moyens d'évaluation.

correspondance \ Note	0	1	2	3	4	5
en intensité	Absence ou trace	Légère	Assez forte	Forte	Très forte	Totale
en fréquence	Nulle ou très faible	Faible	Modérée	Importante	Très importante	Toute la partie notée est concernée
en nombre	0 à rares	Quelques à peu nombreux	Assez nombreux	Nombreux	Très nombreux	Tous
en % équivalent	0 à 5	6 à 25	26 à 50	51 à 75	76 à 95	96 à 100
en fraction	Absence ou trace	Moins de 1/4	Entre 1/4 et 1/2	Entre 1/2 et 3/4	Plus de 3/4	Totalité

Le principe retenu, dans le cadre du suivi d'un dispositif expérimental, est de ne noter un symptôme que si son intensité sur un arbre est supérieure ou égale à 2. Il reste bien évidemment possible de noter de façon optionnelle des symptômes d'intensité plus faible (0 ou 1). Exemple : FCONS4 correspond à une très forte consommation de feuilles (par des chenilles par exemple).

Il est bien sûr utile d'indiquer la cause du symptôme, lorsque celle-ci est connue. Elle pourra être notée en clair, voire sous forme de code DSF si le notateur est correspondant-observateur du DSF.

Période de notation

Cette notation a été conçue pour coder des symptômes observés à un instant donné, symptômes qui, jusqu'alors, étaient notés en observation lors des mesures dendrométriques hivernales. Pour la notation des symptômes affectant les feuilles des essences à feuillage caduc, la période de ces mesures ne convient donc pas. Si une suspicion de risque d'attaque de défoliateurs existe, il peut être opportun d'effectuer un passage en notation lorsque les arbres sont en feuilles (mai à juin), pour noter les symptômes.

De même, en cas d'événements climatiques risquant d'affecter les arbres (canicule, gel...), une mesure exceptionnelle peut être ajoutée pour noter son effet instantané (voir page 96).

La notation codifiée de symptômes permettra de caractériser l'état sanitaire des arbres de la placette et de suivre son évolution dans le temps.

La cause du symptôme, si ce dernier semble important, pourra être déterminée en faisant appel à un spécialiste

Phénologie

Principe

La **phénologie** est l'ensemble des particularités morphologiques du cycle de développement d'un végétal, avec mention des époques de l'année correspondantes.

La mesure de la phénologie est importante dans le cadre de l'observation des effets du changement climatique. Le climat a en effet une incidence directe sur les dates des principales phases phénologiques. De plus, la phénologie représente un des mécanismes prépondérants dans l'adaptation des espèces au changement climatique car elle intervient dans de nombreux domaines :

- le fonctionnement hydrique des arbres, qui est en relation étroite avec la phénologie foliaire ;
- la coïncidence ou non entre les dates de débourrement/floraison/fructification/sénescence des feuilles et les dates de certains événements climatiques (gel notamment) ;
- la coïncidence ou non entre les dates de débourrement/floraison/fructification/sénescence des feuilles et les cycles de certains champignons pathogènes ou bien d'insectes pouvant être des pollinisateurs ou au contraire des ravageurs.

Cette mesure est cependant coûteuse, car elle nécessite des visites fréquentes sur site (plusieurs fois par an) qui ne peuvent pas être faites au même moment que les mesures dendrométriques qui sont prises uniquement hors période de végétation.

Si elle est mise en place, la mesure de la phénologie doit donc être optimisée en opérant de manière homogène et réfléchi au sein d'un réseau. Une consultation de personnes spécialisées dans ce domaine est indispensable pour mettre en place un protocole adapté à la problématique, à l'essence étudiée et aux moyens disponibles.

Deux axes de travail peuvent être étudiés dans le cadre d'installation de références ou d'expérimentations :

- **l'évolution des périodes de végétation**, dans le temps et géographiquement ;
- **la variation des dates de débourrement (= feuillaison) pour toutes les essences et de sénescence (= changement de couleur des feuilles) pour les essences à feuilles caduques (donc surtout les feuillus)**, notamment pour évaluer les risques de dégâts liés au gel tardif au printemps, ou au gel précoce à l'automne.



© A. Durcouso (INRA)

Début de sénescence des feuilles de hêtre le 9 octobre 2008.



© P. Riou-Nivert (CNPFR-IDF)

Bourgeons d'épicéa commun au début du débourrement.

Trois niveaux de suivi sont proposés dans le tableau suivant, selon les moyens disponibles et les objectifs visés.

Phénomène phénologique observé	Suivi au niveau placette (global)	Suivi au niveau arbre (précis)	Suivi au niveau arbre (très précis) voir échelle BBCH p. 107
Débourrement : notation de printemps (feuillus et résineux)	Notation sur la placette des deux dates auxquelles : - 10 % des arbres possèdent entre 20 et 50 % des bourgeons du houppier ouverts ; - 90 % des arbres possèdent entre 20 et 50 % des bourgeons du houppier ouverts.	Notation individuelle sur 30 arbres, des trois dates auxquelles : - les premiers bourgeons de l'arbre sont ouverts ; - l'arbre possède entre 20 et 50 % des bourgeons ouverts ; - l'arbre possède 100 % des bourgeons ouverts.	Notation individuelle sur 30 arbres, du stade BBCH (1 à 7 passages).
Sénescence des feuilles : notation d'automne (feuillus)	Notation sur la placette des deux dates auxquelles : - 10 % des arbres présentent un jaunissement et/ou une chute des feuilles sur 20 à 50 % du houppier ; - 90 % des arbres présentent un jaunissement et/ou une chute des feuilles sur 20 à 50 % du houppier.	Notation individuelle sur 30 arbres, des trois dates auxquelles : - l'arbre présente les premiers jaunissements et/ou chute de feuilles ; - l'arbre présente un jaunissement et/ou une chute des feuilles sur 20 à 50 % du houppier ; - l'arbre présente un jaunissement et/ou une chute des feuilles sur 100 % du houppier.	Notation individuelle sur 30 arbres, du stade BBCH (1 à 7 passages).
Types de réponses attendues	Donnée peuplement - classement entre essences, des périodes et des durées des phénomènes phénologiques observés ; - évaluation de la période de végétation ; - évaluation des risques thermiques et sanitaires, par rapport au climat local.	Données individuelles permettant d'évaluer la diversité génétique - estimation des périodes et des durées des phénomènes phénologiques observés ; - évaluation de la période de végétation ; - évaluation des risques thermiques et sanitaires, par rapport au climat local.	Pour 7 passages : différence de comportements intraspécifiques - lien entre phénomènes phénologiques observés et caractéristiques des années climatiques ; - déroulement précis des phénomènes phénologiques observés ; - indication précise des risques thermiques et sanitaires, selon des seuils climatiques ; - comparaison précise entre les espèces possibles.

Suivi au niveau placette

Le protocole proposé ici est issu du « Manuel de référence N 12 pour les observations phénologiques », utilisé pour les placettes du réseau **RENECOFOR** (ONF, février 2009).

Le principe retenu est de **déterminer deux dates par placette** qui correspondent à deux stades d'évolution de chacun des deux phénomènes phénologiques observés : débourrement (20 à 50 % de bourgeons ouverts sur un arbre) et sénescence (20 à 50 % de feuilles jaunies ou tombées pour un arbre) :

- **date 1** : phénomène observé sur 10 % des arbres ;
- **date 2** : phénomène observé sur 90 % des arbres.

Nombre de visites : une visite **hebdomadaire** (par exemple le lundi), au printemps pour le débourrement et à l'automne pour la sénescence des feuilles, est conseillée pour une précision satisfaisante, et ceci jusqu'à la détermination des deux dates.

Nombre d'années : le nombre d'années de mesure et la périodicité entre les années mesurées dépendent des objectifs, mais **trois années successives de mesure sont un minimum**.

Ce type de protocole a pour objectif de classer les essences/provenances selon leur précocité de débourrement ou de sénescence des feuilles. Il est plus particulièrement adapté aux références mesurées, mais peut être utilisé sur des expérimentations. Par contre, il n'est pas assez fin pour identifier précisément les dates des événements phénologiques, et leur lien avec le climat.

En **annexe F** figurent des fiches (issues du protocole du réseau **RENECOFOR**) illustrant le stade de débourrement recherché par cette notation (« bourgeons ouverts »), pour quelques essences.

Suivi au niveau arbre

Dans le cadre d'une expérimentation, si l'objectif est de suivre plus précisément dans le temps l'évolution des dates de certains événements phénologiques, notamment en fonction de caractéristiques climatiques, le suivi individuel devient indispensable. Il permet en outre d'appréhender la variabilité du peuplement.

- **Suivi précis**

Ce suivi individuel est également issu du protocole **RENECOFOR**. L'observation par placette est reprise, mais déclinée à l'échelle de l'arbre. Les fiches de l'**annexe F** (débourrement) sont également utilisables pour ce niveau.

Le principe retenu est de **déterminer trois dates pour chaque arbre**, qui correspondent à trois stades d'évolution de chacun des deux phénomènes phénologiques observés (débourrement et sénescence des feuilles) :

- **date 1** : le phénomène commence à apparaître sur l'arbre (apparition des premières feuilles ou aiguilles, ou bien des premiers jaunissements, même partiels, et/ou chute des feuilles) ;
- **date 2** : le phénomène concerne entre 20 et 50 % du houppier ;
- **date 3** : le phénomène concerne 100 % du houppier.

Nombre de visites : comme pour le niveau placette, une visite **hebdomadaire** sur site est conseillée, à chacune des deux périodes, jusqu'à la détermination des trois dates.

Nombre d'années : là encore, **trois années** successives de mesure sont un minimum.

Un **échantillon minimum de 30 arbres** est suivi. Cet échantillon doit être constitué de manière systématique et couvrir l'ensemble de la surface de la placette. La manière la plus simple de procéder est de choisir systématiquement, lors du cheminement dans la plantation ligne par ligne, « un arbre sur x », x étant calculé de manière à mesurer au moins 30 arbres (voir annexe C).

Les arbres de cet échantillon restent toujours les mêmes, afin de permettre un suivi individuel.



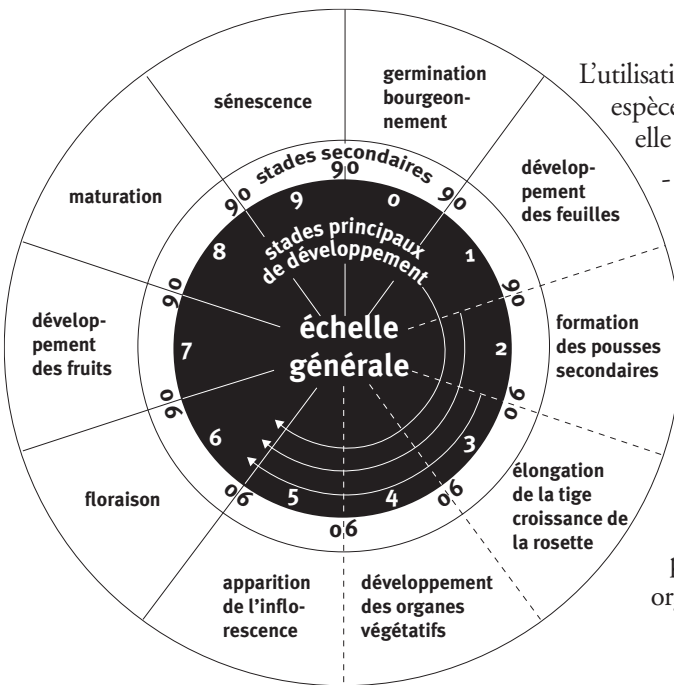
© L.-M. Nageleisen (DSF)

Observation attentive des houppiers.

• **Suivi très précis**

Le suivi individuel est basé ici sur l'échelle BBCH (développée par l'institut allemand Biologische Bundesanstalt für Land und Forstwirtschaft), adoptée par la plupart des scientifiques. Il s'agit d'une échelle générale, utilisable pour toutes les espèces végétales, codifiant les principaux stades phénologiques. Des échelles individuelles peuvent ensuite être élaborées par espèce, à partir de l'échelle générale (voir quatre exemples en **annexe F** et sur le site <http://www.obs-saisons.fr>); sinon, par défaut, cette dernière est appliquée.

Les différentes phases de développement d'une plante sont divisées en **10 stades principaux** de « longue durée », numérotés de 0 à 9, eux-mêmes divisés en **stades secondaires** également numérotés de 0 à 9 (voir figure ci-après), correspondant à des étapes limitées dans le temps. On attribue ainsi un **code à deux chiffres** par arbre.



L'utilisation d'une échelle particulière à une espèce est préférable, si elle existe, car elle permet :

- de se référer à des illustrations (photos, dessins) précises et adaptées à l'espèce, pour clairement déterminer les différents stades ;
- de ne retenir que certains stades de l'échelle générale, ce qui permet de réduire les codes possibles.

Le CNRS de Montpellier a mis au point des échelles individuelles pour un nombre important d'essences forestières, et organise des formations spécifiques¹.

Échelle générale BBCH.

D'après : "Stades phénologiques des monocotylédones et dicotylédones cultivées".
U. Meier. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 2001.

1 GDR SIP-GECC (Groupement de recherche - Système d'information phénologique pour la gestion et l'étude des changements climatiques). Directrice : Isabelle Chuine ; CNRS - <http://www.gdr2968.cnrs.fr/>.

Nombre de visites : la périodicité et le nombre de passages par évènement observé (débourrement ou sénescence des feuilles) dépendra des objectifs et des moyens alloués au suivi :

- **un passage** permet de classer des unités génétiques selon leur précocité. L'imprécision devient de plus en plus grande vers les comportements phénologiques extrêmes ;
- **trois passages** permettent un classement, avec une bonne précision, des unités génétiques ;
- **cinq à sept passages** sont nécessaires pour repérer précisément la date d'un évènement phénologique (débourrement, sénescence des feuilles).

Nombre d'années : si une campagne de mesure suffit pour obtenir des classements entre unités génétiques, la répétition des campagnes est indispensable pour étudier l'évolution dans le temps des phénomènes et pour les mettre en relation avec les caractéristiques climatiques. La répétition de la mesure permet de gagner en précision et, si le nombre de répétitions est suffisant (7 années contrastées), le suivi permet d'isoler les facteurs climatiques de déclenchement d'un évènement phénologique (exemple : une somme des températures provoquant le débourrement).

Un échantillon minimum de 30 arbres est suivi, constitué systématiquement comme l'échantillon du suivi précis.

Temps de mesure indicatif : moins d'une minute par arbre les premières années après plantation, puis plusieurs minutes lorsque les arbres dépassent 3 m. Le temps de mesure s'accroît avec la hauteur des arbres. Au-delà de 8 m, il faut prévoir de bonnes jumelles.

Des méthodes de suivi automatique, par la mesure en continu du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) intercepté par la partie aérienne des arbres (un capteur PAR est posé au sol sous les arbres et un autre est placé au-dessus des arbres), sont en cours de développement à l'INRA. Ces dispositifs devraient permettre de dater précisément le débourrement ou la sénescence des feuilles, en limitant les déplacements sur site (stockage des données sur carte mémoire). Leurs coûts deviendront sans doute de plus en plus abordables¹.

L'observation de la phénologie permet de corrélér le cycle du végétal aux variables météorologiques. Elle peut cependant devenir fastidieuse et très coûteuse, selon le niveau de précision retenu.

Elle sera réservée à certains dispositifs choisis pour leur bonne représentativité ou la facilité de réalisation (accessibilité, par exemple)

¹ Fin 2011 : environ 100 € l'ensemble capteur + carte mémoire, sans le coût de la pose et du petit matériel (piquets, grillage...).

Dendrochronologie

Contribution de Vincent Badeau (INRA)

Principe

La dendrochronologie a pour objet l'étude des cernes d'accroissement des arbres.

Elle donne accès, *a posteriori*, à un grand nombre de caractéristiques essentielles pour connaître et comprendre la croissance des arbres et des peuplements :

- le simple **décompte des cernes** permet de déterminer l'âge des tiges ; facteur important de la croissance ;
- la mesure des **largeurs de cernes** permet d'affiner l'analyse des relations entre croissance radiale et facteurs de l'environnement (climat, fertilité stationnelle, sylviculture, attaques parasitaires, etc.), notamment dans les expérimentations où les mesures ne sont pas annuelles. Cette mesure permet également de retracer la croissance passée d'un peuplement (avant l'installation d'un essai par exemple) ;
- des **mesures encore plus poussées** permettent d'obtenir des informations sur la densité, la composition chimique du bois, le retrait, la durabilité, etc., notamment pour les essences dont les propriétés mécaniques sont méconnues.

Déterminisme de la largeur des cernes

L'arbre agit comme un intégrateur complexe des conditions de son environnement. Les nombreux facteurs influençant la largeur d'un cerne annuel peuvent être résumés par un modèle théorique du type :

$$\text{Largeur cerne} = A + C + PL + PR + E$$

A symbolise les **facteurs biologiques**, l'âge en particulier. L'évolution de la largeur des cernes se fait en deux phases : une augmentation dans le jeune âge, puis une diminution, suivie ou non d'une stabilisation jusqu'à la mort de l'arbre. Attention, cette évolution est différente si on considère les surfaces de cernes : une diminution de la largeur des cernes en fonction du temps (et donc du diamètre) correspond souvent à une augmentation globale de leur surface. La régulation de la croissance est difficilement interprétable par la largeur de cerne mais plutôt par la surface de cerne, qui détermine une surface conductrice. La composante biologique A intègre donc les contraintes géométriques d'accroissement en même temps que les variations liées à l'augmentation de l'âge. Cet « **effet âge** » rend donc impossible la comparaison directe du niveau de croissance moyen, à une date donnée, de cernes d'âges différents.

C est la **composante climatique**. Elle est commune à l'ensemble des arbres d'une même région, mais des variations microclimatiques peuvent se superposer à la composante climatique générale.

PL représente les **perturbations locales**, c'est-à-dire qui ne concernent pas l'ensemble des arbres de la placette ou du peuplement d'un même site. Diverses causes peuvent affecter la croissance radiale : compétition inter-arbres (densité variable dans le peuplement), accidents locaux (chablis), sylviculture (éclaircies sélectives), micro-variations stationnelles (fertilité, obstacles à l'enracinement, disponibilité en eau), incendies, inondations, glissements de terrain...

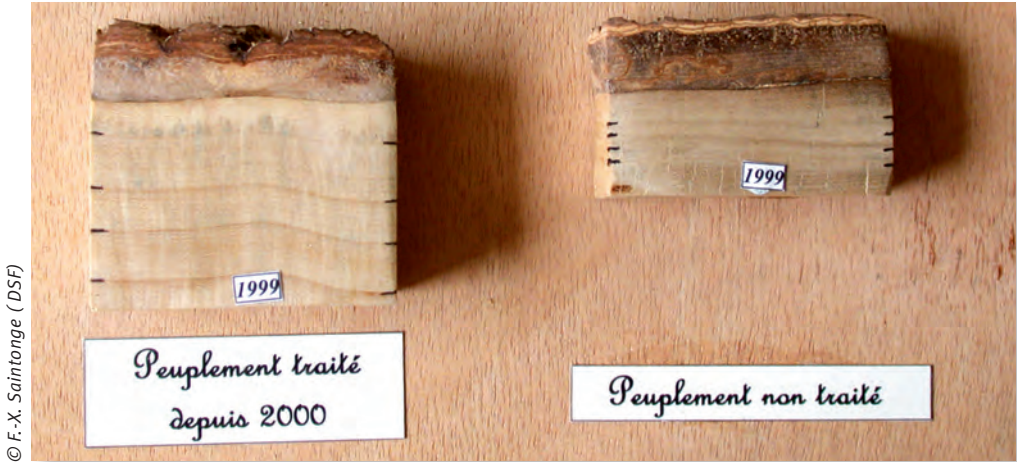
PR intègre les **perturbations régionales**, qui affectent l'ensemble des arbres d'une placette, d'un peuplement ou d'une région. Il peut s'agir de perturbations climatiques à long terme (variation du régime des pluies, augmentation des températures), de l'action bénéfique ou néfaste de composés divers (CO_2 , dépôts azotés, soufre, ozone, etc.), de l'évolution globale des pratiques sylvicoles, des attaques épidémiques d'insectes ou de pathogènes...

E est la **part aléatoire** de la croissance, non explicable. Elle représente la variance qui reste lorsque tous les autres facteurs identifiés ont été pris en considération. Elle inclut les erreurs de mesure, le potentiel génétique, etc.

À tous ces « effets simples » s'ajoutent bien sûr quantités d'interactions complexes (l'effet du climat sur un cerne d'âge i ne sera pas le même que sur un cerne d'âge j , par exemple) et des arrières-effets (le niveau de croissance observé l'année n dépend fortement du niveau de croissance de l'année $n-1$, voire bien au-delà).

Tous ces facteurs agissent sur la croissance radiale à différentes échelles de temps. Trois « fréquences » sont classiquement reconnues et étudiées en dendrochronologie :

- la **haute fréquence** intègre les variations de croissance à l'échelle de l'année (climat, feu, défoliation parasitaire...);
- la **moyenne fréquence** intègre les variations à l'échelle de quelques années (crise climatique sur une décennie, réaction à une éclaircie) et des arrières-effets (conséquences différées d'une sécheresse exceptionnelle);
- la **basse fréquence** intègre les variations de croissance de l'échelle de la décennie à celle du siècle (pollutions, dérives climatiques, changements globaux, etc.).



Influence sur la largeur de cernes d'attaques annuelles de rouille sur peuplier (perturbation régionale) et effet positif d'un traitement phytosanitaire.

Les prélèvements

- Choix de la méthode de prélèvement

Deux méthodes sont possibles, le carottage et le prélèvement de rondelles :

- le **carottage** à la tarière, non destructif, a l'avantage de permettre le choix des arbres échantillons sans être dépendant de leur exploitation. Ce type de prélèvement sera donc retenu dans le cadre d'une analyse déclenchée bien avant la récolte des tiges et ciblant un échantillon représentatif de tout le peuplement. Le **propriétaire ou le gestionnaire doit avoir préalablement donné son accord** ;
- le **prélèvement de rondelles** est certes destructif, mais il offre plusieurs avantages : on dispose toujours du cœur de l'arbre ; il est possible de choisir le rayon où seront faites les mesures ; plusieurs rayons peuvent être mesurés car la croissance radiale n'est pas forcément homogène sur toute la section (cas des cèdres par exemple) ; les analyses de tiges (reconstitution de la croissance en hauteur) sont possibles. Le prélèvement de rondelles sera privilégié lors d'études « opportunistes », à l'occasion d'éclaircies, ou lors de la coupe finale pour faire le bilan d'un dispositif.

- Hauteur de prélèvement

Qu'il s'agisse de carottes ou de rondelles, les échantillons seront la plupart du temps prélevés à 1,30 m du sol, hauteur de référence en foresterie.

Des prélèvements à d'autres niveaux peuvent être envisagés pour préserver la bille de pied :

- prélèvements par carottage à un niveau supérieur. Cette opération est cependant malaisée (utilisation d'échelles). Par ailleurs, plus la hauteur est grande, plus on perd de cerne « juvéniles » (on s'éloigne alors de l'âge réel de l'arbre), et plus les cerne peuvent être déformés par l'influence mécanique des premières branches ;
- prélèvements en dessous de 1,30 m. Ils ne sont envisageables que si l'on souhaite déterminer l'âge de la tige. Cependant, plus la hauteur de prélèvement est basse, plus les cerne proches de l'aubier sont déformés par l'empatement et l'élargissement des cerne vient perturber le signal environnemental que l'on souhaite mettre en évidence. Par ailleurs, les cerne de cœur sont affectés par des phénomènes de concurrence initiale (cas des régénérations naturelles ou des plantations mal entretenues).

Il est de toute façon nécessaire de déterminer une hauteur de prélèvement de référence, identique pour tous les arbres du peuplement car, pour une année donnée, la largeur d'un cerne n'est pas constante du bas en haut de la tige. Par ailleurs, en situation contraignante, lors d'un épisode de sécheresse par exemple, le cambium est mieux alimenté en haut des tiges (plus proche de la couronne et donc des ressources carbonées) qu'à la base du tronc. Ainsi, plus les prélèvements sont effectués haut, plus le signal climatique est amorti.

Dans le cas de prélèvement de rondelles, celui-ci peut aussi être effectué tout au long de la tige abattue pour permettre des « **analyses de tiges** » (reconstitution de la croissance en hauteur...).

- **Nombre d'arbres échantillonnés**

L'objectif visé conditionne la dimension de l'échantillon et les méthodes d'analyse, afin de maximiser le signal recherché par rapport au bruit de fond :

- si l'on souhaite caractériser finement la **croissance d'un arbre** en particulier, on a tout intérêt à y prélever plusieurs carottes pour mesurer les accroissements sur plusieurs rayons ;
- si l'on souhaite caractériser la **croissance d'un peuplement**, il convient de multiplier le nombre d'arbres échantillonnés (voire de statuts sociaux) pour intégrer les perturbations locales ;
- si l'on souhaite caractériser la **croissance d'une espèce** en fonction du climat, il est préférable d'échantillonner peu d'arbres par placette, mais sur un grand nombre de placettes ;
- si l'on souhaite étudier l'**effet à long terme des changements climatiques**, il faut de surcroît multiplier les gammes d'âge.

De manière générale, pour une placette expérimentale, on retiendra que :

- **un échantillon de 10 à 30 arbres** est suffisant pour caractériser une « croissance moyenne » (carottes ou rondelles) ;
- **ces arbres doivent être bien répartis dans la placette** afin de contrôler l'hétérogénéité stationnelle. Il est en effet préférable de ne pas carotter des arbres voisins pour minimiser l'impact des perturbations locales. La règle est la même pour un prélèvement de rondelles après coupe rase ;

- il vaut mieux **prélever une carotte par arbre** (à cœur) et multiplier les arbres échantillonnés plutôt que l'inverse, tout en contrôlant bien entendu la qualité de la carotte ;
- les arbres à carotter sont choisis, selon l'objectif, soit parmi les arbres dominants si l'on souhaite connaître l'évolution de peuplement dominant, soit parmi un échantillon construit de la même manière que pour la mesure de la hauteur moyenne (voir chapitre 1, page 56) afin d'étudier l'évolution de toutes les strates du peuplement.

- **Récolte et traitement des échantillons**

- **Carottes**

Le prélèvement de carottes est réalisé au moyen d'une **tarière de Pressler** qui permet l'extraction d'échantillons de 5 mm de diamètre. Une tarière standard de 40 cm de long est le plus souvent suffisante. Pour les bois tendres, on préconise des tarières à trois filets, et pour les bois durs des tarières à deux filets qui, contrairement aux premières, doivent être affûtées avant chaque utilisation.

Les tarières doivent être en parfait état, régulièrement affûtées. Le prélèvement peut être fait manuellement ou à l'aide d'une chignole à moteur thermique ou encore d'une perceuse sans fil pour les arbres à bois tendre.

Une attention particulière doit être portée du côté de l'écorce, afin de ne pas perdre le dernier cerne de croissance. Les carottes doivent être identifiées sur le terrain à l'aide d'un crayon gras (numéro d'identification, date de carottage, etc.). Elles peuvent être stockées dès l'extraction dans des boîtiers plastiques (type polycarbonate alvéolé).



© L. Burnel (INRA)

Carottage à la tarière de Pressler.



© L. Burnel (INRA)

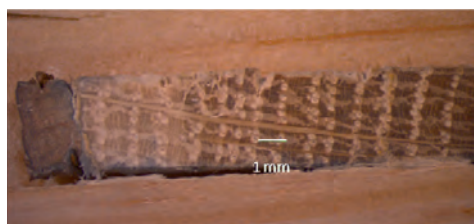
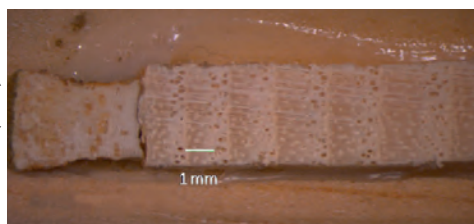
Carottes après extraction.

Chaque arbre doit être carotté à cœur à une hauteur de 1,30 m en évitant les éventuelles anomalies du tronc (méplat, empattement trop prononcé, cicatrice, etc.). Le carottage peut s'effectuer selon un azimut quelconque (qui sera noté) en situation plane, mais parallèlement aux courbes de niveau en situation de pente, pour éviter d'échantillonner le bois de compression ou de tension.

Le trou du sondage, rebouché ou non par un tourillon de bois traité (avec du mercuriothiolate de sodium) et recouvert par un mastic horticoles, cicatrise aisément.

Les échantillons sont ensuite stockés en chambre froide (pour limiter le développement des moisissures) ou séchés à l'air libre (les carottes pourront être réhydratées par la suite par simple trempage).

La lecture des largeurs de cernes n'est possible que lorsqu'une surface de mesure a été préparée par « planage » : les carottes de sondage sont rasées à l'aide d'un cutter, selon un plan strictement perpendiculaire au fil du bois pour bien faire apparaître les structures anatomiques. Il est préférable de réaliser le planage sur des carottes fraîchement extraites, mais il est également possible de planer des carottes sèches après les avoir fait tremper une heure dans de l'eau tiède. Le planage au cutter présente l'avantage de ne pas patiner le bois et de ne pas boucher les orifices des vaisseaux. Ceci est important dans le cas des essences feuillues à bois homogène (pores diffus, nombreux et de petit diamètre), les cernes étant seulement soulignés par la présence d'une zone de fibres aplaties et à parois épaisses sur le bord extérieur du bois final. Pour les conifères, il est également possible de poncer les échantillons en utilisant un papier abrasif très fin.



© L. Burnel (INRA)

© L. Burnel (INRA)

Carottes planées sur frêne (à gauche) et chêne pédonculé (à droite).

- Rondelles

Dans le cas de prélèvement de rondelles à 1,30 m ou tout au long de la tige, il est important de réaliser une coupe bien perpendiculaire au fil du bois et nette, afin d'éviter une seconde coupe à l'atelier ou un gros travail de rattrapage par ponçage en utilisant des grains de plus en plus fins. Une épaisseur de l'ordre de 5 à 6 cm est suffisante. Comme pour les carottes, les rondelles doivent être préparées avant la lecture des cernes par ponçage ou au cutter pour dégager un ou plusieurs rayons ou « chemins de lecture ». Dans le cas des arbres de gros diamètre, on peut recouper des « barreaux » d'une largeur de 5 à 8 cm selon un diamètre

© V. Badaeu (INRA)



Prélèvement de rondelle.

moyen, pour faciliter la manipulation, le séchage et le stockage des échantillons. Si une marque d'orientation a été faite avant l'abattage, elle doit être bien visible sur la rondelle. L'identité de la rondelle sera reportée sur sa face inférieure, avec un crayon indélébile ou une craie forestière et doit être très lisible.

L'analyse de rondelles à différents niveaux permet de mieux caractériser la variabilité de croissance intra-arbre, mais c'est en général au détriment du nombre d'arbres échantillonnés (d'un point de vue statistique, il est préférable de mesurer 100 arbres différents que 10 arbres à 10 niveaux). La chronologie de croissance moyenne d'un arbre sera obtenue par le calcul de la moyenne quadratique (= racine carrée de la moyenne des carrés) des largeurs de cernes mesurées sur différents rayons.

Lecture des cernes

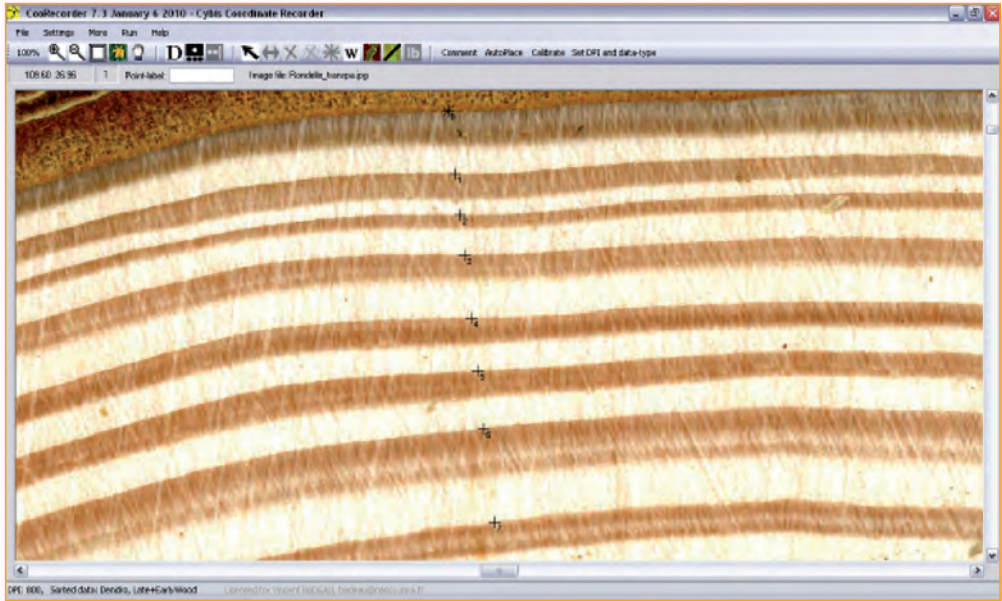
La mesure des largeurs de cernes peut se faire sur le terrain à l'aide d'une forte loupe (méthode IFN pour mesurer les accroissements des 5 et 10 dernières années), ou au laboratoire avec, le plus souvent, une chaîne de saisie dédiée à cet usage qui permet d'obtenir des mesures précises¹.

Depuis quelques années, des outils plus conviviaux et moins chers sont disponibles. Les carottes et les rondelles peuvent être scannées, le choix de la résolution dépendant de la taille des cernes et de la précision souhaitée (de 800 à 2 400 pixels/pouce). Les images peuvent alors être traitées très simplement, mais avec rigueur et précision, à l'aide de logiciels² qui mesurent la largeur du cerne complet ou distinguent le bois initial et le bois final. Les données sont ensuite reprises par des logiciels de traitement d'information (interdatation par exemple) fournissant des courbes de croissance³.

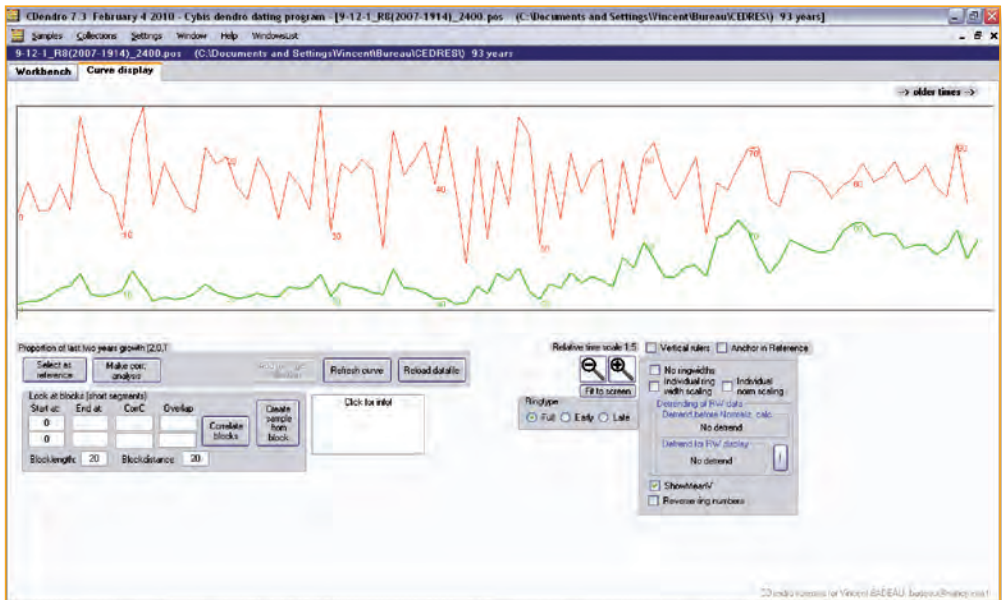
1 Systèmes vidéo-informatisés (par exemple outils WinDendro : www.regentinstrument.com/products/dendro/DENDRO.html).

2 Par exemple: CooRecorder (<http://www.cybis.se/indexe.htm>). La version 7 de ce logiciel est vendue au prix de 54 € HT fin 2011 et une version d'essai gratuite est disponible (www.cybis.se/forfun/dendro/buy_SWREG/cdendrotrialver7.php).

3 Logiciel CDendro (vendu avec CooRecorder). À noter qu'un logiciel d'interdatation est distribué gratuitement par l'UMR 1137 INRA-UHP Écologie & Écophysiologie Forestières de l'INRA Nancy (contacter Jean-Luc Dupouey : dupouey@nancy.inra.fr).



Capture d'écran du logiciel de traitement d'images CooRecorder.

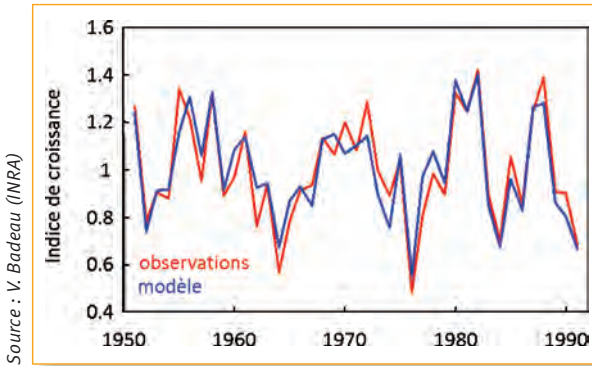


Capture d'écran du logiciel CDendro traduisant les largeurs de cernes en courbes de croissance : en rouge une chronologie de référence, en vert un arbre en cours d'interdation (recalage des années climatiques par rapport aux années calendaires).

Analyses

À l'aide des outils présentés ci-dessus et d'un tableur, il est possible de mettre en évidence quelques indicateurs de la croissance passée des arbres (évolution de la surface terrière par exemple) et de détecter des « années caractéristiques », c'est-à-dire des années où la majorité des arbres (classiquement 80 %) présentent des différences de croissance synchrones par rapport à l'année précédente (classiquement $\pm 10\%$). Ces années caractéristiques marquent généralement des conditions climatiques particulières (mais aussi d'autres phénomènes comme par exemple les éclaircies ou des attaques d'insectes).

Pour des analyses plus poussées, notamment dendroclimatiques, d'autres logiciels plus sophistiqués sont nécessaires¹. À ce niveau d'investigation, il est très fortement conseillé d'établir un partenariat avec une structure de recherche ou un bureau d'étude privé maîtrisant les outils et méthodes de la dendrochronologie. De telles analyses ne se font pas sur des largeurs de cernes brutes mais sur des indices de croissance calculés selon des procédures propres aux questions posées et à la nature de l'échantillon.



Croissance radiale du hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine (Badeau, 1995). La courbe rouge présente les variations interannuelles de croissance, la courbe bleue correspond au modèle dendroclimatique. Le modèle utilise les déficits hydriques (calculés avec Biljou©) de l'année en cours et de l'année précédente ; il permet d'expliquer plus de 70 % des variations interannuelles de croissance (au lieu de 20 %, si on utilise uniquement les précipitations et 30-40 %, si on utilise les différences P-ETP).

La dendrochronologie permet d'obtenir rétrospectivement des données très précises sur les croissances passées des arbres, puis de les mettre en relation avec les variables météorologiques.

Elle peut être appliquée soit sur peuplement sur pied après carottage, soit lors d'éclaircies ou de la coupe rase, après prélèvement de rondelles

¹ Par exemple le logiciel DendroClim2002 ou les suites logicielles téléchargeables sur le site du laboratoire de dendrochronologie de Tucson : www.ldeo.columbia.edu/res/fac/trl/public/publicSoftware.html.

Chapitre 3

*Installation d'une expérimentation
au stade de la plantation* p. 121

*Installation d'une expérimentation
sur peuplement existant* p. 135



© P. Riou-Nivert (CNPf-IDF)



© P. Riou-Nivert (CNPf-IDF)

Expérimentations consacrées à l'étude des adaptations au changement climatique

Les expérimentations forestières permettant d'étudier l'adaptation d'une essence, d'un peuplement ou d'une technique au changement climatique sont très variées. Elles respectent cependant les principes généraux exposés au chapitre 1, complétés le cas échéant par les méthodologies spécifiques présentées au chapitre 2.

Afin de concrétiser le propos, ce troisième chapitre illustre quelques problématiques fréquentes, classées arbitrairement en deux catégories, selon qu'elles s'adressent à une plantation (tests d'élimination et de comportement) ou à un peuplement existant.

Typologie des essais consacrés à l'adaptation au changement climatique

Type d'essai	Objectif	Référence mesurée	Expérimentation	Réseau	Durée	
Évaluation en plantation	Test d'élimination (voir page 121)	Parvenir à un premier tri à partir d'une liste importante d'essences/provenances (données de survie, croissance et forme juvénile)	non adapté	adapté	adapté	10 ans en général (20 ans maximum)
	Test de comportement (voir pages 128 et 133)	À vocation de développement et de démonstration (enseignements chiffrés limités, portée locale)	adapté	adapté	possible	plus de 20 ans
		À vocation de tri d'essences/provenances ou d'étude d'itinéraires sylvicoles pour des essences peu connues (données statistiques robustes : avec répétitions et/ou multi-sites)	non adapté	adapté	adapté	plus de 20 ans
Évaluation sur peuplements existants	Dépérissement (voir page 136)	À vocation de développement et de démonstration (enseignements chiffrés limités, portée locale)	adapté	adapté	possible	plus de 10 ans
	Comportement (voir page 138)					
	Sylviculture (voir page 141)	Données statistiques robustes : avec répétitions et/ou multi-sites	non adapté	adapté	adapté	plus de 10 ans



© É. Paillassa (CNPF-IDF)

Culture en pépinière d'unités génétiques variées en vue d'un test d'élimination.

INSTALLATION D'UNE EXPÉRIMENTATION AU STADE DE LA PLANTATION

L'objectif est ici principalement d'évaluer l'adaptation aux conditions stationnelles d'essences et/ou de provenances, peu ou pas présentes actuellement dans une région ou sur le territoire national. Ces essences sont choisies parmi celles potentiellement adaptées aux conditions climatiques à venir, dans le cadre d'un objectif de production durable de bois.

Nous considérons deux étapes distinctes :

- l'évaluation sur le court terme d'un grand nombre d'essences/provenances, sur de faibles surfaces unitaires : c'est le **test d'élimination** ;
- l'évaluation sur le long terme d'un nombre limité d'essences/provenances, identifiées comme les plus prometteuses (notamment suite aux tests d'élimination) : c'est le **test de comportement**.

Pour chaque unité génétique testée (couple essence/provenance), le suivi de ces dispositifs dans le temps doit permettre d'estimer la capacité de survie, la croissance, la qualité des arbres et les réactions face aux évolutions climatiques, en fonction des conditions édaphiques. Sur un même site, il est possible de comparer soit plusieurs provenances d'une seule essence, soit plusieurs essences représentées chacune par une seule provenance, soit plusieurs essences déclinées en plusieurs provenances.

Dans les tests de comportement, il est aussi possible d'envisager l'évaluation de techniques sylvicoles.

Test d'élimination

Objectif et durée du suivi

Le facteur testé est l'**unité génétique**.

Le test d'élimination a pour objectif d'évaluer **rapidement** (en 10, voire 20 ans maximum), à l'aide des variables d'**état**, de **croissance juvénile** (**hauteur puis circonférence**), et de **forme des arbres**, une sélection d'unités génétiques ayant un **avenir potentiel dans une région donnée**. De nombreux couples essence/provenance sont en général représentés sur le même site.

Une fois ce tri effectué, les unités les plus prometteuses font l'objet de tests de comportement à plus long terme, en élargissant les conditions édaphiques.



Test INRA de descendance de douglas du verger de La Vergne avec étiquetage individuel (Peyrat-le-Château, 87).

Installations concertées au sein d'un réseau

Ce type d'essai, à faible effectif d'arbres suivis par modalité, permet l'évaluation rapide d'un grand nombre de modalités sur une surface limitée. En contrepartie, il nécessite d'être reproduit sur plusieurs sites en réseau, pour apporter des résultats robustes à une échelle géographique donnée. L'installation des tests d'élimination doit donc **faire l'objet d'une concertation** permettant :

- de **choisir les unités génétiques** à tester ;
- d'organiser en amont **la production homogène du matériel végétal** pour l'ensemble des sites ;
- de **stratifier l'installation des sites**, notamment vis-à-vis des conditions écologiques. On pourra, par exemple, décider d'explorer un gradient nord-sud, ou un gradient altitudinal.

La constitution d'un réseau permet, en première approche, d'envisager des transpositions de résultats utiles. Par exemple, dans l'hypothèse fréquemment admise où le climat futur au nord du pays peut se déduire du climat antérieurement observé au sud, les observations sur les unités génétiques des dispositifs de la partie sud d'un réseau pourront être en partie utilisées pour les prévisions de leur adaptation future au nord.

Pour obtenir des informations et tirer des conclusions fiables sur une unité génétique, celle-ci doit être installée sur au minimum **3 sites**, avec **3 répétitions** sur chaque site.

En l'absence de répétitions, elle doit être testée sur au moins 5 sites.

L'adaptation d'une unité génétique, constatée lors d'un test d'élimination, nécessite cependant une validation sur le long terme, au moyen de tests de comportement (voir page 128).

Dans le cadre d'un réseau, l'harmonisation de la fourniture du matériel végétal et la stratification des sites s'imposent

Choix des unités génétiques à tester

Les unités génétiques à tester sont celles dont les potentialités d'adaptation à nos climats et à nos sols sont mal connues, voire pas connues du tout.

Le choix de ces unités (en général essence/provenance) se fait en étudiant les caractéristiques de leur aire d'origine et en analysant la littérature internationale. Il s'agit de retenir celles qui pourraient être potentiellement les plus adaptées aux changements climatiques annoncés (notamment baisse de la pluviométrie en période de végétation et augmentation des températures maximales). La **consultation des organismes de recherche** spécialisés en amélioration génétique, qui ont une bonne connaissance de l'aire naturelle des essences, est essentielle à ce niveau.

Dans ces dispositifs, **il est indispensable d'intégrer, comme témoins connus et locaux, des unités génétiques autochtones ou habituellement plantées qui serviront de point de repère et de « pont » entre sites.**

Il est recommandé d'évaluer en priorité les essences/provenances européennes ou de la zone méditerranéenne, évoluant dans un environnement écologique proche du nôtre, afin de limiter à la fois les risques d'introductions de nouveaux parasites et la sensibilité de ces essences aux parasites en place

Choix des sites

Localement, le choix des sites est guidé par leur représentativité, notamment vis-à-vis des conditions écologiques. En général, sont choisies des **stations bien représentées sur la zone géographique étudiée et adaptées à la production de bois**, afin de permettre ultérieurement l'extrapolation locale des résultats.

En outre, il convient aussi, spécifiquement pour ces tests d'élimination, de choisir des **sols ne présentant pas de contraintes majeures** pouvant imposer une pression de sélection trop forte, incompatible avec une évaluation globale des potentialités des essences.

En effet, choisir un sol difficile, par exemple hydromorphe, risquerait d'éliminer par la seule contrainte d'hydromorphie, une unité génétique potentiellement intéressante sur sol sain.

Enfin, rappelons l'importance du **choix du propriétaire ou du gestionnaire** et de son information : dans ce type d'essai, le but est un tri d'unités génétiques issues d'un large panel, ce qui suppose des risques évidents de mortalités et/ou de faible croissance pour un certain nombre d'entre elles.

Spécificités de l'expérimentation

- Préparation du matériel végétal

Après le choix des unités génétiques, il est nécessaire d'obtenir les graines souhaitées et d'identifier le pépiniériste qui élèvera les plants. **Les lots de graines doivent remplir les critères énoncés au chapitre 2, page 75 en termes de réglementation et d'identification.**

Les unités génétiques testées n'étant souvent pas inscrites au catalogue des pépiniéristes, **il convient de prévoir 3 ans à l'avance l'installation des tests d'élimination**, notamment pour la préparation du matériel végétal (obtention des graines, levée de dormance, élevage des plants). La durée de production des plants, qui peut varier selon l'essence, est à ajuster sur la durée de culture la plus longue.

Un contrat de culture avec le pépiniériste peut être rédigé, spécifiant la provenance des graines et les conditions d'élevage.

Les plants des différentes unités génétiques doivent présenter le même conditionnement, sinon c'est le facteur « unité génétique + conditionnement » qui est testé. S'il doit y avoir un tri en pépinière, on se conformera aux consignes du chapitre 2, page 80.

Un étiquetage individuel des plants dès la pépinière est obligatoire afin d'éviter les mélanges au moment de la plantation.

Enfin, la réalisation d'un **plan d'implantation de chaque arbre**, spécifiant les unités génétiques, est indispensable (voir page 125).



© S. Girard (CNPFF-IDF)

Plant de douglas, 2 ans après plantation, portant l'étiquette sur laquelle sa provenance est inscrite.

- Installation « maîtrisée » dès la plantation

Lors de l'installation d'un test d'élimination, l'ensemble des étapes et des conditions de plantation doivent être contrôlées :

- le piquetage doit matérialiser par des couleurs ou des étiquettes les différentes unités génétiques à planter (voir photo chapitre 1, page 38) ;
- la distribution des plants, le jour de la plantation, doit être faite par un ou des techniciens affectés à cette tâche unique ;
- un contrôle après distribution et avant plantation est nécessaire.

Pour chaque modalité étudiée, les plantations seront **monospécifiques** et **monoprovenances**. Les dispositifs monoarbres (essences ou provenances mélangées pied à pied), dont l'installation et l'analyse sont complexes, sont principalement mis en place par les organismes de Recherche. Ils ne présentent en outre aucun aspect démonstratif.



Plan d'un test d'élimination CNPFP-IDF : chaque carré correspond à 12 plants d'une des 166 unités génétiques étudiées, les couleurs représentent les genres (par exemple, vert clair = genre Pinus, orange = genre Quercus, bleu clair = genre Cedrus...).

- **Nombre de plants par modalité**

L'objectif étant d'évaluer rapidement un grand nombre d'unités génétiques au stade juvénile, le nombre de plants installés par unité est réduit. Un suivi rigoureux de la préparation du matériel végétal doit de plus diminuer les aléas. Ainsi, si un effectif de 30 arbres reste optimal, **12 arbres est à considérer comme un minimum.**

Dans le cas des tests d'élimination, le résultat est attendu dans un délai très court (10 à 20 ans) avec une concurrence en permanence peu marquée entre les tiges. Il peut alors être dérogé à la règle des 10 m minimum de bande d'isolement (voir chapitre 1, page 34). Cependant, si l'on décide, à l'extrême, de supprimer totalement les bandes d'isolement (ce qui représente une économie appréciable de



Essai d'épicéa de 5 ans à faible densité, au stade des entretiens : la concurrence à 10 ans sera toujours faible.

© IDF

plants et de surface), l'interprétation des résultats sur une placette ne sera légitime que tant que la hauteur des arbres de bordure des placettes limitrophes ne dépasse pas le double de l'espacement entre lignes ou plants.

Ainsi, le terme de l'expérimentation peut ne pas être le même pour les différentes modalités. Par ailleurs, pour retarder les effets de la concurrence entre placettes, il est conseillé, lorsque c'est possible, d'éviter de disposer côte à côte une placette d'une essence à croissance très lente et une placette d'une essence à croissance très rapide.

- **Variables mesurées**

Les variables « **état** », « **hauteur** » et, à partir d'un certain stade, « **circonférence** à 1,30 m » sont systématiquement mesurées, comme défini au chapitre 1. Ces variables sont les premiers indicateurs de la capacité de survie et d'adaptation de l'unité génétique aux conditions locales.

La variable « **notation de problèmes phytosanitaires** » est également mesurée, comme défini au chapitre 2. Cette variable doit permettre d'identifier le plus rapidement possible les risques sanitaires éventuels.

Enfin, les variables de **forme** ou de **branchaison** (voir **annexe E**) peuvent apporter des informations sur la qualité future des grumes, sur les tailles de formation nécessaires et donc sur la capacité de l'unité génétique à produire du bois d'œuvre.

La variable « **phénologie** », plus spécifique et plus lourde en temps, pourra être mesurée de manière optionnelle, telle que définie au chapitre 2. Cette variable peut mettre en évidence un défaut d'adaptation de l'unité génétique, comme par exemple une date de débourrement induisant un risque climatique permanent (gel).

- **Périodicité des mesures**

La nécessité d'appréhender les potentialités d'unités génétiques nouvelles, sur un temps court, implique un suivi annuel de l'ensemble des plants des placettes pendant les 5 premières années, et un suivi bisannuel ensuite.

- **Densité d'installation et gestion sylvicole**

Afin de limiter les effets d'une concurrence précoce, tout en n'augmentant pas trop la surface unitaire, on retient en général des densités de plantation de l'ordre de **1 000 tiges/ha** (4 x 2,5 m) à **1 143 tiges/ha** (3,5 x 2,5 m), identiques pour chaque placette.



© CRPF Aquitaine

Clôture de protection contre le gibier.

L'entretien de la plantation doit être régulier, afin que la concurrence de la végétation adventice ne vienne perturber la croissance des plants. Un espacement minimum de 3,5 m entre les lignes permet la mécanisation de ces entretiens.

Si la présence de gibier est suspectée, une **protection adéquate des plants** est indispensable (clôture ou protection individuelle). Attention, celle-ci peut doubler, voire quadrupler le coût de l'installation.

Généralement, la première coupe (dépressage ou éclaircie) intervient au moment de la fin de l'expérimentation, c'est-à-dire quand les effets de la concurrence entre les unités génétiques deviennent importants. Les faibles effectifs retenus dès le départ, les bandes d'isolement réduites, voire nulles et les forts écarts de croissance possibles entre unités génétiques différentes, ne permettent pas, après la coupe, de poursuivre un suivi statistiquement fiable.

Les tests d'élimination ont pour objectif de cerner rapidement (en 10, voire 20 ans) les unités génétiques ayant un avenir potentiel, dans une situation géographique et stationnelle donnée. On privilégie le nombre de modalités testées plutôt que la durée du suivi

Test de comportement

Objectif et durée du suivi

Le facteur testé est l'**unité génétique**, c'est-à-dire en général le couple « **essence/provenance** ».

L'objectif d'un test de comportement est d'observer la **croissance**, la **forme** et le **comportement général** d'une unité génétique sur le **long terme**, afin :

- de préciser son **autécologie**, avec des données à l'âge adulte ;
- d'étudier dans le temps sa **sensibilité aux aléas et évolutions climatiques**, en fonction des conditions écologiques ;
- d'évaluer les capacités de **croissance** et de **production**, en fonction de la station ;
- d'étudier l'**évolution de la forme** des arbres et, à plus long terme, la qualité du bois ;
- d'étudier **différentes modalités d'interventions**, afin de construire des itinéraires sylvicoles adaptés.

La **durée du suivi** est, dans l'idéal, la durée de révolution du peuplement et au minimum le tiers de la durée de révolution.

Installations concertées au sein d'un réseau

Les unités génétiques concernées étant souvent mal connues, il convient de les étudier **sur plusieurs sites**, afin d'obtenir des informations qui pourront avoir une portée générale.

Pour permettre une évaluation régionale ou nationale optimale, **l'installation des tests de comportement doit bénéficier d'une large concertation**, prenant en compte les premiers résultats des tests d'élimination, notamment pour ce qui est du choix des unités génétiques et de la stratification de l'échantillonnage selon les conditions écologiques.

Choix des unités génétiques à tester

Les unités génétiques à tester doivent être préalablement reconnues comme **potentiellement adaptées** aux conditions écologiques actuelles, mais aussi à celles attendues dans le futur, sur les sites à implanter. Cette connaissance peut être issue de données bibliographiques, de résultats de tests d'élimination préalables, d'avis d'expert, ou tout simplement d'observations de terrain. Il s'agit donc d'essences présentant déjà une certaine **garantie d'adaptation (survie, croissance) au climat futur supposé, tout en étant productives sous le climat actuel**. Des listes d'essences à évaluer par grandes régions écologiquement homogènes pourront être constituées.

Il est indispensable de faire figurer dans chaque test de comportement, sur au moins une placette, une **essence/provenance habituellement plantée, à titre de témoin local actuel**.

Choix des sites

Le choix des sites est guidé par les deux axes de travail qui peuvent être suivis sur ces tests de comportement :

- installation sur des stations **bien représentées** sur la zone d'étude, pour permettre par la suite une extrapolation des résultats acquis ou sur une large gamme de stations pour étudier l'autécologie de l'essence ;
- installation en conditions édaphiques et topographiques *a priori* **plus sensibles au stress hydrique**, donc préfigurant l'évolution climatique attendue, pour permettre une évaluation par anticipation des capacités d'adaptation au climat local futur.

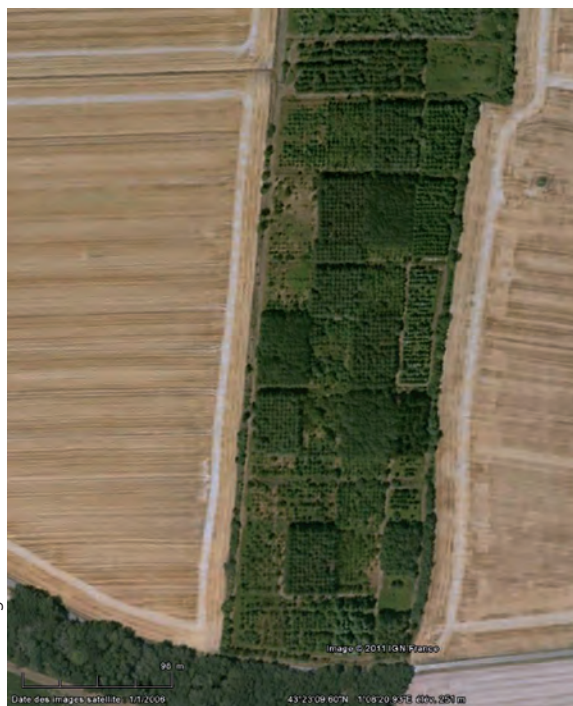
Spécificités de l'expérimentation

- Installation « maîtrisée » dès la plantation

Pour l'installation de ce type de test, il est nécessaire de parfaitement contrôler, dès la plantation :

- les informations sur le **matériel végétal** (voir chapitre 2, page 76) ;
- la description de la station (voir chapitre 2, page 82) ;
- l'ensemble des **conditions de plantation** ;
- le **suivi de la reprise**, dès la première année de végétation.

Les plantations sont **monospécifiques** et **monoprovenances** pour chaque placette.



Pin laricio de Corse	Pin maritime	Pin radiata	
Érable	Frêne	Pin laricio de Corse	Cyprès de Leyland
Merisier	Pin laricio de Calabre	Chêne rouge	Cyprès de Leyland
Merisier Érable	Pin laricio de Corse	Frêne	
Chêne rouge	Érable	Pin laricio de Calabre	Cèdre
Pin laricio de Calabre	Merisier Érable	Chêne rouge	Pin radiata
Merisier	Érable	Frêne	Calo-cèdre
Merisier Érable	Pin laricio de Calabre	Merisier	Chêne rouvre
Merisier Érable	Érable	Érable	Pin maritime

Source : Google earth

© CRPF Midi-Pyrénées

Vue aérienne d'un site de comparaison d'essences à Rieumes (31), installé par le CRPF Midi-Pyrénées en 1981 et 1989 – Comparaison de 14 essences.

- **Surface des placettes**

Le suivi des placettes étant prévu sur le long terme, leur surface est plus importante que pour un test d'élimination. Pour des raisons statistiques, il est nécessaire de pouvoir mesurer un minimum de **30 arbres de chaque unité génétique en fin d'expérimentation**. La densité finale attendue sert donc de base pour calculer la surface nécessaire à l'installation (voir chapitre 1, tableau page 35). Une bande d'isolement est en outre prévue autour de chaque placette de mesure (voir chapitre 1, page 34).

La surface de la placette de mesure varie alors généralement de **15 ares à plus de 40 ares**, selon l'essence et l'itinéraire sylvicole prévu.

- **Variables mesurées**

Les variables « **état** », « **hauteur** » et, à partir d'un certain stade, « **circonférence à 1,30 m** » sont systématiquement mesurées, comme défini au chapitre 1. Outre la confirmation de l'adaptation de l'unité génétique aux conditions locales, ces variables vont permettre de comparer la croissance et donc l'intérêt des essences/provenances les unes par rapport aux autres.

La variable « **notation de problèmes phytosanitaires** » est également mesurée, comme défini au chapitre 2, afin de permettre l'évaluation du risque sanitaire inhérent à tout nouveau matériel génétique.

La variable « **forme** » peut être ajoutée afin de confirmer l'aptitude de l'essence à produire du bois d'oeuvre. Par contre, la variable « **volume** » intervient uniquement quand le peuplement a suffisamment grandi, et commence à présenter un volume de bois significatif (voir **annexe E**).

La variable « **phénologie** », plus spécifique, peut être mesurée de manière optionnelle, comme défini au chapitre 2, afin de s'assurer notamment que l'essence ne court pas de risque de gel sur le site.

- **Périodicité des mesures et individus mesurés**

- à l'**installation** : tous les arbres sont identifiés et mesurés pour la variable « hauteur » ;
- **après la première année de végétation**, tous les arbres sont mesurés pour les variables « état », « hauteur » et « notation de problèmes phytosanitaires ». La hauteur à l'installation peut en outre être mesurée rétrospectivement lors de ce passage ;
- **après la deuxième année de végétation**, tous les arbres sont mesurés pour les variables « état », « hauteur » et « notation de problèmes phytosanitaires » ;
- **les mesures suivantes** interviennent, par exemple, tous les 3 ans. Pour limiter le temps de mesures, un **échantillon de minimum de 30 arbres** peut être suivi pour les variables « état », « hauteur », « circonférence » dès que possible, et « notation de problèmes phytosanitaires ». Cet échantillon doit être constitué de manière aléatoire ou systématique, et couvrir l'ensemble de la surface de la placette de mesure (voir **annexe C**, page 153).

Les arbres de cet échantillon resteront toujours les mêmes, afin de bénéficier d'un suivi individuel;

- avant la première éclaircie (entre la fin de la saison de végétation précédant l'intervention et l'intervention), tous les arbres de la placette de mesure sont mesurés pour les variables « état », « circonférence », et « notation de problèmes phytosanitaires »; la mesure de hauteur sera faite sur un échantillon, comme décrit au chapitre 1, page 56;
- par la suite, ces mêmes mesures seront effectuées, par exemple, tous les 3 ans.

- **Gestion sylvicole**

Le test de comportement couvrant une longue période, voire l'ensemble de la vie du peuplement, la gestion sylvicole est bien entendu un facteur associé à intégrer dans le suivi, car elle peut avoir des impacts sur les résultats. Les précautions suivantes sont donc à prendre :

- la gestion doit être la même sur toutes les modalités (par exemple, pour la protection contre le gibier, les entretiens, les éclaircies) pour que les comparaisons entre unités génétiques ne soient pas biaisées;
- les interventions doivent être décrites le plus précisément possible (date de réalisation, nature et type de l'intervention, conditions de réalisation, matériels utilisés, temps de travaux);
- le déclenchement d'une intervention sylvicole (par exemple, une éclaircie) doit être défini par un critère chiffré (par une densité, en référence à une hauteur dominante donnée, ou par un facteur d'espacement, fixe ou variable dans le temps). Dans ce cas, afin de prendre en compte les différences de croissance entre les essences, les dates de coupes risquent d'être variables selon les unités génétiques. Ceci complique la réalisation des interventions et notamment la commercialisation des produits, parfois en faibles quantités. Dans la mesure du possible, il convient d'essayer de ménager à la fois les exigences expérimentales et les exigences des gestionnaires, en regroupant les passages.



Mesures sur épicéa de Sitka dans un test de comportement en Bretagne.

© P. Riou-Nivert (CNPF-IDF)



Source : CRPF Aquitaine

Plan d'un test de comportement de résineux.



© M. Battle (CNP-F-IDF)

Une vue du même test : au premier plan du pin maritime, au second plan du pin laricio, et au fond du cèdre.

Les tests de comportement ont pour objectif de préciser l'autécologie et le comportement à long terme d'unités génétiques, déjà reconnues comme ayant un avenir potentiel dans une situation stationnelle donnée.

On privilégie donc ici la durée du suivi, ce qui implique l'installation de placettes de surface importante

Test d'itinéraires techniques pour une unité génétique donnée

Dans un contexte de changement climatique, la réussite de certaines essences peut être conditionnée par des facteurs autres que climatiques, mais interagissant avec eux. Ainsi, par exemple, les conditions d'installation, les densités de plantation ou le régime d'éclaircies peuvent influencer sur la résistance des arbres au stress hydrique ou au vent.

Objectif et durée de suivi

L'objectif est ici non pas de comparer dès l'installation et sur le long terme plusieurs unités génétiques, soumises à des conditions de gestion similaires, **mais une seule unité soumise à différents itinéraires techniques**. Tout en restant un test de comportement, ce dispositif s'apparente donc à un essai sylvicole.

Il s'agit alors d'évaluer l'influence de ces itinéraires sur le comportement de l'unité génétique et notamment sa résistance aux évolutions et aléas climatiques.

La durée de suivi est dans l'idéal la durée de révolution du peuplement et au minimum le tiers de la durée de révolution.

Plan d'expérience, choix des sites, installation et suivi

Il est nécessaire d'installer dès le départ autant de placettes que d'itinéraires à comparer. On prendra garde au fait que la multiplication des itinéraires accroît les surfaces nécessaires et accentue donc les risques d'hétérogénéité stationnelle.

Si le facteur testé est l'« itinéraire de plantation », il peut concerner différents domaines, comme par exemple :

- les **conditions d'installation** : avec ou sans préparation du sol, différents types de préparation du sol, types de plants et de plantation, paillage et mode d'entretien... ;
- les **densités de plantation ou les espacements** : on peut, par exemple, choisir une interligne fixe et faire varier l'espacement sur la ligne selon les placettes, afin de faciliter la mise en œuvre de la plantation et des entretiens ;
- la présence ou non d'**accompagnement** ;
- la mise en place ou non d'une **lisière de protection**...

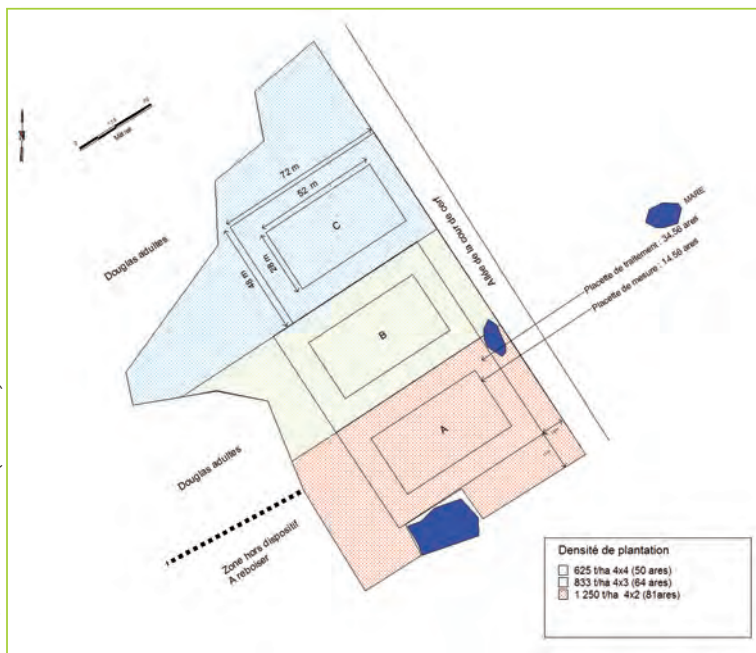
Si le facteur testé est l'« itinéraire sylvicole », le **dégagement**, le **dépressage** ou l'**éclaircie**, peuvent être testés. Dans ces cas, peuvent être évalués : l'âge d'intervention et/ou les conditions et l'intensité d'intervention.

Il est à noter que ce type de dispositif est généralement **plus lourd à implanter qu'un simple test de comportement**. En effet, il demande souvent des moyens financiers spécifiques afin de pouvoir maîtriser la réalisation des travaux par les entrepreneurs. De plus, les contraintes liées à l'expérimentation impliquent des surcoûts fréquents.

Le jour des travaux, un encadrement technique est indispensable pour la mise en place des modalités.

Au sein d'un réseau, on s'efforce, pour la même essence, de limiter les différents itinéraires testés et de les définir le plus précisément possible.

Les conditions à respecter pour l'installation, comme pour le suivi (surface des placettes en lien avec le nombre de tiges finales, variables à mesurer...) sont les mêmes que pour les tests de comportement.



Plan d'un essai densité sur séquoia toujours vert, dans le Loir-et-Cher.

Les tests d'itinéraires techniques ont pour objectif d'étudier l'interaction entre le mode de gestion et la réaction aux évolutions climatiques d'une unité génétique, déjà reconnue comme ayant un avenir potentiel dans une situation stationnelle donnée. On privilégie ici la durée du suivi, ce qui implique l'installation de placettes de surface importante

INSTALLATION D'UNE EXPÉRIMENTATION SUR PEUPEMENT EXISTANT

L'objectif est ici de répondre aux questions que se posent les sylviculteurs dans la gestion de leurs peuplements en place, face aux évolutions climatiques annoncées. Partant de peuplements existants, le choix des modalités expérimentales sera plus limité que lors d'une installation maîtrisée dès la plantation. Cette approche permet néanmoins de gagner beaucoup de temps en répondant directement à des problèmes d'actualité ou attendus.

On peut ainsi :

- étudier l'évolution d'un dépérissement observé ou l'apparition d'un dépérissement probable (dans le cas d'une inadéquation entre l'essence en place et la station) ;
- acquérir des connaissances sur l'autécologie d'une essence ;
- expérimenter des pratiques sylvicoles, dans le but de mieux adapter la gestion face aux effets des aléas climatiques.

Deux options sont envisageables : valoriser des expérimentations existantes ou mettre en place de nouvelles expérimentations. Dans tous les cas, une description stationnelle soignée doit être réalisée (voir chapitre 2, page 82).

Valorisation des expérimentations existantes

Avant d'installer de nouvelles références mesurées ou de nouvelles expérimentations, dans le cadre du changement climatique, il est toujours utile d'envisager un bilan des placettes déjà existantes.

Des problématiques de dépérissement peuvent, par exemple, apparaître sur certains essais, qui pourront alors faire l'objet de suivis spécifiques. De même, pour des essences peu connues, les références mesurées ou les essais déjà en place sont une mine d'informations sur leur autécologie. Enfin, des expérimentations sylvicoles en cours peuvent faire l'objet de suivis complémentaires (par exemple sanitaires) pour évaluer l'impact des itinéraires techniques étudiés vis-à-vis des nouveaux risques encourus.

L'intérêt de cette utilisation de placettes déjà installées, à des fins autres que celle prévue initialement lors de leur installation, est bien entendu de profiter d'un historique connu et de données mesurées antérieures, mais aussi de valoriser un patrimoine expérimental mis en place au fil des ans.

Il est ainsi possible de constituer un ensemble de placettes pour un réseau sur le thème « changement climatique », avec un gain de temps considérable. Cet ensemble peut ensuite être étoffé par de nouvelles installations qui compléteront les thèmes et les stations étudiés.

À titre d'exemple, suite aux tempêtes de décembre 1999, plusieurs réseaux d'expérimentations (GIS Coopérative de Données, Pôle Expérimentations Forêt Privée Française...) ont utilisé les essais de sylviculture sur les résineux afin d'étudier la stabilité des peuplements.

L'utilisation des essais existants peut permettre de tirer rapidement des enseignements sur les essences suffisamment représentées. Après cette analyse, on peut bâtir une stratégie pour la stratification de l'échantillonnage des futures installations

Dispositif de suivi de dépérissement de peuplements

Objectif et durée du suivi

L'objectif est de suivre soit une essence/provenance dans des conditions stationnelles où ont déjà été observés des dépérissements, soit une essence/provenance dans des conditions stationnelles où les changements climatiques annoncés laissent supposer des risques de dépérissement. L'intérêt est de disposer d'observations individuelles sur la **santé des arbres**, notamment en fonction des facteurs **station**, **type de peuplement**, voire **statut social des tiges**. L'étude de l'influence de ces facteurs est facilitée s'ils sont bien stratifiés au sein d'un réseau de placettes.

L'appui d'un correspondant observateur du **Département santé des forêts** est à rechercher dans ce contexte.

La durée de suivi doit être suffisamment longue (au moins 10 ans) pour permettre d'apprécier l'évolution du dépérissement (actuel ou potentiel).

Ce suivi pourra, dans l'idéal, se prolonger jusqu'au renouvellement du peuplement car les effets secondaires ou différés sont fréquents.

Il est aussi possible de tester l'influence, sur le dépérissement, de différentes mesures de gestion : modification du régime d'éclaircies, mode de renouvellement... La référence pourra alors être transformée en une expérimentation si la surface le permet (voir plus loin page 141).



Douglas suivis individuellement suite à la canicule de 2003 (Ménétréol sur Sauldre, 18).

Choix du site

Les peuplements, les essences et les conditions stationnelles à forte représentativité locale ou nationale doivent être étudiés **en priorité**, afin de pouvoir généraliser les observations. Cependant, des placettes sur stations limites du point de vue du régime hydrique, peuvent permettre, dans une certaine mesure, d'apprécier de manière anticipée les réactions d'une essence à un changement climatique futur.

Si, comme pour toute expérimentation, l'homogénéité de la station et du peuplement doit évidemment être satisfaisante sur l'ensemble du dispositif, l'homogénéité du dépérissement doit également être prise en compte **en identifiant des surfaces à taux de dépérissement équivalents**.

La connaissance précise de l'**historique du peuplement** est ici essentielle afin de tenter de cerner précisément les conditions du dépérissement.

Plan d'expérience et surfaces

Dans le cas d'une référence mesurée, une seule placette est installée au cœur d'une zone à taux de dépérissement homogène. Mais si, sur un même site, les taux diffèrent sensiblement selon des zones nettement identifiables, il est préférable d'installer plusieurs placettes de manière à suivre différentes intensités de mortalité dans le but de les expliquer. Les éventuels critères (stationnels, historiques...) variant d'une placette à l'autre doivent alors être identifiés.

Ces placettes doivent idéalement respecter les conditions définies au chapitre 1. Il est conseillé de retenir une **surface de placette de mesure relativement grande (20 à 30 ares)** qui permette à la fois d'apprécier des problèmes de faible ampleur, en début de dépérissement, et de comporter suffisamment de tiges vivantes en fin de suivi, si le dépérissement se poursuit.

Individus et variables mesurées

Comme pour les essais de comportement, le suivi des arbres doit être individuel. La cartographie des tiges dans le peuplement peut par ailleurs apporter des indications sur l'évolution spatiale du dépérissement.

Les variables « **état** », « **circonférence** », « **hauteur** », et « **notation de problèmes phytosanitaires** » sont mesurées, comme défini aux chapitres 1 et 2.

Les mesures de circonférence et de hauteur apportent des indications précieuses sur la dynamique de croissance de chaque arbre. Elles permettent de suivre et de chiffrer l'impact du dépérissement sur cette croissance.

Pour ce type de problématique, la **dendrochronologie** est utile pour reconstituer la croissance antérieure des arbres (voir chapitre 2, page 109). Elle permet de comparer cette dernière avec la croissance actuelle, et ainsi de mieux déceler des paramètres individuels précurseurs du dépérissement.

La variable « **phénologie** », plus spécifique, est mesurée optionnellement (voir chapitre 2, page 102). Elle peut être utile par exemple pour mettre en corrélation la sortie des jeunes feuilles avec des attaques parasitaires (insectes ou champignons).

D'autres variables liées au phénomène étudié peuvent être définies et suivies. Dans le cadre d'un dépérissement identifié régionalement, et afin de comparer les notations phytosanitaires avec celles effectuées sur d'autres réseaux, on peut aussi adapter des protocoles spécifiques utilisés sur certaines essences (protocoles du DSF par exemple, voir chapitre 2 : encadré page 98).

Une expérimentation sur peuplements dépérissants ou présentant des risques de dépérissement est intéressante, à condition de s'assurer de la robustesse du suivi (individualisation des tiges, surface de placette suffisamment grande...). Si, dans la majorité des cas, des références seront installées, un dispositif expérimental peut aussi permettre d'étudier l'effet d'un facteur particulier

Dispositif d'acquisition de connaissances sur l'autécologie d'une essence

Objectif et durée du suivi

L'objectif est de suivre une unité génétique dont l'autécologie n'est pas suffisamment connue, à partir de peuplements adultes existants. Les essences concernées seront en priorité celles qui sont supposées intéressantes à introduire ou à développer, au regard des évolutions climatiques attendues. Il s'agit de récolter des données sur peuplement adulte, notamment de croissance et de production, permettant de préciser l'intérêt de ces essences selon les conditions écologiques.

Si les sites sont suffisamment nombreux et bien répartis au sein d'un réseau, ils pourront à terme fournir une base pour des **études de relations station-production**.

Le suivi de la placette peut se prolonger jusqu'à la coupe finale, dans le cas de peuplements réguliers. Cette installation sur peuplement déjà existant est complémentaire avec les tests de comportement, car elle apporte des informations au stade adulte, rapidement disponibles.

Choix du site

La stratégie de recherche des sites diffère selon l'objectif :

- les conditions stationnelles à forte représentativité locale ou nationale sont en priorité étudiées, afin de mieux évaluer l'intérêt stratégique de l'essence pour l'avenir ;

- dans le cadre d'études station-production, les placettes doivent au contraire couvrir une large gamme de milieux ;

Pour ce type de référence, la provenance du matériel végétal et l'historique précis des interventions, notamment la connaissance des volumes exploités en éclaircies avant l'installation du dispositif expérimental, sont à rechercher.

Plan d'expérience et surface

Une seule placette est en général installée (référence mesurée). Cette placette doit respecter les conditions définies au chapitre 1, notamment en terme de surface. L'essence étudiée doit rester représentée par au moins 30 individus durant toute la durée du suivi.

Individus et variables mesurées

Les variables « état », « circonférence », « hauteur », et « notation de problèmes phytosanitaires » sont mesurées, comme défini aux chapitres 1 et 2.

La **dendrochronologie** (voir chapitre 2, page 109) peut apporter des informations sur les rythmes d'accroissement antérieurs à l'installation de la référence, et ainsi permettre d'avoir une vision plus complète de la croissance de l'essence/provenance.

La variable « **phénologie** », plus spécifique, est mesurée optionnellement comme défini au chapitre 2.

Des **cubages** sont, si possible, réalisés à chaque éclaircie, tel que défini en **annexe E**.



© M. Battle (CNP-IDE)

Placette de calocèdre âgée (domaine d'Harcourt, 27).



© P. Riou-Nivert (CNP-IDE)

Essai FCBA de comportement de calocèdre (Beaujolais).

Le suivi de peuplements en place d'essences/provenances, dont l'autécologie n'est pas ou peu connue, permet de compléter un réseau de tests de comportement

Expérimentation de scénarios sylvicoles « adaptatifs »

Objectif

Dans des peuplements dépérissants ou à fort risque de dépérissement, il peut être opportun d'évaluer des pratiques sylvicoles susceptibles de préparer le peuplement, dans une certaine mesure, aux évolutions climatiques attendues dans le but d'en limiter l'impact.

L'objectif est alors d'étudier les effets (négatifs ou positifs) de la sylviculture sur l'adaptation des peuplements aux évolutions climatiques, soit continues (augmentation des températures, diminution des précipitations estivales...), soit brutales (canicules, sécheresses, tempêtes...), ou bien sur l'apparition ou la poursuite de dépérissements, selon les stations.

Les scénarios testés peuvent être issus d'un retour d'expérience d'agents de terrain ou de la consultation d'experts.

Choix du site

Si l'homogénéité de la station et des peuplements doit évidemment rester bonne sur l'ensemble du dispositif, l'homogénéité du dépérissement, s'il existe, (type et taux de dépérissement, répartition spatiale), doit également être prise en compte. L'historique sylvicole doit être, si possible, connu.

Les peuplements et conditions stationnelles à forte représentativité locale ou nationale sont en priorité étudiés.

Plan d'expérience et surfaces

Le facteur testé, sur une station donnée, est ici l'**itinéraire sylvicole**. Le dispositif doit comparer au moins deux modalités afin de répondre aux interrogations quotidiennes des sylviculteurs quant aux pratiques influant sur l'adaptation des peuplements aux aléas climatiques. Leur mise en œuvre doit être relativement simple à intégrer dans la gestion courante.

La recherche de nouveaux itinéraires ne devra pas conduire à une trop grande dispersion, et la constitution de réseaux sera privilégiée.

Les itinéraires sylvicoles envisagés concernent ici principalement l'effet de différents **régimes d'éclaircie** vis-à-vis du risque de dépérissement ou de dégâts de vent.

Voici quelques exemples de comparaisons possibles :

- intensité de dépressage ou d'éclaircie des jeunes peuplements ;
- maintien/suppression du sous-étage ;
- éclaircie au profit d'arbres présentant des critères prédéfinis (position sociale, caractéristiques des houppiers, dépérissement...) ;
- récolte systématique/maintien des dépérissants ;
- éclaircie/absence d'intervention dans la lisière...

Les modalités testées doivent être tranchées et clairement définies de manière à permettre leur répétabilité au sein de différents dispositifs. Pour les éclaircies, il faut préciser le stade de développement du peuplement (âge, hauteur, facteur d'espacement...), l'intensité (taux de prélèvement ou densité après intervention), la nature (par le haut, par le bas, au profit d'arbres présentant des critères sanitaires prédéfinis), et le type (systématique, sélective, mixte).

La surface unitaire des placettes doit permettre la mesure d'au moins 30 arbres de chaque essence étudiée, durant toute la durée du suivi.

Il est indispensable de prévoir une placette témoin (soumise à une gestion classique ou à une absence de gestion) afin de mettre en évidence d'éventuelles différences obtenues du fait de la gestion adaptative

Variables

Les variables « état », « circonférence », « hauteur », et « notation de problèmes phytosanitaires » sont mesurées, comme défini aux chapitres 1 et 2.

La **dendrochronologie** peut apporter des informations sur le rythme de croissance antérieur à l'installation de la référence, et ainsi permettre d'avoir une vision plus complète du comportement de l'essence/provenance.

D'autres variables liées au phénomène étudié peuvent être définies et suivies. Dans le cadre d'un dépérissement identifié régionalement, et afin de comparer les notations phytosanitaires avec celles effectuées sur d'autres réseaux, on peut aussi adapter des protocoles spécifiques utilisés sur certaines essences (protocoles du DSF par exemple, voir encadré, chapitre 2, page 98).



© P. Riou-Nivert (CNPFF-IDF)

Suivi d'un essai de dépressage sur douglas : amélioration de l'économie en eau (Aulnois en Perthois, 55).

Des expérimentations sylvicoles « traditionnelles » permettent également d'appréhender la réaction au changement climatique. Le choix des modalités et la mesure de variables spécifiques (notation de problèmes phytosanitaires notamment) sont à adapter à la problématique étudiée

Temps d'installation et de suivi de placettes sur peuplement existant

Temps moyen constaté (dépendant des conditions d'accès et de la météorologie) pour l'installation sur des peuplements existants et le suivi de placettes avec mesure uniquement des variables de base (état, hauteur et circonférence) et sans répétition.

Journées ETP (Équivalent temps plein) y compris déplacement (rayon de 100 km)		Référence mesurée	Expérimentation avec 3 modalités sans répétition (3 placettes)
Installation	Établissement du protocole	0,5	1
	Recherche de la localisation, contact propriétaire, rédaction de la convention, recherche de l'historique	2	2 à 4 (= 1 à 2 x 2 p*)
	Matérialisation de l'essai	1 (= 0,5 x 2 p*)	2 (= 1 x 2 p*)
	Mesures à l'installation ; peinture	1 (= 0,5 x 2 p*)	2 (= 1 x 2 p*)
	Saisie, compte rendu d'installation	0,5	1
Suivi**	Mesures, matérialisation et observations les années suivantes à chaque campagne	1 (= 0,5 x 2 p*)	4 à 6 (= 2 à 3 x 2 p*)
	Saisie, compte rendu à chaque campagne	0,5	1
	Observations diverses, imprévus	0 à 0,5	0 à 1
Autres interventions	Désignation d'arbres d'avenir	1 (= 0,5 x 2 p*)	2 (= 1 x 2 p*)
	Martelage d'éclaircies	1 (= 0,5 x 2 p*)	1 à 2 (= 0,5 à 1 x 2 p*)

* x 2 p : 2 personnes obligatoires (doublant ainsi le nombre de jours ETP).

** Le temps consacré aux mesures de suivi est très variable selon les itinéraires sylvicoles testés, et notamment l'intensité des éclaircies ou du dépérissement observé (qui réduiront au fil du temps le nombre d'arbres à mesurer de certaines placettes).

Liste des annexes

A. 10 recommandations pour rater à coup sûr son expérimentation p. 146

B. Plan type de protocole p. 147

C. Suivi individualisé de tous les arbres. Suivi d'un échantillon représentatif du peuplement p. 150

D. Échantillons spécifiques p. 161

E. Variables supplémentaires dans le cadre de la méthodologie générale p. 165

F. Compléments à la méthodologie particulière liée au changement climatique (climatologie, phénologie) p. 171

G. Conseils pratiques pour la réalisation des mesures de hauteur p. 188

H. Protocole de description des stations forestières p. 191

I. Exemple de fiche synthétique de présentation et de traitement des données mesurées p. 214

J. Exemple de convention p. 217

K. Bibliographie p. 220

© A. Ducouso (INRA)



© D. Michaud (FCBA)



A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

ANNEXE A - 10 RECOMMANDATIONS POUR RATER À COUP SÛR SON EXPÉRIMENTATION

- 1- Installer une expérimentation ou une référence mesurée sans avoir préalablement défini d'objectifs précis
- 2- Compter sur un engagement trop important du propriétaire qui ne pourra l'assurer malgré toute sa bonne volonté
- 3- Choisir un site géographique hétérogène du point de vue stationnel et d'accès difficile
- 4- Tester tous les facteurs possibles sur le même dispositif
- 5- Surestimer ses capacités de mémoire en ne matérialisant que succinctement le dispositif et en omettant des dates et informations
- 6- Ne pas s'assurer que le type d'essai installé sera suffisamment robuste statistiquement pour répondre aux objectifs fixés
- 7- Ne pas individualiser les arbres
- 8- Ne pas utiliser les mêmes définitions des variables mesurées selon les expérimentations ou les campagnes de mesure
- 9- Ne pas stocker les mesures sur un support informatique
- 10- Ne pas s'assurer des disponibilités pour le suivi des mesures et ne pas prévoir leur périodicité

D'après Gérard Armand (1998), ingénieur à la Fédération de Vulgarisation Forestière de l'Est.

ANNEXE B - PLAN TYPE DE PROTOCOLE

B

0 - Titre

1 - Objectif(s)

- 1) cadre de l'expérimentation : définir le cadre général (essence, sylviculture...), l'objectif poursuivi et les hypothèses émises
- 2) facteur(s) étudié(s) : le(s) nommer
- 3) résultat(s) attendu(s) : comparaisons, recherche de corrélations, recherche d'interactions...

2 - Choix du site

- 1) localisation/peuplement : préciser la localisation, le type de peuplement visé, l'antécédent cultural...
- 2) station : préciser le(s) caractères stationnel(s) déterminant(s), la nécessité de réaliser des analyses physico-chimiques...
- 3) réseau : conditions d'intégration de l'expérimentation dans un projet global, rattachement à d'autres dispositifs

3 - Modalités étudiées

- 1) description : définir précisément chaque modalité
- 2) réalisation : définir leurs conditions de réalisation sur le terrain

4 - Plan d'expérience

- 1) dispositif : plan d'expérience utilisé (référence ou essai, répétitions ou non, blocs complets...)
- 2) placette unitaire : nombre de tiges et surface des placettes de mesure
- 3) nombre de répétitions
- 4) bandes d'isolement éventuelles (largeur, sylviculture appliquée)

5 – Signalisation utilisée

Matérialisation des limites de placettes: peintures, piquets...

6 - Variables étudiées

- 1) liste complète des variables, avec protocole de mesure, unité de mesure et le cas échéant principe d'échantillonnage
- 2) périodicité de mesure: à indiquer par variable, ou établir un planning des mesures
- 3) autres données: citer les informations à relever et la précision recherchée

7 - Travaux

- 1) à l'installation de l'expérimentation: préciser la nature des travaux, en fonction des modalités
- 2) en cours d'expérimentation: préciser la nature des travaux, en fonction des modalités (entretiens, dépressages, éclaircies, élagages...)

8 - Durée de l'expérimentation

Préciser la durée minimum préfixée et les prolongements éventuels

9 - Analyse des résultats

Préciser au maximum la nature des données qui seront calculées et des analyses qui seront réalisées (analyse de variance, analyse multifactorielle...)

10 - Investissement temps

- 1) logistique: évaluer les temps par grandes catégories de travaux, les fournitures à prévoir (piquets, protections gibier...)
- 2) mesure et saisie: évaluer, pour chaque campagne, les temps de mesures et de saisie informatique, les matériels nécessaires
- 3) analyse: évaluer le temps d'analyse des données
- 4) surveillance et visites

11 - Conventions

Préciser les conventions à réaliser (convention type en **annexe J**); les contrats de culture à prévoir en cas de fourniture de plants...

12 - Auteur(s) du protocole et date de la dernière mise à jour

Préciser le nom des auteurs et leur organisme

13 - Liste des annexes

Fiche de données générales, fiche de relevé stationnel, fiches de mesures, plan d'installation, plan de situation...

ANNEXE C - SUIVI INDIVIDUALISÉ DE TOUS LES ARBRES. SUIVI D'UN ÉCHANTILLON REPRÉSENTATIF DU PEUPELEMENT

En expérimentation forestière, le **suiwi individuel de tous les arbres est un principe de base** car c'est celui qui apporte la plus grande richesse d'informations, à investissement en temps égal. Il permet d'apprécier les évolutions à la fois au niveau de l'arbre (croissance individuelle) et au niveau du peuplement (production...).

Il repose sur :

- l'**individualisation** de la mesure : chaque mesure ou observation est attribuée à un individu (ici un arbre) ;
- l'**identification** de chacune des tiges de la placette de mesure par un numéro unique et permanent ;
- le **repérage** sur un plan ou le **marquage** sur le tronc du numéro de chaque arbre.

Le marquage sur le tronc (à la peinture, avec des étiquettes...) du numéro de chaque tige de la placette n'est pas indispensable lorsqu'un schéma de plantation clair existe et est durablement versé au dossier. Dans ce cas, l'identification physique du premier arbre à mesurer suffit à retrouver le cheminement de mesure. Par contre, le marquage du numéro des arbres doit être physique et durable s'il existe des risques de confusion entre arbres : c'est le cas des peuplements adultes issus de régénérations naturelles, des peuplements irréguliers, et des plantations âgées, dans lesquels le schéma initial de plantation n'est plus visible sur le terrain. La technologie GPS, en constante évolution, permettra sans doute à l'avenir un repérage des arbres suffisamment précis pour l'expérimentation.

Lorsque l'individualisation n'est pas réalisable dans des conditions raisonnables, en particulier en jeunes peuplements non plantés, il est possible d'obtenir des données « peuplement » soit :

- par l'**inventaire total des tiges** sur l'ensemble de la placette, mais sans individualisation ;
- par des **techniques d'échantillonnage**.

Ce type de suivi de l'évolution du peuplement est prolongé jusqu'à ce que sa densité permette raisonnablement la mise en place du suivi individuel.

Par ailleurs, **certaines mesures spécifiques**, généralement chronophages, doivent être également réalisées sur un échantillon plutôt que sur l'ensemble de la population. C'est le cas, par exemple, des mesures de hauteur ou de cubage. La définition de ces échantillons dépend du type de mesure et est décrit dans les paragraphes respectifs du chapitre 1 et en **annexe D**. Ce n'est pas l'objet de la présente annexe.

Sont donc proposés ci-après différents principes et exemples de suivi, de numérotation ou d'échantillonnage selon les cas.

C

Principe de numérotation dans une plantation

Dans un peuplement issu d'une plantation, le suivi individuel des arbres est facilité par un double repérage :

- chaque arbre est **numéroté dans l'ordre du cheminement de mesure (numéro d'ordre unique sur la placette)** ;
- chaque arbre est également **identifié par un numéro de ligne et un numéro de position sur la ligne (coordonnées de localisation sur la placette)**.

Chaque emplacement potentiel de plant est pris en compte, y compris les emplacements vides à l'installation.

Cette localisation peut être ensuite utilisée pour des représentations cartographiques de valeurs de variables, puisque ce positionnement a le même principe qu'un système de coordonnées cartésiennes.

En cas d'espacements très irréguliers sur la ligne, la distance de chaque emplacement au bord de la placette de mesure peut en outre être relevée une fois pour toutes à l'installation (un décimètre de 50 m suffit).

Par la suite, tout au long de la vie du peuplement, ces coordonnées et ces numéros d'ordre sont fixes. Ils ne sont pas réutilisables, même lorsque des arbres disparaissent.

Si la phase de numérotation prend un certain temps lors de l'installation du dispositif et peut apparaître rébarbative, ce temps est ensuite largement récupéré lors des campagnes de mesures ultérieures, en permettant une localisation de chaque arbre claire et fiable

La numérotation des emplacements se schématise ainsi :

numéros d'ordre des arbres et emplacements vides (numéros barrés)

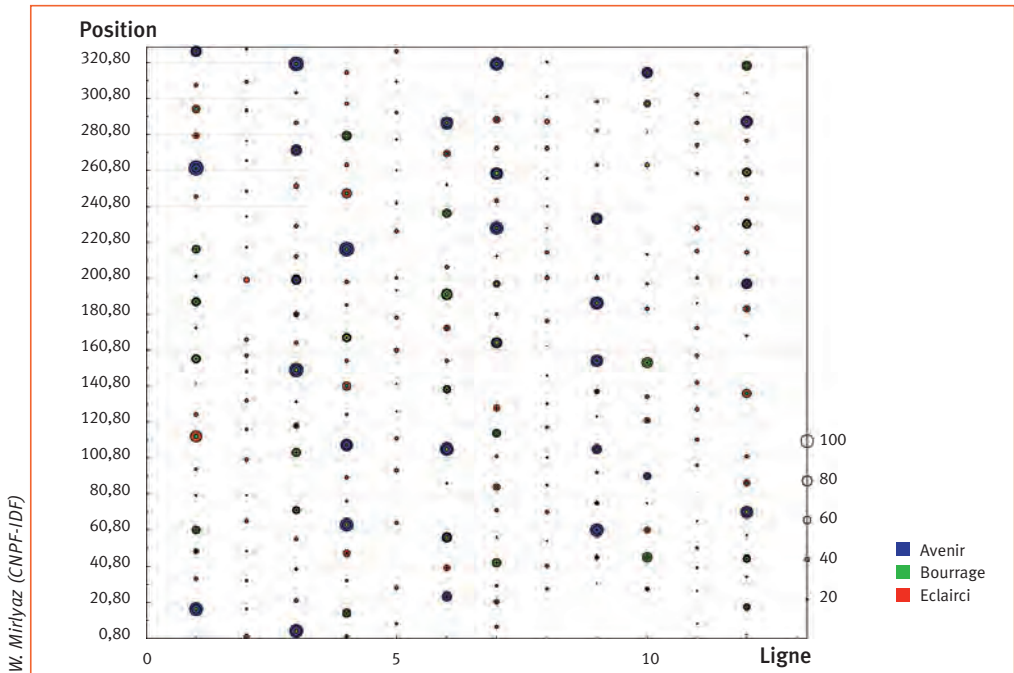
numéro de position sur la ligne	10	10	11	30	31	50	51	70	71	90	91
	9	9	12	29	32	49	52	69	72	89	92
	8	8	13	28	33	48	53	68	73	88	93
	7	7	14	27	34	47	54	67	74	87	94
	6	6	15	26	35	46	55	66	75	86	95
	5	5	16	25	36	45	56	65	76	85	96
	4	4	17	24	37	44	57	64	77	84	97
	3	3	18	23	38	43	58	63	78	83	98
	2	2	19	22	39	42	59	62	79	82	99
	1	1	20	21	40	41	60	61	80	81	100
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		numéro de ligne									

66 : arbre vivant numéro 66 en ligne 7 et position 6

13 : emplacement vide en ligne 2 et position 8

41 à 50 et 91 à 100 : emplacements vides suite à un cloisonnement en lignes 5 et 10

→ : sens du cheminement pour les mesures



Cartographie des circonférences (valeurs en 1983, 1995 et 2009) au sein d'une placette à partir de la localisation des arbres. Essai de dépressage de pin laricio (Chaumont s/Tharonne, 41).

Possibilité d'échantillonnage en plantation, dans une placette comportant un nombre important de tiges

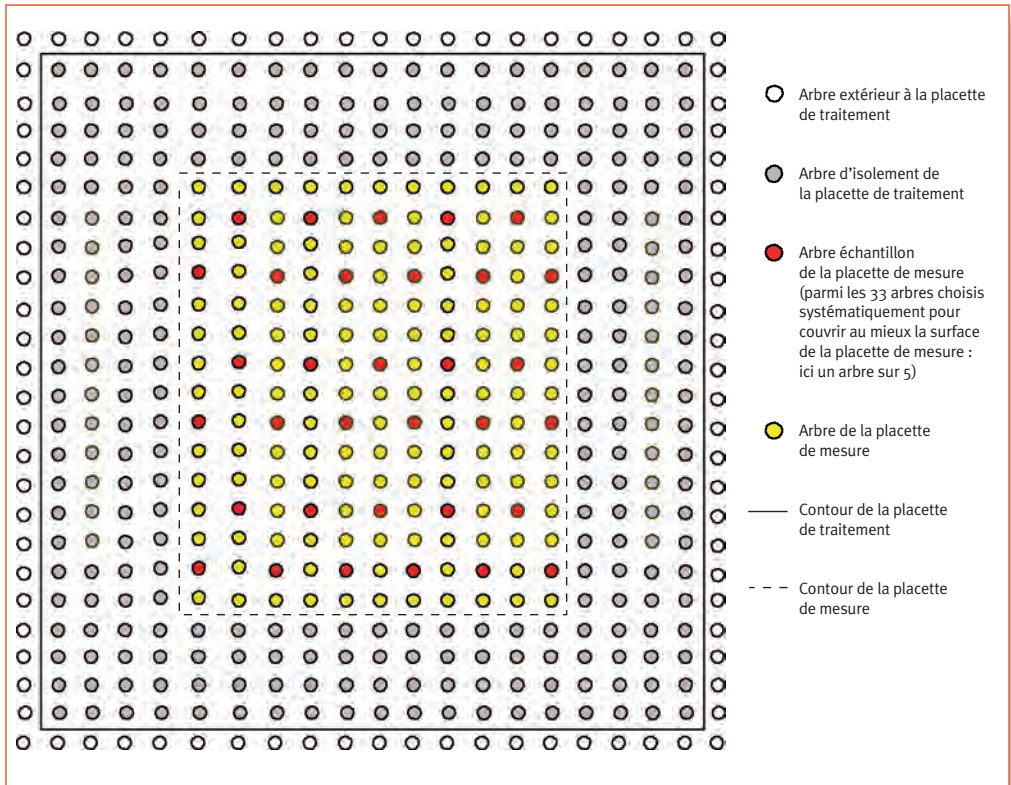
Dans le cas d'installation d'un essai au stade de la plantation et dont le suivi est prévu sur le long terme, la surface et le nombre d'arbres des placettes de mesure sont nécessairement importants afin qu'il reste au minimum 30 tiges au terme de l'expérimentation. Il peut être alors décidé, pour limiter le temps de mesure, de ne suivre dans la phase de croissance initiale, qu'un échantillon représentatif d'arbres.

Exemple: dans le cas d'un test de comportement (voir chapitre 3, page 128), la réussite de l'installation des plants sur l'ensemble de la placette est dans un premier temps évaluée mais, ensuite, on peut vouloir investir moins de temps jusqu'au stade de la 1^{re} intervention sylvicole.

Dans ce cas le principe de numérotation exposé au paragraphe précédent s'applique ainsi au moment de l'installation de la plantation avec individualisation et numérotation de tous les plants et établissement pour chaque placette du schéma précis de plantation. Ensuite le suivi peut concerner tout ou partie des individus, selon la période et l'objectif poursuivi :

- **à l'installation** : tous les arbres sont mesurés (pour la variable « hauteur ») et individualisés ;
- **après la première année de végétation**, tous les arbres sont mesurés pour les variables « état » et « hauteur ». La hauteur à l'installation peut être mesurée rétrospectivement lors de ce passage ;
- **après la deuxième année de végétation**, tous les arbres sont mesurés pour les variables « état », et « hauteur » ;
- **les mesures suivantes** interviennent tous les trois ans. Pour limiter le temps de mesures, un **échantillon minimum de 30 arbres** peut être suivi (« état », « hauteur » et dès que possible « circonférence »). Cet échantillon doit être constitué de manière aléatoire ou systématique et couvrir l'ensemble de la surface de la placette. Le plus simple est de choisir systématiquement, lors du cheminement dans la plantation, ligne par ligne, « un emplacement sur x », x étant calculé de manière à mesurer au moins 30 arbres vivants, la première année. Par exemple, dans une placette de 15 ares située dans une plantation à 1 100 tiges/ha et contenant donc 165 emplacements, l'échantillon est constitué d'un emplacement sur cinq (voir schéma ci-après). **Les arbres de cet échantillon restent toujours les mêmes, afin de bénéficier d'un suivi individuel** ;
- **avant la première intervention** (entre la fin de la saison de végétation précédant l'intervention et l'intervention), tous les arbres de la placette de mesure sont remesurés (« état » et « circonférence ») ; la mesure de hauteur est faite sur un échantillon comme décrit au chapitre 1, page 56 ;

- par la suite, ces mêmes mesures sont effectuées sur tous les arbres, par exemple tous les trois ans.



Exemple de disposition de l'échantillon des 30 arbres minimum.

La méthode proposée ici permet d'alléger temporairement les mesures tout en conservant une bonne représentativité statistique de la placette. Cependant, il est encore possible de réduire le temps de suivi (mais au détriment de la représentativité) en suivant une unique sous-placette matérialisée de 30 arbres minimum (placée à un angle ou au centre de la placette de mesure).

Principe d'échantillonnage dans une régénération naturelle dense

Pour les très jeunes régénérations, le suivi individuel des semis n'est pas raisonnablement concevable. Des inventaires **en plein sans individualisation, ou sur de petites sous-placettes**, permettent alors de suivre l'évolution des semis jusqu'au stade où la densité permet l'individualisation des tiges. Dans le cas d'un suivi dans des sous-placettes, voici un exemple de mise en place :

- **La surface des sous-placettes** est définie par **placette de mesure, avant chaque campagne de mesure**, de manière à ce que chaque sous-placette contienne **une quinzaine de tiges** (sans être inférieure à 1 m²). Cette surface peut évoluer d'une campagne de mesure à l'autre, et d'une placette à l'autre (on privilégie donc pour des raisons pratiques, un nombre fixe de tiges plutôt qu'un taux d'échantillonnage constant).

L'inventaire s'effectue au minimum par classe de dimension (de hauteur ou de circonférence selon le stade de développement) et par essence. Il peut également s'effectuer selon d'autres critères (par exemple inventaire par origine : comptage des semis, rejets...).

- **15 sous-placettes** sont installées dans chaque placette de mesure. La matérialisation permanente des sous-placettes n'est pas indispensable (mais conseillée), puisque la méthode exposée par la suite peut être rapidement reconduite à chaque campagne.

Pour limiter l'influence de l'allure de la régénération sur le choix de la localisation des sous-placettes, les méthodes de répartition suivantes sont proposées.

Méthode de répartition en l'absence de cloisonnements ou de semis en ligne

Signalons d'emblée qu'il est **déconseillé d'installer un essai dans le cas complexe d'une régénération naturelle non cloisonnée**. S'il n'y a pas d'autres choix, il est possible de procéder ainsi :

Pour une placette de mesure de longueur L et de largeur l :

Les sous-placettes sont installées sur la moitié des intersections possibles d'une grille définie par un espacement EL dans le sens de la longueur et El dans le sens de la largeur. Ces espacements sont calculés ainsi :

$$EL = L/7 \text{ et } El = l/6$$

La première sous-placette est installée depuis un angle de la placette à une distance EL dans le sens de la largeur de la placette, et à une distance EL dans le sens de la longueur. Les quatorze sous-placettes suivantes sont installées en laissant dans le sens de la longueur et dans le sens de la largeur, une intersection libre entre chaque sous-placette. La répartition décalée en quinconce optimise leur distribution spatiale (*voir schéma suivant*).

Pour faciliter la mise en place puis le comptage, les sous-placettes sont de forme circulaire et l'utilisation d'une perche de longueur égale au rayon de la sous-placette est conseillée. La surface des sous-placettes est donc identique pour toutes les sous-placettes d'une placette de mesure. Elle doit être impérativement et durablement enregistrée pour chaque campagne de mesure.

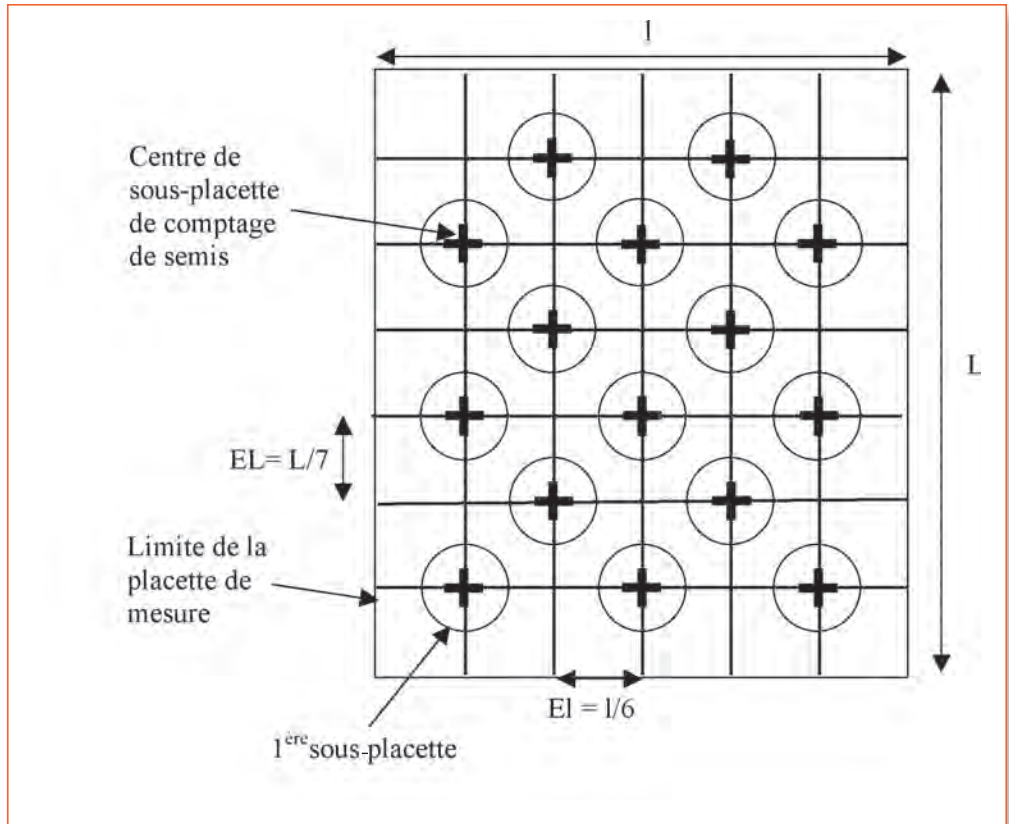


Schéma d'installation des sous-placettes en l'absence de cloisonnements.

Méthode de répartition et forme des sous-placettes pour un semis en ligne ou en présence d'une régénération naturelle cloisonnée

Répartition

En présence de semis artificiels en lignes (ou en bandes) ou en présence de cloisonnements (bandes broyées), le principe reste le même, mais on s'appuie sur la répartition géométrique des semis pour l'installation des sous-placettes. Rappelons que la proportion des cloisonnements en surface doit être la même sur la placette de mesure et dans la parcelle.

L'objectif est d'inventorier **15 sous-placettes**, réparties en quinconce de manière homogène sur l'ensemble de la placette de mesure : x sous-placettes sont donc installées sur chaque « bande » (ligne ou bande de semis, ou bande inter-cloisonnement), x étant égal à 15 divisé par le nombre de bandes inventoriées dans la placette (*voir schéma suivant*).

NB: Au minimum deux sous-placettes doivent toujours être installées par bande. Si le nombre de bandes est supérieur à 7, l'inventaire peut être fait seulement une bande sur deux ou plus (afin de ramener le nombre de bandes inventoriées à moins de 8, garantissant ainsi la présence d'au moins deux sous-placettes par bande inventoriée).

La distance d entre les centres des emplacements théoriques des sous-placettes sur les bandes est calculée ainsi : $d = \text{longueur de la bande} / (2x + 1)$.

Un emplacement théorique sur deux est ensuite choisi pour l'installation d'une sous-placette, en plaçant ces dernières en quinconce.

Forme des sous-placettes

Afin d'obtenir un résultat représentatif de la placette de mesure, en surface, les sous-placettes doivent contenir la même proportion de cloisonnements (ou bandes non semées) que sur la placette entière. Cette nécessité oblige à retenir la forme rectangulaire plutôt que la forme circulaire.

Ainsi, la largeur des sous-placettes correspond à la distance entre axes des cloisonnements (ou bandes non semées) et la longueur est calculée de manière à obtenir une quinzaine de tiges par sous-placette.

La surface des sous-placettes peut donc être légèrement différente au sein d'une même placette si la distance entre axes des bandes non semées ou broyées n'est pas régulière. Cette distance est donc à mesurer pour chaque sous placette. La longueur définie par placette et les largeurs mesurées par sous-placettes **doivent être impérativement et durablement enregistrées pour chaque campagne de mesure.**

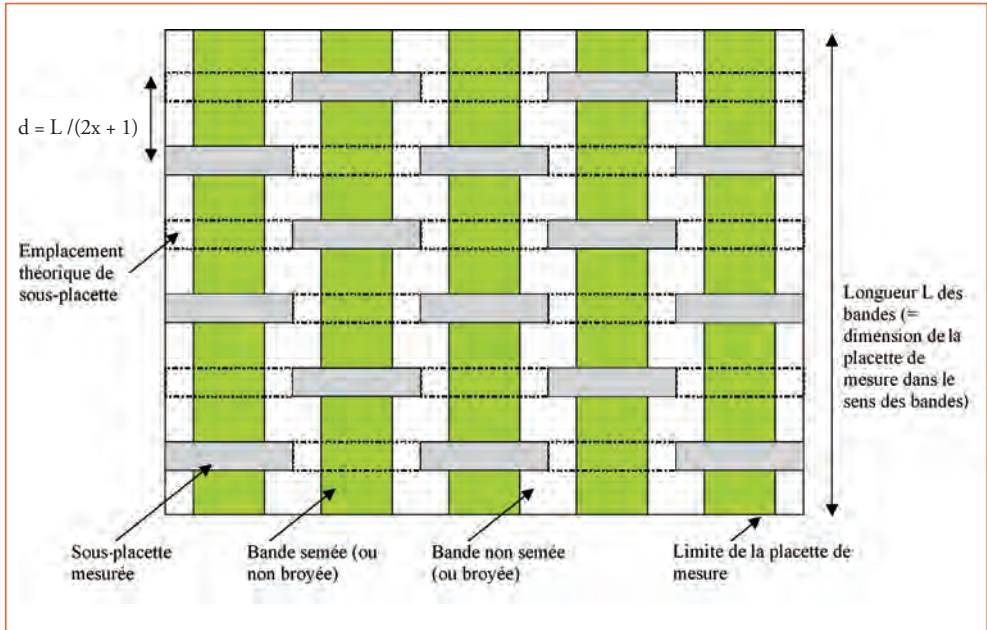


Schéma d'installation dans le cas d'une régénération naturelle cloisonnée (ici, pour 5 bandes, le nombre de sous-placettes à installer par bande est : $x = 15 / 5 = 3$).

Là encore, la multiplication des sous-placettes sur l'ensemble de la surface de la placette de mesure a pour objectif d'offrir une bonne représentativité de cette dernière. Si cet objectif n'est pas essentiel, et si le gain de temps est recherché, le suivi d'un inventaire dans une unique sous-placette de surface suffisante (comportant au minimum 30 tiges durant toute la durée de suivi de l'échantillon, et placée au centre ou à un angle de la placette de mesure) peut être choisi.

Principe de suivi dans un peuplement âgé ou irrégulier

Le suivi de ces peuplements est plus complexe qu'en jeune plantation, à cause d'un repérage plus difficile, et de la présence de différents stades d'évolution (du semis à l'adulte) à des densités très variables. Si le suivi individuel de tous les arbres précomptables est aisément rendu possible par la matérialisation de leurs numéros, celui des autres populations doit, lui, recourir à des méthodes d'échantillonnage.

La méthode choisie ici propose de superposer le suivi individuel de tous les précomptables à un échantillonnage des non précomptables (« régénération naturelle », voir page 155) sur l'ensemble de la placette, voire à un suivi d'échantillons spécifiques (arbres désignés, voir annexe D). Selon la précision attendue, l'échantillonnage peut être simplifié (inventaire dans une seule sous-placette, voir plus haut), ou au contraire détaillé (segmentation des populations, voir page 159).

Le groupe de travail « Traitement Irrégulier » de l'Institut pour le Développement Forestier, animé par Jacques Becquey, a pour objectif de prochainement proposer des protocoles de suivi adaptés aux peuplements irréguliers, pour les gestionnaires et les expérimentateurs. Les protocoles proposés ci-après vont donc sans doute prochainement évoluer, afin de mieux prendre en compte les spécificités et objectifs liés à ces problématiques.

Suivi individuel du peuplement précomptable

Les arbres sont mesurés en circonférence seulement à partir d'un « seuil de précomptage » qui doit être fixé par le protocole (par exemple 55 cm de circonférence).

Sur le terrain, le marquage de chaque arbre par son numéro permet le suivi individuel dans le temps.

Les tiges sont numérotées de 1 à n selon un cheminement cohérent pour faciliter leur repérage. On s'appuiera, par exemple, sur les bandes délimitées par les cloisonnements existants (en aller-retour). Si les bandes sont trop larges, on peut les scinder en deux, en réalisant un aller-retour par bande. Dans ce cas, le marquage à la peinture du niveau de mesure à 1,30 m sur le côté du tronc correspondant au sens du cheminement peut faciliter la réalisation des mesures.

Dans les peuplements où la densité n'est pas excessive, il est possible d'établir un plan de localisation des arbres suivis en les repérant soit schématiquement soit à l'aide d'une distance et d'un azimut en référence à un point fixe (coordonnées polaires).

Suivi par échantillonnage du peuplement non précomptable

Les arbres « non précomptables » sont suivis par échantillonnage, tel que défini précédemment, dans 15 sous-placettes. Cette population peut être le sous-étage dans le cas d'un peuplement régulier adulte, ou l'ensemble des stades non précomptables (des semis aux perches) dans les peuplements irréguliers.

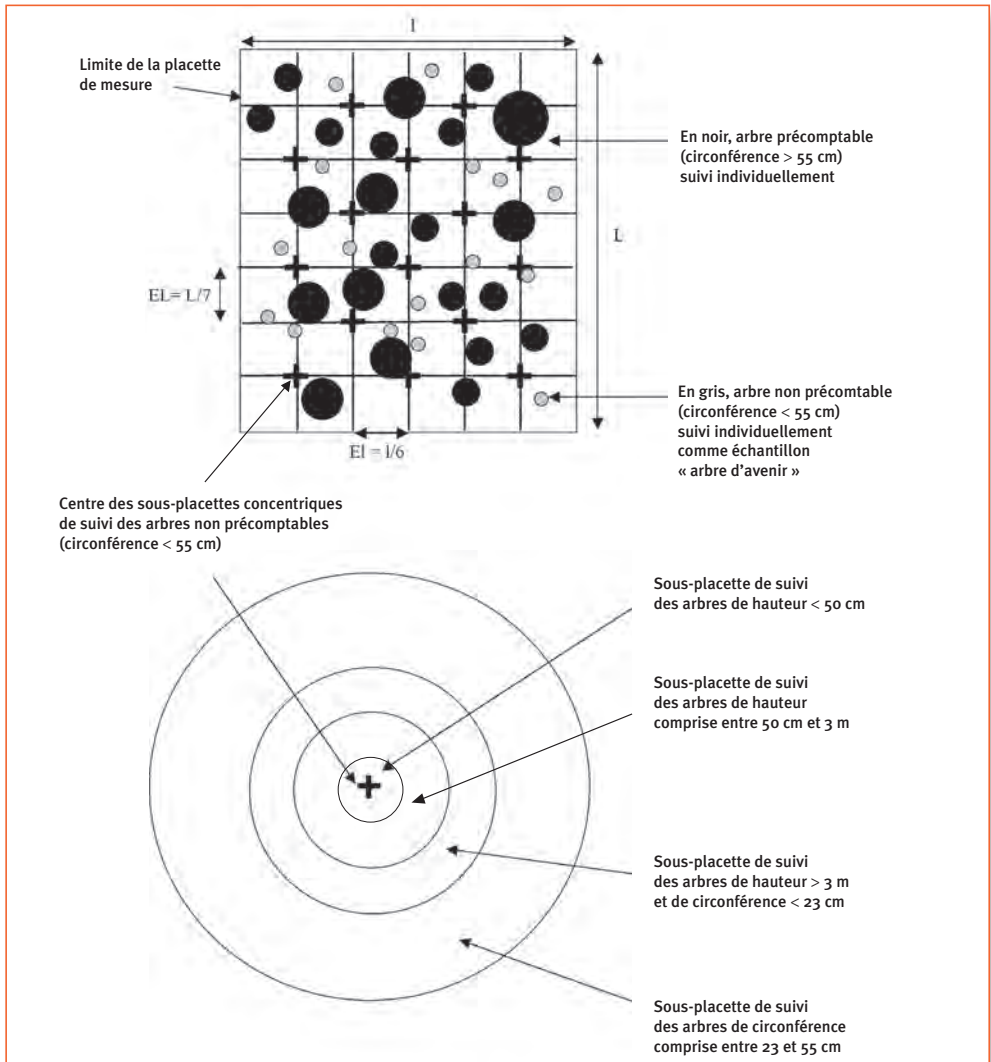
Si l'on souhaite suivre avec précision le peuplement non précomptable, il est possible de le segmenter en sous-populations. Cette segmentation est à adapter afin de distinguer les sous-populations à forte densité (les semis par exemple), de celles à plus faible densité. La clé de cette segmentation doit être clairement définie selon des caractéristiques qui peuvent être des classes de hauteur, et/ou de circonférence, et/ou l'essence. Cette méthode permet d'équilibrer l'échantillonnage de toutes les sous-populations.

Dans ce cas, pour chaque sous-population est fixée une surface de sous-placette permettant de contenir au moins 15 tiges à mesurer de la sous-population concernée (sans que cette surface soit inférieure à 1 m²). Ces sous-placettes sont concentriques. Les surfaces de sous-placettes doivent impérativement être notées et durablement enregistrées avec les inventaires de chaque campagne, pour chaque placette, et pour chaque sous-population.

Dans le cas d'une sous-population de densité pas trop élevée, il peut être cependant plus rapide et plus précis de mesurer les tiges correspondantes en plein et sans individualisation, plutôt que d'installer des sous-placettes.

Enfin, un suivi d'échantillon spécifique, comme un suivi individuel d'arbres non précomptables désignés comme tiges d'avenir (par exemple perches en peuplement irrégulier), peut également être envisagé (voir annexe D).

Le schéma suivant fournit un exemple de juxtaposition de ces échantillons dans le cas d'un peuplement irrégulier.



Exemple de suivi des différentes populations en peuplement irrégulier.

ANNEXE D - ÉCHANTILLONS SPÉCIFIQUES

En complément des suivis « peuplement » classiques (**annexe C**), un suivi d'échantillons spécifiques peut également être décidé.

Dans certains cas, seul un suivi d'échantillons est effectué (par exemple suivi d'arbres désignés dans des essais de détournage de jeunes taillis de châtaignier).

Des inventaires du peuplement (voir **annexe C** : par sous-placettes, voire sur l'ensemble de la placette sans individualisation des tiges) peuvent alors être ponctuellement effectués à certains moments clés (à l'installation, avant et après des interventions...) afin d'obtenir les données « peuplement » (densité totale, production...).

Échantillon « arbres d'avenir » ou « arbres objectif »

Principe

Les arbres d'avenir ou objectif sont sensés perdurer pendant toute la révolution et constituer le peuplement final. Une désignation précoce permet de les faire bénéficier d'opérations sylvicoles ciblées (éclaircie sélective, élagage...). Certains pourront ensuite disparaître accidentellement ou leur statut sylvicole régresser. Un des objectifs de l'expérimentation est alors de les suivre dans le temps.

Dans le cas de mesures concentrées sur les arbres d'avenir, le principe de localisation peut s'appuyer sur la « méthode des cellules » (P. Gonin, 1984) en peuplement régulier ou irrégulier.

Une cellule représente une surface (de forme proche du carré) attribuée à un arbre d'avenir. Cette surface est donc égale à 1 ha divisé par le nombre d'arbres d'avenir à l'hectare.

Exemple : pour comparer l'effet de plusieurs sylvicultures sur un sous-peuplement désigné de 100 tiges/ha, il est possible de matérialiser, à l'installation du dispositif, des cellules de 1 are. Dans la pratique, la présence de cloisonnements permet de fixer une largeur de cellule (largeur de la cellule = largeur de l'inter-bande d'axe en axe).

Un seul arbre est logiquement désigné par cellule. Bien entendu, il est possible de ne pas désigner d'arbre dans une cellule, et/ou de désigner deux arbres dans une autre cellule. Pour pouvoir comparer des populations similaires, il est surtout important que les nombres ramenés à l'hectare et les critères de choix des arbres désignés soient identiques entre les placettes des différentes modalités.

Pré-désignation : selon le stade où se trouve le peuplement au moment de l'installation du dispositif, la désignation peut être prématurée. Une pré-désignation est alors faite en retenant plusieurs arbres par cellule, parmi lesquels sera choisi le futur désigné. Par la suite, les arbres désignés et les arbres restés pré-désignés peuvent être différenciés par la variable « statut sylvicole » (voir page 165).

Dans ce cas, le calcul de la surface des cellules, doit se faire plutôt à partir du nombre de désignés visé, et non du nombre d'arbres pré-désignés à l'installation du dispositif.

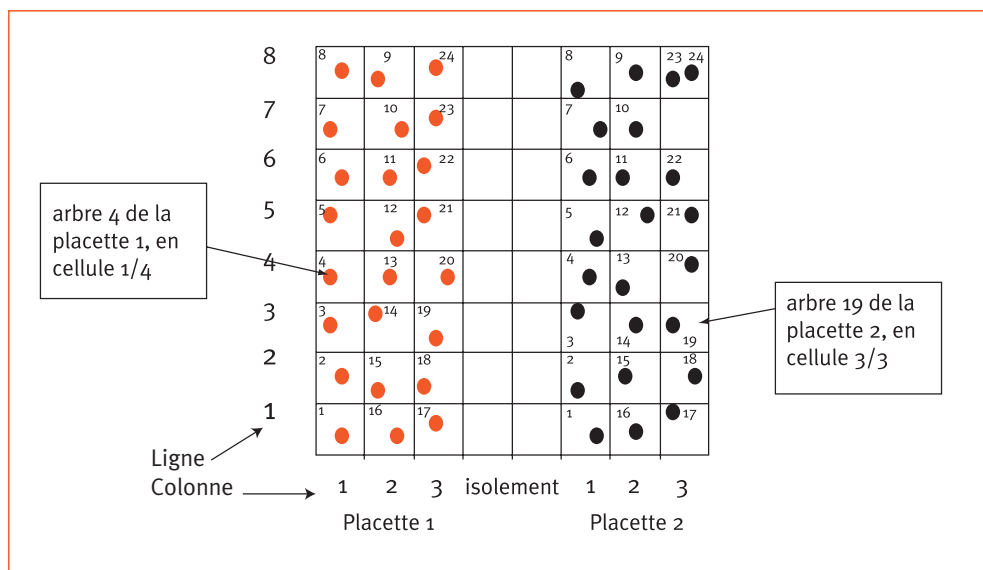
Exemple : dans une expérimentation de chêne, 210 tiges/ha sont pré-désignées. En réalité, l'objectif à terme est de ne conserver que 70 tiges désignées. La surface unitaire de la cellule est donc de 1/70^e d'ha, et chaque cellule contient à l'installation 3 tiges pré-désignées.

D

Chaque arbre est identifié par un numéro unique dans la placette.

Les cellules sont reportées sur un plan, avec la position approximative des arbres dans chaque cellule. Le système de repérage des cellules est alors le même que pour les arbres en plantation (voir annexe C, page 151) et le quadrillage obtenu permet de définir les « coordonnées de la cellule » et d'attribuer un numéro de ligne et de colonne pour chaque arbre.

NB: Lorsque tous les arbres sont déjà numérotés (en plantation par exemple), la notion d'arbres d'avenir est définie par la variable « statut sylvicole » (voir page 165).



En l'absence de désignation par cellule (cas de peuplement irrégulier par exemple), le repérage sera plus difficile à mettre en place. Il faudra alors s'appuyer sur une matérialisation claire des numéros d'arbres, voire sur des cartographies précises des localisations (distance et azimut des arbres par rapport à l'angle de la placette, coordonnées GPS si la précision est suffisante, schéma de localisation...).

La matérialisation sur le terrain de la numérotation des arbres est importante dans ce type d'installation.

Intérêt d'un échantillon fixe dans le temps : exemple de l'évaluation de l'effet d'une intervention sur les arbres d'avenir

L'intérêt du suivi des arbres d'avenir est de pouvoir comparer dans le temps l'évolution d'une population identique (arbres désignés selon les mêmes critères, densité égale...), d'une placette à l'autre. **Le seul facteur qui varie est alors la sylviculture** dont bénéficient ces arbres (intensité de détournement ou élagage), en comparaison notamment d'un témoin où aucune intervention n'est effectuée. Cette population permet d'apprécier l'**effet biologique** d'une intervention, dégagé de l'**effet technique** que subissent les caractéristiques de l'arbre moyen (caractéristiques calculées à partir d'effectifs différents avant et après une coupe).

Parallèlement, un suivi de peuplement (voir **annexe C**) reste important car il permet de quantifier l'évolution de données comme la densité (mesure de la mortalité naturelle dans un témoin, ou de l'intensité des coupes), la surface terrière ou les caractéristiques des arbres moyens ou dominants.

Intérêt d'un échantillon variable : exemple du suivi de la population « d'élite »

Dans ce cas de figure, lors de chaque campagne de mesure, la désignation des arbres peut en théorie être modifiée dans toutes les modalités (leur nombre restant fixe). Ainsi, lorsqu'un arbre désigné n'a pas tenu ses « promesses » (accident, qualité dégradée, ou position sociale dominée), **une nouvelle tige jugée supérieure est choisie (à proximité ou dans la même cellule le cas échéant)**.

Ce changement intervient généralement dans la modalité « témoin », dans laquelle le sylviculteur n'influe pas sur l'évolution de la position sociale des arbres. Si l'arbre désigné ne mérite plus son statut d'arbre d'avenir, la comparaison entre placettes peut alors être biaisée.

L'arbre « remplaçant » est affecté d'un nouveau numéro non utilisé dans la modalité (avec les « coordonnées de la cellule » correspondante le cas échéant).

La valeur de la variable « statut sylvicole » (voir **annexe E**) de l'ancien arbre d'avenir devient donc « bourrage » et celle du nouveau, « avenir ». L'ancien arbre désigné peut être encore suivi pour connaître son évolution. On cumule alors les intérêts du suivi d'une population fixe et d'une population variable.

Le suivi d'un échantillon variable permet de cibler, tout au long de la vie du peuplement, la population d'« élite », qui intéresse plus particulièrement le sylviculteur.

Chaque arbre d'un échantillon est identifié par un numéro et, lorsque cela est possible, par des coordonnées (ligne / colonne)

Autres exemples d'échantillons spécifiques

D'autres échantillons spécifiques peuvent être suivis, selon les objectifs poursuivis par l'expérimentation.

Ces échantillons peuvent être choisis de manière aléatoire ou systématique (la méthode des cellules peut aussi s'appliquer) pour avoir une vision représentative du phénomène étudié :

- arbres ayant une particularité liée à l'expérimentation : arbres élagués, arbres ayant fait l'objet d'un traitement...

- arbres faisant l'objet d'une mesure particulière : suivis phénologiques, sondage à la tarière (voir chapitre 2), ou choisis pour la mesure de la hauteur dominante (voir chapitre 1).

Ces échantillons peuvent également être choisis pour étudier une particularité précise et répartie de manière hétérogène : « étude de cas », par exemple trouées de régénération en peuplements irréguliers.

Les méthodes d'échantillonnage sont à choisir avec soin en fonction de l'objectif des mesures, sous peine de ne pas pouvoir interpréter les données ou de biaiser les résultats.

ANNEXE E - VARIABLES SUPPLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DE LA MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Variable « statut sylvicole »

Dans le cas d'une désignation (arbres d'avenir, arbres élagués...), il est utile de renseigner une variable « statut sylvicole ».

Cette variable peut prendre les valeurs suivantes : « désigné », « pré-désigné », « avenir ou objectif », « éclaircie », « bourrage »...

Elle permet de décliner les calculs par sous-population, et notamment de comparer entre placettes des sous-populations aux statuts sylvicoles identiques (voir annexe D).

Variables qualifiant la forme de la tige et la branchaison pour les jeunes peuplements (< 15 m)

L'objectif de ces variables est d'évaluer, par des critères les plus objectifs possibles, la forme des arbres. La mesure de diamètres de branches, d'angles de branches ou le comptage des branches étant fastidieux, il est souvent fait appel à des notations visuelles synthétiques plutôt qu'à de réelles mesures. Ces notations sont donc qualitatives et restent sujettes à la subjectivité, même si elles sont clairement définies. Il convient donc de les utiliser avec prudence, en cadrant au mieux leur appréciation. **Attention, la prise en compte d'une note de qualité a en général pour conséquence d'au moins doubler le temps habituellement nécessaire pour la mesure de la circonférence.**

Quelques exemples de variables de forme sont fournis ci-après, à titre indicatif.

Variable "présence d'un axe" (pour les jeunes tiges de moins de 6 m)

Principe

- la note 1 correspond à la présence d'un axe marqué ;
- la note 0 correspond à l'absence d'un axe marqué.

Échantillon

Sur toutes les tiges, ou sur un échantillon systématique (1 tige sur x).

Périodicité

Au plus à chaque passage en mesure, tant que les arbres n'ont pas atteint 6 m de hauteur.

Utilisation

Cette variable est plutôt utilisée dans les plantations de feuillus, où les problèmes de forme sont plus fréquents.

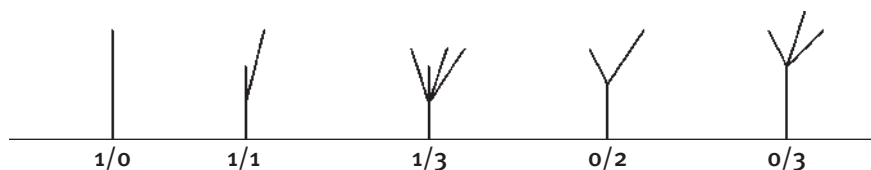
Variable "dominance apicale" (pour les jeunes tiges de moins de 6 m)

Principe

Cette variable correspond au nombre de branches dominantes (hors axe de la tige) dans le cas de la présence d'un axe (note "présence d'un axe" = 1), ou au nombre de branches formant une fourche dans le cas de l'absence d'un axe (note "présence d'un axe" = 0).

La combinaison des deux notes "présence d'un axe" et "dominance apicale" permet de **qualifier la forme globale de la tige**. Les exemples du tableau suivant illustrent différents cas possibles.

Note "présence d'un axe"	Note "dominance apicale"	Description de la tige
1	0	dominance apicale forte (présence d'un axe dominant)
1	1	perte de dominance (une autre branche domine) avec conservation de l'axe
1	3	perte de dominance, trois branches dominant avec conservation de l'axe.
0	2	fourche simple
0	3	fourche à trois branches



Échantillon

Sur toutes les tiges, ou sur un échantillon systématique de tiges (1 tige sur x).

Périodicité

Au plus à chaque passage en mesure, tant que les arbres n'ont pas atteint 6 m de hauteur.

Utilisation

Liée à la variable « présence d'un axe », elle permet d'apprécier la forme des jeunes arbres.

Variables de qualité et de défauts de la tige

Variable	Principe	Périodicité	Utilisation
Rectitude	Une note de 1 à 4 est attribuée : 1 = arbre droit sur toute la hauteur de la tige 2 = arbre droit sur au moins les 2/3 inférieurs de la tige 3 = arbre droit sur au moins le 1/3 inférieur de la tige 4 = arbre n'ayant pas au moins le 1/3 inférieur de la tige droit	Pas nécessairement à chaque passage en mesure, mais en fonction de la rapidité d'évolution du peuplement	Pour apprécier la qualité de forme de la future grume
Inclinaison par rapport à la verticale	Une note de 1 à 3 est attribuée : 1 = angle à la verticale < 20° 2 = angle à la verticale entre 20-45° 3 = angle à la verticale > 45°	À chaque passage en mesure en début de vie du peuplement	Pour évaluer la qualité du bois de la future grume (risques de bois de réaction)
Branchaison globale	Une note de 1 à 4 est attribuée : 1 = branches fines, horizontales et peu nombreuses 2 = branches moyennement grosses, et/ou peu inclinées, et/ou moyennement nombreuses 3 = branches grosses, et/ou fortement inclinées, et/ou nombreuses, et/ou verticilles diffus 4 = branches très grosses, et/ou fortement inclinées, et/ou nombreuses, et/ou verticilles très diffus	Pas nécessairement à chaque passage en mesure, mais en fonction de la rapidité d'évolution du peuplement	Pour apprécier les besoins futurs en taille et en élagage des tiges, et la qualité du bois
Défaut tige	Une note est attribuée de la façon suivante : - nature du défaut (N = nœud plongeant, F = fourche) - hauteur du défaut (entier en m) <u>Exemple</u> : F6 = fourche à 6 m ; N3 = nœud plongeant à 3 m	Pas nécessairement à chaque passage en mesure	Pour apprécier la qualité de la future grume. On se limite en général au défaut principal correspondant à une découpe potentielle
Dégâts de gibier	Un type de dégât est attribué : - frottis - abroustissement On peut l'assortir d'une note de gravité de 0 à 5 (voir la définition des classes de notation des problèmes phytosanitaires, chapitre 2, page 97)	À chaque passage en mesure	Pour apprécier la sensibilité au gibier

Ces variables correspondent à des notations visuelles qui s'utilisent en général dans des jeunes peuplements de moins de 15 m de hauteur, où principalement les 6 premiers mètres (bille de pied) font l'objet d'observations. L'échantillon mesuré est en général le même que pour la mesure de circonférence (toutes les tiges), ou un échantillon systématique (1 tige sur x).

Ces variables peuvent cependant être adaptées pour des tiges plus hautes.



© P. Riou-Nivert (CNPFR-IDF)

© P. Riou-Nivert (CNPFR-IDF)

Fourche et nœud plongeant sur pins laricio.

Variable cubage, pour les arbres abattus

Principe

À l'occasion d'une éclaircie, le cubage d'arbres abattus permet de calculer, plus précisément qu'avec un tarif de cubage général, les volumes exacts par placette et éventuellement de construire des tarifs de cubage différenciés par modalités. Le cubage peut être fait par billons réalisés tous les 1 m, mais le cubage simplifié réalisé à partir de 4 billons, présenté ici, est en général amplement suffisant, notamment pour les jeunes tiges (< 20 m).

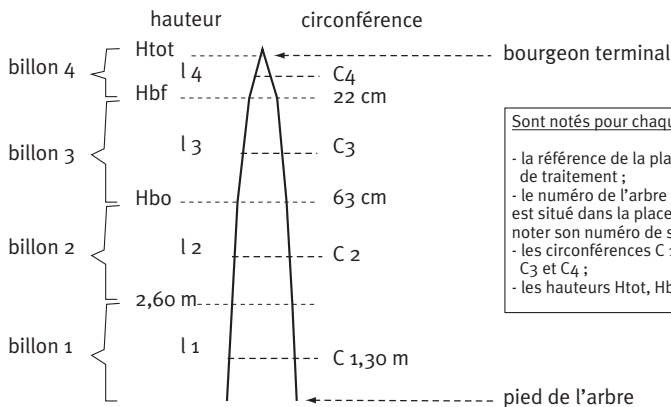
Sur pied, la circonférence à 1,30 m est mesurée au cm près et le niveau 1,30 m est repéré à la peinture (opération en principe déjà faite pour les arbres de la placette mesurés avant intervention).

Une fois l'arbre abattu, le décimètre est étalé du pied au bourgeon terminal, en positionnant la graduation 1,30 m sur le niveau repéré à la peinture. Trois hauteurs sont mesurées et repérées à la peinture ou à la griffe :

- la hauteur bois d'œuvre Hbo (au niveau où la circonférence = 63 cm pour les résineux ou 70 cm pour les feuillus) ;
- la hauteur bois fort Hbf (au niveau où la circonférence = 22 cm pour les résineux et les feuillus) ;
- la hauteur totale Htot (au niveau du bourgeon terminal).

Quatre billons sont ensuite définis ; pour chacun sont mesurées une longueur et une circonférence médiane :

- billon 1 (du pied de l'arbre à 2,60 m) : de longueur $l_1 = 2,60$ m, et de circonférence médiane $C_{1,30}$ m ;
- billon 2 (de 2,60m à Hbo) : de longueur $l_2 = Hbo - 2,60$ m, et de circonférence médiane C_2 ;
- billon 3 (de Hbo à Hbf) : de longueur $l_3 = Hbf - Hbo$, et de circonférence médiane C_3 ;
- billon 4 (de Hbf à Htot) : de longueur $l_4 = Htot - Hbf$, et de circonférence médiane C_4 .



Sont notés pour chaque arbre :

- la référence de la placette de traitement ;
- le numéro de l'arbre (si l'arbre est situé dans la placette de mesure, noter son numéro de suivi) ;
- les circonférences $C_{1,30}$, C_2 , C_3 et C_4 ;
- les hauteurs Htot, Hbf et Hbo

En cas d'élagage artificiel ancien de branches vertes, un des billons peut être divisé en deux « sous-billons » au niveau de la hauteur d'élagage, pour différencier la partie élaguée de la partie non élaguée.

Le cubage de chaque billon se fait en calculant sa longueur (différence des hauteurs), et en la multipliant par le carré de sa circonférence médiane divisée par 4π . Le volume du billon 4 peut en général être négligé pour les plus grosses tiges (voire même les billons 3 et 4 si l'on ne souhaite étudier que le volume bois d'œuvre).

Échantillon

15 arbres environ sont cubés dans chaque placette de traitement (de préférence dans la placette de mesure). Ces arbres sont choisis avant l'abattage, et numérotés. Le choix se fait de la façon suivante :

1°) sur la (ou les) même(s) ligne(s) de cloisonnement lors d'éclaircie systématique ;
2°) avec une distribution en circonférence proche de celle de la placette, afin qu'ils soient représentatifs de la placette,

Les arbres « bas-fourchus » ou avec un « défaut de tige » important ne sont pas retenus dans l'échantillonnage.

Les arbres ne doivent pas être tronçonnés ou étêtés avant la mesure.

Périodicité

Lors des éclaircies ou de la coupe finale.

Utilisation

Dans toutes les références ou expérimentations sur lesquelles est étudiée la production et lorsque les barèmes, tarifs de cubage ou tables de production existants ne peuvent pas être utilisés : par exemple, pour les peuplements gérés avec une sylviculture particulière, notamment très dynamique, pour les essences peu courantes...

ANNEXE F - COMPLÉMENTS À LA MÉTHODOLOGIE PARTICULIÈRE LIÉE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (CLIMATOLOGIE, PHÉNOLOGIE)

Compléments sur les données climatologiques et météorologiques

Contribution de Vincent Badeau (INRA)

Ouvrages traitant des caractéristiques climatiques de la France, à diverses échelles spatiales (les prix fin 2011 mentionnés sont indicatifs).

- *Atlas climatique de la France*. Édition réduite, Météo-France, Paris, 1986, 30 p. (env. 18 €). Le climat de la France y est résumé sous forme de cartes. Cet atlas a été réalisé par les services climatologiques de Météo-France à partir des données de son réseau d'observations. Il contient des cartes annuelles et mensuelles moyennes pour tous les paramètres climatiques (température, précipitations, ensoleillement...).

- *Météo de la France. Tous les climats, localité par localité*. Jacques Kessler et André Chambraud, Jean-Claude Lattès, 1990, 391 p. (env. 18 €). Ce livre présente tout d'abord les grandes caractéristiques des climats français à l'échelle nationale puis, pour chaque département, une carte présente les iso-lignes de précipitations et des tableaux fournissent des normales de paramètres climatiques pour un ensemble de stations d'observations.

- *Normales Climatiques*. Division climatologie et banques de données, Météo-France, Toulouse, 1996, 467 p. (env. 38 €). Ce volume présente les normales climatiques, calculées sur la période 1961-1990, pour 114 stations du réseau métropolitain de Météo-France. Pour chacune de celles-ci, trois pages de tableaux présentent les statistiques relatives aux températures, aux précipitations, à l'insolation, à l'humidité et aux phénomènes particuliers (brouillard, orage, grêle et neige). La quatrième page contient la rose des vents.

- *Statistiques climatiques de la France 1971-2000*. Direction de la climatologie, Météo-France, Toulouse, 2009, 288 p. (env. 60 €). Cet ouvrage fournit la synthèse d'une surveillance systématique du climat avec des informations statistiques sur les principaux paramètres représentatifs du climat observé pour la période 1971-2000 en France. L'ensemble du territoire français est couvert : 133 stations du réseau de Météo-France dont 110 en métropole et 23 en France

d'outre-mer. Des valeurs statistiques mensuelles ou annuelles relatives aux températures, aux précipitations, à l'insolation, au vent, à l'occurrence de brouillard, d'orage, de grêle et de neige sont fournies. Deux pages par station d'observation sont présentées sous forme de tableaux synthétiques et de roses des vents.



Tous ces ouvrages (et d'autres, comme quelques guides régionaux) sont disponibles, entre autre, via le site de la Publiothèque de Météo-France.

Données climatiques spatialisées

Complément sur AURELHY

Les normales climatiques (ou moyennes trentenaires) sont disponibles à la résolution de 1 km, pour les quatre périodes suivantes :

1951-1980

hauteur des précipitations, mensuelles et annuelles.

Pour cette période, étant donné la plus faible disponibilité des postes, les données sont interpolées sur une maille de 5 x 5 km.

1961-1990

hauteur des précipitations, mensuelles et annuelles ;

températures minimales (TN) et maximales (TX) mensuelles et annuelles.

1971-2000

hauteur des précipitations, mensuelles et annuelles ;

nombre de jours avec des précipitations ≥ 1 mm, mensuel et annuel ;

nombre de jours avec des précipitations ≥ 5 mm, annuel ;

nombre de jours avec des précipitations ≥ 10 mm, annuel ;

températures minimales (TN) et maximales (TX), mensuelles et annuelles ;

nombre de jours avec gelées sous abri, mensuel et annuel ;

nombre de jours avec $TN \leq -5^{\circ}\text{C}$, annuel ;

nombre de jours avec $TN \leq -10^{\circ}\text{C}$, annuel ;

nombre de jours avec $TX \leq 0^{\circ}\text{C}$, annuel ;

nombre de jours avec $TX \geq 25^{\circ}\text{C}$, annuel ;

nombre de jours avec $TX \geq 30^{\circ}\text{C}$, annuel.

1991-2000

hauteur des précipitations, mensuelles et annuelles ;
températures minimales et maximales, mensuelles et annuelles ;
nombre de jours avec gelées sous abri, mensuel et annuel (janvier à juin et septembre à décembre).

Depuis 2001, des statistiques année par année sont également disponibles :

hauteur des précipitations, annuelles ;
nombre de jours avec des précipitations ≥ 1 mm ;
températures minimales et maximales, annuelles.

Les données climatiques par satellite SATMOS - www.satmos.meteo.fr

Le Service d'Archivage et de Traitement Météorologique des Observations Spatiales (SATMOS) diffuse auprès de l'ensemble de la communauté scientifique les données des satellites météorologiques. Parmi celles-ci, on peut mentionner les données de rayonnement dérivées des images Météosat.

Ces données de rayonnement sont disponibles depuis 1996 aux pas de temps journalier, décadaire, mensuel et annuel. L'utilisateur peut également commander un travail particulier. La résolution moyenne sur la France est de 3 km (soit 151 018 points de grille). Le coût approximatif d'une carte à l'échelle nationale est d'environ 200 € HT en 2011, mais il est possible de choisir un domaine spatial plus restreint.

Les données SATMOS complètent de façon satisfaisante le réseau assez diffus des observations au sol (réseau utilisé par ailleurs pour la calibration/validation des images Météosat), et peuvent être utilisées localement dans des calculs d'évapotranspiration potentielle (ETP) plus ou moins raffinés.

Données climatiques spatialisées - Worldclim - www.worldclim.org

Les cartes climatiques WorldClim sont issues du travail de Hijmans *et al.* (2005). Comme AURELHY, ces cartes climatiques sont des normales mensuelles. Elles sont par contre calculées uniquement pour la période 1950-2000. Elles donnent les températures minimales, maximales et moyennes, les précipitations, les altitudes, ainsi qu'un ensemble de 19 variables bioclimatiques comme la température du mois le plus chaud ou du mois le plus froid, les précipitations du mois le plus humide ou le plus sec, etc. (voir www.worldclim.org/bioclim).

Les cartes sont disponibles sur des grilles de 30 secondes d'arc (soit à peu près 1 km, comme AURELHY), 2,5 minutes, 5 minutes et 10 minutes. Elles peuvent être téléchargées librement soit au format ESRI® pour une intégration immédiate dans Arcmap®, Arcview®, Arcinfo®, soit dans un format générique permettant l'intégration dans les logiciels cartographiques les plus courants. Elles sont disponibles pour la totalité du globe ou pour des sous-ensembles spatiaux de 30 x 30 degrés.

À la différence d'AURELHY, ces cartes spatialisées ont été calculées à l'échelle du globe. L'utilisation de ces cartes à des échelles régionales ou infra-régionales doit donc être faite avec précaution. Même si la résolution spatiale semble très fine (1 km), les données Worldclim ne donnent que des grandes tendances. À l'échelle mondiale, le relief de la France est très simplifié et des gradients importants de précipitations - très nets sur les cartes AURELHY - apparaissent très atténués sur les cartes Worldclim.

À noter que les cartes Worldclim sont également disponibles pour les paramètres climatiques futurs, selon deux scénarios d'émission SRES (A2 et B2) et 3 modèles climatiques (CCCMA, HADCM3, CSIRO). Ces projections climatiques sont cependant déjà anciennes car elles correspondent au troisième rapport du GIEC¹ (AR3).

Données climatiques spatialisées - Climatic Research Unit www.cru.uea.ac.uk

L'Unité de Recherche sur le Climat (CRU) de l'Université d'East Anglia à Norwich (Royaume Uni) met à disposition gratuitement diverses grilles de paramètres climatiques (voir le menu « data », puis « high-resolution gridded datasets ». Ces données sont probablement les plus connues et les plus utilisées en Europe.

Les grilles climatiques sont soit des normales (average climatology), à l'image des données AURELHY ou Worldclim, soit des séries temporelles mensuelles depuis 1901 (time-series), soit des projections climatiques pour le futur (set of scenarios). Leur résolution spatiale est de 0,5 degrés sur le monde et de 10 minutes sur l'Europe (soit une maille de l'ordre de 20 km sur la France).

Les données climatiques AURELHY, SATMOS, Worldclim et CRU sont accessibles via l'outil SIGECO (voir conditions spécifiques ci-après)

L'outil SIGECO - <https://appgeodb.nancy.inra.fr/sigeco>

Depuis 2009, l'UMR 1137 INRA-UHP Écologie et Écophysiologie Forestières de l'INRA Nancy, travaille sur un outil de stockage et d'extraction de données environnementales géoréférencées (météorologiques, topographiques et floristiques).

Le premier volet de ce projet, consacré aux données climatiques est désormais très avancé et l'INRA offre la possibilité d'utiliser l'outil SIGECO pour extraire des données concernant les points géographiques fournis par les utilisateurs. La réponse est adressée par mail (sous quelques minutes) par le logiciel.

1 Groupe International d'Experts sur l'Évolution du Climat.

Les couches AURELHY et SATMOS ne sont accessibles pour l'instant qu'aux équipes de recherche de l'INRA qui se sont acquittées d'un droit d'utilisation (licence) auprès de Météo-France. Si vous détenez légalement ces données, nous pouvons probablement vous offrir le traitement d'extraction (à discuter avec Alain Bénard, alain.benard@nancy.inra.fr).

Les couches CRU (CRU 1.2 pour l'Europe et CRU 3 pour le globe) sont libres d'accès suite à un accord passé avec la Climatic Research Unit. Les données Worldclim sont également libres d'accès mais uniquement, pour l'instant, à l'échelle de la métropole.

L'interface se présente telle que ci-après une fois le domaine « Données climatiques » sélectionné, pour un accès anonyme :

The screenshot shows the 'SIG-ECOLOGIE' web interface. At the top, there are navigation links: 'Accueil' and 'Se connecter'. Below that, 'Accès aux données' is followed by three categories: 'Données climatiques', 'Données topologiques', and 'Données floristiques'. The main heading is 'Etape 1 : Sélection des couches'. Below this is a table with columns: 'Fiche de métadonnées', 'Format fichier résultat', 'Nom de la Couche', and 'Filtre'. Two rows are visible: 'CRU 1.2 précipitation mm (1901-2000)' and 'CRU 1.2 Température moyenne celsius (1901-2000)'. Each row has a 'Date précise' field, 'Date de début', 'Date de fin', and an 'Ajouter' button. A 'Filtre' dropdown is set to '1930-1950,1976'. At the bottom left, there is a button labeled 'Etape 2: Envoi du fichier'.

Capture d'écran du logiciel SIGECO.

The screenshot shows the 'SIG-ECOLOGIE' web interface, Step 2: 'Envoi du fichier'. At the top, there are navigation links: 'Accueil' and 'Se connecter'. Below that, 'Accès aux données' is followed by three categories: 'Données climatiques', 'Données topologiques', and 'Données floristiques'. The main heading is 'Etape 2 : Envoi du fichier'. Below this is a text block: 'Pour le bon déroulement de l'application, le fichier doit respecter certaines contraintes :'. This is followed by a bulleted list of constraints: 'Il ne doit pas comporter de ligne d'en tête', 'Il ne doit pas y avoir de ligne vide à la fin du fichier', and 'Le nom de la couche ne doit pas dépasser les 40 caractères'. Below the list are several form fields: 'Séparateur de champs de votre fichier' (set to 'Tabulation'), 'Système de projection utilisé dynamique' (set to 'Lambert II étendu'), 'Séparateur de décimale' (set to 'Virgule'), 'Préciser le fichier à déposer (Format accepté : gz, txt)' with a 'Browse...' button, and 'Seuil de rejet (exprimé en %)' (set to '10'). At the bottom left, there is a 'Soumettre' button.

Capture d'écran du logiciel SIGECO.

Les deux liens « Voir », à gauche de l'écran, permettent d'en savoir plus sur les données ou le format du fichier de réponse. L'un d'eux mène directement sur la fiche métadonnées du jeu de données concerné (couche). Une fois la sélection effectuée (couche[s] et période[s]), le bouton « Étape 2 : envoi du fichier » permet d'envoyer la réponse par mail.

Pour récupérer les données climatiques, il est nécessaire de fournir un fichier de coordonnées de points et de renseigner les champs d'informations (séparateur de champ, séparateur décimal, système de projection des points et localisation du fichier point). Le seuil de rejet indique un taux au-delà duquel le traitement est abandonné (ici, si plus de 10 % de vos points ne sont pas contenus dans la zone géographique couverte par la couche de données, alors un message d'erreur vous sera retourné par mail).

À l'heure actuelle SIGECO ne supporte que ce qui est proposé dans les menus déroulants mais des aménagements pourront être réalisés en fonction des besoins. Plus particulièrement en ce qui concerne les coordonnées géographiques, nous conseillons d'utiliser le logiciel Circé édité et distribué gratuitement par l'IGN : <http://geodesie.ign.fr/index.php?page=circe>

L'outil BILJOU - <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>

L'UMR1137 Écologie Écophysologie Forestières a développé le site web du modèle de **bilan hydrique forestier BILJOU**© (Granier *et al.*, 1999). Ce site a été développé dans le cadre d'un projet du Réseau Mixte Technologique AFORCE et avec un soutien de l'INRA et du GIP Ecofor. Il a été présenté dans Forêt-entreprise n°196 (Granier et Bréda, 2011).

Le site propose un cours en ligne sur le bilan hydrique des forêts, les différents flux d'eau dans l'écosystème et les facteurs de variations et de contrôle de ce bilan. Des références bibliographiques en français sont également proposées et les articles au format pdf peuvent être téléchargés. Cette partie du site est dès à présent ouverte à tous.

Le site propose également, gratuitement, après inscription, obtention d'un mot de passe et acceptation d'une licence selon le profil utilisateur (recherche, enseignement, gestionnaire, utilisation commerciale), un outil en ligne permettant le calcul des flux d'eau entrant et sortant du sol sous couvert forestier, de façon claire et rapide. Cet outil permet de calculer et de télécharger les résultats journaliers et annuels. À ces résultats viennent s'ajouter des graphiques illustrant les variations de différents flux d'eau simulés par le modèle (interception, drainage), ainsi que des indicateurs de sécheresse (durée et intensité du déficit hydrique).

L'utilisateur doit soumettre un fichier de caractéristiques de son peuplement et un fichier de données météorologiques quotidiennes, comprenant la pluie, la température, la vitesse du vent, le déficit de saturation de l'air, le rayonnement global. Ces données (dont certaines peuvent être estimées lorsqu'on ne peut les connaître directement) sont reprises par l'outil pour calculer une ETP Penman, utilisée ensuite comme force motrice de l'évapotranspiration réelle du peuplement.

BILJOU
Modèle de bilan hydrique forestier

INRA UMR Ecologie et écophysologie forestières

E-mail: Mot de passe: OK

- Accueil
- Présentation du projet
- Questions des utilisateurs
- Forêts et Eau
 - Bilan Hydrique
 - Transpiration et régulation
 - Interception des précipitations
 - Réserve en eau du sol
 - Indice foliaire et phénologie
 - Météorologie
 - Drainage
 - Indicateurs de sécheresse
 - Modélisation
- Utiliser l'outil (accès réservé)
- Contact

Présentation du projet

Motivations



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

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

Sécheresse en forêt d'Orléans.

Objectifs

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



Dépérissement du chêne en forêt de Tronçais. Sécheresse de 1976. Chêne pedunculé sec et chêne sessile secs.

Unité mixte de recherches INRA-Nancy-Université 1137 «Ecologie et écophysologie forestières»
INRA, 54280 Champenoux - tél : +33 (0)3 83 39 40 41 - Réalisation : Guillaume Ehringer

© INRA, 2009. Modélisation localis

Capture d'écran du site BILJOU.

Observation de la phénologie à l'échelle placette et à l'échelle individuelle (suivi précis au niveau arbre)

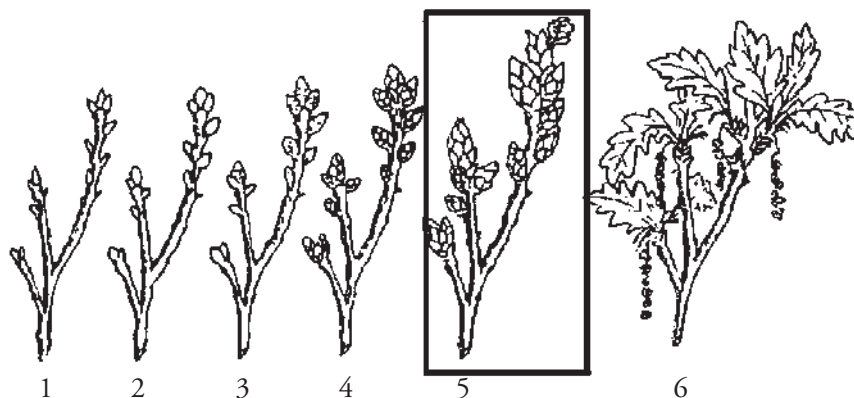
Des protocoles d'observation des stades phénologiques des peuplements forestiers ont été établis dans le cadre du suivi des placettes du Réseau National de suivi à long terme des Écosystèmes Forestiers (RENECOFOR - ONF).

Ces protocoles peuvent être utilisés également sur les dispositifs d'expérimentation forestière classiques.

Les fiches suivantes illustrent le stade phénologique recherché lors des observations de printemps pour le suivi au niveau placette, mais aussi lors des observations individuelles des arbres (suivi précis au niveau arbre) telles qu'envisagées au chapitre 2, page 102. Elles sont issues du Manuel de référence N 12 pour les observations phénologiques - Placettes des niveaux A et B - Février 2009 - ONF.

Pour information : le stade recherché au printemps pour l'ensemble des essences, correspond au code BBCH 10 (voir plus loin, page 184).

Les chênes



Source du schéma : Abgrall et Soutrenon (1991),
d'après Schütte (1957)

- 1) bourgeons entièrement fermés (stade hivernal)
- 2) bourgeons allongés, écailles non décollées
- 3) bourgeons tendres, début de décollement des écailles
- 4) bourgeons ouverts, les écailles s'ouvrent
- 5) **bourgeons épanouis, une feuille se déploie déjà et on voit du vert**
C'EST LE STADE RECHERCHÉ !
- 6) pousse courbée, plusieurs feuilles libres dépliées

F



© L. Croisé (ONF)

Stade 5 recherché.

Le hêtre



Source du schéma : Becker (1981) d'après Malaisse (1964)

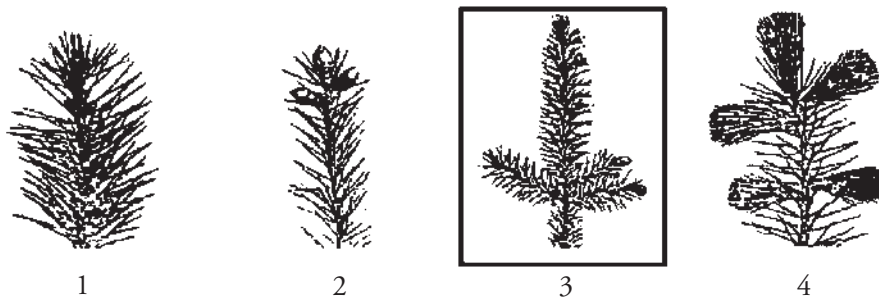
F

- 1) bourgeons entièrement fermés (stade hivernal)
- 2) bourgeons allongés et gonflés, écailles non décollées
- 3) bourgeons tendres, début de décollement des écailles
- 4) **bourgeons épanouis, une feuille se déplie déjà et on voit du vert**
C'EST LE STADE RECHERCHÉ !
- 5) pousse courbée, plusieurs feuilles libres dépliées



Stade 4 recherché.

L'épicéa commun, le sapin pectiné et le douglas



Source du schéma : IUFRO (années 1960,
transmis par David Durant)

- 1) bourgeons entièrement fermés (stade hivernal)
- 2) bourgeons gonflés, écailles non décollées
- 3) **bourgeons ouverts, les écailles, maintenant ensemble le bout des aiguilles, sont tombées
C'EST LE STADE RECHERCHÉ !**
- 4) pousse courbée, les aiguilles s'allongent en forme de blaireau

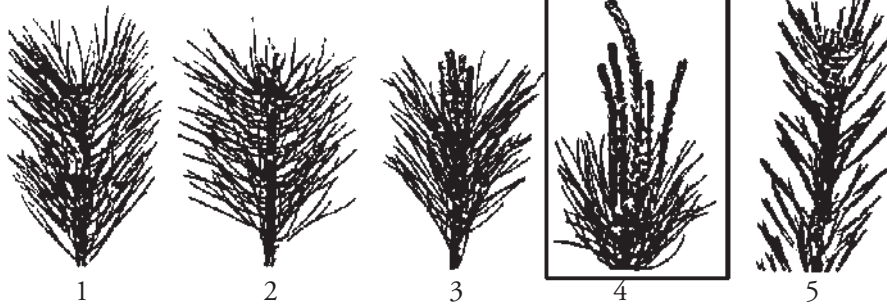
F



© L. Croisé (ONF)

Stade 3 recherché.

Les pins



Source du schéma : IUFRO (années 1960, transmis par David Durant)

- 1) bourgeons entièrement fermés (stade hivernal)
- 2) bourgeons gonflés et en train de s'allonger, écailles non décollées
- 3) bourgeons ouverts, montrant le bout des aiguilles ; le chapeau de l'écaille est encore sur les aiguilles, les maintenant ensemble
- 4) **bourgeons déjà très longs et les aiguilles basses des nouvelles pousses sortent des écailles C'EST LE STADE RECHERCHÉ !**
- 5) pousse courbée, les aiguilles et la pousse s'allongent fortement et sont entièrement libres

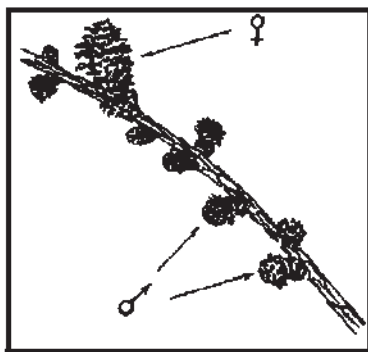
F



© E. Ulrich (ONF)

Stade 4 recherché.

Le mélèze d'Europe



Source du schéma : Jacamon (1979)

Le stade recherché est celui qui suit le stade encadré (fleurs mâles et femelles) : il s'agit du stade qui suit l'ouverture des bourgeons, où les aiguilles sont **entièrement libérées des écailles** et forment un **petit pinceau vert tendre**.

F



© L. Croisé (ONF)

Stade recherché.

Observation de la phénologie à l'échelle individuelle (suivi très précis au niveau arbre)

Exemples d'échelle BBCH pour quatre essences : *chêne pubescent*, *frêne*, *épicéa*, *pin d'Alep*¹.

À chaque passage, un code à deux chiffres est attribué à chaque arbre, selon la codification décrite ci-après, en fonction de l'essence observée.



www.obs-saisons.fr
www.obs-saisons.fr/junior

Quercus pubescens – Chêne pubescent

Feuillaison

Stade 00
Bourgeon
dormant



Stade 07
Bourgeon
gonflé



Stade 10
Bout des
feuilles visible



Stade 11
Environ 10%
des feuilles
épanouies



Stade 15
Environ 50%
des feuilles
épanouies



Floraison

Stade 55
Inflorescences
visibles non
épanouies



Les
chatons ne
libèrent
pas encore
le pollen

Stade 61
Environ 10%
des fleurs
épanouies



Stade 65
Environ 50%
des fleurs
épanouies

Les
chatons
libèrent le
pollen

Fructification

Stade 79
Les fruits ont
atteint leur taille
maximale



Stade 86
Au moins 50%
des fruits sont
matures

Sénescence

Stade 92
Au moins 10%
des feuilles sont
jaunes

Stade 95
Au moins 50%
des feuilles sont
jaunes



¹ Ces fiches sont disponibles sur le site internet <http://www.obs-saisons.fr>



www.obs-saisons.fr
www.obs-saisons.fr/junior

Fraxinus excelsior L. – Frêne commun

Feuillaison

Stade 00
Bourgeon
dormant



Stade 07
Bourgeon gonflé
et allongé



Stade 10
Bout des
feuilles visible



Stade 11
Environ 10% des
feuilles épanouies

Stade 15
Environ 50% des
feuilles épanouies



Floraison

Stade 55
Inflorescence
visible non
épanouie



Stade 61
Environ 10% des
fleurs épanouies

Stade 65
Environ 50% des
fleurs épanouies



Fructification

Stade 79
Les fruits ont atteint
leur taille maximale



Stade 86
Au moins 50% des
fruits sont matures





www.obs-saisons.fr
www.obs-saisons.fr/junior

Picea abies L. – Épicéa commun

Feuillaison

Stade 00
Bourgeon
dormant



Stade 07
Bourgeon
gonflé



Stade 10
Bout des
feuilles
visibles



Stade 11
Environ 10%
des feuilles
épanouies

Stade 15
Environ 50%
des feuilles
épanouies



Floraison

Stade 60
Inflorescence
visible non
épanouie



Stade 61
Environ 10% des
fleurs mâles
épanouies



Stade 65
Environ 50% des
fleurs mâles
épanouies

Stade 69
Fin de la
floraison mâle





www.obs-saisons.fr
www.obs-saisons.fr/junior

Pinus halepensis L. – Pin d'Alep

Feuillaison

Stade 00
Bourgeon
dormant



Stade 07
Bourgeon gonflé
et allongé

Stade 10
Bout des
feuilles visible

Stade 11
Environ 10% des
feuilles épanouies

Stade 15
Environ 50% des
feuilles épanouies



Floraison

Stade 55
Inflorescence
visible non
épanouie



Stade 61
Environ 10% des
fleurs épanouies

Stade 65
Environ 50% des
fleurs épanouies



Les petits
cônes mâles
libèrent le
pollen

Fructification

Stade 79
Les fruits ont atteint
leur taille maximale



Stade 86
Au moins 50% des
fruits sont matures



ANNEXE G - CONSEILS PRATIQUES POUR LA RÉALISATION DES MESURES DE HAUTEUR

Contribution de Sandrine Perret (Cemagref)

En peuplement de moins de 10 mètres



La hauteur totale correspond à la distance verticale entre le sol et la base du bourgeon le plus haut.

Elle se mesure à la **perche télescopique**, en période d'**arrêt de la végétation** et à **deux opérateurs**.

Utiliser un seul type d'appareil par campagne pour toutes les placettes.

Attention

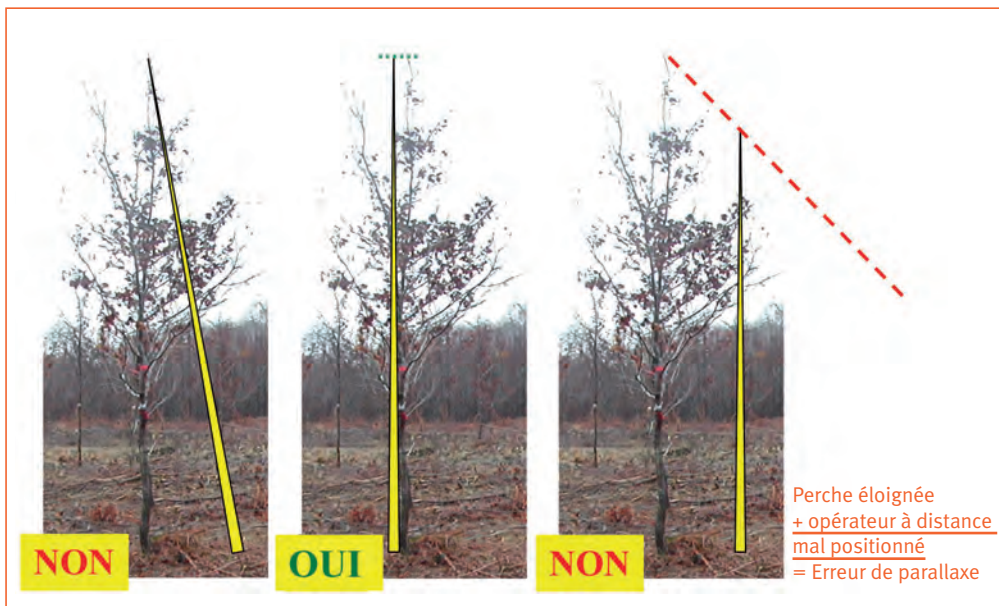
Pour l'opérateur tenant la perche

- Maintenir la perche verticale
- Placer le sommet de la perche proche de l'apex
- Ne pas oublier d'éléments télescopiques (qui pourraient rester non déployés)

Pour l'opérateur à distance

- Se placer à une distance de l'arbre supérieure de 1 à 1,5 fois la hauteur de ce dernier
- Dans une direction perpendiculaire à l'axe arbre/perche

Observations utiles à noter : cime sèche, bris de cime...



En peuplement de plus de 10 mètres



La hauteur totale correspond à la distance verticale entre le sol et la base du bourgeon le plus haut.

Elle se mesure au **dendromètre** en période d'arrêt de la végétation.

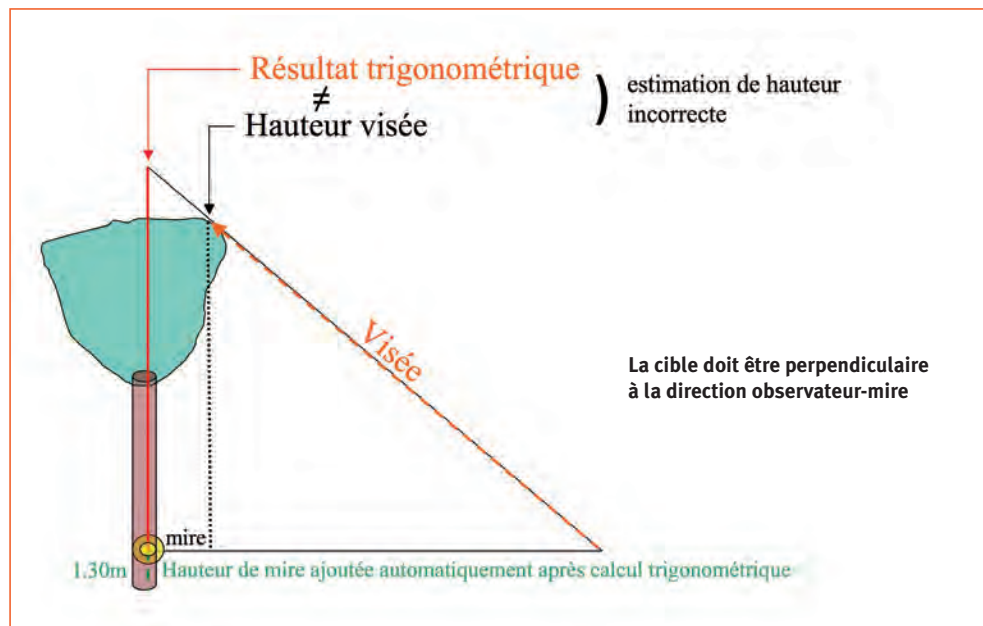
Utiliser un seul type d'appareil par campagne pour toutes les placettes.

Noter les conditions météorologiques lors de la prise de mesure.

Précautions spécifiques au Vertex® (dendromètre fréquemment utilisé)

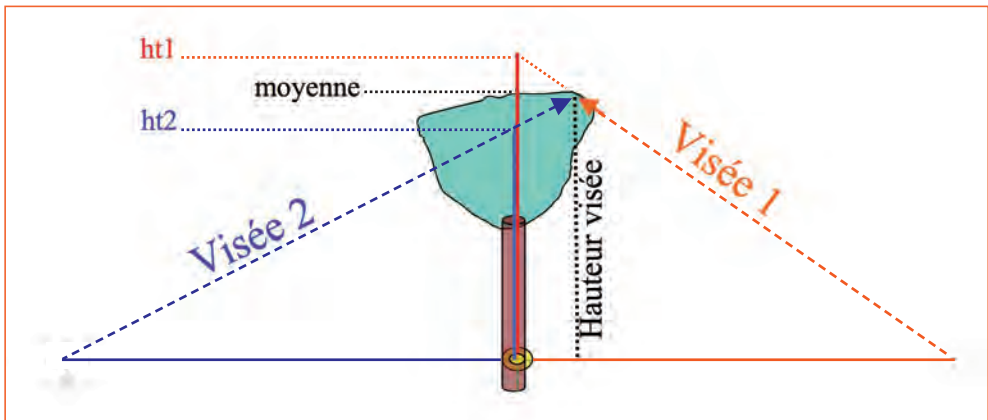
Sources d'erreurs	Solution
La vitesse de propagation des ultrasons dépend de la température	Obligatoirement calibrer le Vertex à chaque utilisation et à température stabilisée → Menu calibrate
Deux paramètres sont indispensables - la hauteur de fixation de la mire (T.Height, en principe 1,30 m) - le pivot offset (généralement 0,30 m)	Obligatoirement vérifier le paramétrage à chaque utilisation → Menu setup
Le Vertex capte les signaux des autres mires !	Ne pas travailler à proximité d'un autre Vertex utilisant le même type de mire

Précautions quel que soit le dendromètre



Pour une estimation correcte de la hauteur :

1. Chercher et identifier le point le plus haut.
Se positionner à une distance permettant de séparer branches et cime, afin de pouvoir bien viser la cime (de 1 à 1.5 fois la hauteur estimée de l'arbre).
2. Dans l'idéal (notamment pour les feuillus ou les arbres à cime globuleuse), faire la moyenne de deux mesures opposées, visant le même point et réalisées à distance similaire de l'arbre.



G

OUI

Estimation correcte de la hauteur

NON!

Estimation incorrecte de la hauteur (sures-timée)

Visée 1

Visée 2

mire 1.30m

Au besoin, placer la mire à l'aplomb du point visé, toujours réaliser 2 mesures opposées

ANNEXE H - PROTOCOLE DE DESCRIPTION DES STATIONS FORESTIÈRES

Contribution de Pierre Gonin (CNPFF-IDF)

La compréhension des principaux facteurs stationnels qui influencent la croissance nécessite une description fine des caractéristiques écologiques, en particulier du sol : propriétés physiques, hydriques et trophiques, forme d'humus et enracinement. Ce point est crucial lorsqu'on étudie l'adaptation au changement climatique.

Ce protocole propose un langage commun aux expérimentateurs. Il constitue une aide pour remplir la fiche de description stationnelle détaillée (chapitre 2, page 83, fiche reprise à la fin de cette annexe), mais peut également être consulté pour remplir la fiche de description simplifiée (chapitre 1, page 46).

Informations générales	p. 192
Relief	p. 192
Situations topographiques	p. 192
Exposition, pente et confinement	p. 193
Régime hydrique	p. 193
Profil pédologique	p. 194
Description des horizons	p. 195
Caractères particuliers pour la roche mère	p. 203
Enracinement	p. 203
Évaluation du pH sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre colorimètre	p. 204
Formes d'humus	p. 204
Analyses physico-chimiques	p. 207
Synthèse	p. 209
Relevé floristique	p. 209
Matériel	p. 210
Fiche de relevés	p. 211
Dénomination des horizons	p. 213

Informations générales

Date de description et événements climatiques récents (dans les deux semaines précédant la description), ce qui permet de mieux interpréter certaines observations (compacité, couleur, humidité des horizons...):

- * Pluie ou neige abondantes;
- * Temps sec (précipitations absentes depuis 15 jours);
- * Sécheresse (précipitations absentes depuis plus de 15 jours);
- * Variable (alternance averses/éclaircies).

Influences humaines et animales, à l'origine d'éventuelles modifications:

- * du sol:
 - fossés de drainage (distants de moins de 50 m) récents et fonctionnels/anciens;
 - labour récent (datant de moins d'1 an)/ancien (1-5 ans)/très ancien (5-15 ans);
 - crochetage superficiel (datant de moins de 3 ans);
 - billonnage ou ados;
 - sous-solage récent (datant de moins de 5 ans)/ancien (5-15 ans);
 - labour par animaux récent (datant de moins de 2 ans)/ancien;
- * de la végétation:
 - dégâts de gibier;
 - pâturage.

Érosion et apport de terre: décapages ou apports d'origine naturelle (alluvionnement, ravines de versant, glissement de terrain...) ou anthropique (érosion par labour, remblai...).

Roche sous-jacente: formation géologique indiquée par la carte géologique et nature de la roche mère observée sur le relevé.

H

Relief

Situations topographiques

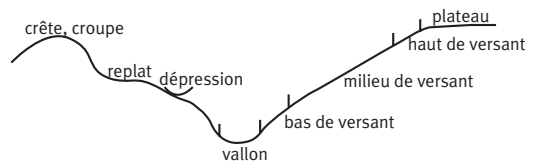
Liste des 10 situations topographiques:

* **crête, croupe**: sommet de toute nature, vif ou arrondi;

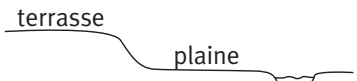
* **haut de versant**: partie supérieure d'un versant, limitée aux 1^{res} dizaines de mètres

et correspondant à une zone généralement bien drainée et donc moins alimentée en eau que le reste du versant, avec parfois des dépôts de matériaux;

* **milieu de versant**: partie moyenne d'un versant entre haut et bas de versant, dans laquelle dépôts et arrivées d'eau s'équilibrent globalement;



- * **bas de versant** : partie inférieure d'un versant, limitée aux dernières dizaines de mètres avant la fin du versant, correspondant à une zone mieux alimentée en eau que le reste du versant, avec parfois accumulation de matériaux ;
- * **replat** : zone plane (pente $\leq 10\%$) intercalée dans un versant, délimitée par une rupture de pente marquée avec le reste du versant, de largeur bien inférieure à celle d'une terrasse ;
- * **dépression** : situation confinée observée sur le versant, plus fraîche et mieux alimentée en eau que le reste du versant ; elle peut être ouverte (sillon transversal sans cours d'eau permanent) ou fermée (cuvette, doline). La dépression est peu encaissée et ses bordures ne dépassent guère une dizaine de mètres ;
- * **vallon** : fond de petite vallée, de pente en long faible (moins de 15%), plus ou moins encaissée, nettement plus fraîche et humide que le versant ;
- * **plaine alluviale** : zone plane (pente $\leq 10\%$) de vallée alluviale, correspondant au niveau le plus bas en bordure du cours d'eau (formations géologiques "basse plaine" et "alluvions modernes"), d'extension plus importante qu'un vallon ;
- * **plateau, terrasse** : zones planes (pente $\leq 10\%$), autres que les plaines et les replats ;
- * **autres** : à préciser.



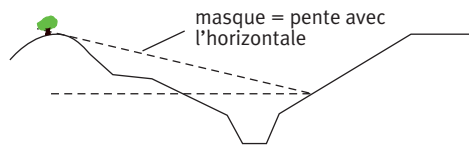
Exposition, pente et confinement

Exposition (si pente $\geq 10\%$) : en grade ou degré, ou notée N, NE, NO, E, O, SO, SE et S

Pente du terrain : notée en %

Confinement :

- * **pente opposée (ou masque, en %)** : pente de la droite joignant le point étudié à la plus haute partie du versant opposé, sans tenir compte des arbres. Dans le cas d'une ravine, on mesurera la pente par rapport aux versants de la ravine, et non par rapport au versant opposé à celui entaillé par la ravine ;
- * **classification en 3 types** : 0 = absent ($< 20\%$ environ) ; 1 = faible (20 à 40% environ) ; 2 = fort ($> 40\%$ environ).

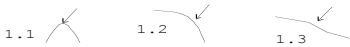
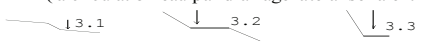
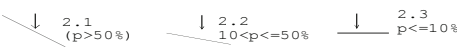
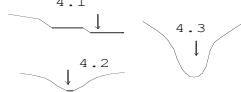



Régime hydrique

Il s'agit d'évaluer l'alimentation en eau de la station et le fonctionnement hydrique du sol. Ces caractères doivent aider à déterminer si les horizons hydromorphes (marqués par un engorgement d'eau périodique ou permanent) sont fossiles ou non. On notera la position topographique, qui influe sur les conditions d'apport d'eau et le drainage (indice topographique), les éventuels excès d'eau et leur origine.

Indice topographique relatif à l'alimentation en eau :

- * 1 : départs d'eau;
- * 2 : apports et départs équilibrés;
- * 3 : apports faibles à moyens;
- * 4 : apports importants (rupture de pente marquée avec différence de pente amont/aval supérieure à 30-40 % ou vallon sans nappe ou dépression marquée);
- * 5 : nappe courante (apports réguliers par une nappe d'eau courante permanente) ou dépression tourbeuse.

<p>1 - conditions topographiques défavorables à l'alimentation en eau : pertes par drainage > apports latéraux (RHY-)</p> 	<p>3 : conditions topographiques favorables à l'alimentation en eau : apports latéraux > pertes par drainage (RHY+) (la circulation eau par drainage latéral se ralentit)</p> 	
<p>2 - conditions topographiques entrainant une alimentation en eau équilibrée : pertes nulles ou presque égales aux apports latéraux (RHY0)</p> 	<p>4 : conditions topographiques entrainant une alimentation en eau excédentaire : apports latéraux excédentaires (RHY++)</p> 	<p>5 : conditions d'alimentation en eau très excédentaires</p> 

RHY = réserve hydrique

Profil pédologique

Le profil d'un sol¹, constitué d'une succession d'horizons, peut être étudié sur fosse pédologique ou à l'aide d'un sondage à la tarière pédologique. Une mini-fosse jusqu'à 40 cm minimum, précédant le sondage, est alors utile pour observer l'enracinement, la structure du sol en surface et éventuellement la profondeur d'apparition de la roche sous-jacente sur sols peu épais.

La fosse sera implantée dans une zone homogène et représentative de la station étudiée. La description des racines doit tenir compte des caractéristiques générales des systèmes racinaires : ils se composent le plus souvent d'un compartiment central autour du collet, d'environ 1 à 3 m de rayon, qui comprend l'ensemble des pivots de l'arbre, et d'un compartiment périphérique au-delà, essentiellement formé de racines horizontales superficielles. Selon l'objectif recherché (prospection des horizons, pathologie...), la fosse pourra être positionnée à l'intérieur, en limite ou à l'extérieur du compartiment central d'un arbre.

Le profil peut être décrit avec plus ou moins de précision selon l'objectif de l'analyse, les paragraphes permettant une description plus fine sont précédés du symbole :



¹ Le sol - ou solum dans la nouvelle terminologie - sera décrit en utilisant les notations proposées par A. Brêtes (1993), D. Baise et B. Jabiol (1995) et les qualificatifs du Référentiel Pédologique (AFES, 2008).

Description des horizons

Chaque horizon est décrit séparément avec les indications suivantes (voir dénomination des horizons à la fin de cette annexe page 213).

Profondeur des horizons et transition

Niveau 0 = sol minéral

Notation de la profondeur (en cm)

* exemple: « 0 à 10 »

* si limite irrégulière: « 0 à 35/45 »

* si seule la partie supérieure de l'horizon est observable (roche dure...): [90]

Transition (dans la colonne « profondeur », noter l'épaisseur de la transition en cm)

* transition régulière ou ondulée

	Transition régulière	Transition ondulée
Limite progressive (> 5 cm)	~~~~~
Limite nette (2-5 cm)	_____	~~~~~
Limite brutale (< 2 cm)	=====	~~~~~

* transition irrégulière: sinuosités plus hautes que larges (langues...);

* transition interrompue: horizon en plages ou lentilles discontinues.

Humidité

* **sec**;

* **frais**;

* **humide**: sans eau libre;

* **très humide**: présence d'eau libre, mais porosité non remplie en totalité;

* **gorgé d'eau**: présence d'une nappe.

Couleur

La couleur aide à distinguer et caractériser les horizons, et à interpréter le profil:

* **la roche mère** impose une couleur dominante (blanc ou clair avec les calcaires fins, rouge en présence d'oxydes et d'hydroxydes de fer, très variable avec les argiles...);

* **la matière organique** confère aux horizons organo-minéraux des teintes foncées, grises ou noires;

* **le fer libre** donne la coloration brune (avec des nuances) que l'on observe dans les sols brunifiés; à l'état **oxydé**, il prend une teinte plus rouge dans la gamme des brun, ocre ou rouille; à l'état **réduit**, il colore les horizons en gris-bleuté à gris-verdâtre; la migration du fer (parfois associée à celle de l'argile) entraîne une décoloration de la matrice et l'apparition de taches plus claires que le fond d'origine;

* **la dégradation des minéraux argileux** en milieu très acide (podzolisation) provoque une forte décoloration et donne des horizons blanchis.

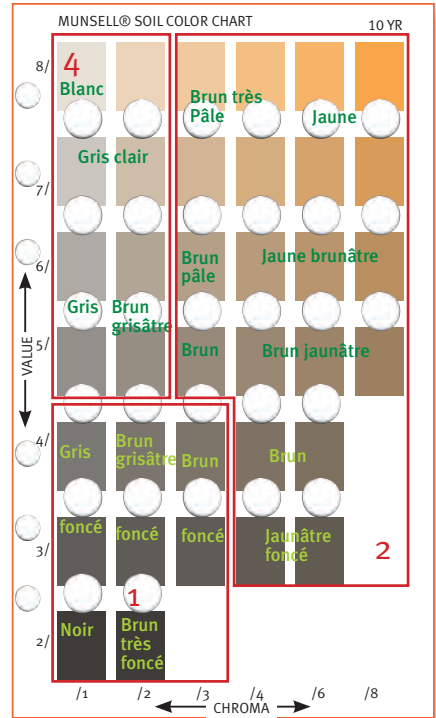
La couleur est utilisée pour décrire la matrice et les taches d'un horizon, en précisant si celui-ci est homogène, tacheté ou bariolé.

On note la couleur (sans réhumidifier la terre) avec les termes suivants (voir un exemple sur une des planches du code Munsell ci-contre) :

- 1 = brun foncé à noir
- 2 = brun, brun-jaunâtre, jaune-brunâtre, brun très pâle
- 3 = blanchâtre, blanc
- 4 = brun-grisâtre, gris, gris clair
- 5 = gris-bleu, gris-verdâtre
- 6 = ocre, rouille
- 7 = bariolé (abondance sensiblement égale de taches d'oxydation et de décoloration)
- 7o si taches ocre dominantes
- 7g si taches grises dominantes
- 8 = tacheté (taches rouille d'oxydation : 20 à 40 %)

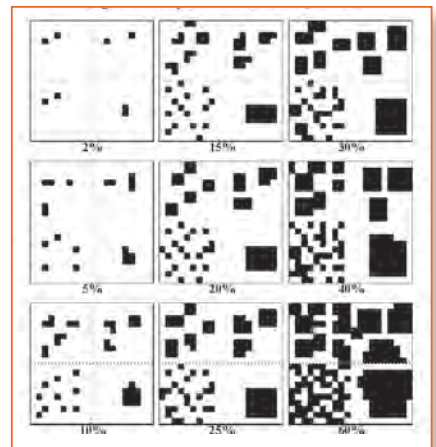


On peut nommer la couleur de manière plus détaillée (par ex. 10 YR 4/6) ou avec les appellations issues des regroupements proposés dans le code Munsell (voir ci-contre pour la planche la plus fréquemment utilisée 10 YR).



Pour chaque horizon, on indique alors le % de recouvrement par couleur à l'aide de la figure ci-contre, en mentionnant la nature de la couleur :

- * non identifiée;
- * **matrice**: couleur en l'absence d'évolution pédologique;
- * **oxydation**: taches d'oxydation ou réoxydation des composés du fer et/ou du manganèse;
- * **décoloration**: taches plus claires que la matrice suite à un départ de fer;
- * **réduction**: taches de fer réduit (gris-vert, gris-bleu) à l'ouverture de la fosse ou dans un horizon gorgé d'eau;
- * **dégradation**: altération du matériau (dans un horizon E de podzol, la partie supérieure de BPh);
- * **matière organique**.



Estimation du % de taches ou d'éléments grossiers dans le sol.

Hydromorphie

Les **horizons rédoxiques** (pseudogley) sont caractérisés par la présence de taches ou de liserés rouille bien visibles et de taches décolorées, plus claires ou grises, parfois moins nettes. Dans les **horizons réductiques** (gley), la prédominance des phénomènes de réduction liés à l'engorgement conduit à des couleurs bleuâtre à verdâtre, voire blanc à gris. Il est essentiel de déterminer l'origine de l'hydromorphie pour différencier les excès d'eau actuels et passés. Un horizon ne sera nommé rédoxique ou réductique que si l'engorgement est actuel. L'importance relative des taches permet de définir l'intensité de l'hydromorphie à l'aide du tableau ci-après.

o	aucune tache rouille ou presque (0 à 2 % : engorgement nul ou faible)
g1	matrice partiellement décolorée avec quelques taches rouille diffuses sur 2 à 15 % (engorgement temporaire → horizon rédoxique)
g2	matrice partiellement décolorée avec taches rouille abondantes > 15 % (engorgement temporaire → horizon rédoxique)
g3	matrice entièrement décolorée avec des taches rouille et grises (engorgement temporaire → horizon rédoxique)
G	gley à couleur homogène bleuâtre à verdâtre, voire blanche à grise, éventuellement avec quelques taches de réoxydation (engorgement permanent → horizon réductique)



L'hydromorphie peut être décrite de manière plus fine à l'aide de la classification ci-dessous, un horizon n'étant nommé rédoxique qu'à partir de la classe 3 (l'excès d'eau étant considéré comme mineur dans les classes 1 et 2).

Classes d'hydromorphie (d'après Grandjean et Jabiol, 1990, modifié par Gonin et Larrieu, 2001)

Décoloration de la matrice absente ou seulement en taches plus ou moins importantes

* aucune tache de décoloration

- sans tache ocre ou rouille : horizon non hydromorphe
- petites taches ocre ou rouille à faible recouvrement (souvent autour des racines)

* décoloration diffuse (par exemple 10 YR 6/3 ou 6/2 ou 7/2)

en taches floues dans une matrice de couleur générale foncée

- moins de 10 % de taches de décoloration (taches ocre ou rouille < 2 %) 2
- 10 à 75 % de taches de décoloration (horizon tricolore à contraste faible) 3
- plus de 75 % de taches de décoloration (taches ocre ou rouille > 15 %) 4

Il ne reste plus de matrice non décolorée (la couleur du fond est gris clair et les seules taches colorées sont des taches ocre ou rouille)

* taches ocre ou rouille d'intensité variable, généralement contrastées et à limites nettes (souvent horizon argileux)

- 35 à 65 % d'ocre ou rouille et 65 à 35 % de gris 5
- % de taches ocre ou rouille très inférieur au % de gris, compris entre 2 et 35 % 6

* taches ocre ou rouille < 2 % ; horizon entièrement décoloré (horizon souvent limoneux ou sableux) 7

engorgement
absent

0

1

2

3

4

engorgement
temporaire =
horizon
rédoxique

5

6

7

H

g

Horizon entièrement gris-bleuté ou gris-verdâtre de réduction

(présence d'eau presque toute l'année)

* quelques taches de réoxydation

* aucune tache de réoxydation

10
10t
10r

engorgement permanent = horizon réductique
G

Texture

La texture est la répartition des éléments de la terre fine (de dimensions < 2 mm) en trois catégories de grosseur : **sable, limon et argile**. Elle détermine la réserve utile en eau, la perméabilité et influe sur la compacité du sol. Elle sera nommée par référence au triangle des textures de Jamagne (voir figure ci-après). En l'absence d'analyse, on peut l'estimer au toucher :

* le sable gratte les doigts ;

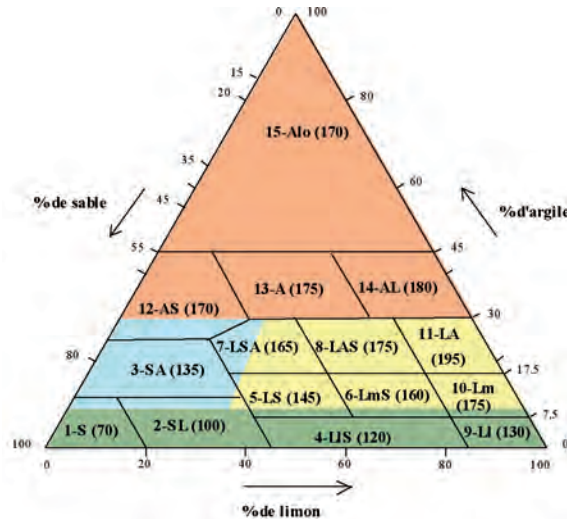
* le limon est pulvérulent à l'état sec, doux au toucher, très fluide à l'état humide ;

* l'argile colle à l'état humide et se travaille comme de la pâte à modeler. Elle forme des blocs durs à l'état sec.

La texture n'est pas toujours facile à estimer sur le terrain. On peut s'entraîner à la reconnaître sur des échantillons analysés en laboratoire (conserver les échantillons pour constituer une « boîte à texture »). On s'attachera à reconnaître les variations de texture qui peuvent expliquer les phénomènes d'hydromorphie (existence de plancher imperméable).

Triangle des textures (Jamagne)

- 1 - S sable
- 2 - SL sable limoneux
- 3 - SA sable argileux
- 4 - LIS limon léger sableux
- 5 - LS limon sableux
- 6 - LmS limon moyen sableux
- 7 - LSA limon sablo-argileux
- 8 - LAS limon argilo-sableux
- 9 - LI limon léger
- 10 - Lm limon moyen
- 11 - LA limon argileux
- 12 - AS argile sableuse
- 13 - A argile
- 14 - AL argile limoneuse
- 15 - Alo argile lourde



Principe de l'abaque granulométrique triangulaire :

À tout point situé à l'intérieur du triangle correspond une proportion définie des 3 éléments : sables, limons, argiles, dont la somme, constante, est égale à 100.

Légende :

N° de la texture - Nom abrégé (réserve utile en mm/m) - Service de cartographie des sols de l'Aisne.

Anneau réalisable (argile > 30 %)	Anneau fissuré à 1/2 de la fermeture
Anneau fissuré à 3/4 de la fermeture	Pas de boudin possible (argile < 10 %)

Cas des textures sableuses : indiquer dominance sables fins ou sables grossiers

Dimension des différents éléments (en mm)

Sable grossier	Sable fin	Limon grossier	Limon fin	Argile
2 à 0,2	0,2 à 0,05	0,05 à 0,02	0,02 à 0,002	< 0,002



La réserve utile maximale (RUM)¹ renseigne sur la quantité d'eau que le sol peut stocker, puis céder aux arbres. L'une des méthodes d'estimation est basée sur les textures et la profondeur utilisable maximale : le Service de cartographie des sols de l'Aisne a calculé la réserve utile maximale pour chaque texture (voir tableau ci-après, extrait de Baize, 1988). La réserve utile est égale à la somme des réserves de chaque horizon jusqu'à la profondeur utilisable maximale (et non forcément utilisée), le pourcentage volumique de cailloux devant être déduit de cette valeur. Le tableau ci-dessous donne des ordres de grandeur de la RUM.

Regroupement des classes texturales (Gonin et Larrieu, 1998)

TEXTURE		Perméabilité	Densité apparente	RUM mm/m	RUM (mm) pour une épaisseur de	
groupe	nom				80 cm	250 cm
très argileuse	Alo	non	1,5	170	136	425
argileuse	A, AS	non	1,5	172,5	138	431
intermédiaire (équilibrée)	LAS, LSA	oui	1,48	170	136	425
limono-argileuse	LA, AL	oui	1,4	187,5	150	468
limoneuse	LmS, Lm, Ll, LIS	oui	1,44	146	117	365
sableuse	SA, LS, SL	oui	1,45	127	102	317
très sableuse	S	oui	1,35	70	56	175

Données issues du Service de cartographie des sols de l'Aisne.

1 Réserve utile maximale (encore appelée "réservoir utilisable maximal" par Baize, 1988) : quantité d'eau utilisable par les plantes contenue dans l'épaisseur du sol. Cette quantité représente le volume du réservoir utilisable maximal et non le volume d'eau effectivement disponible à un instant donné, qui peut être inférieur.

Charge en éléments grossiers – Pierrosité

La charge en éléments grossiers (EG : graviers, cailloux, pierres, blocs), qui conditionne la réserve utile, est relativement délicate à estimer ; on peut s'aider de l'échelle comparative pour l'estimation visuelle des rapports de surface (voir plus haut, page 196).

Rappelons que le pourcentage volumique, obtenu par estimation visuelle et utilisé pour déterminer le réservoir utilisable maximal, est inférieur au pourcentage pondéral donné par l'analyse (le % volumique des éléments grossiers est d'environ 0,6 x le % pondéral).

Les éléments grossiers sont décrits en indiquant **leur proportion** et **leur nature** (distinction calcaire/non calcaire), par catégorie de dimension (voir liste ci-dessous).

	graviers	cailloux	pierres	blocs
Diamètre moyen	0,2 à 2 cm	2 à 7,5 cm	7,5 à 20 cm	> 20 cm



En cas de doute sur la charge en éléments grossiers, on peut la mesurer sur un échantillon de terre en calculant le rapport entre le volume (ou le poids) des éléments grossiers après tamisage à 2 mm et le volume (ou le poids) total.



On peut également préciser la **nature des éléments grossiers** :

- * EG calcaires durs ou à ciment calcaire ;
- * EG calcaires tendres et calcaires marneux ;
- * EG issus de craie ;
- * EG de silex, chailles, meulrières, brèches, poudingues à ciment siliceux
- * EG de quartz ;
- * EG de schistes ou micaschistes ;
- * EG de roches cristallines (granite, gneiss) et roches éruptives acides ;
- * EG de roches éruptives basiques (basalte) ;
- * EG de grès ;
- * EG issus du démantèlement d'horizon induré (alios) ;
- * EG de nature anthropique (brique, ciment) ;
- * EG de nature non définie.



Pour mémoire, le Référentiel Pédologique Français (RPF, après 1997) a défini des classes de charge en éléments grossiers d'où découle la dénomination des horizons :

Charge RPF (en poids)	nulle	faible	moyenne	élevée	très élevée
Proportion	0	< 5 %	5 à 40 %	40 à 60 %	> 60 %

Classification des horizons de référence en fonction de la dimension et de la charge pondérale en éléments grossiers (d'après RPF, 1995)

C + P + B > 60 %	P + B > 40 %	Pierrique (horizon nommé Xp si non stabilisé : éboulis, grave alluviale)
	P + B < 40 %	Cailloutique (horizon nommé Xc si non stabilisé : éboulis, grave alluviale)
C + P + B < 60 %	P > 40 %	Pierreux
	C > 40 %	Caillouteux
	G > 40 %	Graveleux
	G + C + P + B > 40 %	À charge grossière
	G + C + P + B < 40 %	Sans qualificatif particulier

G : graviers ; C : cailloux ; P : pierres ; B : blocs

On appellera "horizon à charge grossière" tout horizon dont la charge est élevée à très élevée (% pondéral supérieur à 40 %).

Structure

Agencement des particules en agrégats, qui influe sur l'aération et la réserve utile du sol. La structure ne s'apprécie correctement que sur fosse, selon la typologie suivante, pour les horizons minéraux et organo-minéraux :

- * **continue ou massive** : absence d'agrégats, mais ensemble cohérent, friable ou induré ;
- * **particulaire** : absence d'agrégats et ensemble non cohérent ; particules libres entre elles, par exemple avec du sable ;
- * **en agrégats anguleux à sub-anguleux** : cet ensemble peut se subdiviser selon la forme des arêtes et l'orientation préférentielle des agrégats :



- **lamellaire** : arêtes nettement anguleuses ; agrégats à orientation préférentielle horizontale ;



- **prismatique** : arêtes anguleuses et vives, faces planes ; agrégats à orientation préférentielle verticale ;



- **polyédrique anguleuse** : arêtes anguleuses et vives, faces planes ; agrégats sans orientation préférentielle ;



- **polyédrique subanguleuse** : arêtes souvent émoussées, formes mal définies, faces + ou - bombées ;



- **grumeleuse** : agrégats à formes nettement arrondies et irrégulières, les agrégats s'emboîtent mal ; généralement observée dans les horizons organo-minéraux.

Compacité

Elle traduit la résistance mécanique du sol, qui dépend notamment de son état d'humidité. On l'apprécie selon la résistance à la pénétration d'un couteau ou de la tarière :

- * **meuble** : pénétration sans effort ;
- * **peu compact** : nécessite un léger effort ;
- * **compact** : pénétration partielle ;
- * **très compact** : impossibilité d'enfoncer le couteau de plus de quelques mm ;
- * **induré, cimenté** : impossibilité totale d'enfoncer le couteau.



Porosité

Volume des vides du sol (en %) ; plusieurs cas sont possibles :

- * **non poreux** : pas de fente ni de pore ;
- * **peu poreux** : volume des fentes et pores < 15 % , matériau tassé et mal structuré ;
- * **poreux** : volume des pores entre 15 et 40 % ; structuration peu développée ; modérément tassé ;
- * **très poreux** : volume des pores > 40 % ; structuration nette, agrégats de taille fine à moyenne ; non tassé.

Présence de calcaire

La présence de calcaire dans la terre fine est décelée par une **effervescence à HCl** (diluée à 10 %) et notée selon la classification suivante :

* effervescence de la terre fine (attention aux cailloux) :

- **brutale** +++++
- **rapide** +++
- **nette, mais lente** ++
- **faible** (à peine visible, mais audible) +

* en l'absence d'effervescence de la terre fine, noter l'effervescence éventuelle sur les sables et les éléments grossiers :

- effervescence des **sables et éléments grossiers** S + EG
- effervescence des **sables** S
- effervescence des **éléments grossiers** EG

Concrétions

Les **concrétions ferro-manganiques** sont présentes dans les horizons rédoxiques et peuvent être un signe d'hydromorphie. Lorsqu'elles sont abondantes, elles peuvent constituer un horizon plus ou moins induré (grop) faisant obstacle à l'enracinement. On notera leur proportion (en %, à l'aide du graphique utilisé pour l'estimation de la charge en éléments grossiers, voir page 196) et on précisera leur localisation dans l'horizon sur le dessin du profil.



On peut aussi noter leur couleur et leur dureté :

- * **tendres** : s'effritent facilement sous les doigts ;
- * **moyennement dures** : pression nette pour les écraser ;
- * **durs** : forte pression pour les écraser ;
- * **très durs** : impossible de les casser avec la main.

Caractères particuliers pour la roche mère

Dans le cas d'une roche dure massive ou +/- fragmentée, on notera le degré de démantèlement de la roche :

- * dure, homogène, non ou peu fissurée ;
- * dure, fissurée en blocs à joints minces (< 5 mm) ;
- * dure, fissurée en blocs à joints larges (> 5 mm) ;
- * tendre, fortement altérée ;
- * fortement fragmentée en petits éléments.

On notera également la disposition des couches géologiques : horizontale, sub-horizontale, oblique ou redressée.

Enracinement

On mentionnera la profondeur prospectable et la nature de la contrainte à l'enracinement :

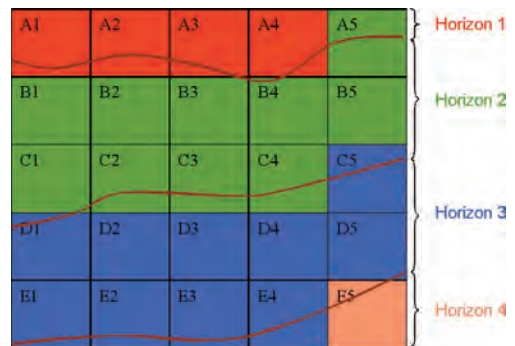
- * dalle ou roche massive ;
- * horizon induré ;
- * horizon compact ;
- * semelle de labour ;
- * forte charge en EG ;
- * nappe temporaire ;
- * nappe permanente ;
- * obstacle chimique (excès de calcaire...).



Comptage des racines sur un profil rafraîchi (méthode IDF : Drénou et Sadjak, 2010) :

* placer une grille d'au moins 50 cm de large sur le profil, divisée en rectangles de 10 x 10 cm, positionnée si possible face à un tronc. Affecter chaque case à l'horizon qui occupe plus de 50 % de sa surface ;

* dans chaque case, compter et localiser toutes les racines en distinguant 3 classes de diamètre : $R \leq 2$ mm ; $2 < R \leq 5$ mm ; $R > 5$ mm, et en indiquant l'état des racines : saines, nécrosées ou mortes ;



* si la fosse est profonde, possibilité d'échantillonner de manière systématique une partie des cases seulement (par ex. 1 colonne/2);

* préciser la profondeur de la dernière racine observée (présence de racines jusqu'au fond de la fosse ou non).

Qualité de la colonisation en racines fines (≤ 2 mm) d'un horizon profond (> 50 cm) selon l'abondance des racines (Baize et Jabiol, 1995)

Densité	Abondance
> 5 racines/dm ²	très importante
3 à 5 racines/dm ²	bonne
1 à 3 racines/dm ²	moyenne
0,5 à 1 racine/dm ²	faible
$< 0,5$ racine/dm ²	très faible

Évaluation du pH sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre colorimètre

Le pH (potentiel hydrogène) a une valeur comprise en général entre 3,5 et 8 dans les sols forestiers. Il est d'autant plus faible que le sol est acide. Voici la classification du Référentiel Pédologique :

pH $< 3,5$	pH 3,5 à 4,2	pH 4,2 à 5,0	pH 5,0 à 6,5	pH 6,5 à 7,5	pH 7,5 à 8,7	pH $> 8,7$
hyper-acide	très acide	acide	faiblement acide	neutre	basique	très basique

Le pH est souvent utilisé en tant qu'indicateur de la fertilité d'un sol, du fait de sa relation avec d'autres paramètres, en particulier avec le **taux de saturation** (proportion de cations nutritifs, Ca⁺⁺ Mg⁺⁺ K⁺ et Na⁺, par rapport à l'ensemble des cations échangeables) : le sol est désaturé (= pauvre en cations nutritifs) s'il est acide et au contraire saturé (= riche en cations nutritifs) s'il est basique. Entre ces deux extrêmes, la relation est cependant moins bonne (voir plus loin "Analyses physico-chimiques").

Le pH est l'une des rares données pédologiques qui peut être mesurée sur le terrain, grâce au pH-mètre colorimètre Hellige. On mesure en général le pH de l'horizon A.

Formes d'humus

La forme d'humus est intéressante à observer car elle influence la croissance des arbres (cycle des nutriments) et reflète les conditions de milieu. Elle est constituée par l'ensemble des horizons supérieurs du sol contenant de la matière organique (horizons O et A).

Horizon entièrement organique

Cet horizon, qualifié également d'holorganique est nommé O (anciennement Aoo et Ao); il est constitué par la litière plus ou moins décomposée. Selon l'état de transformation des débris végétaux, on différencie :

* **l'horizon OL** (L = litière au sens strict), constitué de feuilles et de débris végétaux intacts ou peu modifiés. Trois sous-horizons peuvent être distingués : OLn = végétaux intacts avec présence de feuilles de l'année; OLv = légères modifications, mais faible fragmentation avec présence de feuilles blanchies anciennes, situé sous OLn et reposant sur OF ou A; Olt = fragmentation nette due aux vers de terre, situé sous un éventuel OLn et reposant sur A;

* **l'horizon OF** (F = fragmentation), constitué de résidus végétaux plus ou moins fragmentés mélangés avec de la matière organique fine (10 à 70 %). Deux sous-horizons peuvent être distingués : OFr = matière organique fine peu importante < 30 %; OFm = matière organique fine aussi importante que les débris végétaux;

* **l'horizon OH** (H = humification), contenant une grande quantité de matière organique fine (> 70 %) et très peu de débris identifiables.

Horizon organo-minéral

Cet horizon, qualifié également d'hémiorganique est nommé A (anciennement A1); il est constitué par un mélange de matière organique (débris non reconnaissables) et de matière minérale (au moins 70 %), de couleur plus sombre que les horizons inférieurs, avec une structuration d'origine biologique. Lorsque l'activité biologique est importante, A est bien structuré par l'action des vers de terre (aspect généralement grumeleux). Sinon, sa structuration est moins bonne avec simple juxtaposition de matière organique et minérale.

L'évolution de la matière organique dépend des conditions climatiques, du milieu et de la végétation. Elle conduit à **différentes formes d'humus**, caractérisées par une succession particulière des horizons décrits précédemment.

Mull

Il s'agit d'un humus à bonne activité biologique (vers de terre) assurant une incorporation rapide de la matière organique aux horizons minéraux. L'horizon A est biomacrostructuré et la discontinuité entre O et A est forte. La morphologie de l'humus varie selon l'activité biologique :

* **eumull** : lorsque l'activité biologique est forte, la matière organique est rapidement transformée et incorporée dans le sol (horizons OLn et Olt seuls présents). Les eumulls se forment généralement dans les milieux à pH élevé (pH en A > 6) et taux de saturation élevé (> 80 %), mais ils peuvent exister sur des milieux acides et désaturés si l'activité biologique est importante. Ces milieux sont riches en azote (minéralisation forte) et fertiles, sauf dans les eumulls carbonatés où la faiblesse du taux de minéralisation est en partie compensée par l'importance de la matière organique en A;

* **mésomull et oligomull** : lorsque le milieu est moins favorable à l'activité biologique, la vitesse de décomposition des litières et l'incorporation de la matière organique dans le sol diminuent (apparition d'un OLv sporadique dans le mésomull, continu dans l'oligomull). Ces milieux sont en général plus acides et moins saturés (pH en A entre 5 et 6, taux de saturation entre 30 et 70 % pour le mésomull ; pH < 5 et taux de saturation < 30 % pour l'oligomull), mais ces conditions ne sont pas obligatoires pour conduire à ces humus ;

* **dysmull** : c'est un humus de transition avec les moders ; on note la présence de OF, mais l'horizon A reste biomacrostructuré.

Moder

C'est un humus à faible activité biologique (absence de vers de terre), entraînant une incorporation lente de la matière organique dans les horizons minéraux. La litière, se décomposant moins bien, s'accumule en surface. L'horizon A est un horizon de juxtaposition et le passage entre O et A est progressif. Les moders s'observent en général sur des milieux acides (pH < 5 à 4,5), désaturés, à rapport carbone/azote élevé (C/N = 18 à 25 % en A), à faible taux de minéralisation de l'azote. Ils peuvent également se former en cas de températures basses, de sécheresse ou d'asphyxie. Selon la morphologie de l'humus, on distingue les formations suivantes :

* **hémimoder** : forme de transition entre mull et moder, caractérisée par l'absence de OH ;

* **moder** : forme typique, avec OH mince (moins de 1 cm) ;

* **dysmoder** : forme avec OH épais (plus de 1 cm).

Mor

Il s'agit d'un humus formé dans des conditions très défavorables à toute activité biologique, caractérisé par la présence des horizons OL, OF et OH, et par la transition rapide entre OH et l'horizon sous-jacent.

Amphimus

Anciennement dénommé amphimull, cet humus présente une dualité de fonctionnement, avec un horizon A à forte activité de vers de terre et structure grumeleuse (agrégats de 2 à 5 mm) surmonté d'un horizon O épais (OL + OF + OH) à activité mal connue, à structure granulaire (amas de 1-2 mm maximum), en discontinuité brutale avec A.

Humus hydromorphes

Ils se forment au-dessus d'une nappe temporaire ou permanente remontant jusqu'à la surface du sol :

* **tourbe** : en présence d'une nappe permanente, avec un horizon organique épais (> 30 cm) ;

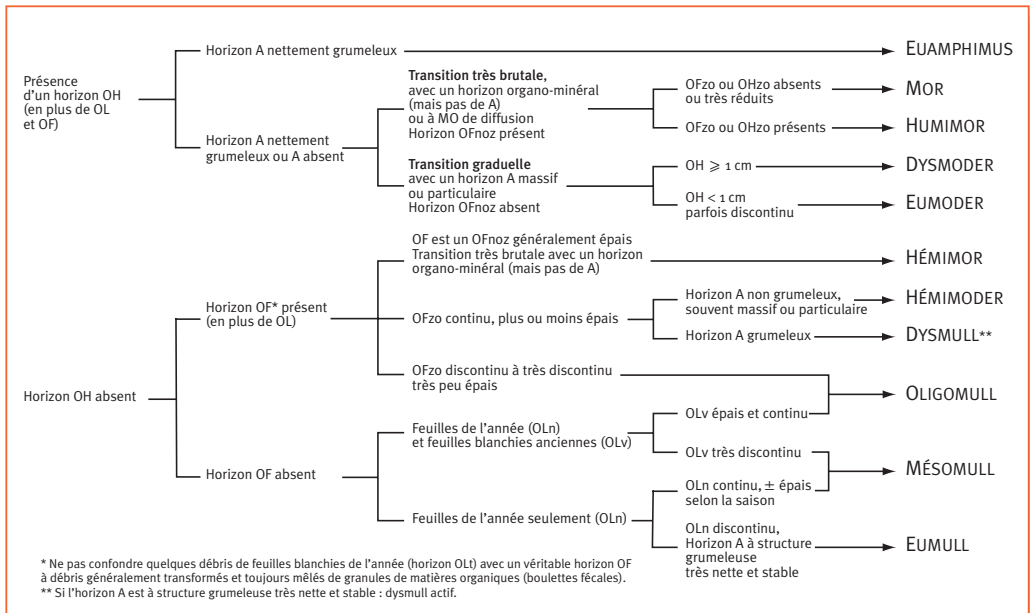
* **anmor** : en présence d'une nappe permanente, mais avec de courtes phases aérées, avec un horizon OL recouvrant un horizon A noir et épais nommé An ;

* **hydromull, hydromoder, hydromor** : formes mixtes dans les milieux très humides, mais aérés.

On indiquera la **forme d'humus** dans les peuplements forestiers, en l'absence de perturbation (travail du sol...), à l'aide de la clé de détermination et de la classification du Référentiel Pédologique (voir tableau ci-dessous). On précisera également les points suivants :

- * **épaisseur et continuité de la litière** : épaisse ou moyennement épaisse ou sporadique (continue ou discontinue);
- * **transition O – A** : brutale ou progressive;
- * **compléments de description** : présence de mycélium reliant les débris végétaux ou de voiles mycéliens les emballant; éléments grossiers; abondance des turricules de vers de terre.

Principales formes d'humus aérés



Analyses physico-chimiques

Paramètres utiles

La description sur le terrain peut être complétée par des analyses physico-chimiques en laboratoire. Celles-ci permettent de préciser certaines caractéristiques du sol et les potentialités de la station. L'interprétation de ces analyses peut être facilitée en utilisant le logiciel ADISHATZ, réalisé par le CRPF Midi-Pyrénées (Delarue et Larrieu, 1999).

Les analyses se concentrent généralement sur la texture et la fertilité chimique du sol, avec la détermination :

- * de la granulométrie en 5 fractions, ainsi que du pourcentage d'éléments grossiers;

- * du pH eau;
- * de la capacité d'échange des cations (CEC ou T);
- * des bases échangeables: Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ et de leur somme (S) en négligeant Na^+ (sauf sur sols sodiques: bord de mer...);
- * du taux de saturation S/T. Ce dernier est un indicateur de la fertilité du sol qui est lié avec les valeurs extrêmes du pH. Par contre, entre pH 4,5 et pH 6, la relation est moins bonne, et donc l'indication du pH est insuffisante et la détermination du taux de saturation devient nécessaire.

Dans quelques cas, l'analyse peut être complétée par la détermination:

- * du carbone organique total (C) dans les horizons A, BPh et E et du taux de matière organique (MO);
- * de l'azote organique total (N) dans l'horizon A. On peut ainsi calculer le rapport C/N;
- * du phosphore assimilable P_2O_5 à deux niveaux: horizons A et S;
- * du calcaire total et du calcaire actif, pour les horizons faisant effervescence à HCl.

Prélèvements

Les prélèvements sont réalisés de préférence sur fosse, au moins pour les horizons supérieurs (0 à 40 cm), éventuellement sur plusieurs faces représentatives de la fosse. On peut poursuivre ensuite le prélèvement à la tarière en évitant de mélanger les horizons (jeter la partie haute de la carotte, bien nettoyer la tarière). On prélève la totalité de la hauteur de l'horizon (valeur moyenne) en excluant les bordures (par exemple, pour 30-90 cm, prendre entre 40 et 80 cm). L'analyse peut porter sur un regroupement de plusieurs sondages (4-5 endroits pour le même horizon et le même type de sol), si on veut une valeur moyenne sur une zone homogène.

Méthodes d'analyse

Les analyses pédologiques effectuées par un laboratoire d'analyse des sols utilisent les méthodes suivantes:

- * **éléments grossiers** (> 2 mm) : exprimé en g/100 g de terre brute séchée à l'air (%);
- * **granulométrie** en 5 fractions, sans décarbonatation, exprimée en %. Le résultat est ensuite distribué en classes granulométriques par référence au triangle des textures de Jamagne;
- * **pH eau et pH KCl** (mol/L).

À titre indicatif, le pH eau peut également être estimé sur le terrain au pHmètre colorimètre Hellige. Il peut aussi être mesuré avec un pHmètre électrique selon le protocole suivant:

- récolte d'un échantillon de terre et séchage à l'air;
- tamisage à 2 mm;
- prise d'essai: 40 g de l'échantillon;
- dilution dans 100 ml d'eau déminéralisée;
- mise en suspension par agitation pendant 1 min, repos durant 12 h;
- mesure avec un pHmètre électrique, effectuée au repos, après une agitation de 1 min;
- * **capacité d'échange des cations** (CEC ou T): méthode Metson (percolation à l'acétate d'ammonium tamponné à pH 7), exprimée en cmol^+/kg ($1 \text{ cmol}^+/\text{kg} = 1 \text{ meq}/100 \text{ g} = 1$ milliéquivalent pour 100 g de terre fine).

En milieu acide (pH < 5,5), il est préférable de déterminer la CEC par la méthode d'extraction au chlorure de cobaltihexammine qui permet une mesure au pH du sol, alors que la méthode Metson mesure la CEC à pH 7,0 (réactif tamponné) ce qui revient à surestimer la CEC sur sol acide;

* **bases échangeables**: Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺ par percolation à l'acétate d'ammonium tamponné à pH 7, exprimées en cmol+/kg (1 cmol+/kg = 1 meq/100 g = 1 milliéquivalent pour 100 g de terre fine). La somme des bases échangeables (S) comprend Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺ (Na⁺ est négligé dans le calcul, car sa valeur est faible hormis sur sols sodiques);

* **taux de saturation**: S/T exprimé en %;

* **calcaire total**: méthode du calcimètre de Bernard, et calcaire actif: méthode Drouineau-Gallet, exprimés en %;

* **carbone organique total (C)**: méthode Anne, exprimé en ‰;

* **taux de matière organique (MO)**, déduit du carbone total: MO = C x 1,72, exprimé en %;

* **azote organique total (N)**: méthode Kjeldahl, exprimé en ‰. On peut ainsi calculer le rapport C/N;

* **phosphore assimilable**: méthode Duchaufour sur sol non calcaire et Joret-Hébert sur sol calcaire, exprimé en ‰.

Synthèse

Outre l'identification du type de sol et de la station, l'ensemble de ces analyses permet d'estimer les niveaux hydrique et trophique, puis de porter un **jugement sur la qualité du sol et ses contraintes**:

- * réserve en eau;
- * fertilité chimique;
- * risque de chlorose;
- * problème d'excès d'eau;
- * contraintes à l'enracinement et profondeur prospectable par les racines;
- * niveau et variations de la nappe permanente.

L'interprétation de ces analyses demande cependant dans la plupart des cas l'appui d'un spécialiste des sols.

Relevé floristique

La végétation peut être décrite et interprétée lorsqu'elle reflète les conditions stationnelles et qu'elle n'a pas subi de perturbation majeure du fait de l'activité humaine.

En forêt, le relevé botanique s'effectue sur une surface homogène de 400 m² (cercle de 11 à 15 m de rayon, mais on peut modifier la forme pour conserver une certaine homogénéité de composition), représentative de la végétation étudiée. Dans le cas de végétation hétérogène avec plusieurs stades dynamiques, décrire si nécessaire chaque stade séparément, quitte à morceler le relevé en plusieurs endroits.

On note toutes les espèces présentes par strate (sauf la strate muscinale), si possible en indiquant leur abondance avec le coefficient d'abondance - dominance (AD) :

- + = individus très peu abondants ; faible recouvrement, inférieur à 5 % ;
- 1 = individus peu abondants à abondants ; recouvrement inférieur à 5 % ;
- 2 = individus abondants à très abondants ; recouvrement entre 5 et 25 % ;
- 3 = individus en nombre variable ; recouvrement entre 25 et 50 % ;
- 4 = individus en nombre variable ; recouvrement entre 50 et 75 % ;
- 5 = individus en nombre variable ; recouvrement supérieur à 75 % .

On individualise généralement les strates suivantes :

* plantes ligneuses :

- strate A1 : arbres de 1^{re} grandeur, > 20 m (arbres dominants) ;
- strate A2 : arbres de 2^e grandeur, < 20 m (arbres dominés, sous-étage) ;
- strate a : arbustes = petits arbres < 7 m, arbrisseaux et sous-arbrisseaux = plantes ligneuses ramifiées à la base ;
- strate s : semis = régénération d'espèces forestières < 50 cm ;

* plantes herbacées : strate h

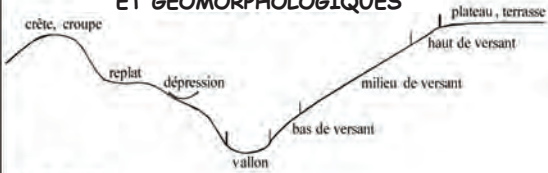

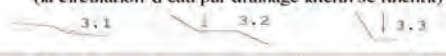
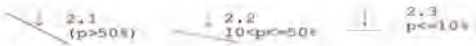
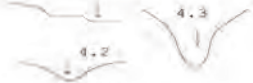

On peut ensuite estimer le niveau trophique et hydrique de la station, soit en se référant à la représentativité des groupes d'espèces indicatrices de la Flore forestière française, soit de manière automatique à l'aide du logiciel ÉCOFLORE élaboré par l'ONF.

Matériel

Liste à adapter aux observations réalisées :

- * fiches de relevés, protocole, cartes IGN et cartes géologiques ;
- * boussole, altimètre, clisimètre ;
- * tarière pédologique, pioche, bêche, marteau de géologue, pHmètre, fiole d'HCl diluée à 10 %, sacs plastiques, couteau, tamis 2 mm et boîte, règle, code Munsell ;
- * Flore forestière française, matériel de détermination botanique (loupe, cutter, pince) ;
- * appareil photo.

Fiche de relevés

FICHE DE DESCRIPTION DES STATIONS	date : _____ relevé n° _____
RÉFÉRENCE ADMINISTRATIVE Département : _____ Commune : _____ Sylvoécocorégion IFN : _____ Forêt, propriété : _____ Parcelle ou lieu-dit : _____ coordonnées GPS / Référentiel : _____	Évènement climatique récent : _____ Réf. Catalogue de station : _____ Type de station : _____ Habitat : actuel = _____ potentiel = _____
PLAN DE LOCALISATION , croquis topo.	RÉFÉRENCES GÉOGRAPHIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES  Plaine, autre : _____ Expo. = _____ Alt. (m) = _____ Pente (%) = _____ Pente opposée (%) = _____ Confinement = 0 - 1 - 2 Forme versant : concave - convexe - plan
RÉGIME HYDRIQUE	
1 - conditions topographiques défavorables à l'alimentation en eau : pertes par drainage > apports latéraux (RHY-)	3 : conditions topographiques favorables à l'alimentation en eau : apports latéraux > pertes par drainage (RHY+) (la circulation d'eau par drainage latéral se ralentit)
	
2 - conditions topographiques entraînant une alimentation en eau équilibrée : pertes nulles ou presque égales aux apports latéraux (RHY0)	4 : conditions topographiques entraînant une alimentation en eau excédentaire : apports latéraux excédentaires (RHY++)
	
5 : conditions d'alimentation en eau très excédentaires	
	
Régime hydrique : submersion périodique - engorgement temporaire - engorgement permanent - profil drainé Cause excès d'eau : pluie - crue - ruissellement - source - imbibition capillaire - nappe temp. / nappe perman. obs. à = _____ cm	
OBSERVATIONS DIVERSES	
Érosion et apport de terre : érosion en nappe / localisée - apport par érosion / ruissellement / alluvionnement Influence humaine et animale : _____	

H
Source : P. Gonin (CNPF-IDF)

GÉOLOGIE - DESCRIPTION DU PROFIL PÉDOLOGIQUE

date :
relevé n° :

Roche sous-jacente (carte géologique) : Réf. carte géol. =
Nature et disposition des couches :

Roche mère, si différente de la roche sous-jacente :
Degré de démantèlement de la roche :

Affleurement rocheux : Nature = Origine = éboulis - blocs isolés - affl. rocheux Importance = % de recouvrement
Type de sol :

Profondeur arrêt tarière par EG / C (cm) Épaisseur prospectable (cm) : Réserve utile maximale = Facteurs limitants et contraintes à l'enracinement :	FORME D'HUMUS * eumull / mésomull / oligomull / dysmull Qualificatifs : carbonaté – calcique * hémimoder / moder / dysmoder autres : * mor * amphimus * hydromull / hydromoder / hydromor / tourbe / anmoor				
pH en A (eau - KCl / labo - pHmètre color.) = Autres pH (eau - KCl / labo - pHmètre color.) = Mode d'observation du profil pédologique : fosse = tarière = Arrêt : volontaire - forcé, cause =	Horizon OL, OF, OH	Épaisseur – continuité	Turri- cules	Transition O - A	Compléments : éléments grossiers – divers...
				brutale / progressive	

Horizon	Prof.	Hum.	Couleurs teinte, %, nature	Hydro- morphie	Texture	Structure	Compacité	Porosité	HCl terre fine	Éléments grossiers %, dimension, nature

Horizon	Prélèvements pour analyse : n° échantillons et prof.	Racines	Concrétions (%, couleur, dureté)	Autres éléments particuliers	Remarques

H

Dénomination des horizons

Les horizons sont généralement numérotés dans l'ordre de leur apparition.

On peut aussi les nommer en utilisant une nomenclature, de préférence la classification du Référentiel Pédologique Français (2008), mais cela suppose d'avoir interprété au préalable les observations réalisées.

Dénomination des principaux horizons selon la classification du Référentiel Pédologique (2008)

Catégorie d'horizon	Code	Description
Horizon organique = litière au sens large	O	Litière plus ou moins décomposée <i>Voir description détaillée dans « Forme d'humus »</i>
Horizon de surface organo-minéral	A	Mélange de matière organique (débris non reconnaissables) et de matière minérale (au moins 70 %), de couleur plus sombre que les horizons inférieurs, avec une structuration d'origine biologique <i>Voir description détaillée dans « Forme d'humus »</i>
Horizons intermédiaires minéraux	S E BT BP : BPh et BPs G	- S : horizon « structural », dont la structure résulte de phénomènes pédologiques d'altération. Souvent brun homogène (par brunification) - E : horizon clair « éluvial » (délavé par lessivage ou podzolisation) - Horizons d'accumulation d'argile (BT) et, dans les horizons podzoliques BP, de manière organique (BPh) ou de fer ferrique (BPs) - G : horizon réductique, hydromorphe = Gley
Horizons profonds minéraux	C R, M et D	- C : matériau parental fragmenté, peu évolué, en cours d'altération - Matériau parental non altéré situé à la base du profil, soit dur (R), soit meuble (M), soit dur et fragmenté, puis déplacé ou transporté (D)

D'après AFES (2008), Baize et Jabiol (1995).

Le code désignant l'horizon peut être suivi d'un suffixe précisant les caractéristiques de l'horizon. Par exemple : ca = calcaire, g = rédoxique, h = horizon plus humifère que la norme...

Un horizon peut également être subdivisé : par exemple S en S1 et S2.

En présence de plusieurs matériaux parentaux, le code est précédé des chiffres romains II, III... Par exemple : A / S / II C / III R

ANNEXE I - EXEMPLE DE FICHE SYNTHÉTIQUE DE PRÉSENTATION ET DE TRAITEMENT DES DONNÉES MESURÉES

FICHE SYNTHÉTIQUE



Espèce Pin laricio de Corse
Code Dr31
Date de correction 15 juillet 2003
Rédacteur Cemagref / Sandrine PERRET

RESPONSABLE :

Cemagref : Groupement de Nogent sur Vernisson
Domaine des Barres
45290 Nogent sur Vernisson
02.38.95.03.30

GESTIONNAIRE :

ONF : UT de Les Bordes - Montargis

COORDONNÉES (système Lambert) : 53,105 gr de latitude Nord
0,230 gr de longitude Est

RÉFÉRENCES CARTE IGN : 2320 ET, Forêt d'Orléans, massif de Lorris

RÉFÉRENCES CARTE MICHELIN : 238 Centre Berry-Nivernais

DÉPARTEMENT : Loiret (45)

COMMUNE : Dampierre en Burly

RÉGION FORESTIÈRE IFN : 452 Orléanais

NOM DE LA FORÊT : FD d'Orléans

NUMÉRO DE PARCELLE : 64

TYPE DE STATION : S13 **RÉFÉRENCES À CATALOGUE :** Autécologie du pin laricio de Corse
dans le secteur ligérien (Cemagref)

FLORE : Acidiphile

TYPE DE SOL : Sol brun acide sur sables profonds et graviers

SUBSTRAT : Argile sableuse à 80-100 cm

ALTITUDE : 144 m

CLIMAT : Océanique altéré

PEUPEMENT : **DATE DE CRÉATION :** Printemps 1978

HISTORIQUE : **ANTÉCÉDENT CULTURAL :** Forestier en remplacement d'une plantation de douglas
(1974)

MODE DE REBOISEMENT : Plantation, densité : 2 500 tiges / ha (2.5 x 1.6 m)

TRAVAUX DE PRÉPARATION : À la charrue landaise

FERTILISATION INITIALE : Néant

MATÉRIEL VÉGÉTAL : Corse Valdoniello
TYPE DE PLANTS : Non connu
TAILLE : Non connue

PRINCIPAUX TRAVAUX D' ENTRETIEN : Dégagement au croissant de 1978 à 1984
Dégagement mécanique de 1979 à 1981

REGARNIS : Automne 1978, 25 % en pin laricio de Calabre
Automne 1979, 13 % en pin laricio de Calabre

DÉPRESSAGES : Néant

ÉCLAIRCIES : Néant

COMMENTAIRES : Forme correcte des arbres

NATURE DE L'EXPÉRIMENTATION : **FACTEUR EXPÉRIMENTÉ :** Dépressage

DATE D'INSTALLATION : Printemps 1987

ÂGE DU PEUPEMENT : 9 ans (depuis la plantation)

NOMBRE DE PLACETTES : 2

LISTE DES MODALITÉS TESTÉES : A : Témoin non dépressé
B : Dépressage ramenant à 800 tiges / ha (systématique 1/3 + sélective)

TAILLE DES PLACETTES : A : 9.72 ares / 36.5 ares (surface de mesures / surface totale isolement compris)
B : 9.52 ares / 34.6 ares

TRAVAUX SUITE À L'INSTALLATION : Printemps 1987, exploitation du dépressage
Printemps 1996, désignation de 200 arbres d'avenir / ha et élagage de 0
à 4.5 m dans les 2 placettes.

TABLES D'EVOLUTION DENDROMETRIQUE :

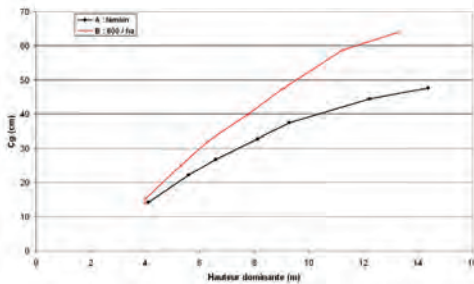
A : Témoin non dépressé

	Après éclaircie					Eclaircie		
	H0	N	G	Cg	S%	N	G	Cg
1986 / 9 ans	4.12	2253	3.63	14.2	54.9			
1988	5.59	2243	8.80	22.2	40.6			
1990	6.59	2191	12.54	16.8	34.8			
1992	8.12	2037	17.72	33.0	29.3			
1994	9.29	2037	22.67	37.4	25.6			
1996	-	2037	27.23	41.0	-			
1998	12.23	2037	31.79	44.3	19.5			
2001 / 24 ans	14.38	2016	36.32	47.6	16.6			

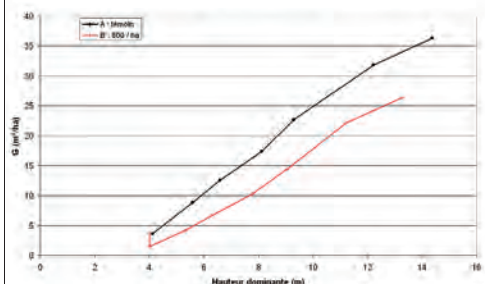
B : 800 tiges / ha

	Après éclaircie					Eclaircie		
	H0	N	G	Cg	S%	N	G	Cg
1986 / 9 ans	4.01	2374	3.65	13.9	55.0			
1986	4.01	830	1.53	15.2	93.0	1544	2.12	13.1
1988	5.33	830	4.18	25.2	69.9			
1990	6.28	819	6.67	32.0	59.8			
1992	7.78	809	10.31	40.0	48.6			
1994	9.04	809	14.41	47.3	41.8			
1996	-	809	18.10	53.0	-			
1998	11.23	809	22.11	58.6	33.6			
2001 / 24 ans	13.27	809	26.31	63.9	28.3			

Évolution de la circonférence de l'arbre moyen



Évolution de la surface terrière



INDICATIONS ECONOMIQUES :

Coût du dépressage : 137 euros /ha (11 heures/homme/ha, observé sur la surface de traitement, coût horaire matériel compris).

ANNEXE J - EXEMPLE DE CONVENTION

CONVENTION D'EXPÉRIMENTATION FORESTIÈRE

Entre Nom de l'organisme forestier :
 Adresse :
 Représentant légal :
 Ci-après désigné par « l'ORGANISME »

Et Nom du propriétaire foncier :
 Adresse :

Ci-après désigné par « le PROPRIÉTAIRE »

1 – Objet de la convention

Cette convention a pour objet de préciser :

- les conditions de réalisation de l'expérimentation ;
- les conditions d'interventions de l'ORGANISME ;
- les implications pour le PROPRIÉTAIRE qui accepte cette expérimentation.

L'installation d'une expérimentation forestière sur une propriété privée permet aux sylviculteurs et à la communauté forestière de parfaire leurs connaissances techniques.

Il est rappelé que cette installation est basée sur un **volontariat** réciproque et donc l'ORGANISME qui installe cette expérimentation, avec l'autorisation expresse du PROPRIÉTAIRE qui a pris connaissance des implications, **ne peut être tenu responsable de l'éventuel échec** de la (ou des) méthode(s)/essence(s) testée(s).

2 – Descriptif de l'expérimentation

A) Objectif de l'expérimentation :

B) Localisation de l'expérimentation (joindre la carte de localisation du dispositif sur carte au 1/25 000 et/ou sur le plan cadastral) :

Département :
 Commune :
 Lieu-dit :
 Forêt :
 Parcelle cadastrale et/ou parcelle forestière :

C) Description des méthodes/essence(s) expérimentées (joindre le plan de l'expérimentation et le protocole d'installation et de suivi) :

.....

D) Surface concernée par l'expérimentation : ha a ca

E) Durée de l'expérimentation : ans

F) Technicien responsable de l'expérimentation :

3 – Engagement de l'ORGANISME

L'ORGANISME s'engage à :

- installer le dispositif au cours de l'année : ;
- prendre en charge les travaux suivants :

Types de travaux (préparation du sol, protection gibier, plantation, entretien, taille, élagage, éclaircies...)	Période prévue (mois/année)
...	...
...	...
...	...

- suivre régulièrement le dispositif (mesures, visites de contrôle, entretien des peintures) ;
- transmettre au propriétaire les fiches synthétiques de résultats des mesures ;
- prévenir le propriétaire avant toute visite et toute réunion technique.

4 – Implications pour le PROPRIÉTAIRE

Le PROPRIÉTAIRE s'engage à :

- prendre en charge les travaux suivants :

Types de travaux (préparation du sol, protection gibier, plantation, entretien, taille, élagage, éclaircies...)	Période prévue (mois/année)
...	...
...	...
...	...

- avertir, en cas d'impossibilité de réalisation des travaux, l'ORGANISME au moins 3 mois à l'avance ;
- ne pas modifier les marquages sur le dispositif et ne pas effectuer de coupes ou travaux non prévus au protocole ;
- permettre la visite du dispositif pour des réunions techniques ; autoriser l'utilisation et la diffusion des résultats issus du dispositif ;
- signaler au technicien responsable de l'expérimentation, 6 mois à l'avance sauf cas de force majeure, toute modification relative à la nature du PROPRIÉTAIRE ou du gestionnaire, ou tout événement exceptionnel pouvant affecter la suite de l'expérimentation.

Les arbres et le bois issu de coupes restent la propriété du PROPRIÉTAIRE. Toutefois, et après accord préalable, voire indemnisation, l'ORGANISME se réserve la possibilité de prélever des échantillons à des fins expérimentales.

5 – Fin de l'expérimentation

En règle générale, l'expérimentation prend fin au terme de la durée inscrite au paragraphe 2 E).

À l'issue de ce délai, l'examen des résultats obtenus peut induire la nécessité de poursuivre l'expérimentation. Dans ce cas, la convention peut-être prolongée par tacite reconduction, ou bien une nouvelle convention devra être signée si des modifications substantielles sont à apporter.

Par ailleurs, si au cours de l'expérimentation, pour des raisons diverses (accidents, raisons personnelles) l'expérimentation ne peut être poursuivie, le PROPRIÉTAIRE et l'ORGANISME doivent convenir par courrier et d'un commun accord de l'abandon du dispositif (avec si possible un préavis d'un an permettant une dernière mesure).

Cette convention engage les ayants droit, usufruitiers et successeurs du PROPRIÉTAIRE ou les nouveaux propriétaires en cas de vente, partage ou division.

Date et signatures précédées de la mention « Lu et approuvé »

ANNEXE K - BIBLIOGRAPHIE

Dendrométrie, dendrochronologie

Bastien Y. et Gauberville C., coordinateurs, 2011. *Vocabulaire Forestier, écologie, gestion et conservation des espaces boisés.* Paris, IDE, 628 p.

Burnel L. et Pélissier C., 2009. *Méthode de préparation d'échantillons de bois feuillus pour utilisation en dendrochronologie.* Les cahiers techniques de l'INRA, 66, pp.5-12.

Duplat P. et Perrotte G., 1981. *Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers.* ONF, Section Technique, 432 p.

Gérémia F. et Nassau A., 2006. *Le point sur le carottage mécanisé d'arbres vivants. Les cahiers techniques de l'INRA.* Méthodes et outils pour l'observation et l'évaluation des milieux forestiers, prairiaux et aquatiques. N° spécial 2006 (http://www.prodinra.inra.fr/prodinra/pinra/data/2010/11/PROD2009a920cfd_20101104034135339.pdf).

Gonin P., 1984. *Une démarche simple pour désigner ou marteler : la méthode des cellules.* Forêt-entreprise n° 20, juin 1984, pp. 26-32.

Payette S. et Fillion L., 2011. *La dendrochronologie : principes, méthodes et application.* Les presses de l'Université Laval, 758 p.

Pardé J., Bouchon J., 1988. *Dendrométrie.* ENGREF, Nancy, 2^e édition, 328 p.

Rondeux J., 1999. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers.* Les presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 521 p.

Réseaux d'expérimentations, protocoles

Angelier A., Héois B., Philippe G., Baldet P., Plas G. ; Matz S., 2006. *Évaluer les variétés forestières résineuses issues de vergers à graines : un outil commun ONF-Cemagref, les réseaux expérimentaux.* Rendez-vous techniques ONF, n° 13, pp. 9-18.

Angelier A., Héois B., Philippe G., Baldet P., Plas G. ; Matz S., 2006. *Évaluer les variétés forestières résineuses issues de vergers à graines : premiers résultats des réseaux expérimentaux ONF-Cemagref.* Rendez-vous techniques ONF n° 14, pp. 51-58

ATVE, 1967. *Comment faire un essai démonstratif d'éclaircie ? Présentation d'un protocole à appliquer pour les peuplements résineux.* BVF n° 67/1, janvier 1967, 16 p.

Bédéneau M., Sindou C., Ruchaud F., Bailly A., Crémère L., 2001. *Un partenariat scientifique original : la coopérative de données sur la croissance des arbres et peuplements forestiers.* Rev. For. Fr. LIII - 2, pp. 171-177.

Chartier M., 2004. *Pôle Expérimentations Forêt Privée Française - Le réseau des plantations de feuillus.* Forêt-entreprise n° 158, p. 45-46.

Décourt N., 1973. *Protocole d'installation et de mesure des placettes de production semi-permanentes.* Doc CNRF (Inra) février 1973, 25 p.

Gastine F., Bouvet A., Deleuze C., Monchaux P. *Le réseau des essais AFOCEL fête ses 40 ans!* Rev. For. Fr. LV 1-2003, pp. 47-56.

GIP-Ecofor. *Catalogue en ligne des sources d'information sur la forêt,* (<http://www.casi.gip-ecofor.org>).

GIS de la coopérative des données sur la croissance des peuplements forestiers, juin 2007. *Protocole d'installation et de mesures du groupe Chênes.* 20 p. et annexes.

GIS de la coopérative des données sur la croissance des peuplements forestiers, janvier 2006. *Protocole d'installation et de mesures pour le groupe Douglas.* 19 p.

GIS de la coopérative des données sur la croissance des peuplements forestiers, mars 2010. *Protocole d'installation et de mesures pour le groupe Pin laricio.* 31 p. et annexes.

GIS de la coopérative des données sur la croissance des peuplements forestiers, janvier 2006. *Protocole d'installation et de mesures pour le groupe Pin maritime.* 56 p.

GIS de la coopérative des données sur la croissance des peuplements forestiers, juillet 2008. *Catalogue des dispositifs du groupe Pin laricio,* 35 p.

ONF, département R & D, Guide pour la mise en place et le suivi d'expérimentations, janvier 1998. 35 p.

Perret S., Ginisty C., 2009. *Jusqu'à où dynamiser la sylviculture du pin sylvestre en région Centre ? Les enseignements issus du réseau expérimental du Cemagref.* Rendez-vous Techniques ONF, n° 23-24, pp. 3-13

Philippe G., Matz S., Curnel Y., Jacques D., Lee S., 2006. *Premiers enseignements d'un réseau européen de plantations comparatives de variétés de mélèze hybride (Larix x eurolepis Henry).* Ingénieries : eau - agriculture - territoires n° 45, pp. 73-86

Pôle Expérimentations Forêt Privée Française, 2003. *Protocole éclaircie et dépressage de plantation résineuse.* Doc. interne, 14 p.

Pro Silva France, 1992. *Protocoles d'installation d'un réseau de placettes expérimentales dans des peuplements irréguliers.* Doc. interne, 25 p. et annexes.

Rosa J., 2003. *Pôle Expérimentations Forêt Privée Française - Dépressages et éclaircies de résineux : premiers résultats.* Forêt-entreprise n° 153, pp. 58-62.

Rosa J., 2003 et 2004. *Pôle Expérimentations Forêt Privée Française - Dépressages et éclaircies de résineux : caractérisation et influence de la fertilité 1^{re} et 2^e partie.* Forêt-entreprise n°154 (p. 55-57) et 155 (p. 57-60).

Rosa J., 2004. *Pôle Expérimentations Forêt Privée Française - Stabilité des peuplements réguliers résineux 1^{re} et 2^e partie*. Forêt-entreprise n°156 (p. 55-57) et 157 (p. 54-57).

Réseau Expérimentations Peuplier de la Forêt Privée Française, 1999. *Les cultivars de peuplier*. 9 Fiches techniques. IDF.

Vidal C., Becquey J., Vernay B., 2005. *La végétation sur le réseau « Reconstitution » de Rhône-Alpes et Auvergne*. Forêt-entreprise n°163, pp. 41-46.

Vidal C., Becquey J., Gonin P., Paillassa E., 2008. *Réseau reconstitution post tempête du Pôle Expérimentation de la Forêt Privée Française*. Forêt-entreprise n°183, pp. 18-23.

Pédologie, stations forestières, analyses de sol

Association française pour l'étude du sol (AFES), 2008. *Référentiel pédologique*. Paris, INRA, 480 p.

Baize D., 1988. *Guide des analyses courantes en pédologie*. Paris, INRA, 172 p.

Baize D., Jabiol B., 1995. *Guide pour la description des sols*. Paris, INRA, 375 p.

Bastien Y. et Gauberville C., coordinateurs, 2011. *Vocabulaire Forestier, écologie, gestion et conservation des espaces boisés*. Paris, IDF, 628 p.

Bonneau M., Souchier B., 1979. *Pédologie : constituants et propriétés du sol*. Paris, Masson, 479 p.

Brêthes A., 1993. *Manuel pour la description simplifiée des sols*. Fontainebleau, ONF, 47 p. + fiches.

Delpech R., Dumé G., Galmiche P., 1985. *Typologie des stations forestières : vocabulaire*. Paris, IDF, 243 p.

Delarue A., Larrieu L., 1999. *Adishatz, aide à l'interprétation des analyses de sol à usage forestier*. Toulouse, CRPF Midi-Pyrénées, oct. 1999, 8 p. + disquette.

Drénou, C. (coord.), 2006. *Les racines, face cachée des arbres*. Paris, IDF, 335 p.

Duchauffour P., 1977. *Pédologie : pédogénèse et classification*. Paris, Masson, 491 p.

Duchauffour P., 1977. *Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement*. Paris, Masson, 5^e édition, 291 p.

Granier A., Bréda N., 2011. *Outils pour raisonner les calculs de flux d'eau et de bilan hydrique à l'échelle du peuplement*. Forêt-entreprise, n° 196, janvier 2011, pp. 22-24.

Granier A., Bréda N., Biron P. & Vilette S., 1999. *A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands*. Ecological Modelling, 116 (2-3), pp. 269-283.

Jabiol B., Brêthes A., Ponge J.-F., Toutain F., Brun J.-J., 1995. *L'humus sous toutes ses formes*. Nancy, ENGREF, 63 p.

Jabiol B., Lévy G., Bonneau M., Brêthes A., 2009. *Comprendre les sols pour mieux gérer les forêts*. Éditions d'Agro-ParisTech ENGREF Nancy, 2009, 624 p.

Larrieu L., 1998. *Les analyses de sol pour la forêt. Éléments de méthodologie et interprétation*. Toulouse, CRPF Midi-Pyrénées, 39 p.

ONF R & D, 2000. *Logiciel ECOFLORE Rev. For. Fr. LII-6, pp. 530-547*. Pour obtenir le CD d'installation, contacter département R & D de l'ONF à Fontainebleau.

Rameau J.-C., Mansion D., Dumé G., 1989. *Flore forestière française, guide écologique illustré, Tome 1 - Plaines et collines*. Paris, IDF, 1785 p. (voir également Tome 2 - Montagnes et Tome 3 - Région méditerranéenne).

Climatologie, météorologie

Babillot P., Gillet M., 2007. *Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique*. Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durable - Observatoire national des effets du réchauffement climatique (ONERC). La Documentation Française, 95 p.

Badeau V., Ulrich E., 2008. *RENECOFOR - Étude critique de faisabilité sur la comparabilité des données météorologiques RENECOFOR avec celles de Météo-France*; l'estimation de la réserve utile du sol et le calcul des volumes d'eau drainée. ONF, Département des Recherches Techniques, 108 p. + 166 p. d'annexes.

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. (www.worldclim.org/worldclim_IJC.pdf).

Kessler J. et Chambraud A., 1990. *Météo de la France. Tous les climats, localité par localité*. Jean-Claude Lattès, 391p.

Météo-France, 1986. *Atlas climatique de la France*. Édition réduite, Paris, 30 p.

Météo-France, 1996. *Normales Climatologiques*. Division Climatologie et banques de données, Toulouse, 467p.

Météo-France, 2009. *Statistiques climatiques de la France, 1971-2000*. Direction de la climatologie, Toulouse, 288 p.

Moisselin J.-M. et al., 2002. *Les changements climatiques en France au XX^e siècle*. Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. La météorologie n° 38, pp. 45-56.

Moisselin J.-M., Dubuisson B., 2006. *Évolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XX^e siècle en France*. La météorologie n° 54, p. 33-42.

Peiffer M., Badeau V., Bréda N., Ulrich E., 2008. *RENECOFOR - Suivi de la météorologie forestière locale*. Bilan de la période 1995-2004. ONF, Département des Recherches Techniques, 313 p.

Changement climatique : impact sur les forêts

Aussenac G., Guehl J.-M., Hoff C., Rambal S., 2000. *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e siècle, extraits : impacts sur la forêt et la sylviculture*. Édition Ministère de l'Environnement, 25 p.

Badeau V., Dupouey J.-L., 2007. *Quelles forêts en France en 2100?* Édition Arboria, 5 p.

Bourgau J.-M., Lerat J.-F., Cailmail F., 2007. *Adaptation de la gestion des forêts au changement climatique*. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, CGAAER. Mission n° 1 223, 56 p.

Bréda N., Granier A., Aussenac G., 2004. *La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers*. Rev. For. Fr. LVI, n° 2, pp. 109-131.

ENGREF, 2000. *Conséquence des changements climatiques pour la forêt et la sylviculture*. Rev. For. Fr. LII, numéro spécial 2000. 175 p.

Gauberville C., Riou-Nivert P., 2008. *Forêt et changement climatique : les attentes des sylviculteurs privés*. Forêt méditerranéenne Tome XXIX, n° 2. Numéro spécial « Changements climatiques et forêt méditerranéenne », pp. 235-242.

Gauquelin X. (coord.), 2010. *Des forêts en crise sanitaire, guide de gestion*. ONF IDF, 96 p.

GIEC, 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)*, 103 p.

Landeau S., Maurice D., 2006. *Surveillance et évaluation des effets de la sécheresse et de la canicule sur le court, moyen et long terme : les outils disponibles*. Mieux utiliser les dispositifs de terrain grâce aux possibilités offertes par les systèmes d'information. Dossier expertise sécheresse et canicule 2003. Rendez-vous Techniques de l'ONF n° 11, pp. 19-23.

Lebourgeois F., Granier A., Bréda N., 2001. *Une analyse des changements climatiques en France entre 1956 et 1997*. Réflexions en termes de conséquences pour les écosystèmes forestiers. Annals of Forest Science, vol. 58, n° 7, pp. 733-754.

Loustau D., 2007. *Changement climatique : une simulation du comportement des forêts [Quelques résultats du projet Carbofor]*. Presse Info, Inra n° 290, 2 p.

Nageleisen L.-M., Piou D., Saintonge F.-X., Riou-Nivert P., 2010. *La Santé des Forêts*. Paris, IDF, 608 p.

ONF, 2007. *Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques*. Rendez-Vous Techniques de l'ONF, Hors série n° 3, 102 p.

Perrier C., 2009. *AFORCE, un réseau mixte technologique sur l'adaptation des forêts face au changement climatique*. Forêt-entreprise n° 186, p 59-63.

Riou-Nivert P., 2007. *Le changement climatique, mythe ou réalité?* Bulletin de la Société forestière de Franche-Comté, n° 6, pp. 321-366.

Riou-Nivert P., Moussu C., 2007. *Réchauffement climatique - Le changement climatique et la forêt : une réalité*. Forêt de France n° 509, pp. 17-22.

Riou-Nivert P., 2005. *La forêt face aux changements climatiques*. Forêt-entreprise n° 162 – Dossier, pp. 11-53.

Riou-Nivert P., 2008. *Changement climatique : préparer l'avenir*. Forêt-entreprise n° 182 - Dossier, pp. 18-48.

Riou-Nivert P., 2008. *Changement climatique : questions des sylviculteurs et réponses des chercheurs*. Forêt-entreprise n° 180, pp. 14-29 et 182, pp. 19-29.

Roman-Amat B., 2007. *Préparer les forêts françaises au changement climatique*. Rapport à MM. les Ministres de l'Agriculture de la Pêche et de l'Écologie, du Développement et l'Aménagement Durables, 125 p.

Changement climatique et gestion sylvicole

Aussenac G., Guehl J.-M., 2006. *Impacts sur la forêt et la sylviculture du changement climatique*. Édition Inra, 7 p.

Becker M., Le Tacon F., Lévy G., 1994. *Conjonction des facteurs naturels et des pratiques sylvicoles dans le dysfonctionnement des écosystèmes forestiers*. Rev. For. Fr XLVI 5 - Numéro spécial « Les dépérissements d'arbres forestiers. Causes connues et inconnues », pp. 572-578.

Cordonnier T., Gosselin F., 2009. *La gestion forestière adaptative : intégrer l'acquisition de connaissances parmi les objectifs de gestion*. Rev. For. Fr. LXI, n° 2, p 131-144.

ENGREF, 2007. *Session 4 : Vers une gestion adaptative. Face aux changements environnementaux, sociétaux, économiques, quelle gestion, quelle recherche pour la forêt de demain?* Ecoforum des 5 et 6 décembre 2006. Rev. For. Fr. LIX, N° 3, pp. 271-289.

Étienne M., 2006. *Stratégie de gestion adaptative. S'appuyer sur des incertitudes*. Espaces Naturels n° 15 - Dossier Changement climatique et Biodiversité, p. 21.

Estiarte M., Rutishauser T., Ogaya R., 2010. *Intégration des effets du changement climatique sur les forêts méditerranéennes : observation, expérimentation, modélisation et gestion*. Forêt Méditerranéenne T. XXXI, n° 4. pp. 351-356.

Legay M., Ladier J., 2008. *La gestion forestière face aux changements climatiques : premières orientations d'adaptation en forêt publique*. Le cas des forêts méditerranéennes. Forêt méditerranéenne Tome XXIX, n° 2- Numéro spécial « Changements climatiques et forêt méditerranéenne », pp. 221-234.

Legay M., Mortier F., 2006. *La forêt face au changement climatique – Adapter la gestion forestière*. Synthèse de l'atelier ONF/INRA du 20 octobre 2005. Les Dossiers forestiers N°16, 2^e édition. 39 p.

Legay M., Bréda N., Dupouey J.-L., 2006. *Gestion sylvicole, quels comportements adopter?* Espaces Naturels n° 15 - Dossier Changement climatique et Biodiversité, pp. 23-24.

Legay M., Mortier F., Mengin-Lecreulx P., Cordonnier T., 2007. *La forêt face au changement climatique : adapter la gestion forestière*. Silva Belgica n° 6, pp. 20-27.

Legay M., Mortier F., Mengin-Lecreulx P., Cordonnier T., 2008. *La gestion forestière face aux changements climatiques: tirons les premiers enseignements*. Forêt Wallonne n° 96, pp. 16-27.

Penuelas J., Gracia C., Alistair Jump I.F., Carnicer J., Coll M., Lloret F., Yuste J.C., Estiarte M., Rutishauser T. & Ogaya R., 2010. *Intégration des effets du changement climatique sur les forêts méditerranéennes: observation, expérimentation, modélisation et gestion*. Forêt Méditerranéenne T. XXXI, n° 4, pp. 351-356.

Phénologie

Chuine I., 2005. *Un réseau d'observatoires phénologiques pour la gestion du changement climatique*. Colloque « De l'observation des écosystèmes forestiers à l'information sur la forêt » à Paris, les 2 et 3 février 2005. www.symposcience.org., pp. 49-58.

Lebourgeois F., Cecchini S., Godfroy P., Lanier M., Pierrat J.-C. 2006. *Phénologie des peuplements du réseau RENECOFOR: variabilité entre espèces et dans l'espace, et déterminisme climatique*. Rendez-Vous Techniques de l'ONF n° 13, pp. 23-26.

Lebourgeois F., Chuine I., Ulrich E., 2006. *Observations phénologiques des arbres forestiers: concepts, intérêts et problématiques actuelles*. Rendez-Vous Techniques de l'ONF n° 13, pp. 19-22.

ONF, 2009. *Manuel de référence N 12 pour les observations phénologiques – Placettes des niveaux A et B (réseau RENE-COFOR)*. Département Recherche et Développement, février 2009. 27 p.

Génétique

Balsemin E., Collin E., 2004. *Conservation in situ des ressources génétiques des arbres forestiers en France métropolitaine*. Ingénieries N°40, pp. 51-60.

Collin E., 2010. *Conservation de la biodiversité intra-spécifique des arbres forestiers en France et en Europe*. Sciences, Eau et Territoires, n° 3, pp. 28-33.

Commission Ressources Génétiques Forestières (CRGF), 2008. *Préserver et utiliser la diversité des ressources génétiques forestières pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique*. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, DGPAAT, Sous-direction de la Forêt et du Bois, 4 p.

Ducouso A., 2010. *Les ressources génétiques des arbres face aux changements climatiques: les différentes réponses*. Rendez-Vous Techniques de l'ONF, Hors-série n° 5, p 66-72.

Kremer A., 1994. *Diversité génétique et variabilité des caractères phénotypiques chez les arbres forestiers*. Genet Sel Evol n° 26, Suppl 1, pp. 105-123.

Legay M., Riou-Nivert P., Le Boulter H., Badeau V., 2011. *Le changement climatique relance la question de l'introduction d'espèces en forêt*. Groupe d'histoire des Forêts Françaises (à paraître).

Musch B., Valadon A., Oddou-Muratorio S., 2004. *À propos de génétique des populations...* Rendez-Vous Techniques de l'ONF, Hors-série n° 1, pp. 7-15.

ONF, 2004. *Diversité génétique des arbres forestiers: un enjeu de gestion ordinaire*. Rendez-Vous Techniques de l'ONF, Hors-série n° 1. 130 p.

Poncelet J., 2007. *Reboisements préventifs face aux mutations climatiques*. Exemples d'essences plus résistantes. Forêt Privée n° 296, pp. 26-32.

Rérat B., 2006. *Essences de reboisement et changement climatique*. Forêt Privée n° 291, pp 23-24.

Rousselet C., Bilger I., Héois B., Ginisty C., 2003. *Conseils d'utilisation des matériels forestiers de reproduction: régions de provenance, variétés améliorées*. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de la Pêche et des Affaires Rurales. Paris. 174 p.

Valadon A. et Musch B., 2007. *Rôle et influence de la gestion forestière sur la diversité génétique*. Rendez-Vous Techniques de l'ONF N°16, p 34-37.

Valadon A., 2009. *Effets des interventions sylvicoles sur la diversité génétique des arbres forestiers: analyse bibliographique*. Coll. « Les dossiers forestiers », n° 21. Fontainebleau: ONF. 157 p.

Vennetier M., Collin É., 2008. *Changement climatique, forêts et matériels de reproduction*. Sinfotech – Les fiches Savoir-faire. Édition Cemagref. 4 p.

Statistiques

CISIA – CERESTA, 1999. *Aide-mémoire statistique*. 285 p.

Dagnelie P., 2003. *Principes d'expérimentation: planification des expériences et analyse de leurs résultats*. Gembloux, Presses agronomiques, et édition électronique, (www.dagnelie.be), 397 p.

Dagnelie P., 2007. *Statistique théorique et appliquée. Tome 1. Statistique descriptive et bases de l'inférence statistique*. Bruxelles, De Boeck, 511 p.

Dagnelie P., 2011. *Statistique théorique et appliquée. Tome 2. Inférence statistique à une et à deux dimensions*. Bruxelles, De Boeck, 736 p.

Jayaraman K., 1999. *Manuel de statistiques pour la recherche forestière*. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 235 p.

Philippeau G., 1984. *Puissance d'une expérience*. Service des études statistiques de l'ITCF, 19 p.

Philippeau G., 1989. *Théorie des plans d'expérience: application à l'agronomie*. Service des études statistiques de l'ITCF, 205 p.

Saporta G., 1990. *Probabilités, analyses des données et statistique*. Édition Technip, 493 p.

Vessereau A., 1988. *Méthodes statistiques en biologie et en agronomie*. J.-B. Baillière, 2^e édition, 538 p.

Liste des sigles et acronymes

AFES : Association française pour l'étude des sols

AgroParisTech : Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (nom officiel)

AURELHY : analyse utilisant le relief pour l'hydro-météorologie

BBCH : Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und chemische Industrie

BILJOU[®] : bilan hydrique journalier

Ca-SIF : Catalogue des sources d'information sur la forêt

Cemagref : Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts

Cg : circonférence quadratique moyenne (= circonférence de l'arbre moyen)

Co : circonférence dominante

CGAF : Conservatoire génétique des arbres forestiers

Cirad : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CNPF : Centre national de la propriété forestière

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

CPFA : Centre de productivité et d'action forestière d'Aquitaine

CRU : Climatic research unit

CRPF : Centre régional de la propriété forestière

DEPEFEU : dépérissement des feuillus

DJU : degrés jours unifiés

Draaf : Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt

DSF : Département de la santé des forêts

Engref : École nationale du génie rural, des eaux et des forêts

ETo : évapotranspiration potentielle de référence

ETP : équivalent temps plein ou évapotranspiration potentielle

ETR : évapotranspiration réelle

FCBA : Forêt, Cellulose, Bois-construction, Ameublement

G : surface terrière du peuplement

GDR SIP-GECC : Groupement de recherche « Système d'information phénologique pour la gestion et l'étude des changements climatiques »

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GIP Ecofor : Groupement d'intérêt public « Écosystèmes forestiers »

GIS Coop : Groupement d'intérêt scientifique « Coopératives de données sur la croissance des peuplements forestiers »

GPS : Global positioning system (« système de positionnement mondial »)

Hbo : hauteur bois d'œuvre

Hbf : hauteur bois fort

Hg : hauteur moyenne

Ho : hauteur dominante

Ht ou Htot : hauteur totale

ICg : accroissement en circonférence de l'arbre moyen

ICO : accroissement en circonférence de l'arbre dominant

IDF : Institut pour le développement forestier

IFN : Inventaire forestier national

IG : accroissement en surface terrière

IGN : Institut géographique national

INRA : Institut national de la recherche agronomique

N : densité des tiges (nombre de tiges/hectare)

ONF : Office national des forêts

pH : potentiel hydrogène

P : précipitations

PAR : rayonnement photosynthétiquement actif

PEFPF : Pôle expérimentations forêt privée française

RENECOFOR : Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers

RMT Aforce : Réseau mixte technologique « Adaptation des forêts au changement climatique »

RU : réserve utile

RUM : réserve utile maximale

RHY : réserve hydrique

S% : facteur d'espacement entre les tiges

SATMOS : Service d'archivage et de traitement météorologique des observations satellitaires

SIGECO : système d'information géographique écologique

Mettre en place une expérimentation en forêt ne s'improvise pas. Les embûches sont multiples et les échecs sur le long terme fréquents. Le défi du changement climatique et les nombreuses questions qu'il pose au forestier relance l'intérêt pour l'expérimentation. Les conditions économiques, toujours plus tendues, impliquent cependant d'éviter tout gaspillage de temps, d'énergie et de moyens.

Ce guide arrive donc à point pour aider l'expérimentateur à faire face au mieux à ce nouveau contexte qui impose un gain d'efficacité et une harmonisation des méthodes entre organismes. Il satisfera aussi les enseignants, étudiants, gestionnaires et tous ceux qui s'interrogent sur la façon d'analyser le fonctionnement d'un peuplement forestier.

- **Le premier chapitre** met le doigt sur les écueils à éviter dans la démarche expérimentale. À travers un plan simple et clair, il suit pas à pas le déroulement d'un essai depuis l'installation jusqu'au traitement des données. Il fournit des bases scientifiques solides au technicien de terrain qui recherche rigueur et fiabilité.

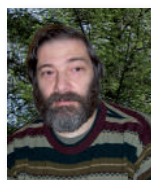
- **Le deuxième chapitre**, novateur, identifie les variables à mesurer pour appréhender les effets du changement climatique. Il met en avant les éléments fondamentaux que sont le matériel végétal, le climat, le sol, les problèmes sanitaires...

- **Le troisième chapitre** propose des approches expérimentales en lien avec le problème du changement climatique, afin d'étudier des potentialités d'essences nouvelles, des gestions de peuplements déperissants ou à risque, des choix d'itinéraires sylvicoles adaptatifs.

Exemples et modèles pratiques, conseils concrets, détails des calculs, bases statistiques... Tout ce qui touche à l'expérimentation forestière est méticuleusement passé en revue dans cet ouvrage à la fois synthétique et complet. Les auteurs se sont par ailleurs entourés des meilleurs spécialistes qui ont apporté leurs compétences, chacun dans leur domaine.



Jérôme Rosa, technicien au CRPF Île-de-France-Centre, est chargé du suivi des placettes expérimentales et est le correspondant national des questions relatives au changement climatique dans ces deux régions. Il a acquis une solide expérience de terrain au contact des chercheurs et des expérimentateurs à l'IDF, puis des gestionnaires et des propriétaires au CRPF.



Philippe Riou-Nivert, ingénieur CNPF-IDF, spécialiste des résineux, est un des pionniers de l'expérimentation forestière et est en charge au niveau national des questions liées au changement climatique. L'initiative de cet ouvrage est à mettre à son actif. Il est l'auteur du manuel « Les résineux » (T1 : connaissance et reconnaissance ; T2 : écologie et pathologie) et coauteur des manuels « Le mélèze » et « La santé des forêts ». On lui doit près de trois cents articles de vulgarisation dans les revues forestières.



Éric Paillassa, ingénieur CNPF-IDF, est responsable du service Expérimentations du CNPF et coordinateur du Pôle Expérimentations Forêt Privée Française. Il a la charge de la base de données ILEX qui rationalise, harmonise et valorise des milliers de références forestières réparties sur le territoire. Spécialiste national du peuplier, il anime entre autres un réseau spécifique d'expérimentations et un groupe de travail sur cette essence. Par ailleurs, il est impliqué dans un réseau européen d'arboretums pour l'adaptation des ressources forestières au changement climatique.