



Institut National de la Recherche Agronomique

Analyse du bilan hydrique et de la croissance des arbres
dans le Réseau National de Suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers
(RENECOFOR)

François Lebourgeois

INRA-Centre de Recherches Forestières de Nancy
Unité d'Ecophysiologie Forestière – Equipe Bioclimatologie
F-54280 Champenoux *

Programme soutenu financièrement par :

- Union Européenne, DG VI, projet n°9760FR0030, **rapport final**
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Pêche
- Institut National de la Recherche Agronomique, Département des Recherches Forestières
- Office National des Forêts

* depuis Septembre 1999

Laboratoire Ecosystèmes Forestiers et Dynamique du Paysage

ENGREF, 14 rue Girardet

54042 Nancy Cedex

Tél : + 33 (3) 83 39 68 74

Fax : + 33 (3) 83 39 40 22

email : lebourgeois@engref.fr

SOMMAIRE

Résumé

Liste des Figures

Liste des Tableaux

I. INTRODUCTION	1
II. MATERIEL ET METHODES	2
1 Sélection des sites et des stations météorologiques	2
2 Mesures et caractérisation des séries chronologiques	3
2.1 Mesures des accroissements radiaux	3
2.2 Largeur moyenne, écart type et coefficient de variation	4
2.3 Sensibilité moyenne (SM), coefficient d'interdatation (SR) et autocorrélation (AC)	4
2.4 Transformation des accroissements annuels en surfaces	5
2.5 Standardisation des accroissements annuels : modélisation ARMA	5
3 Organisation des données météorologiques	7
3.1 Estimation des données manquantes	7
3.2 Calcul des moyennes mensuelles	7
3.3 Modèle du bilan hydrique	8
3.3.1 Description du modèle	8
3.3.2 Principe du calcul du stress hydrique	10
3.3.3 Définitions des fichiers de paramètres stationnels par placette	11
3.3.3.1. <i>Les observations phénologiques</i>	11
3.3.3.2. <i>Indices de surfaces foliaires (Leaf Area Index) et coefficient d'extinction k</i>	17
3.3.3.3. <i>Coefficients de transpiration à LAI saturant et seuils d'interception des pluies</i>	18
3.3.3.4. <i>Reserve utile maximale en eau du sol</i>	18
4 Analyses des relations cerne – climat	21
4.1 Les années caractéristiques	21
4.1.1 Objectifs	21
4.1.2 Définition des années caractéristiques	21
4.1.3 Calcul	22
4.2 Les fonctions de réponse : la procédure « bootstrap »	22
4.3 Les outils statistiques utilisés	24

III. RESULTATS	25
5 Caractéristiques des peuplements et des séries chronologiques	25
6 Modélisation ARMA	27
6.1 Analyse globale	27
6.2 Etude de l'effet espèce	27
6.3 Conclusions	29
7 Déficit de réserve en eau des peuplements	31
7.1 Analyse globale	31
7.2 Analyse par espèce	33
7.2.1 Les placettes de chênes	33
7.2.2 Les placettes de hêtre	34
7.2.3 Les placettes de sapin pectiné et d'épicéa commun	36
7.3 Conclusions	37
8 Dérives climatiques à moyen terme	39
8.1 Analyse des paramètres élémentaires	39
8.1.1 Les précipitations	39
8.1.2 Les températures	40
8.1.3 Les gelées	41
8.1.4 L'ETP	41
8.1.5 La durée d'insolation	41
8.1.6 Les 28 stations de référence « ETP »	41
8.1.7 Conclusions	42
8.2 Effet des changements climatiques sur le bilan hydrique	44
8.2.1 Evolution temporelle des déficits de réserve des 41 peuplements	44
8.2.2 Evolution régionale des déficits	45
8.2.3 Effet sur le cycle phénologique	45
8.2.3.1. <i>Sur l'ensemble des périodes disponibles (1949-1997 et 1956-1997)</i>	45
8.2.3.2. <i>Sur la période 1988-1997</i>	45
8.2.3.3. <i>Sur les années à forts déficits de réserve (période 1988-1997)</i>	46
9 Années caractéristiques	47
9.1 Effets du compartiment anatomique (bois initial, bois final et cerne complet) et de l'unité d'expression du cerne (mm et cm ²)	47
9.2 Relation avec la sensibilité moyenne (SMi) des séries chronologiques	47
9.3 Relation avec la réserve utile maximale en eau du sol (RUM)	48
9.4 Variabilité inter-espèces et inter-régions	48
9.4.1 Fréquence des années caractéristiques	49
9.4.2 Analyse globale des effets espèce et région	50
9.4.2.1. <i>Interprétation du premier axe (6.07% de la variance totale)</i>	50
9.4.2.2. <i>Interprétation du deuxième axe (5.57% de la variance totale)</i>	50
9.4.2.3. <i>Interprétation des axes 3 et 4 (5.41% et 5.0% de la variance totale)</i>	51
9.4.2.4. <i>Conclusions partielles</i>	51
9.4.3 Analyses discriminantes des effets espèce et région	52

9.4.3.1. <i>Etude de l'effet espèce</i>	53
9.4.3.2. <i>Etude de l'effet région</i>	55
9.4.3.3. <i>Décomposition de la variance des effets espèce et région</i>	56
10 Analyse des relations cerne-climat	57
10.1 Déterminisme des années caractéristiques	57
10.2 Croissance moyenne et indices de déficit de réserve	57
10.2.1 Corrélations avec les indices annuels de déficit	57
10.2.2 Corrélations avec les indices mensuels de déficit et les températures	57
a. <i>Indices mensuels de déficit</i>	57
b. <i>Températures mensuelles</i>	58
a. <i>Indices de déficit et températures mensuels</i>	60
10.2.3 Régionalisation des fonctions de réponse	60
10.3 Comparaison des approches mensuelle (P et T) et journalière (indices de déficit de réserve)	62
10.4 Conclusions	62
IV. DISCUSSION ET CONCLUSIONS	64
V. BIBLIOGRAPHIE	66

Résumé

L'objectif de cette étude était de quantifier les niveaux de contraintes hydriques subies par 41 peuplements du réseau RENECOFOR (15 hêtraies, 15 chênaies, 6 pessières et 5 sapinières) et d'évaluer leur rôle dans les variations inter-annuelles de croissance radiale des 1219 arbres correspondants. Les contraintes hydriques liées aux différents contextes pédo-climatiques des sites étudiés ont été quantifiées par modélisation mécaniste de bilan hydrique journalier (Granier *et al.* 1999) paramétré pour chaque placette (réserve utile, RU ; indice foliaire, LAI). Un indice de stress caractérisant la durée et l'intensité du déficit hydrique, défini par rapport au seuil de régulation de la transpiration de $0.4 \times RU$, a été calculé pour chaque année et chaque peuplement (Bréda 1999).

Les données journalières de 68 stations météorologiques du réseau Météo-France ont été utilisées comme variables climatiques d'entrée du modèle. Ces données ont permis de caractériser les conditions climatiques locales moyennes de croissance des arbres et de quantifier les niveaux annuels et mensuels de déficit hydrique. L'analyse des données climatiques a révélé une nette augmentation des températures depuis 40 à 50 ans variant de 1 à 2°C selon la station, le paramètre (T_{\min} , T_{\max} , T_{moy}) et la période considérés. Les précipitations et la durée d'insolation ont moins varié et aucune tendance générale n'a été observée. Il n'est pas apparu de liaisons directes simples entre le réchauffement et les variations de la durée d'insolation et le régime pluviométrique. Pour 7 des 41 peuplements, ces variations climatiques ont aggravé les niveaux de stress depuis 10 à 15 ans.

La variabilité de la réserve utile, de l'indice foliaire et de la pluviométrie entre placettes interagissent de manière complexe sur le bilan hydrique des sols, mais expliquent en grande partie les différences de comportements observés entre sites. Pour les résineux bénéficiant de fortes pluies annuelles (> 1000 mm) et bien réparties pendant la saison, les contraintes en eau sont en général assez faibles et ne jouent pas un rôle déterminant dans les variations inter-annuelles de croissance des arbres. Pour ces peuplements, ce sont les températures d'hiver et de printemps qui semblent moduler une grande part des variations inter-annuelles. Pour la majorité des peuplements de feuillus, bénéficiant de régimes pluviométriques « moins favorables », le calcul du bilan hydrique s'est révélé être un outil performant pour détecter les contraintes hydriques affectant les peuplements et pour expliquer les variations de croissance radiale des arbres. Les analyses ont ainsi confirmé le rôle capital de l'alimentation hydrique du hêtre et du chêne dans la régulation de leur croissance. Cependant, le déficit de réserve est apparu plus déterminant pour le hêtre que pour le chêne (sensibilité moyennes des séries chronologiques plus fortes dans les hêtraies) aussi bien au niveau du nombre plus élevé de peuplements pour lesquels le déficit était une variable significativement corrélée à la croissance qu'au niveau du pourcentage de variance expliquée : 13 peuplements sur 15 avec des taux de variance expliquée de 12 à 43% pour le hêtre (moy=25%) et 10 peuplements sur 15 avec des taux de 8 à 32% pour le chêne (moy=19%). L'indice de déficit de réserve annuel (cumul de mai à octobre) est intervenu dans 7 cas. Pour 16 peuplements, c'est le déficit d'un mois où d'une combinaison de mois particuliers qui a expliqué le mieux les fluctuations de croissance. Pour ces sites, les périodes clés sont en relation étroite avec la capacité du sol à stocker l'eau. Pour les faibles réserves (< 100 mm), ce sont les déficits du début de saison (juin-juillet) qui interviennent sur la croissance annuelle alors qu'une réserve utile plus forte (> 150 mm) tamponne et/ou diffère l'arrivée du stress (relation entre croissance et déficit de août-septembre). Enfin, le calcul du bilan hydrique journalier s'est montré beaucoup plus puissant que les pluviométries mensuelles pour expliquer les variations de croissance radiale des peuplements.

- Carte 1.** Localisation géographique des 41 peuplements et des 68 postes météorologiques du réseau national Météo-France. Le chiffre entre parenthèses indique l'altitude du poste. T = température ; P = précipitation ; ETP = évapotranspiration ; HET = hêtre ; CHS et CHP = chênes sessile et pédonculé ; EPC = épicéa ; SP = sapin pectiné. Le numéro suivant le code de l'espèce indique le département. La carte centrale représente la zonation bioclimatique (simplifiée) de la France.
- Figure 1.** Relation entre l'altitude (en m) de la station météorologique de référence pour le calcul de l'ETP (6 données journalières) et l'altitude des 41 placettes RENECOFOR étudiées (- a -) et effectif des placettes selon leur éloignement de la station météorologique de référence (- b -).
- Figure 2.** Relation entre l'altitude (en m) de la station météorologique de référence pour les précipitations (P ; 1 donnée journalière) et l'altitude des 41 placettes RENECOFOR étudiées (- a -) et effectif des placettes selon leur éloignement de la station météorologique de référence (- b -).
- Figure 3.** Relation entre la date observée (en jour julien) du débourrement en 1997 des placettes de chêne et de hêtre et la date prédite par le modèle selon différents cumuls de température. Le modèle prédictif utilisé ne prend en compte que les températures minimales et maximales journalières supérieures au seuil de 5°C (pour le chêne) et 4.5°C (pour le hêtre) (les températures inférieures sont considérées comme nulles), et cumule les températures moyennes journalières à partir du premier janvier de l'année courante (Comps *et al.* 1987 ; Kramer 1994 ; Duchemin 1998). Les débourrements 10% et 90% correspondent respectivement à la semaine à laquelle 10% et 90% des arbres présentent au moins sur 20 à 50% du houppier des bourgeons ouverts, avec l'apparition des premières petites feuilles.
- Figure 4.** Date estimée (en jour julien) du débourrement du chêne et du hêtre selon différents cumuls de température et la localisation géographique des stations météorologiques. Le modèle prédictif utilisé ne prend en compte que les températures minimales et maximales journalières supérieures au seuil de 5°C (pour le chêne) et 4.5°C (pour le hêtre) (les températures inférieures sont considérées comme nulles), et cumule les températures moyennes journalières à partir du premier janvier de l'année courante (Comps *et al.* 1987 ; Kramer 1994 ; Duchemin 1998). Pour chaque cumul, la date estimée correspond au jour julien moyen calculé sur une période de 30 à 49 ans selon la station (1968-1997 à 1949-1997).
- Figure 5.** Sensibilités moyennes (SMi et SMm) par compartiment anatomique du cerne et par espèce. Les moyennes ont été calculées sur les surfaces (cm²) et pour la période 1949-1994. Les espèces ont été triées par ordre décroissant des valeurs de SMi. La barre verticale représente les écart-types.
- Figure 6.** Relation entre le nombre de modèles ARMA différents observés par placette et la longueur des séries élémentaires analysées pour chaque compartiment anatomique et selon l'unité d'expression du cerne. N=41 placettes ; n=26 à 30 arbres par placette. Toutes espèces confondues.
- Figure 7.** Répartition des 32 placettes dans le plan factoriel 1-2 de l'ACP sur matrice de covariance. Les variables d'entrées sont les fréquences par site des 29 modèles arma différents observés sur les 799 chronologies élémentaires. Les modèles ont été déterminés sur le cerne complet exprimé en surface et pour la période 1949-1994. het = hêtre ; chs et chp = chêne sessile et pédonculé ; epc = épicéa ; sp = sapin pectiné. Le numéro suivant le code de l'espèce indique le département.
- Figure 8.** Conditions pluviométriques moyennes pour les 41 sites d'étude (ronds blancs). Les moyennes des différents paramètres ont été calculées à partir des séries climatiques journalières des 39 postes météorologiques de référence (ronds noirs) et sur la période 1961-1990 (dans la grande majorité des cas). La liste des postes météorologiques rattachés à chaque site est donnée dans le tableau 2.
- Figure 9.** Conditions thermiques moyennes pour les 41 sites d'étude (ronds blancs). Les moyennes des différents paramètres ont été calculées à partir des séries climatiques journalières des 33 postes météorologiques de référence (ronds noirs) et sur la période 1961-1990 (dans la grande majorité des cas). La liste des postes météorologiques rattachés à chaque site est donnée dans le tableau 2.
- Figure 10.** Durée (A) et intensité (B) annuelles moyennes du déficit de réserve en eau pour les 28 stations "ETP" du réseau météorologique national (Météo-France) . Les moyennes ont été calculées sur la période 1961-1990. La taille des symboles est proportionnelle à A) la durée de la sécheresse par tranche de 15 jours (de 40 à 113 jours) et à B) l'intensité de la sécheresse par tranche de 10 (de 16 à 76). Pour toutes les stations, les indices du stress correspondent à un peuplement de feuillus aux caractéristiques fixes : RUM = 150 mm ; LAI = 6m²/m² ; saison de végétation = jours juliens 120 à 300.
- Figure 11.** Diagrammes ombrothermiques et caractéristiques moyennes mensuelles des contraintes en eau (nombre de jours et intensité du stress) pour 8 stations météorologiques. Pour toutes les stations, les caractéristiques du stress correspondent à un peuplement de feuillus aux caractéristiques fixes : RUM = 150 mm ; LAI = 6m²/m² ; saison de végétation = jours juliens 120 à 300. Les moyennes correspondent à la période 1961-1990. Les chiffres en gras indiquent le nombre de jours et l'intensité moyenne de la sécheresse cumulés sur la saison de végétation.

- Figure 12.** Conditions climatiques moyennes et caractéristiques du déficit de réserve des 15 peuplements de chênes. Pour les précipitations et les températures (A et B), les moyennes correspondent à la période 1961-1990. Pour le bilan hydrique (C et D), les valeurs cartographiées sont les moyennes calculées sur 30 à 49 ans selon le peuplement. Les graphes E et F donnent la répartition des 15 placettes et des 30 années (période 1961-1990) dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP sur matrice de covariance réalisée à partir des indices de déficit annuels de chaque peuplement. Les caractéristiques moyennes de chaque groupe sont données dans la figure G. La fréquence "année" est le rapport entre le nombre total d'années disponibles et le nombre d'années présentant un indice de déficit non nul. La fréquence des jours de stress est le rapport entre le nombre moyen de jours avec déficit et la longueur de la saison de végétation. La liste des postes météorologiques rattachés à chaque site est donnée dans le tableau 2. Les caractéristiques des peuplements pour le calcul des contraintes en eau sont présentées dans le tableau 11.
- Figure 13.** Conditions climatiques moyennes et caractéristiques du déficit de réserve des 15 peuplements de hêtre. Pour les précipitations et les températures (A et B), les moyennes correspondent à la période 1961-1990. Pour le bilan hydrique (C et D), les valeurs cartographiées sont les moyennes calculées sur 30 à 49 ans selon le peuplement. Les graphes E et F donnent la répartition des 15 placettes et des 30 années (période 1961-1990) dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP sur matrice de covariance réalisée à partir des indices de déficit annuels de chaque peuplement. Les caractéristiques moyennes de chaque groupe sont données dans la figure G. La fréquence "année" est le rapport entre le nombre total d'années disponibles et le nombre d'années présentant un indice de déficit non nul. La fréquence des jours de stress est le rapport entre le nombre moyen de jours avec déficit et la longueur de la saison de végétation. La liste des postes météorologiques rattachés à chaque site est donnée dans le tableau 2. Les caractéristiques des peuplements pour le calcul des contraintes en eau sont présentées dans le tableau 11.
- Figure 14.** Conditions climatiques moyennes et caractéristiques du déficit de réserve des 11 peuplements de sapin pectiné (SP) et d'épicéa commun (EPC). Pour les précipitations et les températures (A et B), les moyennes correspondent à la période 1961-1990. Pour le bilan hydrique (C et D), les valeurs cartographiées sont les moyennes calculées sur 30 à 49 ans selon le peuplement. Les graphes E et F donnent la répartition des 15 placettes et des 30 années (période 1961-1990) dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP sur matrice de covariance réalisée à partir des indices de déficit annuels de chaque peuplement. Les caractéristiques moyennes de chaque groupe sont données dans la figure G. La fréquence "année" est le rapport entre le nombre total d'années disponibles et le nombre d'années présentant un indice de déficit non nul. La fréquence des jours de stress est le rapport entre le nombre moyen de jours avec déficit sur le nombre total de jours dans l'année. La liste des postes météorologiques rattachés à chaque site est donnée dans le tableau 2. Les caractéristiques des peuplements pour le calcul des contraintes en eau sont présentées dans le tableau 11.
- Figure 15.** Diminution des précipitations du mois d'août observée pour 22 des 63 stations pluviométriques du réseau national météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR.
- Figure 16.** Dérive climatique observée dans les températures minimales (Tmin) et les températures moyennes (Tmoy) pour les 33 stations météorologiques du réseau Météo-France (ronds noirs) utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR (ronds blancs). Pour la carte des stations, le premier chiffre indique l'altitude du poste et le second la première année disponible. Pour les autres cartes, les chiffres indiquent la pente (en °C/an) de l'ajustement linéaire calculé sur toute la période disponible. ns = non significatif au seuil de 5%. Les données en gras indiquent les stations pour lesquelles des données sur les plus longues périodes sont disponibles (1949-1997 et 1950-1997).
- Figure 16b.** Augmentation de la température minimale annuelle (B) et estivale (A) (juin-juillet-août) pour les 33 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. La taille des ronds noirs indique l'ampleur du réchauffement entre le début de la période et 1997. Pour chaque station, les estimations ont été faites à partir des ajustements linéaires calculés sur toute la période disponible. Les ronds blancs indiquent des tendances non significatives au seuil de 5%.
- Figure 16c.** Augmentation de la température moyenne annuelle (B) et estivale (A) (juin-juillet-août) pour les 33 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. La taille des ronds noirs indique l'ampleur du réchauffement entre le début de la période et 1997. Pour chaque station, les estimations ont été faites à partir des ajustements linéaires calculés sur toute la période disponible. Les ronds blancs indiquent des tendances non significatives au seuil de 5%.
- Figure 17.** Exemple d'évolution de la température moyenne minimale annuelle (Tmin en °C) par période pour 11 des 33 stations thermiques du réseau météorologique national utilisées pour l'étude du bilan hydrique. Les ronds noirs indiquent la localisation des 22 autres stations.
- Figure 18.** Evolution du nombre de jours de gelées (Tmin < 0°C) sur l'année selon la date pour 8 des 32 stations thermiques du réseau météorologique national utilisées pour l'étude du bilan hydrique. Les ronds noirs indiquent la localisation des stations et les ronds blancs des placettes RENECOFOR.

- Figure 19.** Evolution de l'indice de déficit de réserve selon la date pour 7 peuplements du réseau RENECOFOR. Le déficit est calculé sur la saison de croissance des arbres (de 180 à 190 jours) par différence entre la réserve critique (quand REW = 0.4) et la réserve actuelle du sol (RUM). LAI = Leaf Area Index. HET = hêtre ; CHS = chêne sessile. Le numéro suivant le code indique la région d'échantillonnage du peuplement. Les petits ronds noirs indiquent la localisation géographique des 34 autres peuplements étudiés.
- Figure 20.** Evolution du déficit moyen de réserve en eau par période pour les stations météorologiques présentant une dérive climatique. Le déficit est calculé pour un peuplement de feuillus aux caractéristiques constantes (RUM = 150 mm ; LAI = 6 m²/m² ; cycle de croissance annuel = jours juliens 120 à 300). Pour chaque ville, un triangle noir indique une dérive positive significative sur la saison de croissance de la température moyenne (°C ; triangle supérieur) et/ou des précipitations (en mm ; triangle inférieur).
- Figure 21.** Relation entre la sensibilité moyenne (SMi) des séries chronologiques et le nombre d'années caractéristiques pour les différents compartiments anatomiques du cerne et selon l'espèce. Pour chaque placette, SMi correspond à la moyenne des sensibilités moyennes des séries individuelles (23 à 30 arbres par site). ** : significatif à 1%.
- Figure 22.** Relation entre le nombre d'années caractéristiques et la réserve utile maximale en eau du sol (RUM en mm) pour les chênes et le hêtre. Les graphes [A] présentent la relation observée pour les années caractéristiques calculées sur l'ensemble des dates disponibles et [B] pour la période commune 1955-1994. Pour chaque placette, le RUM a été calculé en prenant en compte la texture, l'épaisseur et la charge en cailloux de chaque horizon de sol (Brêthes et Ulrich 1997).
- Figure 23.** Répartition des 40 années (A) et des 71 placettes (B) dans le plan factoriel 1-2 de l'AFC. Chp et Chs = chêne pédonculé et sessile ; Het = hêtre ; Epc = épicéa ; Sp = Sapin pectiné ; Ps = pin sylvestre. Le numéro suivant le code indique le département d'échantillonnage. Un signe + indique une forte croissance et un signe - une croissance réduite. Les années qui contribuent le plus à l'axe 1 ont été signalées en gras.
- Figure 24.** Répartition des 71 placettes dans le plan factoriel 1-2 (A) et 3-4 (B) de l'AFC. Pour le plan 1-2, les placettes ont été identifiées par leur altitude (en mètres). Pour le plan 3-4, c'est la région d'échantillonnage qui a été prise en compte.
- Figure 25.** Répartition des 6 espèces dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante inter-espèce réalisée après l'ACP sur matrice de covariance. Les 71 placettes, figurées par des points, sont positionnées par des codes de variance 1 optimisant la variance inter-espèce. Le rond représente le centre de gravité pour chaque espèce.
- Figure 26.** Répartition des placettes de chaque espèce dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante intra-espèce réalisée après l'ACP sur matrice de covariance. Le nuage est projeté sur le plan optimisant la variance moyenne par groupe de coordonnées. Le numéro indique la région d'échantillonnage de la placette.
- Figure 27.** Répartition des 4 régions dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante inter-région réalisée après l'ACP sur matrice de covariance. Les 71 placettes, figurées par des points, sont positionnées par des codes de variance 1 optimisant la variance inter-région. Le rond représente le centre de gravité pour chaque région.
- Figure 28.** Répartition des espèces de chaque région dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante intra-région réalisée après l'ACP. Le nuage est projeté sur le plan optimisant la variance moyenne par groupe de coordonnées.
- Figure 29.** Relation entre la fréquence annuelle moyenne des jours de déficit de réserve en eau et le nombre total ou la fréquence des années caractéristiques (calculées sur la largeur du cerne complet). Pour les graphes [A] et [C], les 41 placettes ont été prises en compte. Pour les graphes [B] et [D], seules les 34 placettes disposant d'au moins 39 années de données météorologiques ont été prises en compte (39 à 46 années). Toutes les espèces ont été confondues. * : significatif à 5% ; ** : significatif à 1%.
- Figure 30.** Déficit de réserve en eau observés pour chaque peuplement au cours des années sèches 1959, 1962, 1976 et 1989. Un rond noir large indique que l'année est caractéristique c'est-à-dire qu'elle présente une réduction de croissance d'au moins 10% (par rapport à l'année précédente) pour au moins 75% des arbres de la placette. Ces quatre années correspondent aux années caractéristiques négatives les plus fréquentes sur la période 1949-1994. * : Pour HET 09, l'année 1989 est une année à forte croissance.
- Figure 31.** Comparaison des coefficients de corrélation (r²) entre les déficits annuels de réserve en eau et les indices de croissance radiale calculés à partir des largeurs de cernes (mm) et des surfaces de cernes (cm²) pour les 24 peuplements présentant une corrélation significative. Les placettes ont été triées par ordre décroissant selon la valeur du coefficient r² observé entre les déficits et les indices obtenus à partir des surfaces.
- Figure 32.** Exemples de relations entre les indices de croissance radiale et les indices de déficits annuels de réserve pour 4 des 12 peuplements de hêtre (sur un total de 15) présentant une corrélation significative (** et *** : significatif à 1 p. cent et 1 p. mille). Pour les courbes, les indices de croissance correspondent à des surfaces de cerne complet

- détendancées par modélisation ARMA. Pour HET 14, les corrélations étant meilleures avec les indices de croissance définis à partir des largeurs de cerne, les deux graphes ont été présentés.
- Figure 33.** Exemples de relations entre les indices de croissance radiale et les indices de déficits annuels de réserve pour 5 des 9 peuplements de chênes (sur un total de 15) présentant une corrélation significative (** et *** : significatif à 1 p. cent et 1 p. mille). Pour les courbes, les indices de croissance correspondent à des surfaces de cerne complet détendancées par modélisation ARMA. Pour CHS 58 et CHS 81, les corrélations étant meilleures avec les indices de croissance définis à partir des largeurs de cerne, les deux graphes ont été présentés.
- Figure 34.** Exemples de relations entre les indices de croissance radiale et les indices de déficits annuels de réserve pour les 3 peuplements d'épicéa (sur un total de 5) présentant une corrélation significative (* : significatif à 5 p. cent). Pour les courbes, les indices de croissance correspondent à des surfaces de cerne complet détendancées par modélisation ARMA.
- Figure 35.** Evolution de l'indice de croissance radiale moyen par classe d'indice de déficit de réserve en eau pour les 9 peuplements de chênes et les 12 peuplements de hêtre présentant une corrélation significative entre la croissance et l'intensité du déficit. Pour chaque classe et chaque peuplement, les moyennes ont été calculées sur au moins trois années. Idm correspond à l'indice de déficit hydrique moyen calculé sur toute la période (voir Tableau 20).
- Figure 36.** Corrélations entre les indices de croissance radiale (calculés à partir des surfaces de cerne) et les indices de déficits mensuels de réserve en eau pour 10 placettes. La valeur entre parenthèses correspond à la corrélation obtenue sans prendre en compte les années pour lesquelles le déficit est nul pour le mois correspondant.
- Figure 37.** Corrélations entre les indices de croissance radiale (calculés à partir des surfaces de cerne) et les températures mensuelles pour 8 placettes. Les mois représentés ont été choisis suite à l'analyse des fonctions de réponse (Tableau 40). Le (n-1) signifie que c'est la mois de l'année précédant la mise en place du cerne n qui intervient.
- Figure 38.** Analyse de la cohérence des fonctions de réponse. Les graphes représentent la répartition des 41 placettes et des 18 régresseurs climatiques dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des résultats des fonctions de réponse obtenues pour les combinaisons mensuelles (déficits et Tmin) et (déficits et Tmax) (voir Tableau 40).
- Figure 39.** Analyse de la cohérence des fonctions de réponse des 15 Chênaies du réseau. Les graphes représentent la répartition des 15 placettes et des 18 régresseurs climatiques dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des résultats des fonctions de réponse obtenues pour les combinaisons mensuelles (déficit et Tmin) et (déficit et Tmax).
- Figure 40.** Analyse de la cohérence des fonctions de réponse des 15 Hêtraies du réseau. Les graphes représentent la répartition des 15 placettes et des 18 régresseurs climatiques dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des résultats des fonctions de réponse obtenues pour les combinaisons mensuelles (déficit et Tmin) et (déficit et Tmax).
- Figure 41.** Répartition des 30 peuplements de feuillus dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des résultats des fonctions de réponse (voir Tableau 40). Pour cette ACP, seules les relations avec les déficits ont été prises en compte. Pour chaque placette, le code attribué à chaque mois correspond au seuil de signification le plus fort obtenu pour les combinaisons Déf-Tmin et Déf-Tmax. Les mois non significatifs ont été codés 0 et le seuil de 10% n'a pas été pris en compte (code -1 dans le tableau 40). Pour le graphe A, seuls les déficits mensuels ont été considérés. Pour le graphe B, le déficit annuel a également été pris en compte. La figure C représente la projection dans le plan factoriel 1x2 de la RUM associée à chaque peuplement.

- Tableau 1.** Caractéristiques stationnelles des 41 placettes retenues pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance. L'altitude est exprimée en m et la pente en %. Les types de sol suivent la classification Duchaufour.
- Tableau 2.** Postes météorologiques du réseau national Météo-France rattachés à chaque placette pour chaque type de données (ETP, P et T). L'altitude est en mètres et la distance du poste à la placette est en km. Pour les données de croissance, les dates disponibles correspondent à la période pour laquelle l'effectif d'arbres est complet (26 à 30). La période modélisable représente la plus longue période disponible après croisement des données de croissance et météorologiques (1, 2 ou 3 postes). %DM = % de données météorologiques manquantes.
- Tableau 3.** Périodes de débourrement et de sénescence des feuilles observées en 1997 pour les 41 placettes retenues pour l'analyse du bilan hydrique. Pour le débourrement, la première date correspond à la semaine à laquelle 10% des arbres présentent au moins sur 20 à 50% du houppier des bourgeons ouverts, avec l'apparition des premières petites feuilles ou aiguilles. La seconde date correspond à la semaine à laquelle 90% des arbres présentent ces caractéristiques. Pour la sénescence, la première date correspond à la semaine dans laquelle 10% des arbres présentent un début de jaunissement sur au moins 20 à 50% des feuilles du houppier. La seconde date correspond à la semaine dans laquelle 90% des arbres présentent ces caractéristiques. Les observations ont été effectuées à l'oeil nu ou à l'aide de jumelles par les responsables locaux du réseau.
- Tableau 4.** Dates de débourrement observées en 1997 (en jour julien ; JJ) et cumuls des températures (en °C) calculés sur les stations météorologiques rattachées à chaque placette. Pour le chêne et le hêtre, le modèle prédictif utilisé ne prend en compte que les températures minimales et maximales journalières supérieures au seuil de 5°C (pour le chêne) et 4.5°C (pour le hêtre) (les températures inférieures sont considérées comme nulles), et cumule les températures moyennes journalières à partir du premier janvier de l'année courante (Comps *et al.* 1987 ; Kramer 1994 ; Duchemin 1998). Les débournements 10% et 90% correspondent respectivement à la semaine à laquelle 10% et 90% des arbres présentent au moins sur 20 à 50% du houppier des bourgeons ouverts, avec l'apparition des premières petites feuilles ou aiguilles. Afin de simplifier la présentation, seul le jour julien médian de la semaine correspondante a été indiqué. Pour les placettes de résineux, les cumuls de température pour le début et la fin avril correspondent aux sommes pour le chêne (première valeur) et le hêtre (seconde valeur). La longueur de la saison de végétation a été calculée en prenant en compte le jour médian de la semaine pour laquelle 90% des arbres avaient débourré et le jour médian de la semaine pour laquelle le feuillage de 90% des arbres était jaune.
- Tableau 5.** Date moyenne (en jour julien) du débourrement du chêne et du hêtre selon différents cumuls de température et par grande région géographique. Le modèle prédictif utilisé ne prend en compte que les températures minimales et maximales journalières supérieures au seuil de 5°C (pour le chêne) et 4.5°C (pour le hêtre) (les températures inférieures sont considérées comme nulles), et cumule les températures moyennes journalières à partir du premier janvier de l'année courante (Comps *et al.* 1987 ; Kramer 1994 ; Duchemin 1998).
- Tableau 6.** Jour julien moyen de débourrement et longueur de la saison de végétation (en jours) pour le hêtre et le chêne pour différentes régions.
- Tableau 7.** Jour julien moyen de débourrement et longueur de la saison de végétation (en jours) pour le chêne dans différentes forêts de l'est de la France. La date de débourrement correspond à l'éclatement des bourgeons et à l'apparition des feuilles étalées aux contours visibles (stades b3 et b4). La longueur de la saison a été estimée en faisant la différence entre la date du débourrement et a) une chute de 50% du LAI (Champenoux ; Bréda 1994) ou b) le jaunissement des feuilles sur au moins 50% du houppier (Amance et Haye ; Dupouey et Behr, non publié).
- Tableau 8.** Jour julien moyen de débourrement et longueur de la saison de végétation (en jours) pour le hêtre dans différentes forêts de l'est de la France. La date de débourrement correspond à l'éclatement des bourgeons et à l'apparition des feuilles étalées aux contours visibles (stades b3 et b4) pour les forêts d'Amance et de Haye (1) (Dupouey et Behr, non publié). Pour « Haye(2) », le débourrement a été estimé à partir d'observations satellitaires (Duchemin 1998). La longueur de la saison a été estimée en faisant la différence entre la date du débourrement et a) le jaunissement des feuilles sur au moins 50% du houppier (Amance et Haye-1) et b) les observations satellitaires de sénescence (Haye-2).
- Tableau 9.** Décalage phénologique moyen observé depuis 1988 pour chaque grande région géographique.
- Tableau 10.** Paramètres phénologiques moyens retenus pour chaque grande région géographique et chaque espèce. JJ = jour julien du débourrement ; SV = longueur de la saison de végétation.
- Tableau 11.** Valeurs des différents paramètres utilisés pour le calcul du bilan hydrique sur chacune des 41 placettes. Pour chaque site, l'horizon 1 correspond à la zone fortement enracinée (75% des racines) et l'horizon 2 à la zone faiblement enracinée (25%) (sauf pour EPC39b : un seul horizon et 100% de racines). Pour chaque tranche, la réserve utile maximale en eau a été estimée à partir des coefficients de réserve en eau potentielle pour chaque texture (triangle de Jamagne), de la charge en éléments grossiers et de l'épaisseur de chaque horizon (Brêthes et Ulrich 1997). Pour le second horizon, la RUM a été calculée sur 150 cm au maximum. Dans la majorité des cas, les valeurs présentées sont les moyennes calculées sur les deux fosses pédologiques. Les indices de surfaces foliaires ont été estimés à partir des litières récoltées sur chaque site entre 1994 et 1997. le coefficient d'extinction

- k a été déterminé à partir de la relation le liant au LAI. Pour les feuillus, les jours juliens de débourrement et de sénescence ont été estimés à partir d'un modèle phénologique prédictif fondé sur le cumul des températures journalières (voir texte pour les explications détaillées).
- Tableau 12.** Caractéristiques dendrométriques des 41 placettes. Les données sur les âges, les diamètres et les hauteurs correspondent aux mesures effectuées en 1994. Le diamètre correspond au diamètre sur écorce à hauteur de carottage (entre 1 et 1.30 m). Les mesures de hauteur ont été effectuées sur les arbres observations (52 arbres dominants mesurés tous les ans) et non sur les 26 à 30 arbres dominants échantillonnés pour l'étude dendrochronologique. tot = surface terrière totale du peuplement en 1995 ; esp. = surface terrière de l'espèce dominante en 1995, c'est-à-dire de l'espèce étudiée. La largeur du cerne correspond à la moyenne calculée sur l'ensemble des cernes disponibles par site (std=écart-type).
- Tableau 13a.** Sensibilité moyenne (SMi) des séries chronologiques. Pour chaque site et chaque modalité, la valeur présentée correspond à la moyenne des sensibilités moyennes des séries individuelles (Sj) (23 à 30 arbres par site). La période 1949-1994 correspond à la période de calcul des fonctions de réponse des arbres au climat.
- Tableau 13b.** Sensibilité moyenne (SMm) des séries chronologiques. Pour chaque site et chaque modalité, la valeur présentée correspond à la sensibilité moyenne calculée à partir de la chronologie moyenne de référence (23 à 30 arbres par site). La période 1949-1994 correspond à la période de calcul des fonctions de réponse des arbres au climat.
- Tableau 14.** Coefficient d'interdatation SR (=SMm/SMi) des séries chronologiques. Pour chaque site et chaque modalité, un synchronisme parfait s'exprime par une valeur proche de 1. La valeur correspondant à l'asynchronisme (SRa) total dépend de la taille de l'échantillon. Pour n=23 arbres, SRa = 0.209 et pour n=30, SRa=0.183. La période 1949-1994 correspond à la période de calcul des fonctions de réponse des arbres au climat.
- Tableau 15.** Fréquence des modèles ARMA par compartiment et selon l'unité des largeurs de cernes (en mm et cm²). Seuls les modèles apparaissant dans au moins 5% des cas ont été retenus. Le nombre total de modèles ARMA différents ainsi que les deux modèles les plus complexes observés ont été indiqués. (AR) : processus auto-régressif le plus complexe ; (MA) : valeur de moyenne mobile la plus forte.
- Tableau 16.** Nombre de modèles ARMA différents et fréquences des modèles les plus souvent observés pour le cerne complet (en cm²) selon l'âge des arbres (en 1994 à 1.30 m) (toutes les espèces et tous les sites confondus).
- Tableau 17.** Caractéristiques des 32 placettes retenues pour l'étude du déterminisme des modèles ARMA selon l'espèce. Seuls les arbres âgés d'au moins 75 ans ont été retenus. Les modèles ARMA ont été déterminés sur la période commune 1949-1994 et sur les surfaces de cerne complet (cm²).
- Tableau 18.** Fréquence des modèles ARMA par site (n=32) et pour les 799 arbres retenus pour l'étude de l'effet espèce. Seuls les arbres âgés d'au moins 75 ans ont été retenus. Les modèles ARMA ont été déterminés sur la période commune 1949-1994 et la surface du cerne complet (cm²).
- Tableau 19.** Fréquence des modèles ARMA les plus fréquents par espèce. Seuls les arbres âgés d'au moins 75 ans ont été retenus. Les modèles ARMA ont été déterminés sur la période commune 1949-1994 et sur la surface du cerne complet (cm²). Pour chaque espèce, les 4 modèles présentés modélisent plus de 80% des arbres. N= nombre d'arbres ; Nb = nombre de modèles différents.
- Tableau 20.** Caractéristiques des déficits de réserve (nombre d'années, de jours et niveau des stress) par peuplement. Le déficit est calculé par différence entre la réserve critique (quand REW =0.4) et la réserve du sol actuelle sur la saison de croissance des arbres. Pour le nombre de jours de stress, la fréquence est le rapport entre le nombre moyen de jours avec déficit et la longueur de la saison de végétation. Pour la placette CHP18, environ 40% des jours de la saison de croissance sont déficitaires au niveau hydrique et le déficit moyen de réserve sur cette période est de l'ordre de 26.
- Tableau 21.** Dérive climatique observée dans les données de précipitation pour les 63 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. Pour chaque mois, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible. Un signe + indique une augmentation des pluies significative au seuil de 5% et le signe - une réduction. Les signes entre parenthèses indiquent des tendances significatives au seuil de 10%. La date indique le début de la période analysée (dernière année : 1997).
- Tableau 22.** Dérive climatique observée dans les températures minimales moyennes (Tmin) pour les 32 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR (pas de données pour Tomblaine). Pour chaque mois, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible. Un signe + indique une augmentation des températures significative au seuil de 5% et le signe - une réduction. Les signes entre parenthèses indiquent des tendances significatives au seuil de 10%. La fin de la période correspond à l'année 1997.

- Tableau 23.** Dérive climatique observée dans les températures moyennes (T_{moy}) pour les 33 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. Pour chaque mois, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible. Un signe + indique une augmentation des températures significative au seuil de 5% et le signe - une réduction. Les signes entre parenthèses indiquent des tendances significatives au seuil de 10%. La fin de la période correspond à l'année 1997.
- Tableau 23b.** Augmentation des températures moyennes et minimales annuelles et estivales (juin-juillet-août) pour les 32 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR (pas de T_{min} pour Tomblaine). T_{dp} = température en début de période ; T_{1997} = température en 1997. Pour chaque station, les températures sont des estimations à partir des ajustements linéaires. ns = tendance non significative au seuil de 5%.
- Tableau 24.** Fréquence des rangs par période pour les différents paramètres de température présentant une augmentation significative. Pour chaque station et chaque paramètre analysés, les 9 périodes ont été triées par ordre décroissant selon la valeur du paramètre. Pour les températures, le rang 1 a été attribué à la période la plus chaude et le rang 9 à la période la plus "froide". Pour les amplitudes thermiques, le rang 1 correspond à l'amplitude la plus forte et le rang 9 à la plus faible. Par exemple, pour la température minimale annuelle, la période 1991-1997 correspond à la période la plus chaude pour 25 stations, à la deuxième période la plus chaude pour 6 stations et à la troisième période la plus chaude pour 1 station ; le rang moyen étant de 1.3. La saison de végétation regroupe les mois de mai à septembre.
- Tableau 25.** Variations du nombre et de la fréquence des jours de gelées ($T_{min} < 0^{\circ}C$) en mai et sur l'année pour les 32 stations thermiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR (pas de T_{min} pour Tomblaine). Pour l'année, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible (seuil de 5%). Pour le mois de mai, aucune tendance n'apparaît mais pour l'année il y a en moyenne 1 jour de gelée en moins tous les 3 ans.
- Tableau 26.** Dérive climatique observée de l'ETP (calculée par Météo-France) (en mm) pour 25 des 28 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. Pour chaque mois, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible. Un signe + indique une augmentation significative au seuil de 5% et le signe - une réduction. Les signes entre parenthèses indiquent des tendances significatives au seuil de 10%. Pour le mois d'août et l'année, les chiffres indiqués correspondent aux pentes (en mm/an) des ajustements linéaires.
- Tableau 27.** Dérives climatiques observées dans les durées d'insolation mensuelles cumulées (en heures) pour les 27 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. Pour chaque mois, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible. Un signe + indique une augmentation significative au seuil de 5% et le signe - une réduction. Les signes entre parenthèses indiquent des tendances significatives au seuil de 10%. Pour Tomblaine, les données correspondent au rayonnement global. Pour St Dizier, la période 1962-1978 correspond à des données d'insolation et la période 1979-1994 au rayonnement global (W/m^2).
- Tableau 28.** Dérives climatiques observées pour les 28 stations du réseau Météo-France utilisées pour le calcul de l'ETP (6 données journalières). Pour chaque station et chaque paramètre, la première valeur correspond à la pente de la droite de régression établie sur toute la période disponible et la seconde à la variation relative du paramètre entre 1950 et 1997. Un signe + indique une augmentation significative au seuil de 5% ou 10% et le signe - une réduction. Pour Tomblaine, seule l'évolution de la température moyenne (T_{moy}) a été prise en compte (T_{min} et T_{max} non disponibles). Pour cette station, les données d'insolation correspondent au rayonnement global (W/m^2). Pour St Dizier, l'évolution de l'insolation n'a pas été testée car la période 1962-1978 correspond à des données d'insolation et la période 1979-1994 au rayonnement global (W/m^2). La saison de végétation regroupe les mois de mai à septembre. L'ETP provient des calculs de Météo-France (* données non disponibles).
- Tableau 29.** Evolution du cumul de déficit de réserve (en mm) par période. Pour chaque peuplement, seules les périodes avec 5 années complètes ont été prises en compte. * : significatif à 5% ; (*) : significatif à 10% ; ns = non significatif ; *1 : significatif à 5% à partir de 1966. Pour HET64, 65 et 88, la valeur moyenne pour la période 1961-1965 est principalement due au stress extrême de 1962. Si on exclut cette année, la tendance est positive sur l'ensemble de la période étudiée.
- Tableau 30.** Effet d'un décalage phénologique de 12 jours sur le déficit de réserve pour trois peuplements de hêtre du réseau RENECOFOR. Pour chaque placette, les quatre modalités étudiées ont été appliquées sur l'ensemble de la période disponible (1949-1997 et 1956-1997) et sur la période récente 1988-1997. Cette dernière a été choisie car elle correspond aux années pour lesquelles le modèle phénologique prédit un débournement plus précoce de 12 jours (voir paragraphe 3.3.2.1). RUM = réserve utile maximale en eau du sol.

- Tableau 31.** Effet d'un décalage phénologique de 12 jours sur le déficit de réserve des 5 années présentant les indices de stress les plus forts (période 1988-1997) pour trois peuplements de hêtre du réseau RENECOFOR. RUM = réserve utile maximale en eau du sol. Pour chaque placette et chaque année, la valeur en gras indique le déficit de réserve observé pour une saison "normale" de 180 jours sans décalage phénologique.
- Tableau 32.** Nombre moyen d'années caractéristiques par espèce selon le compartiment anatomique et l'unité du cerne. CC = cerne complet ; BI = Bois initial ; BF = Bois final. Pos = année à forte croissance ; Nég = année à croissance réduite. La placette de mélèze et les deux placettes de pin laricio de Corse ont été exclues de l'analyse. Une année est caractéristique quand au moins 75% des arbres de la placette présentent une variation relative d'au moins 10% du cerne correspondant.
- Tableau 33.** Fréquence d'observation (en % du nombre N de placettes) des 5 années caractéristiques les plus remarquables par espèce. (période 1955-1994). ↑ : forte croissance ; ↓ : faible croissance.
- Tableau 34.** Années caractéristiques contribuant le plus à la signification des axes 1 et 2 de l'ACP sur matrice de covariance (valeurs exprimées 1/10 000). + : forte croissance ; - : faible croissance (période 1955-1994).
- Tableau 35.** Décomposition du poids de chaque année dans l'analyse discriminante de l'effet espèce (réalisée après l'ACP). L'inertie inter-espèce représente 15% de l'inertie totale. Seules les 13 années participant pour au moins 20% dans la discrimination des 6 espèces sont présentées. Pour chaque espèce, les % sites et % arbres représentent les fréquences d'observation de l'année par rapport au nombre total de placettes et d'arbres disponibles. Seules les années observées dans au moins 40% des sites sont signalées. Pour le sapin, l'année 1986 présente une réduction de croissance pour 90 % des placettes (N=10) et 96% des arbres échantillonnés (n=298). * L'année 1993 présente une croissance réduite pour les placettes de chêne pédonculé seulement.
- Tableau 36.** Décomposition du poids de chaque année dans l'analyse discriminante de l'effet région (réalisée après l'ACP). L'inertie inter-région représente 11% de l'inertie totale. Seules les 17 années participant pour au moins 15% dans la discrimination des 4 régions sont présentées. Pour chaque région, les % sites et % arbres représentent les fréquences d'observation de l'année par rapport au nombre total de placettes et d'arbres disponibles. Seules les années observées dans au moins 38% des sites sont signalées. Pour le nord-est, l'année 1983 présente une réduction de croissance pour 47 % des placettes (N=32) et 86% des arbres échantillonnés.
- Tableau 37.** Caractéristiques des déficits de réserve (nombre d'années, de jours et niveau des stress) et des années caractéristiques par peuplement. Pour le nombre moyen de jours de stress, la fréquence est le rapport entre le nombre moyen de jours avec déficit et la longueur de la saison de végétation. Les années caractéristiques ont été calculées sur le cerne complet exprimé en mm et cm². La fréquence est le rapport entre le nombre d'années caractéristiques et le nombre total d'années disponibles.
- Tableau 38.** Déficit de réserve en eau des 3 années les plus sèches observées pour chaque peuplement sur la période 1949-1994. Si l'année correspondante est caractéristique, la variation relative (%) de croissance (calculée à partir de la largeur du cerne complet) a été indiquée. Le déficit moyen correspond à la moyenne des 3 années.
- Tableau 39.** Corrélations entre les indices de croissance radiale (calculés à partir des surfaces de cernes) et les déficits annuels de réserve en eau pour les 41 peuplements du réseau RENECOFOR. Pour chaque cas, les caractéristiques de la droite de régression (constante et pente) et le nombre d'années (N) pris en compte ont été indiqués. Les corrélations significatives ont été indiquées en gras. Pour chaque placette, toutes les années ont été prises en compte.
- Tableau 40.** Fonctions de réponse codées pour les différentes placettes. Chaque code correspond à un seuil de signification de la variable climatique : code 1 = variable significative au seuil de 10 p. cent ; code 2 = 5 p. cent ; code 3 = 1 p. cent ; code 4 = 1 p. mille. Le signe + et - indique le sens d'intervention de la variable. Pour chaque placette, la première ligne correspond aux fonctions de réponse calculées avec (indice de déficit + T min) et la seconde avec (indice de déficit + Tmax). Le coefficient r est le coefficient de corrélation calculé sur les années de vérification. Le RMV est le rapport de ce coefficient sur son écart-type. S/N représente le rapport entre la somme (S) en valeur absolue des codes des différents régresseurs et le nombre total de régresseurs (N). (*) Pour les placettes CHS 57a, HET 54a et b, les fonctions de réponse ont été calculées à partir des températures moyennes (pas de données min et max).
- Tableau 41.** Corrélations (r²) entre les indices de croissance radiale et les indices de déficits de réserve en eau pour les 41 placettes. Pour chaque cas, seule la période présentant la corrélation la plus significative a été prise en compte (zone grisée) (synthèse des tableaux 39 et 40). Le premier chiffre correspond à la corrélation observée entre la croissance et les mois considérés (zones grisées). La valeur entre parenthèses donne la corrélation obtenue avec l'indice annuel de déficit de réserve (cumul de mai à octobre). Pour HET21, l'indice de déficit de juin-juillet explique 42% des variations de croissance inter-annuelles (21% pour l'indice annuel). N= nombre d'années pris en compte. ns= non significatif au seuil de 5%.

- Tableau 42.** Relations entre les températures mensuelles et la croissance pour les 15 peuplements de chênes et les 15 peuplements de hêtre. Pour chaque espèce, N représente le nombre de placettes pour lesquelles la température du mois considéré intervient. N Tmin et N Tmax représentent le nombre de cas où la Tmin ou la Tmax sont significativement corrélées avec la croissance. Le signe + ou - donne le sens de la relation. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% ont été considérées (variable codée 2 dans le tableau 40). Pour les chênes, la température de décembre (n-1) intervient dans 5 cas sur 15. La Tmin dans 4 cas et la Tmax dans 3 cas. L'action de cette température est toujours positive.
- Tableau 43.** Relations entre les températures mensuelles et la croissance pour les 5 peuplements de d'écicéa et les 6 peuplements de sapin. Pour chaque espèce, N représente le nombre de placettes pour lesquelles la température du mois considéré intervient. N Tmin et N Tmax représentent le nombre de cas où la Tmin ou la Tmax sont significativement corrélées avec la croissance. Le signe + ou - donne le sens de la relation. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% ont été considérées (variable codée 2 dans le tableau 40). Pour les sapins, la température de février intervient dans 5 cas sur 6. La Tmin dans 4 cas et la Tmax dans 3 cas. L'action de cette température est toujours positive.
- Tableau 44.** Analyse de la cohérence de la réponse des 30 peuplements de feuillus aux indices mensuels de déficit de réserve. Les peuplements ont été regroupés selon leur localisation géographique. RUM = réserve utile maximale en eau du sol (en mm). Les moyennes climatiques (1961-1990) ont été calculées sur les stations météorologiques attachées à chaque placette (voir Tableau 2). Le r^2 indique la corrélation entre les indices de croissance radiale et les indices de déficits de réserve en eau. Pour chaque cas, seule la période présentant la corrélation la plus significative a été prise en compte (zone grisée) (synthèse des Tableaux 39 et 40). Le premier chiffre correspond à la corrélation observée entre la croissance et les mois considérés (zones grisées). La valeur entre parenthèses donne la corrélation obtenue avec l'indice annuel de déficit de réserve (cumul de mai à octobre). Pour HET21, l'indice de déficit de juin-juillet explique 42% des variations de croissance inter-annuelles (21% pour l'indice annuel). N= nombre d'années pris en compte. ns= non significatif au seuil de 5%.
- Tableau 45.** Fonctions de réponse codées pour les différentes placettes. Chaque code correspond à un seuil de signification de la variable climatique : code 1 = variable significative au seuil de 10 p. cent; code 2 = 5 p. cent ; code 3 = 1 p. cent ; code 4 = 1 p. mille. Le signe + et - indique le sens d'intervention de la variable. Pour chaque placette, la première ligne correspond aux fonctions de réponse calculées avec (P+ T min) et la seconde avec (P + Tmax). Le coefficient r est le coefficient de corrélation calculé sur les années de vérification. Le RMV est le rapport de ce coefficient sur son écart-type. S/N représente le rapport entre la somme (S) en valeur absolue des codes des différents régresseurs et le nombre total de régresseurs (N). (*) Pour les placettes CHS 57a, HET 54a et b, les fonctions de réponse ont été calculées à partir des températures moyennes (pas de données min et max).

I. INTRODUCTION

Dans le cadre du Réseau National de Suivi à Long Terme des Ecosystèmes Forestiers (abrégé en RENECOFOR), une étude dendrochronologique a été entreprise en 1995-1996 afin de retracer l'histoire des 102 peuplements à travers la croissance radiale des arbres (Lebourgeois 1997). L'analyse des 3029 carottes de sondage a permis de préciser l'âge et le niveau moyen de croissance radiale des arbres, de mettre en évidence les crises antérieures de croissance avant l'installation du réseau et de juger de l'ampleur des éclaircies pratiquées dans les peuplements (Lebourgeois *et al.* 1998 ; Lebourgeois 1999). Dans un tel réseau d'observations à long terme (30 ans), l'analyse des crises de croissance apparaît essentielle. En effet, de nombreuses études ont clairement montré que des symptômes actuels de dépérissement (pertes foliaires, jaunissement...) pouvaient être l'expression de pertes de croissance parfois très anciennes liées, dans la grande majorité des cas, à des événements climatiques exceptionnels ou durables (sécheresses estivales, gelées hivernales ou printanières) (Becker 1987 ; Landmann 1993 ; Lebourgeois et Becker 1996 ; Bréda 1999). Face à l'importance du facteur climatique sur la dynamique des peuplements forestiers, il est apparu particulièrement intéressant d'analyser plus finement les relations entre les variations inter-annuelles de croissance et le climat dans les placettes du réseau. L'identification des facteurs climatiques influençant la croissance des arbres peut se faire (1) par l'établissement de « fonctions de réponse » qui traduisent le comportement moyen du peuplement dans la région climatique considérée et (2) par l'analyse des séries de cernes plus étroits ou plus larges que la moyenne (années « caractéristiques ») qui traduisent l'effet d'événements climatiques extrêmes sur la croissance. Les variables climatiques potentiellement explicatives peuvent être considérées à différents pas de temps (saisonnier, mensuel ou journalier), isolément (température moyenne, minimum, maximum, cumul des précipitations) ou combinées (utilisation des sorties d'un modèle de bilan hydrique). Les variations climatiques n'étant pas identiques selon les régions, chaque essence doit faire l'objet d'observations régionales. A terme, les différents modèles obtenus peuvent être comparés afin de mettre en évidence d'éventuelles grandes tendances dans le comportement de l'espèce vis-à-vis des aléas climatiques. A l'inverse, pour une même région climatique, les réponses des différentes espèces peuvent être comparées et mises en relation avec les comportements écophysologiques et phénologiques des espèces considérées (espèce évitante ou tolérante, débourrement tardif ou précoce...).

Les principaux objectifs du présent projet sont :

- D'élaborer les indices des contraintes hydriques subies par les arbres ;
- De tester la pertinence et la validité du bilan hydrique, qui prend en compte des paramètres climatiques mesurés au pas de temps journalier, comme variable explicative de la croissance radiale des peuplements et de comparer les modèles ainsi obtenus à ceux définis à partir de l'approche classique au pas de temps mensuel ;
- De juger du déterminisme climatique des comportements remarquables de croissance mis en évidence à partir de la définition des années caractéristiques ;
- De régionaliser les relations cerne-climat en mettant en évidence d'éventuelles grandes tendances dans le comportement des espèces vis-à-vis du climat.

II. MATERIEL ET METHODES

1 Sélection des sites et des stations météorologiques

Les données météorologiques utilisées dans cette étude proviennent des stations du réseau national Météo-France. Ces stations ont été sélectionnées avec l'aide du Service Central d'Exploitation de la Météorologie (SCEM de Toulouse) et correspondent :

- *Aux stations les plus proches possibles des peuplements échantillonnés.* En effet, la fiabilité des relations cerne-climat est très dépendante de la qualité des données climatiques utilisées (Tessier 1989). Plus la station est proche du site et plus la relation sera satisfaisante (surtout pour la pluviométrie qui peut fortement varier sur une très courte distance) ;
- *A des longues séries homogènes.* L'élaboration de fonctions de réponse des arbres au climat statistiquement fiables nécessite le calcul des corrélations cerne-climat sur au moins 30 années ;
- *A des séries complètes pour lesquelles l'ensemble des données journalières nécessaires au calcul du bilan hydrique est disponible.* Le calcul de ce bilan prend en compte 6 données journalières qui ne sont pas systématiquement relevées dans toutes les stations Météo-France : températures minimale et maximale (°C), pluviométrie (mm), durée d'insolation (minute), vitesse du vent (m/s) et tension de vapeur d'eau (hPa).

La fiabilité du calcul du bilan hydrique dépend également de paramètres liés aux peuplements échantillonnés (Bréda 1994 ; Granier *et al.* 1995, 1999). Ainsi, sur l'ensemble des 102 placettes du réseau, un sous-échantillon a été défini selon les critères de sélection suivants :

- *L'âge des arbres* doit être d'au moins 40 ans ;
- *L'espèce dominante* doit représenter au moins 50% du nombre de tiges du peuplement ;
- *Le peuplement doit être mono spécifique.* Les mélanges feuillus et résineux sont exclus ;
- Enfin, *la régionalisation* ne peut se faire que sur les espèces bien représentées au niveau national en nombre de placettes et en localisation.

Le croisement de l'ensemble de ces conditions – existence et représentativité des données météorologiques et critères des peuplements – a permis de choisir 41 placettes correspondant à 5 espèces parmi les 102 peuplements et les 10 espèces du réseau (**Carte 1 et Tableau 1**).

A ces 41 placettes correspondent 68 stations météorologiques du réseau national (**Tableau 2**). 28 stations disposent des 6 données journalières permettant de calculer l'ETP Penman. Dans près de 70% des cas, ces stations de référence sont distantes de plus de 25 km des sites étudiés (**Figure 1**). Etant donné la sensibilité du modèle de bilan hydrique aux précipitations, et plus généralement des peuplements forestiers à ce paramètre climatique, il est important de disposer des données pluviométriques les plus représentatives du contexte de croissance des arbres étudiés. Ainsi, ces stations de référence ont été complétées par les 35 stations pluviométriques les plus proches possibles des sites. Dans plus de 80% des cas, ces stations sont localisées à



Carte 1. Localisation géographique des 41 peuplements et des 68 postes météorologiques du réseau national Météo-France. Le chiffre entre parenthèses indique l'altitude du poste. ETP = évapotranspiration ; T = température ; P = précipitation. HET = hêtre ; CHS et CHP = chênes sessile et pédonculé ; EPC = épicéa ; SP = sapin pectiné. Le numéro suivant le code de l'espèce indique le département. La carte centrale représente la zonation bioclimatique (simplifiée) de la France.

Espèce	Forêt	Département	Code	Latitude	Longitude	Alti	Pente	Expo	Topo	Type de sol
<i>Quercus robur</i>	D. de Verneuil	Cher	CHP 18	46°49'33" N	2°34'27" E	175	2	nord-ouest	terrain plat	péiosol-pseudogley
<i>Chêne pédonché</i>	D. de Monnaie	Maine et Loire	CHP 49	47°27'22" N	0°01'52" W	57	0	sud-ouest	terrain plat	sol brun lessivé à pseudogley
<i>Pedunculata oak</i>	D. de Mormal	Nord	CHP 59	50°10'16" N	3°45'16" E	149	3	plat	terrain plat	pseudogley glossique
	C. d'Azereix	Hautes-Pyrénées	CHP 65	43°12'13" N	0°02'17" W	370	12	sud-est	replat	sol brun colluvial
<i>Quercus petraea</i>	D. de Seillon	Ain	CHS 01	46°10'17" N	5°14'22" E	260	3	plat	terrain plat	sol brun faiblement lessivé à pseudogley
<i>Chêne sessile</i>	D. de Tronçais	Allier	CHS 03	46°40'05" N	2°43'37" E	260	0	plat	terrain plat	sol brun superficiel
<i>Sessile oak</i>	D. de Viezron	Cher	CHS 18	47°15'17" N	2°07'29" E	176	1	plat	terrain plat	sol lessivé à pseudogley
	D. de Châtreaux	Mane	CHS 51	49°01'60" N	4°57'38" E	180	2	sud	haut de versant	sol ocre podzologique
	D. d'Amelecourt	Moselle	CHS 57a	48°52'18" N	6°29'02" E	315	4	nord-est	haut de versant	sol brun faiblement lessivé à pseudogley
	D. de Montherhouse	Moselle	CHS 57b	49°00'59" N	7°27'45" E	320	15	nord-ouest	haut de versant	podzol
	D. de Vincence	Nièvre	CHS 58	46°58'13" N	3°39'39" E	270	7	sud-ouest	mi-versant	sol brun lessivé à pseudogley
	D. de Reno Valdieu	Orne	CHS 61	48°31'23" N	0°40'48" E	220	5	sud-est	terrain plat	sol brun faiblement lessivé hydromorphe
	D. de Bercé	Sarthe	CHS 72	47°47'46" N	0°22'49" E	170	0	plat	terrain plat	sol brun lessivé à pseudogley
	D. de Grésigne	Tam	CHS 81	44°02'44" N	1°44'56" E	300	18	sud-est	mi-versant	sol brun faiblement lessivé
	D. de Moulfière	Vienne	CHS 86	46°37'38" N	0°29'44" E	116	4	nord-ouest	mi-versant	sol brun acide
<i>Picea abies</i>	C. de Chaux du Dombief	Jura	EPC 39a	46°34'47" N	5°52'37" E	970	10	sud-est	haut de versant	sol brun eutrophe
<i>Épicéa commun</i>	C. des Rousses	Jura	EPC 39b	46°31'00" N	6°03'44" E	1210	8	ouest	dépression ouverte	sol humo-calcaïque
<i>Norway spruce</i>	D. de Glenne	Saône et Loire	EPC 71	47°00'33" N	4°07'06" E	600	20	sud-est	mi-versant	sol ocre podzologique
	C. de Bourg-Saint-Maurice	Savoie	EPC 73	45°35'12" N	6°47'23" E	1700	40	nord-ouest	mi-versant	sol brun acide
	S. de Laveline	Vosges	EPC 88	48°14'02" N	7°06'14" E	660	20	sud-ouest	replat	sol brun acide
<i>Fagus sylvatica</i>	D. de Retz	Aisne	HET 02	49°12'21" N	3°07'36" E	145	0	plat	terrain plat	pseudogley
<i>Hêtre commun</i>	D. des Coilettes	Allier	HET 03	46°11'37" N	2°59'54" E	590	15	nord	haut de versant	sol brun acide
<i>Common beech</i>	D. du Jabron	Alpes de Haute-Prov.	HET 04	44°07'52" N	5°48'00" E	1300	50	nord	mi-versant	sol brun calcaïque
	D. de Soulan	Arège	HET 09	42°55'53" N	1°16'56" E	1250	32	sud-ouest	mi-versant	sol ocre podzologique
	D. de Cerisy	Calvados	HET 14	49°10'57" N	0°51'23" W	90	4	plat	terrain plat	sol brun acide superficiel
	D. de Lugny	Côte d'Or	HET 21	47°48'50" N	4°51'18" E	400	3	nord-est	sommet arrondi	rendzine
	D. de Carnoet	Finistère	HET 29	47°50'16" N	3°32'34" W	50	0	plat	terrain plat	sol brun faiblement lessivé acide
	D. d'Auberive	Haute-Marne	HET 52	47°47'46" N	5°04'17" E	440	0	plat	terrain plat	rendzine brunifié
	D. des Hauts Bois	Meurthe et Moselle	HET 54a	48°30'35" N	6°42'23" E	325	5	est	mi-versant	rendzine brunifié
	D. de Haye	Meurthe et Moselle	HET 54b	48°38'57" N	6°04'04" E	390	2	plat	terrain plat	rendzine brunifié
	D. de Lachalade	Meuse	HET 55	49°10'15" N	5°00'17" E	250	0	plat	terrain plat	sol ocre podzologique
	D. de Compiègne	Oise	HET 60	49°19'27" N	2°52'34" E	138	0	plat	terrain plat	sol brun calcaïque hydromorphe
	C. d'Ance	Pyrénées-Atlant.	HET 64	43°09'01" N	0°39'29" W	400	44	nord-ouest	mi-versant	sol brun eutrophe
	C. de Bize	Hautes-Pyrénées	HET 65	43°01'36" N	0°26'12" E	850	25	nord-ouest	mi-versant	sol brun acide
	D. du Ban d'Harol	Vosges	HET 88	48°08'21" N	6°14'50" E	400	3	ouest	haut de versant	sol brun faiblement lessivé à pseudogley
<i>Abies alba</i>	D. de Boscodon	Hautes-Alpes	SP 05	44°29'25" N	6°27'33" E	1360	30	nord-est	mi-versant	sol brun calcaïque
<i>Sapin pectiné</i>	D. de Lavillaite	Arèche	SP 07	44°42'36" N	3°57'57" E	1300	20	ouest	mi-versant	sol ocre podzologique humifère
<i>Silver fir</i>	D. de Massat	Arège	SP 09	42°51'52" N	1°20'43" E	1100	66	nord-ouest	bas de versant	sol ocre podzologique
	D. d'Abeschiviller	Moselle	SP 57	48°36'36" N	7°08'02" E	400	20	nord-ouest	mi-versant	sol brun acide
	D. du Livradois	Puy-de-Dôme	SP 63	45°26'51" N	3°31'39" E	1040	25	sud-ouest	mi-versant	sol brun acide
	D. de Guebviller	Haut-Rhin	SP 68	47°56'01" N	7°07'31" E	680	45	nord-ouest	mi-versant	sol brun mésotrophe

Tableau 1. Caractéristiques stationnelles des 41 placettes retenues pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance. L'altitude est exprimée en m et la pente en %. Les types de sol suivent la classification Duchaufour.

Code	all.	Site	Postes météorologiques de rattachement (type de données)										T (2 données journalières)		les centres		Dates disponibles pour les données météo (ETP-P-T)		Période modélisable d'années	Nbre d'années
			ETP (6 données journalières)		P (1 donnée journalière)		T (2 données journalières)		alt. dist.		alt. dist.		alt. dist.		alt. dist.					
			Station	alt.	dist.	%DM	Station	alt.	dist.	%DM	Station	alt.	dist.	%DM	Station	alt.	dist.	%DM		
CHP 18	175	D. de Verneuil	Cher	Bourges	161	31	0,4	Dun-sur-Auron	160	5	1,9	1951-1994	01/01/1950-01/01/1947	1951-1994	44					
CHP 49	57	D. de Monnaie	Maine et Loire	Angers	97	41	0,1	Longue-Jumeilles	30	9	2,2	1934-1994	01/01/1950-01/01/1950	1950-1994	45					
CHP 59	149	D. de Mormal	Nord	Fontaine-les-clercs	98	55	0,04	Etreux	141	22	0,8	1932-1994	01/01/1949-01/01/1933	1949-1994	36					
CHP 65	370	C. d'Azereix	Hautes-Pyrénées	Tarbes (Ossun)	360	3	0,09	Tarbes (Ossun)	360	3	0,09	1947-1994	01/01/1956-	1956-1994	49					
CHS 01	260	D. de Seillon	Ain	Ambérieu (Château-Caillard)	250	22	0,8	Neuville-sur-Ain	275	14	0,5	1921-1994	01/01/1950-01/01/1946	1950-1994	45					
CHS 03	260	D. de Tronçais	Allier	Nevers (Marzy)	175	46	0,5	Isle-et-Bardais	260	0	0,4	1900-1994	01/01/1952-01/01/1954	1954-1994	41					
CHS 18	176	D. de Vierzon	Cher	Bourges	161	27	0,4	Vierzon	98	8	0,8	1932-1994	01/01/1950-01/01/1947	1950-1994	45					
CHS 51	180	D. de Charitres	Marne	Saint-Dizier	138	44	0	Sainc-Menehould	210	7	0	1892-1994	01/01/1962-01/01/1950	1962-1994	33					
CHS 57a	315	D. d'Amelécourt	Moselle	Tomblaine	212	28	0	Foulquiennont	278	21	1,4	1920-1994	01/01/1950-01/01/1950	1950-1994	45					
CHS 57b	320	D. de Mouterhouse	Moselle	Strasbourg (Enzheim)	150	53	0,02	Rohrbing	275	17	0,04	1886-1994	01/01/1950-01/01/1954-01/01/1950	1954-1994	41					
CHS 58	270	D. de Vincence	Nièvre	Nevers (Marzy)	175	42	0,5	Vandenesse	220	10	1,5	1945-1994	01/01/1952-01/01/1955	1955-1994	40					
CHS 61	220	D. de Reno Valdien	Orne	Alençon	140	43	0,9	Remalard	160	11	0,8	1914-1994	01/01/1949-01/01/1951	1951-1994	44					
CHS 72	170	D. de Bercé	Sarthe	Le Mans	51	21	0,1	Mansigné	73	18	2,9	1942-1994	01/01/1949-01/01/1951	1951-1994	44					
CHS 81	300	D. de Grésigne	Tarn	Toulouse (Bagnac)	151	55	0,2	Cordes-sur-ciel	175	17	0,3	1903-1994	01/01/1949-01/01/1942	1942-1994	53					
CHS 86	116	D. de Mouligne	Vienne	Poitiers (Blard)	117	15	0,2	La Chapelle-Moulière	121	3	1,4	1922-1994	01/01/1949-01/01/1949	1949-1994	46					
EPC 39a	970	C. de Chaux du Dombief	Jura	Besançon	307	74	1,4	Saint-Laurent-en-Grandvaux	910	6	1,4	1940-1994	01/01/1949-01/01/1946-01/01/1962	1962-1994	33					
EPC 39b	1210	C. des Rousses	Jura	Besançon	307	81	1,4	Les Rousses	1110	3	0,5	1902-1994	01/01/1949-01/01/1948-01/01/1962	1962-1994	33					
EPC 71	600	D. de Glenne	Saône et Loire	Nevers (Marzy)	175	77	0,5	Château-Chinon (ville)	598	15	0,2	1953-1994	01/01/1952-01/01/1945	1953-1994	42					
EPC 73	1700	C. de Bourg-Saint-Maurice	Savoie	Bourg-Saint-Maurice	869	3	0,02	Bourg-Saint-Maurice	865	3	0,02	1838-1994	01/01/1960-	1960-1994	35					
EPC 88	660	S. de Lavalline	Vosges	Colmar (Meyenheim)	209	41	0,9	Fraize	518	8	0,2	1913-1994	01/01/1963-01/01/1950	1963-1994	32					
HET 02	145	D. de Retz	Aisne	Bonneuil-en-France	51	57	0,3	Beiz	100	13	2,9	1952-1994	01/01/1949-01/01/1956	1956-1994	39					
HET 03	590	D. des Colettes	Allier	Vichy (Charmell)	249	31	0,4	Ebreuil	310	10	0,6	1939-1994	01/01/1950-01/01/1928-01/01/1951	1951-1994	44					
HET 04	1300	D. du Jablon	Alpes de Haute-Prov.	Château-Amoux-St-Auban	461	17	1,5	Château-Amoux-St-Auban	461	17	1,5	1918-1994	01/01/1968-	1968-1994	27					
HET 09	1250	D. de Soutan	Arège	St-Giron (Loop-Sentaraille)	411	16	1,7	Aulus-les-Bains	733	15	0,4	1871-1994	01/01/1956-01/01/1953	1956-1994	39					
HET 14	90	D. de Corisy	Calvados	Caen (Carpique)	64	28	0,02	Brenoy	240	22	1,1	1920-1994	01/01/1952-01/01/1949	1952-1994	43					
HET 21	400	D. de Lugny	Côte d'Or	Langres	467	36	0,5	Recey-sur-Ource	330	3	0,5	1887-1994	01/01/1956-01/01/1921	1956-1994	39					
HET 29	50	D. de Carmoet	Finistère	Lorient (Quéven)	42	16	0,06	Quimperlé	40	3	1,3	1943-1994	01/01/1965-01/01/1958	1965-1994	30					
HET 52	440	D. d'Aubertve	Haute-Marne	Langres	467	20	0,5	Recey-sur-Ource	330	15	0,5	1900-1994	01/01/1956-01/01/1921	1956-1994	39					
HET 54a	325	D. des Hauts Bois	Meurthe et Moselle	Tomblaine	212	40	0	Lanceuveville-mux-bois	240	11	0,9	1926-1994	01/01/1950-01/01/1958	1958-1994	37					
HET 54b	390	D. de Haye	Meurthe et Moselle	Tomblaine	212	11	0	Tomblaine	212	11	0	1929-1994	01/01/1950-	1950-1994	45					
HET 55	250	D. de Lachalade	Meuse	Saint-Dizier	138	60	0	Sainc-Menehould	210	7	0	1924-1994	01/01/1962-01/01/1950	1962-1994	33					
HET 60	138	D. de Compiègne	Oise	Bonneuil-en-France	51	51	0,3	Chevrières	31	15	0,9	1945-1994	01/01/1949-01/01/1960	1962-1994	33					
HET 64	400	C. d'Ance	Pyrénées-Arlant.	Pau (Uzein)	183	32	0,03	Buzey	303	14	0	1940-1994	01/01/1955-01/01/1951-01/01/1952	1955-1994	40					
HET 65	850	C. de Bize	Hautes-Pyrénées	Tarbes (Ossun)	360	39	0,09	Nestier	504	5	0,1	1861-1994	01/01/1956-01/01/1948	1956-1994	39					
HET 88	400	D. du Ban d'Harol	Vosges	Luxeuil (Saint-Stauveur)	271	38	0,2	Chaumoussy	357	10	1,8	1943-1994	01/01/1956-01/01/1955	1956-1994	39					
SP 05	1360	D. de Boscodon	Hautes-Alpes	Embrun	871	9	4,4	Les Orres	1445	7	0,5	1930-1994	01/01/1950-01/02/1953	1956-1994	39					
SP 07	1300	D. de Lavillate	Arèche	Moutémar	73	62	0,2	Saint-Etienne-de-Lugdaires	1035	6	0,3	1924-1994	01/01/1949-01/01/1951-01/01/1956	1956-1994	42					
SP 09	1100	D. de Massat	Arège	St-Giron (Loop-Sentaraille)	411	25	1,7	Aulus-les-Bains	733	7	0,4	1835-1994	01/01/1956-01/01/1953	1956-1994	39					
SP 57	400	D. d'Abrèschviller	Moselle	Strasbourg (Enzheim)	150	37	0,02	Niling	270	9	0	1950-1994	01/01/1950-01/01/1950-01/01/1950	1950-1994	45					
SP 63	1040	D. du Livradois	Puy-de-Dôme	Clermont-Perrand	329	47	0,05	Marsac-en-Livradois	550	16	1,5	1919-1994	01/01/1949-01/01/1944	1949-1994	46					
SP 68	680	D. de Guebwiller	Haut-Rhin	Colmar (Meyenheim)	209	21	0,9	Krueth	500	12	1	1902-1994	01/01/1963-01/01/1954	1963-1994	32					

Tableau 2. Postes météorologiques du réseau national Météo-France rattachés à chaque placette pour chaque type de données (ETP, P et T). L'altitude est en mètres et la distance du poste à la placette est en km. Pour les données de croissance, les dates disponibles correspondent à la période pour laquelle l'effectif d'arbres est complet (26 à 30). La période modélisable représente la plus longue période disponible après croisement des données de croissance et météorologiques (1, 2 ou 3 postes). %DM = % de données météorologiques manquantes.

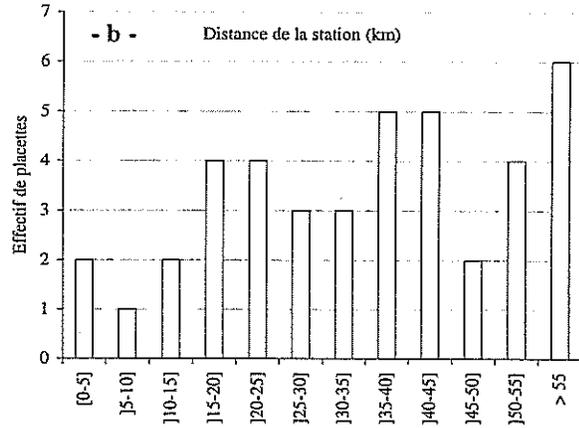
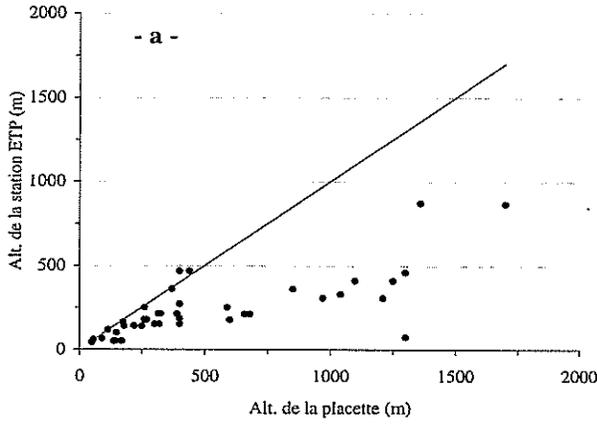


Figure 1. Relation entre l'altitude (en m) de la station météorologique de référence pour le calcul de l'ETP (6 données journalières) et l'altitude des 41 placettes RENECOFOR étudiées (- a -) et effectif des placettes selon leur éloignement de la station météorologique de référence (- b -).

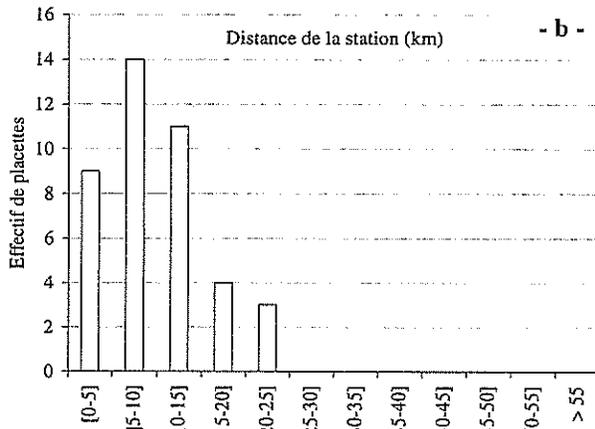
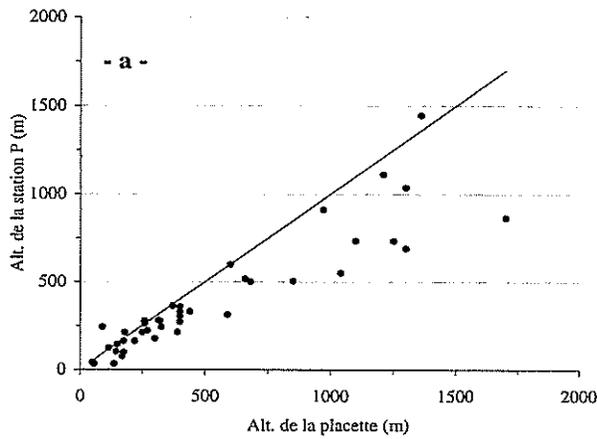


Figure 2. Relation entre l'altitude (en m) de la station météorologique de référence pour les précipitations (P ; 1 donnée journalière) et l'altitude des 41 placettes RENECOFOR étudiées (- a -) et effectif des placettes selon leur éloignement de la station météorologique de référence (- b -).

moins de 15 km des placettes (Figure 2). Enfin, 5 stations de données thermiques (2 données par jour) ont également été prises en compte pour les quelques placettes d'altitude.

Liste des 41 placettes du réseau RENECOFOR retenues pour l'analyse du bilan hydrique et de la croissance.

Espèce	Code	Nb de sites	Département d'échantillonnage
Chêne pédonculé	CHP	4	18, 49, 59, 65
Chêne sessile	CHS	11	1, 3, 18, 51, 57a, 57b, 58, 61, 72, 81, 86
Epicéa commun	EPC	5	39a, 39b, 71, 73, 88
Hêtre	HET	15	2, 3, 4, 9, 14, 21, 29, 52, 54a, 54b, 55, 60, 64, 65, 88
Sapin pectiné	SP	6	5, 7, 9, 57, 63, 68

En raison de chronologies trop courtes ou du nombre restreint de placettes disponibles, l'ensemble des placettes de douglas (n=6), de pin maritime (n=7), de pin laricio (n=2) et de mélèze (n=1) a été exclu de l'étude.

Les 14 placettes de pin sylvestre n'ont pas été retenues pour la caractérisation des niveaux de contraintes en eau et pour l'analyse des relations entre les variations inter-annuelles de croissance et les données climatiques. Cependant, elles ont été intégrées pour l'analyse des effets « espèce » et « région » dans le déterminisme des années caractéristiques. Afin d'affiner cette analyse, les 30 sites correspondant aux placettes de feuillus, d'épicéa et de sapin non prises en compte précédemment ont également complété cet échantillon (voir paragraphe 9).

2 Mesures et caractérisation des séries chronologiques

2.1 Mesures des accroissements radiaux

Les critères de choix des arbres dominants échantillonnés par placette (de 23 à 30), ainsi que les méthodes d'extraction des carottes de sondage ont été développés dans des publications précédentes et ne seront donc pas reprises ici (Lebourgeois 1997 ; Lebourgeois *et al.* 1998 ; Lebourgeois 1999). Chaque carotte a été mesurée à l'aide d'un système vidéo-informatisé (précision théorique : 1/100 mm). Pour chaque cerne, la largeur du bois initial (=bois de printemps) et la largeur du bois final (=bois d'été) a été mesurée séparément ; la largeur totale étant la somme de ces deux largeurs. Cette séparation doit permettre de mettre en évidence d'éventuelles différences de comportement des deux composantes du cerne vis-à-vis des conditions climatiques régionales. Ces mesures sont également intéressantes du point de vue de l'analyse du fonctionnement physiologique de l'arbre (Cochard et Tyree 1990) et également pour leur impact sur la qualité technologique des bois (Polge 1973 ; Polge et Keller 1973 ; Huber 1993). Chez les chênes, la différenciation anatomique des deux composantes du cerne est aisée. Le bois initial est une zone poreuse constituée essentiellement de gros vaisseaux. Le bois final est composé de fibres, de parenchyme et de petits vaisseaux. Pour le hêtre, le bois présente des pores nombreux et des vaisseaux de petits diamètres. Les cernes sont soulignés par la présence d'une zone de fibres aplaties à parois

épaisses sur le bord extérieur de la zone de bois final. Pour les résineux, la différenciation s'est faite sur des critères de couleur. Le bois initial correspond à la zone claire du cerne et le bois final à la zone foncée.

2.2 Largeur moyenne, écart type et coefficient de variation

L'accroissement moyen annuel (en mm/an) et l'écart-type des largeurs des cernes ont été calculés pour chaque placette sur la base des chronologies individuelles. A partir de ces deux valeurs, le coefficient de variation (moyenne divisée par l'écart-type) a été calculé. Ce paramètre, exprimé sans dimension, traduit l'écart relatif des valeurs à la moyenne.

2.3 Sensibilité moyenne (SM), coefficient d'interdatation (SR) et autocorrélation (AC)

La sensibilité moyenne (SM) (mean sensitivity) et l'autocorrélation d'ordre 1 (AC) de chaque série de cernes permettent d'appréhender l'intensité et le mode de réponse des arbres au facteur du milieu, notamment au facteur climatique (Fritts 1976 ; Strackee et Jansma 1996 ; Nefaoui 1996).

La sensibilité moyenne définit la variation moyenne entre deux épaisseurs annuelles successives (Douglass 1936). Elle exprime l'ampleur des changements affectant à court terme l'épaisseur des cernes et varie de 0, pour deux cernes successifs égaux, à 2 lorsque l'épaisseur de l'un d'entre eux est nulle. Elle quantifie la sensibilité des arbres au climat tel qu'il résulte de l'interaction des facteurs du milieu (Tessier 1989) et s'exprime par le rapport :

$$S_j = \frac{1}{n-1} \times \sum_{t=1}^{t=n-1} \left| \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{x_{t+1} + x_t} \right|$$

x_t = cerne formé l'année t x_{t+1} = cerne formé l'année t+1 n = nombre d'années disponibles

Pour la population entière, la sensibilité moyenne est :

$$SM_i = \frac{1}{n-1} \times \sum_{t=1}^{t=n-1} S_j$$

Le coefficient d'interdatation SR correspond au plus ou moins bon synchronisme des séries élémentaires dont est issue la chronologie maîtresse (Tessier 1984 ; Gadbin-Henry 1994). C'est le rapport de la sensibilité moyenne calculée directement sur la chronologie maîtresse (SM_m) à la moyenne des sensibilités moyennes calculées sur les séries élémentaires correspondantes (SM_i) :

$$SR = \frac{SM_m}{SM_i}$$

Les valeurs les plus proches de 1 expriment un synchronisme maximum. L'asynchronisme total est exprimé par des valeurs qui dépendent de la taille de l'échantillon analysé. Pour un groupe de n séries, une valeur de SR

égale à $1/\sqrt{n}$ correspondrait à des séries dont les épaisseurs de cernes varieraient de façon purement aléatoire (Schulman 1956 ; Munaut 1966).

La confrontation de ces deux paramètres (SM et SR) permet une appréciation plus objective de l'intensité et du mode de réponse des arbres au facteur climatique. La combinaison « faible sensibilité moyenne et fort coefficient d'interdatation » dénote une réponse modérée, mais très homogène, des individus au climat. A l'opposé, une forte sensibilité moyenne couplée à un faible coefficient d'interdatation signifie une réponse climatique plus modulée par l'intervention de facteurs microstationnels susceptibles d'agir de façon sélective sur les individus (Tessier 1982 ; Nefaoui 1996).

L'autocorrélation d'ordre 1 estime l'interdépendance entre deux cernes successifs de la même série chronologique, c'est-à-dire quantifie l'effet de la persistance lié aux conditions conduisant à l'élaboration du cerne de l'année (t-1) sur la mise en place du cerne de l'année suivante (t).

2.4 Transformation des accroissements annuels en surfaces

Pour étudier la croissance radiale, les surfaces de cernes (en cm^2) sont de plus en plus utilisées car elle rendent mieux compte de la production en biomasse que les largeurs (Jordan et Locaby 1990 ; LeBlanc 1990 ; Briffa 1992 ; Visser 1995 ; Gadbini-Henry 1994). La surface d'un cerne d'âge a correspond à la surface terrière de l'arbre à l'âge a moins la surface terrière de l'arbre à l'âge $(a-1)$, soit :

$$S_a = \pi \times L_a \times ([2 \times R_{a-1}] + L_a)$$

S_a = surface du cerne d'âge a R_{a-1} = rayon de l'arbre à l'arbre $(a-1)$ L_a = largeur du cerne d'âge a .

2.5 Standardisation des accroissements annuels : modélisation ARMA

Le calcul des relations cerne-climat nécessite, dans la grande majorité des cas, une transformation préalable des données brutes en données standardisées (exprimées sans dimension). Les méthodes de standardisation sont multiples et le choix de l'une d'entre elles dépend des objectifs fixés, c'est-à-dire du type de signal que l'on désire étudier (Monserud 1986 ; Cook 1987 ; Cook *et al.* 1990 ; Warren et LeBlanc 1990 ; Dupouey *et al.* 1992 ; Visser et Molenaar 1992 ; Van Deusen et Reams 1993 ; Cook et Peters 1997). En dendroclimatologie, les méthodes utilisées ont généralement pour objectifs d'extraire le signal haute fréquence, qui contient la variabilité inter-annuelle liée principalement au climat, des signaux moyennes (décennies) et basses fréquences (siècle) qui reflètent les effets des processus physiologiques internes et des facteurs exogènes sur la croissance (effet de l'âge de l'arbre, arrière-effets et autocorrélation des cernes, gestion sylvicole, chablis, modifications de l'environnement...) (Cook 1990 ; Tessier *et al.* 1997).

Dans cette étude, la modélisation de la croissance sur chaque série de données fait appel à la procédure ARMA (p, q) (Auto-Regressive (p) Moving-Average (q) processes) (Box et Jenkins 1970) adaptée à l'analyse dendroclimatologique (Guiot *et al.* 1982 ; Guiot 1986, 1991 ; Tessier 1986, 1989 ; Gandolfo et Tessier 1994 ;

Messaoudène et Tessier 1997).

Un modèle calculé sur la base des autocorrélations des séries d'épaisseurs brutes permet d'obtenir l'expression de l'épaisseur du cerne au temps t (C_t) en fonction des valeurs aux temps $t_1, t_2 \dots t_n$. La série de résidus aléatoires (a_t), obtenue par la soustraction de la partie modélisée à la largeur mesurée du cerne, représente tout ce qui peut être interprété comme le signal climatique enregistré par l'arbre ; l'action du climat étant également considérée comme variant aléatoirement d'une année à l'autre. Pour un modèle ARMA (3.1) ($p=3, q=1$), l'expression mathématique correspondante est la suivante :

$$C_t = (\varphi_1 \times C_{t-1}) + (\varphi_2 \times C_{t-2}) + (\varphi_3 \times C_{t-3}) - (\theta_1 \times a_{t-1}) + a_t$$

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$: coefficients autorégressifs d'autocorrélation d'ordre 1, 2 et 3 variant de 0 à 1

θ_1 : coefficient de moyenne mobile d'ordre 1

Le modèle sélectionné est celui qui fournit des séries de résidus présentant des autocorrélations non significatives (bruit blanc), une variance résiduelle minimale et un χ^2 sur les coefficients d'autocorrélation de $n-1$ à $n-13$ des résidus minimal. Les modèles complexes sont généralement exclus car ils sont difficilement interprétables du point de vue biologique (Monserud 1986 ; Malgras et Debouzie 1997). Le modèle unique sélectionné fournit donc, pour chaque série élémentaire, une série de résidus et un modèle caractérisé par les valeurs φ et θ comprises entre 0 et 1. Les caractéristiques du modèle représentatif du peuplement sont obtenues en faisant la moyenne arithmétique des coefficients φ et θ des modèles individuels. L'efficacité moyenne de la modélisation est obtenue en faisant la moyenne des valeurs individuelles du pourcentage de variation expliquée par le modèle ($R^2 m \%$; part prédéterminée), du pourcentage de variation des résidus ($S^2 r \%$; part aléatoire) et de la statistique χ^2 . La série correspondante des résidus représentative de la population (chronologie de référence ou maîtresse) est obtenue en calculant la moyenne des résidus des séries élémentaires. Cette chronologie de référence (indices détendancés) est ensuite confrontée aux variables climatiques disponibles pour le calcul des fonctions de réponse au climat. Il est à noter que l'élimination de la fraction déterministe du modèle ARMA entraîne la disparition d'une partie de l'information contenue dans les séries de cernes, en particulier, les rapports entre la croissance de l'année en cours et les accroissements (et le climat) des années antérieures (élimination des « arrière-effets ») (Gadbin-Henry 1994).

L'interprétation écologique des modèles consiste à passer d'un modèle mathématique à un modèle biologique (Tessier 1984 ; Nefaoui 1996). La variance des résidus ($S^2 r$) peut être attribuable à l'intervention du climat au temps t . Le pourcentage d'explication du modèle ($R^2 m$) est attribuable à la partie prédéterminée liée au fonctionnement de l'arbre (mobilisation des réserves carbonées...) ou à une action différée des facteurs stationnels (réserve hydrique du sol...). Les valeurs φ et θ expriment l'effet de ces processus sur la mise en place du cerne.

Pour chaque placette, cette méthode a été appliquée sur les données du cerne total, du bois initial et du bois final exprimées en largeurs (en mm) et en surfaces (en cm^2), soit 6 chronologies de référence par peuplement. Pour chaque site, le nombre d'années pris en compte correspond aux années pour lesquelles tous les arbres échantillonnés sont disponibles. Il varie de 42 ans (1953-1994 ; EPC 71) à 160 ans (1835-1994 ; SP 09).

3 Organisation des données météorologiques

3.1 Estimation des données manquantes

Etant donné le nombre de paramètres mesurés et la longueur des séries utilisées, un certain nombre de données manquent dans les relevés quotidiens. L'estimation de ces données manquantes a été faite selon le protocole suivant :

- Pour des données de températures ou de précipitations, les valeurs manquantes sont remplacées par celles observées dans les stations complémentaires (stations T ou P vers stations ETP de référence ou l'inverse). Dans le cas de stations complémentaires caractérisées par une altitude très différente, il est possible d'établir des relations entre les données de chacune des stations et d'estimer les données manquantes à partir de ces relations (relations entre les Températures minimales (Tmin) par exemple).
- Quand il n'y a pas de stations complémentaires :
 - Pour une ou deux données manquantes successives ou non, la valeur ajoutée correspond à la moyenne calculée sur les données n-1 et n+1 ;
 - Pour une semaine, la valeur ajoutée correspond à la moyenne calculée sur les données n-7 et n+7 ;
 - Pour une série plus longue, la valeur ajoutée peut être 1) une moyenne calculée sur une période plus ou moins longue correspondant au nombre de données disponibles sur le mois à compléter (par exemple, si les 15 derniers jours du mois manquent, la valeur ajoutée du paramètre sera la moyenne des 15 premiers jours), 2) une estimation par rapport à des relations existant entre des paramètres (par exemple, la tension de vapeur d'eau peut être estimée grâce à sa relation avec la T min).

3.2 Calcul des moyennes mensuelles

A l'heure actuelle, il existe diverses méthodes d'analyse qui diffèrent par le pas de temps étudié et les hypothèses simplificatrices. Les fonctions de réponse les plus simples consistent à expliquer les variations inter-annuelles de croissance à partir des paramètres climatiques simples (pluviosité, température) à un pas de temps mensuel. Les avantages essentiels de cette méthode sont la « relative » facilité d'obtention des données météorologiques et la possibilité de caractérisation du climat régional. Les données climatiques sont généralement combinées de façon à obtenir, pour chaque année, un total de 24 variables explicatives d'octobre de l'année précédant la mise en place du cerne (année n-1) à septembre de l'année d'élaboration (année n) (Fritts 1976). Avec les totaux pluviométriques mensuels (P), 2 combinaisons avec les températures sont généralement étudiées : P et températures moyennes mensuelles maximales (P-Tmax) ; P et températures moyennes mensuelles minimales (P-Tmin) (Tessier 1989). Selon les résultats des fonctions de réponse, le regroupement de différents mois successifs peut être faits de façon à diminuer le nombre de régresseurs initiaux et à améliorer la fiabilité des modèles calculés (Guiot 1981).

3.3 Modèle du bilan hydrique

3.3.1 Description du modèle

Compte tenu du pas de temps mensuel utilisé, la démarche précédente ne tient pas compte des transitions phénologiques (pas forcément mensuelles) de l'espèce dans la région étudiée, et aboutit généralement à de simples relations statistiques dont les interprétations écologiques sont parfois difficiles. Pour une compréhension plus fine des mécanismes écophysologiques sous-jacents à la mise en place du cerne annuel de croissance, il apparaît de plus en plus indispensable de réduire les pas de temps considérés, c'est-à-dire de considérer des variables décennales voire journalières. Ces modèles mécanistes, beaucoup plus complexes, sont fondés sur les processus énergétiques et physiologiques qui gouvernent le fonctionnement des couverts végétaux, et permettent ainsi une résolution complète du bilan d'énergie. Les inconvénients de cette approche sont liés à la difficulté de recueil des données météorologiques (pas de temps horaire), des conductances du couvert et aérodynamiques, de la structure aérienne et racinaire, du type de station, etc. (Granier et Bréda 1996 ; Granier *et al.* 1999).

Un modèle climatique de bilan hydrique a été développé par l'Unité d'Ecophysologie Forestière de l'INRA-Nancy (Bréda 1994, 1999a ; Granier *et al.* 1999). Il s'agit d'un modèle itératif à pas de temps journalier à partir duquel on peut effectuer des analyses rétrospectives et prévisionnelles de l'intensité du déficit de réserve en eau du sol, simuler la transpiration des arbres et le drainage, expliquer les variations inter-annuelles de la croissance (Badeau 1995) et de l'état sanitaire des forêts (Bréda et Landmann 1995), et ainsi plus largement approfondir la connaissance des facteurs qui modulent la production forestière.

Pour chaque journée, la variation du stock d'eau du sol (ΔS_{sol}) est calculée à partir de l'équation suivante (Granier *et al.* 1999) :

$$\Delta S_{sol} = P - In - T - ET_{sse} - D$$

ΔS_{sol}	... Variation du stock d'eau dans le sol
P	... Pluie incidente (en mm)
In	... Interception de la pluie par le couvert
T	... Transpiration des arbres
ET_{sse}	... Evaporation du sol et du sous-étage
D	... Drainage

Les variables d'entrée du modèle sont les données journalières de précipitations (P en mm) et d'évapotranspiration (ETP en mm). L'ETP est calculée selon la formule de Penman à partir de la température moyenne (en °C), du déficit moyen de saturation de l'air (en Pa), du rayonnement global moyen (en J m²) et de la vitesse du vent (en m s⁻¹).

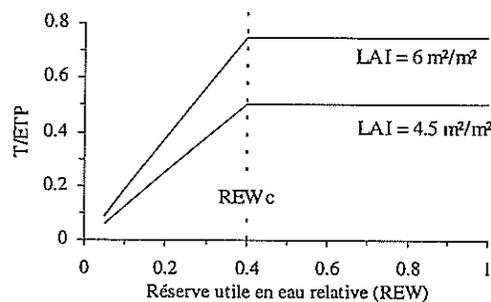
L'interception (In) est calculée comme une fonction de la pluie incidente et de la surface foliaire (LAI) (Bréda 1994, 1999b). L'interception est considérée comme constante au cours de l'année pour les résineux. Pour les feuillus, elle est réduite pendant la période d'expansion des feuilles et de sénescence. Cette durée est fixée à

30 jours pour les deux phénomènes. Pour des pluies incidentes de moins de 1 mm pour les feuillus et de 2 mm pour les résineux, l'interception est fixée à 100%. La pluie au sol, c'est-à-dire la pluie « utile » permettant au réservoir du sol de se recharger, est obtenue par différence entre la pluie incidente et l'interception des précipitations en ajoutant l'écoulement le long des troncs. Cette pluie s'infiltré verticalement dans le sol. Dans chaque couche, l'eau est répartie selon deux composantes dont la proportion dépend de la distribution de la taille des pores. Une partie de l'eau s'infiltré rapidement à travers la macroporosité (eau gravitationnelle) et atteint l'horizon sous-jacent. L'autre partie est retenue par la microporosité ce qui permet la recharge en eau de l'horizon. Quand un horizon est réhydraté à la capacité au champ, l'excès d'eau est drainé à travers les horizons.

La transpiration des arbres (T) est estimée à partir de l'évapotranspiration potentielle calculée (ETP). Il y a une relation étroite entre T_{\max} et ETP quand l'eau du sol n'est pas limitante (Bréda 1994 ; Granier *et al.* 1999). Pour la plupart des espèces étudiées et dans le cas d'un couvert fermé (indice de surface foliaire LAI ≥ 6 m²/m², c'est-à-dire plus de 6 m² de feuilles par m² de sol), il a été montré que le rapport T/ETP était de l'ordre de 0.7 à 0.8 aussi bien pour des feuillus (Aussenac et Granier 1979 ; Savoie *et al.* 1988 ; Bouten *et al.* 1992 ; Bréda *et al.* 1993) que pour des résineux (Black 1979 ; Aussenac et Boulangeat 1980). Pour des couverts non fermés (LAI < 6), Granier *et al.* (1999) ont montré que le rapport T/ETP était proportionnel à l'indice foliaire :

$$T_{\max}/ETP = 0.125 \times LAI \quad \dots 0 \leq LAI \leq 6$$

$$T_{\max}/ETP = 0.75 \quad \dots LAI \geq 6$$



Le rapport T/ETP dépend également de la réserve utile en eau. Quand la disponibilité de l'eau dans le sol diminue, c'est-à-dire quand elle devient inférieure à 40% de la disponibilité relative totale, le rapport T/ETP décroît linéairement selon cette réserve. Cette réserve critique correspond à un seuil physiologique à partir duquel la transpiration est régulée par fermeture des stomates (régulation des pertes en eau).

L'évapotranspiration du sous-étage est une fonction de l'énergie lumineuse arrivant au sol (Loustau et Cochard 1991). Celle-ci est proportionnelle à la radiation globale au dessus du couvert forestier et dépend de l'indice de surface foliaire des strates arbustive et arborescente. Dans le modèle, l'énergie disponible sous le couvert est calculée à partir de la fonction de Beer-Lambert et du coefficient d'extinction de la lumière k à travers le couvert. En absence de données précises sur la régulation de la strate herbacée en cas de sécheresse édaphique, on émet l'hypothèse que sa transpiration diminue linéairement selon la réserve utile en eau relative de l'horizon de surface du sol.

3.3.2 Principe du calcul du stress hydrique

Pour chaque jour, les différentes composantes du bilan hydrique sont calculées : interception des pluies, pluie au sol, transpiration des arbres, évapotranspiration du sol et du sous-étage et drainage.

Etape n°1. En début de simulation (1 janvier de la première année de la simulation), la réserve est initialisée à sa valeur maximale, c'est-à-dire à la capacité au champ (RU_{max}). Cette réserve correspond au réservoir sol et est fonction de l'épaisseur, de la texture et de la charge en cailloux des différents horizons prospectées par les racines. A la réserve hydrique de la veille est ajoutée la pluie arrivant au sol et est retranchée l'évapotranspiration du sous-étage. Pour remplir le réservoir du sol, la pluie au sol est partagée en deux termes : l'un correspond aux écoulements préférentiels via la macroporosité structurale ou fissurale. La seconde fraction remplit les horizons tant qu'ils ne sont pas saturés. S'ils le sont, toute la lame d'eau part en drainage vertical. Ce calcul est réalisé de façon itérative pour chaque horizon. Une nouvelle réserve hydrique R_j est calculée pour l'ensemble du réservoir sol. Pour voir savoir si la capacité du sol est dépassée (=drainage) et si les arbres sont soumis à un stress hydrique (=régulation stomatique), une réserve hydrique relative (REW, Relative Extractable Water) est calculée :

$$REW = (R_j - RU_{min}) / (RU_{max} - RU_{min})$$

$$(R_j - RU_{min}) = \text{eau utile du sol (EW = extractable water)}$$

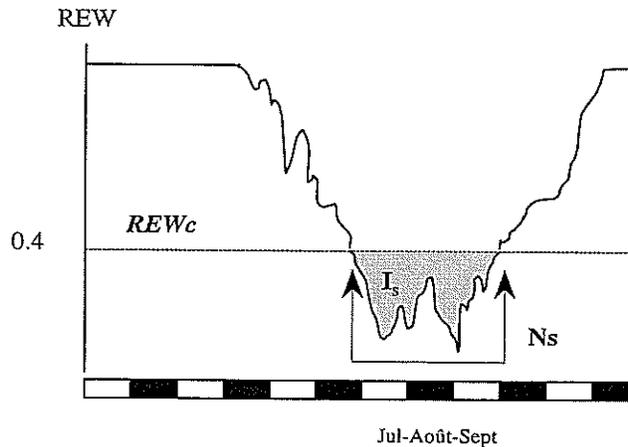
$$(RU_{max} - RU_{min}) = \text{eau utile maximale du sol (EW}_M = \text{maximum extractable water)}$$

La Réserve hydrique minimale (R_{min}) correspond à la réserve au-dessous de laquelle les arbres ne peuvent plus prélever de l'eau c'est-à-dire à l'eau liée.

Etape n°2. L'étape suivante consiste à calculer la transpiration des arbres. Elle est déduite par la relation $T/ETP = f(REW)$ par classe de LAI. Si REW est inférieure au seuil de 0.4 (=REWc), alors il y a stress hydrique et régulation stomatique. Le rapport T/ETP décroît linéairement selon la valeur calculée de REW. Connaissant l'ETP et le LAI, on peut en déduire T.

Etape n°3. Si $REW < REWc$, deux indices sont calculés qui peuvent être cumulés sur différentes périodes (annuelle, mensuelle, saison).

- Le nombre de jours de stress hydriques (N_s) correspond au nombre de jours durant lequel la quantité d'eau utile dans le sol est inférieure à 40% de la quantité d'eau utile maximale : $EW < 0.4 EW_M$;
- L'indice de stress hydrique, exprimé sans dimension, intègre la différence entre REW et REWc. Il correspond à : $IS = \sum SWD/EWM$ avec $SWD = \text{déficit en eau du sol} = (0.4*EWM - EW)$.



3.3.3 Définitions des fichiers de paramètres stationnels par placette

Outre les données climatiques élémentaires journalières, le calcul du bilan hydrique nécessite le paramétrage de certaines données liées au peuplement (phénologie, LAI...) et à la station (réserve utile...).

3.3.3.1 Les observations phénologiques

Modèle phénologique

La date de débournement des arbres ainsi que la longueur de la saison de végétation sont importantes à connaître car ces deux paramètres conditionnent, pour les feuillus, la période de calcul des indices de stress. Malheureusement, les longues séries d'observations phénologiques n'existent pas en France et, dans le cadre du réseau, ces données ne sont actuellement disponibles que pour l'année 1997 et sur un nombre restreint de sites. La température de l'air étant le principal facteur climatique qui conditionne l'apparition du débournement des espèces feuillues (Courbet 1981 ; Teissier Du Cros 1981 ; Comps *et al.* 1987 ; Hunter et Lechowicz 1992 ; Kramer 1994), il est possible de prédire le débournement à l'aide d'un modèle phénologique fondé sur le cumul T des températures de l'air au-dessus d'une valeur seuil S à partir d'une date d'initialisation I (Duchemin 1998 ; Duchemin *et al.* 1999). L'équation de ce modèle est la suivante :

$$T = \frac{1}{2} \sum_{d=I} [(Tx_d - S) + (Tn_d - S)]$$

$$\text{avec } Tx_d - S = 0 \text{ si } Tx_d < S \text{ et } Tn_d - S = 0 \text{ si } Tn_d < S$$

Pour les seuils, la valeur minimale prise en compte a été fixée à 5°C pour le chêne (Comps *et al.* 1987) et à 4.5 °C pour le hêtre (Kramer 1994). Pour le hêtre, les travaux de Courbet (1981) ont montré que la somme des

températures avait un rôle moins prépondérant que pour les autres espèces (débourrement à des dates fixes) suggérant le rôle majeur de la photopériode. Pour les deux espèces, la date d'initialisation correspond au 1er janvier de l'année courante.

Observations phénologiques pour l'année 1997

Parmi les 30 placettes de feuillus retenues pour cette étude, 9 placettes de chêne et 13 placettes de hêtre ont fait l'objet d'observations phénologiques en 1997 (**Tableaux 3 et 4**). Pour la majorité de ces sites, deux relevés ont été effectués par les responsables locaux. Ils correspondent respectivement à la semaine pour laquelle 10% et 90% des arbres présentaient sur au moins 20 à 50% du houppier des bourgeons ouverts avec l'apparition des premières petites feuilles.

Pour le chêne, le début du débourrement s'est étalé du 24 mars (CHS03) au 21 avril (CHP59, CHS57a) avec un développement phénologique terminé à la fin du mois d'avril pour la grande majorité des sites. (**Tableau 3**). Depuis l'apparition du feuillage sur les arbres les plus précoces jusqu'à la fin du débourrement, il s'est écoulé en moyenne 17 jours (13 à 20 jours). Pour la fin de la saison, le début de jaunissement du feuillage s'est étalé du 8 septembre (CHS51) au 20 octobre (CHS03, CHS58) pour se terminer entre le 5 octobre (CHP 59) et le 9 novembre.

Pour le hêtre, la majorité des arbres a débourré entre le 14 et le 21 avril pour atteindre un développement complet au début du mois de mai, voire à la mi-mai (HET55 et HET60) (**Tableau 3**). Par rapport aux autres sites, le peuplement de la forêt de Carnoët (HET 29 – Finistère) a été plus précoce avec un développement s'étalant du 31 mars au 20 avril. Depuis l'apparition du feuillage sur les arbres les plus précoces jusqu'à la fin du débourrement, il s'est écoulé en moyenne 16 jours (13 à 22 jours). Le jaunissement des feuilles est apparu entre le 25 août (HET 88) et le 20 octobre (HET 54a) et s'est généralisé entre le 28 septembre (HET29) et le 16 novembre (HET21).

A partir des dates de débourrement et de sénescence, il est possible de calculer la longueur de la saison de végétation, c'est-à-dire la longueur de la phase photosynthétiquement active. Dans notre cas, elle a été calculée à partir du jour médian de la semaine pour laquelle 90% des arbres étaient débourrés jusqu'au jour médian de la semaine pour laquelle le feuillage de 90% des arbres était jaune. Pour le chêne, la longueur de la saison de végétation a donc varié de 155 à 210 jours pour une moyenne de 186 jours. Pour le hêtre, elle a varié de 133 à 203 jours et a été en moyenne de 179 jours (**Tableau 4**).

Pour l'année 1997, le débourrement s'est étalé du jour 83 (jour le plus précoce pour un débourrement observé sur 10% des arbres) au jour 133 (jour le plus tardif pour un débourrement de 90% des arbres) et le développement complet du feuillage a pris en moyenne 17 jours. La saison de végétation a varié de 133 à 210 jours et a été en moyenne de 182 jours. L'effet régional est apparu plus nettement pour le hêtre que pour le chêne avec un retard de l'ordre de 15 jours à trois semaines entre le débourrement des placettes du Sud et de l'Ouest (93 à 114) et les sites de l'Est de la France (107 à 130).

Code	Espèce second.	Débourrement		Sénescence	
		ess. Princ	ess. Second.	ess. Princ	ess. Second.
CHP 18					
CHP 49	charme			13 oct au 9 nov	29 sept au 26 oct
CHP 59	charme	21 avril au 4 mai	31 mars au 13 avril	15 sept au 5 oct	22 sept au 12 oct
CHP 65	châtaignier			22 sept au 19 oct	20 oct au 9 nov
CHS 01	charme et chêne			13 oct au 2 nov	13 oct au 2 nov
CHS 03	charme	24 mars au 13 avril	17 mars au 13 avril	20 oct au 9 nov	20 oct au 9 nov
CHS 18	?			13 oct au 9 nov	6 oct au 9 nov
CHS 51	hêtre			8 sept au 9 nov	20 oct au 9 nov
CHS 57a	charme	21 au 27 avril		22 sept au 12 oct	13 au 26 oct
CHS 57b	hêtre	7 au 20 avril	7 au 27 avril	22 sept au 5 oct	29 sept au 19 oct
CHS 58	hêtre	31 mars au 20 avril	7 au 27 avril	20 oct au 2 nov	6 au 26 oct
CHS 61	hêtre	7 au 27 avril	14 au 20 avril	6 oct au 2 nov	29 sept au 19 oct
CHS 72	hêtre	7 au 13 avril	7 au 13 avril	13 oct au 9 nov	
CHS 81	charme	14 au 27 avril	14 au 27 avril	15 sept au 19 oct	
CHS 86	hêtre	31 mars au 20 avril	7 au 20 avril	13 oct au 9 nov	29 sept au 9 nov
EPC 39a		5 au 25 mai			
EPC 39b		26 mai au 8 juin			
EPC 71					
EPC 73		5 au 26 mai			
EPC 88		5 mai au 1 juin			
HET 02	hêtre	14 au 27 avril	14 au 20 avril	20 oct au 9 nov	22 sept au 2 nov
HET 03					
HET 04	hêtre	14 avril au 4 mai	7 au 20 avril	6 oct au 2 nov	29 sept au 12 oct
HET 09		7 au 20 avril		6 au 26 oct	
HET 14		14 au 27 avril		15 sept au 5 oct	
HET 21		21 avril au 4 mai		29 sept au 16 nov	
HET 29	hêtre et charme	31 mars au 20 avril	31 mars au 20 avril	15 au 28 sept	15 au 28 sept
HET 52		21 avril au 4 mai		6 au 26 oct	
HET 54a		14 avril au 4 mai		20 oct au 9 nov	
HET 54b	charme			6 au 26 oct	20 au 26 oct
HET 55	charme	21 avril au 13 mai	31 mars au 4 mai	20 oct au 2 nov	20 oct au 2 nov
HET 60		21 avril au 11 mai		20 oct au 9 nov	
HET 64		21 au 27 avril		29 sept au 16 nov	
HET 65		14 au 20 avril		22 sept au 26 oct	
HET 88	hêtre	21 avril au 4 mai	14 au 27 avril	25 août au 14 sept	20 oct au 2 nov
SP 05		5 au 25 mai			
SP 07	hêtre	5 au 25 mai	28 avril au 11 mai		
SP 09		5 mai au 1 juin			
SP 57		28 avril au 4 mai			
SP 63		12 mai au 1 juin			
SP 68		5 mai au 18 mai			

Tableau 3. Périodes de débourrement et de sénescence des feuilles observées en 1997 pour les 41 placettes retenues pour l'analyse du bilan hydrique. Pour le débourrement, la première date correspond à la semaine à laquelle 10% des arbres présentent au moins sur 20 à 50% du houppier des bourgeons ouverts, avec l'apparition des premières petites feuilles ou aiguilles. La seconde date correspond à la semaine à laquelle 90% des arbres présentent ces caractéristiques. Pour la sénescence, la première date correspond à la semaine dans laquelle 10% des arbres présentent un début de jaunissement sur au moins 20 à 50% des feuilles du houppier. La seconde date correspond à la semaine dans laquelle 90% des arbres présentent ces caractéristiques. Les observations ont été effectuées à l'oeil nu ou à l'aide de jumelles par les responsables locaux du réseau.

Comparaison des dates prédites et observées pour l'année 1997

Pour chaque site et chaque niveau de débourrement (10% et 90%), le premier jour, le jour médian et le dernier jour de la semaine ont été comparés aux jours juliens prédits par le modèle phénologique (**Figure 3**).

Excepté pour la Forêt de Grésigne (CHS 81), il apparaît une bonne adéquation entre le jour médian de la semaine du début du débourrement du chêne (10% des arbres débourrés) et le jour julien prédit avec un cumul de température de 325 °C. La différence varie de 0 à 6 jours et est en moyenne de 3 jours.

Pour le hêtre, le modèle somme de températures utilisé apparaît moins satisfaisant et ne permet pas de prédire d'une façon fiable le jour du débourrement. Pour expliquer ce phénomène, Comps *et al.* (1987) suggèrent que la foliation du hêtre est définie non pas par le cumul des températures depuis le début de l'année mais par la photopériode jusqu'à la fin mars (nombre de jours) puis par la température à partir du premier avril.

Variabilité inter-régionale des dates prédites de débourrement

A partir du modèle de cumul des températures, il est possible d'établir des gradients géographiques de débourrement en comparant les dates prédites selon la localisation géographique des 32 stations météorologiques. Pour une espèce donnée, cette approche permet donc de « quantifier » les décalages phénologiques entre des régions climatiquement différentes.

Pour chaque espèce, il apparaît nettement un gradient sud-nord et ouest-est dans la date de débourrement des arbres (**Figure 4 et Tableau 5**). Pour le chêne, l'effet climatique se traduit par un retard moyen de débourrement de 28 à 32 jours du Sud à l'Est selon le cumul de température considéré. Pour le hêtre, le retard varie de 33 à 29 jours. Pour un même cumul de températures, le hêtre débourre entre 4 et 5 jours plus tôt que le chêne. Ces estimations sont cohérentes avec les observations phénologiques faites par différents auteurs (**Tableaux 6 à 8**) et avec la synthèse de Duchemin (1998) qui met en évidence un retard de 33 jours du nord au sud (pour le chêne) et un débourrement plus précoce du hêtre de l'ordre de 5 à 6 jours.

Tableau 6. Jour julien moyen de débourrement et longueur de la saison de végétation (en jours) pour le hêtre et le chêne pour différentes régions.

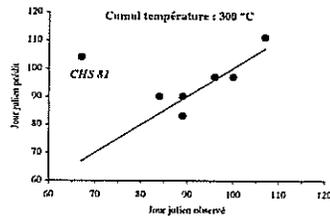
Chêne	Hêtre	Période	Localisation	Référence
96 - 225		1973 à 1980	Sud -ouest - F. de Laveyron	Comps <i>et al.</i> 1987
106 - 197		1989 à 1994	Sud -ouest - F. de Grésigne	Duchemin 1998
125 - 160		1989 à 1994	Est - F. de Chaux	Duchemin 1998
128 - 179		1990 à 1993	Est - F. de Champenoux	Bréda 1994
122 - 186		1994 à 1998	Est - F. d'Amance et de Haye	Dupouey et Behr (comm. pers)
*** - 160		1960	Est - Ardennes (245 m)	Galoux <i>et al.</i> 1967
	108 - 198	1973 à 1980	Sud -ouest - F. de Laveyron	Comps <i>et al.</i> 1987
	117 -	1976-1981	F. de Haye	Courbet 1981
	120 - 179	1994 à 1998	Est - F. d'Amance et de Haye	Dupouey et Behr (comm. pers)
	119 - 161	1989 à 1994	Est - F. de Haye	Duchemin 1998
	*** - 162	1960	Est - Ardennes (245 m)	Malaisse 1964
	*** - 149	1960	Est - Ardennes (365 m)	Malaisse 1964

Note : la première valeur correspond au jour julien moyen du débourrement et le second à la longueur de la saison de végétation.

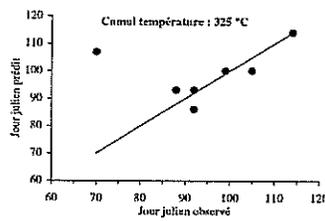
Tableau 7. Jour julien moyen de débourrement et longueur de la saison de végétation (en jours) pour le chêne dans différentes forêts de l'Est de la France. La date de débourrement correspond à l'éclatement des bourgeons et à l'apparition des feuilles étalées aux contours visibles (stades b3 et b4). La longueur de la saison a été estimée en faisant la différence entre la date du débourrement et a) une chute de 50% du LAI (Champenoux ; Bréda 1994) ou b) le jaunissement des feuilles sur au moins 50% du houppier (Amance et Haye ; Dupouey et Behr, non publié).

Année	Débourrement			Saison de végétation		
	Champenoux	Amance	Haye	Champenoux	Amance	Haye
1989						
1990	123			181		
1991	145			171		
1992	133			174		
1993	120			188		
1994		119	123		182	182
1995		129	129		175	175
1996		120	120		200	192
1997		115	123		192	189
1998		120	123			
Moy.	128	121	124	179	187	184
EcType	10	5	3	8	11	8
		124 (8)			183 (9)	

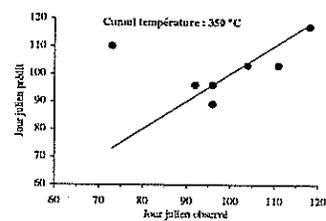
Chêne - année 1997



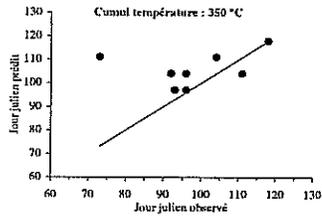
Jour julien observé = premier jour de la semaine avec le débournement de 10% des arbres



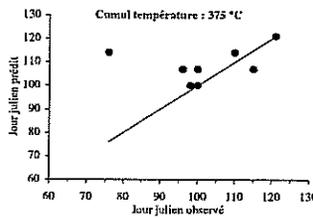
Jour julien observé = jour médian de la semaine avec le débournement de 10% des arbres



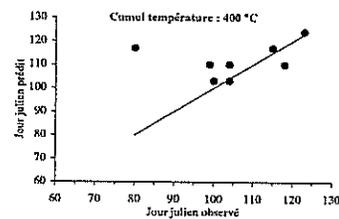
Jour julien observé = dernier jour de la semaine avec le débournement de 10% des arbres



Jour julien observé = premier jour de la semaine avec le débournement de 90% des arbres

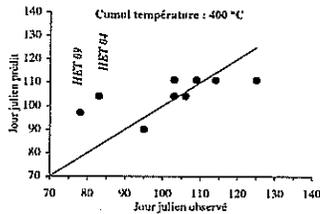


Jour julien observé = jour médian de la semaine avec le débournement de 90% des arbres

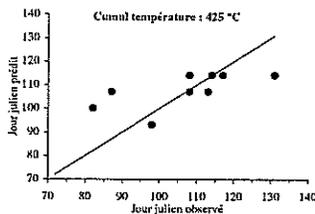


Jour julien observé = dernier jour de la semaine avec le débournement de 90% des arbres

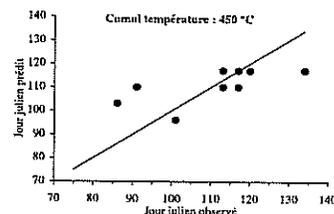
Hêtre - année 1997



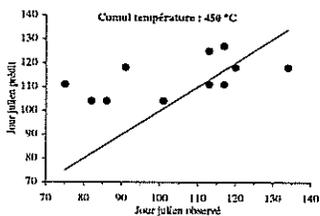
Jour julien observé = premier jour de la semaine avec le débournement de 10% des arbres



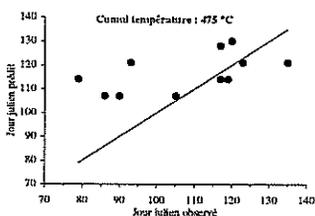
Jour julien observé = jour médian de la semaine avec le débournement de 10% des arbres



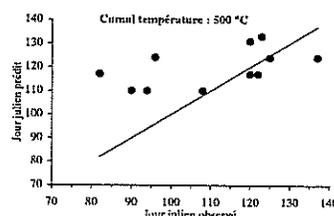
Jour julien observé = dernier jour de la semaine avec le débournement de 10% des arbres



Jour julien observé = premier jour de la semaine avec le débournement de 90% des arbres



Jour julien observé = jour médian de la semaine avec le débournement de 90% des arbres



Jour julien observé = dernier jour de la semaine avec le débournement de 90% des arbres

Figure 3. Relation entre la date observée (en jour julien) du débournement en 1997 des placettes de **chêne** et de **hêtre** et la date prédite par le modèle selon différents cumuls de température. Le modèle prédictif utilisé ne prend en compte que les températures minimales et maximales journalières supérieures au seuil de 5°C (pour le chêne) et 4.5°C (pour le hêtre) (les températures inférieures sont considérées comme nulles), et cumule les températures moyennes journalières à partir du premier janvier de l'année courante (Comps *et al.* 1987 ; Kramer 1994 ; Duchemin 1998). Les débournements 10% et 90% correspondent respectivement à la semaine à laquelle 10% et 90% des arbres présentent au moins sur 20 à 50% du houppier des bourgeons ouverts, avec l'apparition des premières petites feuilles.

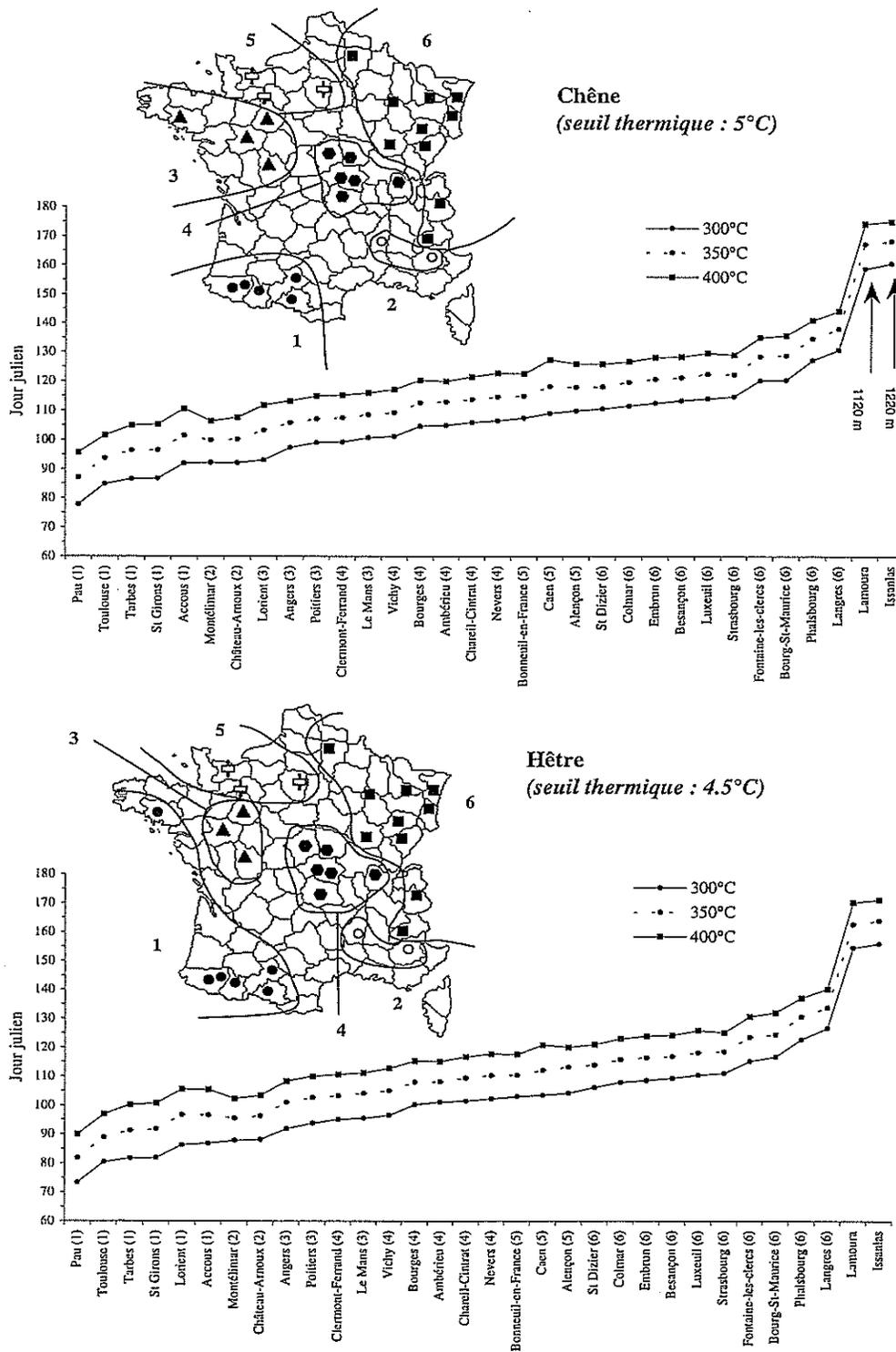


Figure 4. Date estimée (en jour julien) du débourrement du **chêne** et du **hêtre** selon différents cumuls de température et la localisation géographique des stations météorologiques. Le modèle prédictif utilisé ne prend en compte que les températures minimales et maximales journalières supérieures au seuil de 5°C (pour le chêne) et 4.5°C (pour le hêtre) (les températures inférieures sont considérées comme nulles), et cumule les températures moyennes journalières à partir du premier janvier de l'année courante (Comps *et al.* 1987 ; Kramer 1994 ; Duchemin 1998). Pour chaque cumul, la date estimée correspond au jour julien moyen calculé sur une période de 30 à 49 ans selon la station (1968-1997 à 1949-1997).

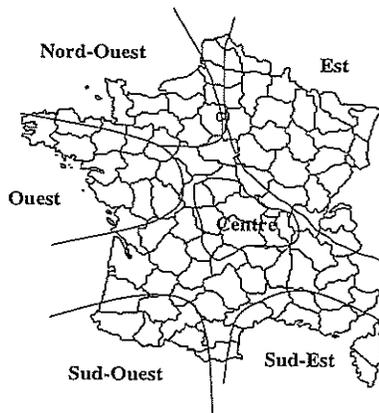
Chêne

Région	Station météo	Période de calcul		Nbre total d'années	300°C			325 °C			350 °C			400 °C			425 °C		
		min	max		moy.	min	max	moy.	min	max	moy.	min	max	moy.	min	max	moy.	min	max
Sud-Ouest	5	1956-1997	1949-1997	223	86	58	121	90	63	127	95	67	130	104	72	139	108	76	144
Sud-Est	2	1968-1997	1949-1997	79	92	70	113	96	73	116	100	75	119	107	81	126	110	86	129
Ouest	4	1965-1997	1949-1997	179	98	66	126	102	70	129	107	75	132	114	82	138	118	89	140
Centre	6	1952-1997	1949-1997	287	104	71	130	108	75	132	112	78	136	119	83	140	123	91	142
Nord-Ouest	3	1952-1997	1949-1997	144	109	76	132	113	79	136	117	83	140	125	97	148	129	103	151
Est	10	1963-1997	1949-1997	432	118	81	146	122	88	152	126	92	155	133	100	163	136	103	155

Hêtre

Région	Station météo	Période de calcul		Nbre total d'années	300°C			325 °C			350 °C			400 °C			425 °C		
		min	max		moy.	min	max	moy.	min	max	moy.	min	max	moy.	min	max	moy.	min	max
Sud-Ouest	5	1956-1997	1949-1997	223	81	55	117	86	59	121	90	64	127	99	69	132	102	72	135
Sud-Est	2	1968-1997	1949-1997	79	88	67	109	92	70	112	96	73	115	103	79	122	106	81	125
Ouest	4	1965-1997	1949-1997	179	92	59	121	97	65	124	101	70	128	109	77	134	113	80	137
Centre	6	1952-1997	1949-1997	287	99	69	127	103	72	130	107	75	132	115	80	137	118	83	139
Nord-Ouest	3	1952-1997	1949-1997	144	104	72	129	108	76	131	112	78	135	120	89	142	123	94	146
Est	10	1963-1997	1949-1997	432	114	78	143	117	81	146	121	88	151	128	96	158	132	100	162

Tableau 5. Date moyenne (en jour julien) du débourrement du chêne et du hêtre selon différents cumuls de température et par grande région géographique. Le modèle prédictif utilisé ne prend en compte que les températures minimales et maximales journalières supérieures au seuil de 5°C (pour le chêne) et 4.5°C (pour le hêtre) (les températures inférieures sont considérées comme nulles), et cumule les températures moyennes journalières à partir du premier janvier de l'année courante (Comps *et al.* 1987 ; Kramer 1994 ; Duchemin 1998).



Placette	Horizon 1		Horizon 2		LAI (m ² /m ²)	Coef k	Débourrement	Sénescence
	Prof (cm)	RUM (mm)	Prof (cm)	RUM (mm)				
CHP 18	85	137	150	70	3,7	0,31	108	293
CHP 49	80	58	150	116	8,8	0,22	102	287
CHP 59	85	156	150	114	8,6	0,22	122	302
CHP 65	78	103	150	102	3,9	0,31	90	280
CHS 01	52	98	150	138	8,1	0,23	122	302
CHS 03	75	62	150	131	5,7	0,27	108	293
CHS 18	75	97	150	64	5,9	0,26	108	293
CHS 51	50	32	150	27	9,1	0,22	122	302
CHS 57a	82	98	150	100	7,1	0,24	122	302
CHS 57b	83	77	150	58	5,5	0,27	122	302
CHS 58	92	132	150	88	6,9	0,25	108	293
CHS 61	62	107	150	65	7,3	0,24	102	287
CHS 72	50	88	150	149	6,3	0,26	102	287
CHS 81	100	84	150	31	4,1	0,3	90	280
CHS 86	55	84	150	62	6,0	0,26	102	287
EPC 39a	27	45	70	20	6,1	0,35	0	365
EPC 39b	150	109			6,8	0,35	0	365
EPC 71	70	72	150	77	7,4	0,35	0	365
EPC 73	60	72	150	46	6,9	0,35	0	365
EPC 88	90	47	150	41	5,9	0,35	0	365
HET 02	90	163	150	111	10,2	0,2	108	288
HET 03	90	108	150	45	7,8	0,23	103	288
HET 04	60	92	150	58	7,8	0,23	92	282
HET 09	65	71	130	44	7,5	0,24	86	276
HET 14	60	89	150	111	9,0	0,22	97	282
HET 21	60	52	150	32	7,3	0,24	117	297
HET 29	65	105	150	94	8,8	0,22	97	282
HET 52	50	42	150	35	8,4	0,23	117	297
HET 54a	55	92	150	116	8,5	0,22	117	297
HET 54b	50	52	150	36	9,0	0,22	117	297
HET 55	75	73	150	25	7,8	0,23	117	297
HET 60	60	66	150	44	9,2	0,21	108	288
HET 64	50	75	100	44	7,2	0,24	86	276
HET 65	50	74	150	114	5,4	0,27	86	276
HET 88	80	78	150	73	8,6	0,22	117	297
SP 05	65	94	150	97	7,7	0,35	0	365
SP 07	75	74	150	18	5,9	0,35	0	365
SP 09	37	42	70	38	6,6	0,35	0	365
SP 57	95	68	150	35	8,1	0,35	0	365
SP 63	85	94	150	31	6,8	0,35	0	365
SP 68	45	29	150	30	6,2	0,35	0	365

Tableau 11. Valeurs des différents paramètres utilisés pour le calcul du bilan hydrique sur chacune des 41 placettes. Pour chaque site, l'horizon 1 correspond à la zone fortement enracinée (75% des racines) et l'horizon 2 à la zone faiblement enracinée (25%) (sauf pour EPC39b : un seul horizon et 100% de racines). Pour chaque tranche, la réserve utile maximale en eau a été estimée à partir des coefficients de réserve en eau potentielle pour chaque texture (triangle de Jamagne), de la charge en éléments grossiers et de l'épaisseur de chaque horizon (Brêthes et Ulrich 1997). Pour le second horizon, la RUM a été calculée sur 150 cm au maximum. Dans la majorité des cas, les valeurs présentées sont les moyennes calculées sur les deux fosses pédologiques. Les indices de surfaces foliaires ont été estimés à partir des litières récoltées sur chaque site entre 1994 et 1997. Le coefficient d'extinction k a été déterminé à partir de la relation liant au LAI. Pour les feuillus, les jours juliens de débourrement et de sénescence ont été estimés à partir d'un modèle phénologique prédictif fondé sur le cumul des températures journalières (voir texte pour les explications détaillées).

Tableau 8. Jour julien moyen de débourrement et longueur de la saison de végétation (en jours) pour le hêtre dans différentes forêts de l'Est de la France. La date de débourrement correspond à l'éclatement des bourgeons et à l'apparition des feuilles étalées aux contours visibles (stades b3 et b4) pour les forêts d'Amance et de Haye (1) (Dupouey et Behr, non publié). Pour « Haye(2) », le débourrement a été estimé à partir d'observations satellitaires (Duchemin 1998). La longueur de la saison a été estimée en faisant la différence entre la date du débourrement et a) le jaunissement des feuilles sur au moins 50% du houppier (Amance et Haye-1) et b) les observations satellitaires de sénescence (Haye-2).

Année	Débourrement			Saison de végétation		
	Amance	Haye (1)	Haye (2)	Amance	Haye (1)	Haye (2)
1989			122			181
1990			114			
1991			125			156
1992			123			152
1993			117			155
1994	115	123	114	176	168	
1995	110	119		194	185	
1996	121	123		174	172	
1997	112	118		196	190	
1998	120	123		173	170	
Moy.	116	121	119	183	177	161
EcType	5	2	5	11	10	13
		119 (5)			175 (14)	

Décalage phénologique observé depuis 1988

L'évolution temporelle des dates prédites de débourrement met en évidence un décalage phénologique très nette depuis le début des années 1990 (**Tableau 9**). Quel que soit le cumul de température considéré, le modèle prédit une foliation plus précoce de l'ordre de 12 jours et ceci pour toutes les régions. Ce phénomène est à mettre en relation avec l'augmentation très significative des températures observée depuis 10 ans pour toutes les stations météorologiques étudiées (voir synthèse climatique).

Tableau 9. Décalage phénologique moyen observé depuis 1988 pour chaque grande région géographique (Jour julien de débourrement prédit avant et après 1988)

Région	Chêne		Hêtre	
	Avant 1988	1988-1997	Avant 1988	1988-1997
Sud-ouest	97	86	92	82
Sud-est	103	91	99	87
Ouest	109	96	104	91
Centre	114	103	110	98
Nord-ouest	119	108	114	101
Est	128	118	124	113

Conclusions

Les observations au sol pour l'année 1997, l'utilisation d'un modèle phénologique prédictif ainsi que la comparaison avec des données de la littérature ont permis 1) de dégager les grandes tendances au niveau national, 2) de préciser, au moins partiellement, les dates moyennes de débourrement des peuplements ainsi que la longueur des cycles végétatifs et 3) de comparer le comportement du chêne et du hêtre.

Etant donné le nombre important de sites étudiés et leur répartition sur tout le territoire national, il apparaît plus important de bien prendre en compte le gradient géographique plutôt que de quantifier très précisément, sur chaque site, l'amplitude des variations inter-annuelles du cycle phénologique.

Ainsi, au vue des différentes informations disponibles et de la cohérence entre les prédictions du modèle et les observations réelles, la date de débourrement (jour julien, JJ) et la longueur de la saison de végétation (SV en jours) pour chaque espèce et chaque région ont été paramétrées selon les valeurs présentées dans le **Tableau 10**. Ces données permettent de prendre en compte le décalage de 30 jours environ entre le nord et le sud, ainsi que le débourrement plus précoce de 5 à 6 jours observé chez le hêtre. Au niveau de l'indice de stress hydrique annuel, ceci signifie que pour les placettes de chêne de l'Est de la France, son calcul se fera sur 180 jours à partir du jour julien 122 (début mai à fin octobre). Pour les placettes de résineux, l'ensemble de l'année est pris en compte pour le calcul des indices de stress annuels.

Tableau 10. Paramètres phénologiques moyens retenus pour chaque grande région géographique et chaque espèce. JJ = jour julien du débourrement ; SV = longueur de la saison de végétation.

Placette du...	Chêne		Hêtre	
	JJ	SV	JJ	SV
Sud-ouest	90	190	86	190
Sud-est	96	190	92	190
Ouest	102	185	97	185
Centre	108	185	103	185
Nord-ouest	113	180	108	180
Est	122	180	117	180

3.3.3.2 Indices de surfaces foliaires (Leaf Area Index) et coefficient d'extinction k

L'indice de surface foliaire (surface foliaire par unité de surface au sol ; m^2 de feuille / m^2 de sol) est une donnée très importante à connaître car il reflète la surface par laquelle les échanges photosynthétiques et la transpiration se produisent. Il intervient aussi sur le fonctionnement hydrique du peuplement en interceptant une partie des précipitations et en réduisant donc la disponibilité en eau du sol (Bréda 1994, 1999b). Le coefficient d'extinction de la lumière k conditionne la quantité de lumière arrivant au sol et donc l'évapotranspiration du sous-étage. Sa valeur, qui est liée à celle du LAI, diminue quand la surface foliaire augmente (Bréda 1994, 1999b). Pour les feuillus, la valeur a été estimée à partir de la relation mathématique liant k au LAI (Bréda 1994). Pour les résineux, le coefficient a été fixé à 0.35.

Estimation pour les placettes de feuillus

Pour chaque placette, un indice de surface foliaire moyen a été calculé à partir de la moyenne des biomasses de feuilles récoltées sur la période 1994-1997, en distinguant les feuilles de l'espèce principale (chênes ou hêtre) et celles de l'accompagnement. Les biomasses de feuilles de l'espèce principale (kg/m^2) ont été multipliées par une surface spécifique moyenne (m^2/g) des feuilles établies par Bréda (1998) au cours des automnes 1995 et 1996, sur 5 placettes de chêne pédonculé, 8 placettes de chêne sessile et 7 placettes de hêtre. Ce produit conduit à l'indice de surface foliaire de l'espèce principale (LAI_{pp}).

Les biomasses de feuilles de l'accompagnement ont été multipliées par une surface spécifique moyenne (m^2/gr) pondérée en fonction de la composition en espèces (en nombre de tiges). Pour ce calcul, seules les espèces représentant au moins 5% des tiges ont été prises en compte. Les surfaces spécifiques de toutes les espèces d'accompagnement ont été déterminées sur des échantillons de litières sur 20 placettes du réseau en 1995 et 1996 (Bréda 1998). L'indice foliaire de l'accompagnement a été réduit de 10% (LAI_{acc}) afin de tenir compte du biais moyen observé entre l'estimation à partir des litières et les mesures sur le terrain à l'aide d'analyseur de couvert (Bréda 1998). Ce biais peut être attribué au mélange dans les biomasses de l'accompagnement d'éléments autres que les feuilles (brindilles, fruits, écailles de bourgeons ...).

Au final, l'indice de surface foliaire total (LAI_{tot}) du peuplement est égal à la somme des indices de surface foliaire de l'espèce principale (LAI_{pp}) et des espèces d'accompagnement (LAI_{acc}).

Estimation pour les placettes de résineux

Une relation entre la surface terrière du peuplement et l'indice foliaire estimé par mesures indirectes à l'aide d'un analyseur de couvert (LAI 2000, Li-Cor) a été établie sur 6 placettes (3 placettes d'épicéa et 3 placettes de sapin) par Bréda (1998). Cette relation a été utilisée pour estimer le LAI des autres placettes de résineux, à partir des surfaces terrières mesurées à l'installation des placettes en 1995). Afin de tenir compte de la distribution non aléatoire des aiguilles, le LAI ainsi calculé a ensuite été multiplié par un coefficient d'agrégation de 1.6 (Gower et Norman 1991).

3.3.3.3 Coefficients de transpiration à LAI saturant et seuils d'interception des pluies

La transpiration des arbres est proportionnelle à l'ETP. Pour la plupart des espèces étudiées et dans le cas d'un couvert fermé (LAI saturant), il a été montré que le rapport TR_{max}/ETP était de l'ordre de 0.7 à 0.8 aussi bien pour des feuillus que pour des résineux. Dans notre étude, le coefficient de transpiration TR_{max}/ETP à LAI saturant a été fixé à 0.75 pour les feuillus et les résineux.

Le seuil d'interception de l'eau de pluie par le feuillage a été fixé à 2 mm pour les résineux et à 1 mm pour les feuillus. Des précipitations inférieures ou égales à ces seuils ne sont pas prises en compte car, n'arrivant pas au sol, elles ne sont pas exploitables par le système racinaire.

3.3.3.4 Réserve utile maximale en eau du sol (RU_{max})

La réserve utile en eau est un paramètre important du modèle car, reflétant la capacité du sol à stocker l'eau, elle conditionne, en grande partie, la capacité de résistance des arbres à des réductions de précipitations et à des sécheresses pendant la saison de croissance.

Dans la grande majorité des cas, le sol est considéré comme un système à deux horizons (deux réservoirs) d'une épaisseur totale de 150 cm. La détermination et les caractéristiques de chaque horizon reposent sur les principes suivants :

- La profondeur de chaque horizon est définie à partir des descriptions pédologiques des sols du réseau (Brêthes et Ulrich 1997) et de l'enracinement observé à chaque niveau (densité et taille des racines). Le premier horizon correspond à une zone fortement enracinée (75% des racines) où les arbres prélèvent le maximum d'eau. Le second horizon correspond à une zone de faible enracinement (25% des racines) ; enracinement limité par un changement significatif de la charge en cailloux, de texture, de structure (très compacte), par des traces d'hydromorphie très prononcée... ;
- En théorie, les variations du stock d'eau dans le sol nécessite le calcul des lames d'eau extractibles maximales pour chaque horizon. Cette lame d'eau correspond à la différence entre la quantité d'eau retenue à la capacité au champ et la quantité retenue au point de flétrissement permanent. Ceci nécessite la mise en œuvre de techniques difficilement applicables sur les placettes du réseau. Ainsi, pour chaque horizon, la réserve utile maximale potentielle en eau (RU_{max}) a été estimée à partir des coefficients (T) de réserve potentielle en eau associés à chaque texture, des charges en éléments grossiers (CC) et de l'épaisseur de la couche de sol correspondante (E en cm) selon le protocole présenté dans Brêthes et Ulrich (1997) :

$$RUM_h = T \times E \times \left[\frac{100 - CC}{100} \right]$$

Les valeurs du coefficient T pour chaque classe de texture du triangle de Jamagne (Baize 1988)

sont présentées dans le tableau ci-dessous :

<i>Texture</i>	S	SL	SA	LIS	LS	LmS	LSA	LAS	LI	Lm	LA	AS	A	AL	Alo
<i>Coef T</i>	0.70	1.00	1.35	1.20	1.45	1.60	1.65	1.75	1.30	1.75	1.95	1.70	1.75	1.80	1.65

Une charge en éléments grossiers faible, moyenne, forte et très forte correspond respectivement à un pourcentage de 15, 35, 65 et 80% de cailloux.

Par exemple :

Horizon 1 : E=35 cm, LS=1.45 et CC=10%

$$RUM_1 = 1,45 \times 35 \times \left[\frac{100 - 10}{100} \right] = 45,7mm$$

Horizon 2 : E=70 cm, AS=1.70 et CC=25%

$$RUM_2 = 1,70 \times 70 \times \left[\frac{100 - 25}{100} \right] = 89,2mm$$

Le sol a une réserve utile maximale potentielle en eau de :

$$RUM_{totale} = 45,7 + 89,2 = 134,9 = 135mm$$

- Par manque de données disponibles sur les placettes du réseau, les autres caractéristiques du sol (théoriquement paramétrables) ont des valeurs fixes provenant des données de la littérature (Villette 1994) :

- ✓ La variable utilisée pour décrire l'état hydrique du sol étant la lame d'eau extractible, l'humidité relative de la tranche de sol considérée est calculée de la façon suivante :

$$Humidité = humidité \text{ à } pF \ 4,2 + \frac{\text{lame d'eau extractible}}{C}$$

L'humidité pondérale au point de flétrissement permanent ($pF = 4.2$) est fixée à 0.1387 pour le premier horizon et 0.1055 pour le second.

- ✓ Le coefficient d'humidité (noté C dans la formule), calculé de façon théorique et sans signification physique particulière, qui permet de passer de la lame d'eau à l'humidité globale de la tranche de sol considéré est fixé à 7.12 pour l'horizon 1 et à 5.83 pour l'horizon 2 ;
- ✓ Les densités de la pierre sont fixées à 2.426 et 2.544 pour chaque horizon ;
- ✓ La porosité totale des couches, exprimée en indices des vides à partir de la densité apparente,

est fixée à 150 et 80 pour les deux horizons. Les différentes porosités sont calculées à partir de la formule suivante :

$$\text{Indice des vides} = 100 \times \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume de solide}} = 100 \times \frac{D_r - D_a}{D_a}$$

avec D_r = densité réelle et D_a = densité apparente

- ✓ Enfin, les coefficients a et b de variation de la densité apparente du sol avec l'humidité ($D_a = a \times H + b$) sont fixés à -0.7441 et 1.4656 pour le premier horizon et à -2.1857 et 2.0825 pour le second.

Les valeurs des paramètres par placette sont présentées dans le **Tableau 11**.

4 Analyses des relations cerne – climat

Les relations entre la croissance et le climat peuvent être étudiées selon deux approches complémentaires qui sont d'une part, l'analyse des *années caractéristiques* et, d'autre part, l'établissement des *fonctions de réponse*. Les années caractéristiques correspondent à des séries de cernes plus étroits ou plus larges que la moyenne et traduisent l'effet d'événements climatiques extrêmes sur la croissance. Les fonctions de réponse traduisent le comportement moyen du peuplement dans la région climatique considérée.

4.1 Les années caractéristiques

4.1.1 Objectifs

Les objectifs de cette analyse sont de préciser le déterminisme climatique des années caractéristiques et d'étudier les différentes sources de variation (type de données, espèce, région...). Cette analyse est possible en utilisant deux types d'information. D'une part, les informations apportées par les années caractéristiques considérées individuellement : fréquence de chaque année (nombre total de sites sur lesquels l'année a été calculée), nombre moyen d'années recensées sur une placette ou pour une espèce... D'autre part, en déterminant un indice synthétique obtenu par des combinaisons linéaires des variables initiales (ici les années) grâce à des méthodes multivariées du type Analyse Factorielle des Correspondances (AFC), Analyse en Composantes Principales (ACP) et Analyse Discriminante (AD). Ces techniques d'analyse permettent de *réduire* le nombre de variables et de *détecter la structure* des relations entre variables, ce qui revient à les classifier.

4.1.2 Définition des années caractéristiques

Ces années témoignent d'événements extrêmes survenus dans la vie de l'arbre et plus généralement de l'action limitante ou stimulante des facteurs climatiques sur la croissance. Selon leur intensité et leur durée, ces facteurs ont pour effet de générer des séries de cernes plus étroits ou plus larges que la moyenne (Fritts 1976 ; Schweingruber 1985, 1992 ; Schweingruber *et al.* 1989, 1991). Pour des arbres soumis au même environnement, les fluctuations climatiques inter-annuelles vont entraîner des variations synchrones de la structure des cernes (croissance forte ou faible). Ces fluctuations synchrones de croissance sont fondamentales en dendrochronologie car elles permettent de vérifier l'agencement des séries individuelles de croissance et ainsi d'attribuer à chaque cerne son année exacte d'élaboration (interdatation ou cross-dating) (Fritts 1971 ; 1976).

4.1.3 Calcul

La première étape consiste à calculer, pour chaque arbre de la placette et chaque année disponible, l'évolution du rapport (ERC_t) entre la largeur du cerne de l'année t (L_t) et celle du cerne de l'année t-1 (L_{t-1}) :

$$ERC_t = 100 \times \left(\frac{L_t - L_{t-1}}{L_{t-1}} \right)$$

Une moyenne des ERC peut être ensuite calculée pour chaque date disponible en utilisant l'ensemble des carottes de la placette. On obtient alors une valeur moyenne de l'évolution relative de la croissance radiale pour l'ensemble de l'échantillon entre deux années consécutives.

Une année *t* est alors considérée comme caractéristique quand (Becker 1987, 1989 ; Becker *et al.* 1994) :

- L'écart relatif moyen est d'au moins 10%. Cette différence est positive dans le cas d'une forte croissance et négative dans le cas inverse ;
- Au moins 75 % des arbres échantillonnés présentent le même comportement pour le cerne correspondant ;
- L'effectif d'arbres pris en compte pour le calcul correspond à l'ensemble des arbres disponibles sur la placette (de 23 à 30). Une année est d'autant plus caractéristique que l'écart relatif moyen est important et que le pourcentage d'arbres présentant le même comportement est élevé.

Les années caractéristiques ont été calculées pour chaque compartiment anatomique et sur les données exprimées en largeur (en mm) et en surface (cm²).

4.2 Les fonctions de réponse : la procédure « bootstrap »

Les relations entre la croissance et le climat sont étudiées en utilisant les paramètres climatiques comme variables explicatives et les séries moyennes brutes ou standardisées comme variables à expliquer.

Ces relations peuvent être analysées à partir des simples corrélations entre les séries chronologiques et les paramètres climatiques considérés individuellement. Si cette analyse permet de mettre en évidence les variables liées significativement à la croissance, elle n'aboutit pas à l'élaboration de modèles climatiques qui, en intégrant l'ensemble des facteurs jouant un rôle significatif sur la croissance des peuplements, reflètent son comportement moyen dans la zone étudiée. Pour cela, il est nécessaire d'élaborer des fonctions de réponse des arbres au climat. La fonction de réponse est un modèle statistique susceptible de prédire les paramètres mensuels du climat intervenant dans les variations d'épaisseur du cerne annuel. Pour cette étude, le calcul fait appel à la procédure « bootstrap » (bootstrapped response-function analysis) (Efron 1979 ; Fritts et Xiangding 1986 ; Guiot 1991 ; Tessier 1986 ; Gandolfo et Tessier 1994 ; Tessier *et al.* 1994 ; Messaoudène et Tessier, 1997). Les fonctions de réponse ont été calculées avec le programme Calrob (Bootstrap Regression / Calibration) de PPPHALOS (Guiot et Goeuru 1996). Le calcul fait appel à une régression orthogonalisée entre la variable dépendante et les variables

explicatives (climat), résultantes d'une analyse en composante principale des paramètres climatiques. Il se déroule de la façon suivante :

- Les données de croissance (variable dépendante) et les paramètres climatiques (variables explicatives) de chaque année sont tirés au sort n fois ; n étant le nombre total d'années disponibles. Le tirage se fait avec remise ce qui signifie qu'une même année peut être tirée au sort plus d'une fois. Les années tirées au sort sont les années de *calibration* sur lesquelles la fonction de réponse est calculée ;
- La vérification se fait sur toutes les années non prises en compte (n au total). Les indices de croissance pour ces années sont obtenus à partir des coefficients issus de la fonction de réponse. La confrontation des indices estimés aux indices réels définit le coefficient de corrélation sur la période de *vérification* ;
- Afin d'assurer la validité des corrélations, la procédure suivante est répétée au moins 50 fois sur les n années. La moyenne et l'écart-type des k coefficients de corrélation pour chaque variable climatique sont calculés pour les n années de calibration et les n années de vérification ($k=24$ avec 12 données de température et 12 données de précipitation par an) ;
- La signification statistique de la liaison entre chacun des paramètres climatiques et la croissance est testée en faisant le rapport de la corrélation moyenne de chaque variable avec la croissance sur l'écart-type correspondant. La valeur du rapport mesure l'intensité de la relation et son signe le sens. Plus le rapport est grand et plus le paramètre climatique joue un rôle important dans le déterminisme des variations inter-annuelles d'accroissement des arbres. Un signe positif correspond à une relation directe : plus la valeur de la variable explicative est grande, plus le cerne est grand (et inversement). Un signe négatif témoigne d'une relation inverse : plus la valeur de la variable climatique est grande, plus le cerne est fin (et inversement). De la même façon, la signification globale de la fonction de réponse est établie sur la base du rapport du coefficient de corrélation moyen entre la série reconstruite du climat et la série des valeurs réelles à son écart-type, sur la période de calibration et sur la période de vérification. La valeur du rapport permet d'apprécier la qualité et l'efficacité prédictive du modèle. Que ce soit pour les régresseurs considérés individuellement ou pour la signification globale de la fonction de réponse, les différents rapports calculés (R : coefficient moyen de régression sur écart-type) donnent une valeur approchée du coefficient t de student ($ddl > 30$) (Gadbin-Henry 1994). Les seuils de signification statistique sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les fonctions de réponse sont présentées sous forme codée à partir des valeurs des rapports de signification statistiques.

Valeur du rapport R	Seuil de signification	Code
1.645 • R < 1.96	10% ($p < 0.10$)	1
1.96 • R < 2.576	5% ($p < 0.05$)	2
2.576 • R < 3.291	1% ($p < 0.01$)	3
R • 3.291	1‰ ($p < 0.001$)	4

4.3 Les outils statistiques utilisés

L'analyse dendroclimatologique des placettes du réseau repose sur l'utilisation de nombreux outils statistiques plus ou moins complexes. Comme il n'est pas possible de présenter dans le détail l'ensemble des procédures mis en œuvre et des programmes écrits spécifiquement, nous avons simplement listé les différents systèmes et logiciels utilisés en indiquant quand cela était possible les références bibliographiques.

- Les différents paramètres des séries chronologiques, le calcul des années caractéristiques, la mise en forme des données climatiques, l'étude des corrélations entre les variables ont été effectués en utilisant le logiciel SAS fonctionnant sous UNIX (SAS 1988) ;
- Les indices de stress annuels et mensuels (modèle du bilan hydrique) ont été élaborés à partir des programmes spécifiques mis au point par A. Granier (Granier *et al.* 1999) ;
- La standardisation des données brutes (modélisation ARMA) et le calcul des fonctions de réponse (bootstrapped response-function analysis) ont été faits à partir du logiciel PPPBase (Programmes pour Paléoécologie, Paléoclimatologie) (Guiot et Goeury 1996) ;
- Les analyses multivariées (AFC, ACP, Analyse discriminante...) ont été faites à partir du logiciel ADE-4 (Analyses multivariées des Données Ecologiques et représentation graphiques) (Thioulouse *et al.* 1997). L'AFC et l'ACP permettent d'extraire les principaux facteurs écologiques ou environnementaux qui structurent la répartition et/ou la composition des sites étudiés. L'AFC utilise des données qualitatives et l'ACP des données quantitatives. L'Analyse Discriminante permet de focaliser le point de vue sur les différences entre classes. L'objectif de cette méthode est de trouver des combinaisons linéaires de variables de variance unité (maximisation du rapport de la variance inter-classe sur la variance totale), c'est-à-dire optimisant le pouvoir de discrimination entre groupes de relevés. Cette analyse permet donc le lien entre le tableau de données initiales et une variable classe ou catégorie qui identifie les différents groupes. Cette analyse décompose la variabilité totale entre une variabilité inter-classes (between-groups) et une variabilité intra-classes (within-groups). Dans cette étude, les classes peuvent être définies par rapport à l'espèce (chêne pédonculé et chêne sessile, hêtre, épicéa, sapin pectiné et pin sylvestre) ou par rapport à la région d'échantillonnage (nord-est de la France, sud-ouest...). Cette analyse permet de conforter et d'affiner l'interprétation obtenue à partir de l'AFC ou de l'ACP.

III. RESULTATS

5 Caractéristiques des peuplements et des séries chronologiques

Les caractéristiques dendrométriques des arbres et des paramètres de croissance sont présentés dans le **Tableau 12**. L'âge des 1219 arbres étudiés varie de 43 à 228 ans et est en moyenne de 92 ans. Le diamètre et la hauteur sont en moyenne de 42 cm et 27 m avec des extrêmes respectivement de 21 à 73 cm et 15.5 à 40.5 m.

La sensibilité moyenne, qui reflète la variance haute-fréquence des séries de cernes, varie :

- *Selon la méthode de calcul.* Le coefficient établi sur les séries individuelles puis moyenné sur l'ensemble des arbres (SM_i) est toujours plus élevé que la valeur calculé directement à partir de la chronologie moyenne (SM_m) et ceci quels que soient le compartiment du cerne et la période considérés. (**Tableaux 13a et 13b ; Figure 5**). Ces résultats sont cohérents avec les observations faites par Gadbin-Henry (1994) sur *Pinus Pinea*, Nefaoui (1996) sur *Pinus pinaster* et Desplanque *et al.* (1998) sur *Abies alba* et *Picea abies*. Ceci résulte en grande partie de la minimisation des variations atypiques propres à chaque individu lors du calcul de la série moyenne ;
- *Selon l'unité d'expression du cerne.* La sensibilité moyenne est toujours plus élevée pour les séries de cernes exprimées en surface. Ceci suggère que la surface intègre plus fortement les variations inter-annuelles de croissance des arbres que la largeur ;
- *Selon le compartiment anatomique du cerne.* Pour les chênes et les résineux, la sensibilité moyenne est plus forte pour le bois final que pour le bois initial (**Figure 5**). Pour le hêtre, les valeurs les plus élevées sont observées pour le bois initial. Ceci suggère une réactivité différente des deux compartiments du cerne aux variations climatiques inter-annuelles ;
- *Selon la période considérée.* Pour les surfaces de cernes, la sensibilité moyenne est systématiquement plus faible pour la période récente 1949-1994. Pour les largeurs de cernes, le coefficient est plus faible dans 60 à 70% des cas.

Le coefficient d'interdatation (SR), qui reflète le plus ou moins bon synchronisme des séries élémentaires dont est issue la chronologie maîtresse, varie de 0.287 à 0.938 (**Tableau 14**). Pour les chênes, le synchronisme est nettement plus élevé pour le bois final que pour le bois initial (moyennes respectives de 0.712 et 0.428 pour la période 1949-1994 ; largeur et surface confondues). Pour le hêtre, un meilleur synchronisme est observé pour le bois initial (valeur moyenne de 0.668 contre 0.436 pour le bois final). Pour le sapin, les deux compartiments présentent un comportement comparable (0.580) et, pour l'épicéa, le coefficient SR est plus élevé pour le bois initial que pour le bois final (0.649 contre 0.493). Pour le cerne complet exprimé en surface et la période 1949-1994, la forte sensibilité moyenne observée pour la placette HET 52 ($SM_m = 0.278$) couplée à un fort coefficient d'interdatation (SR = 0.840) dénote une réponse forte et homogène au climat. Pour la placette SP05, la faible sensibilité moyenne ($SM_m = 0.126$) couplée à un fort coefficient d'interdatation (SR = 0.704) suggère également une réponse homogène au climat mais faible (**Tableaux 13b et 14**).

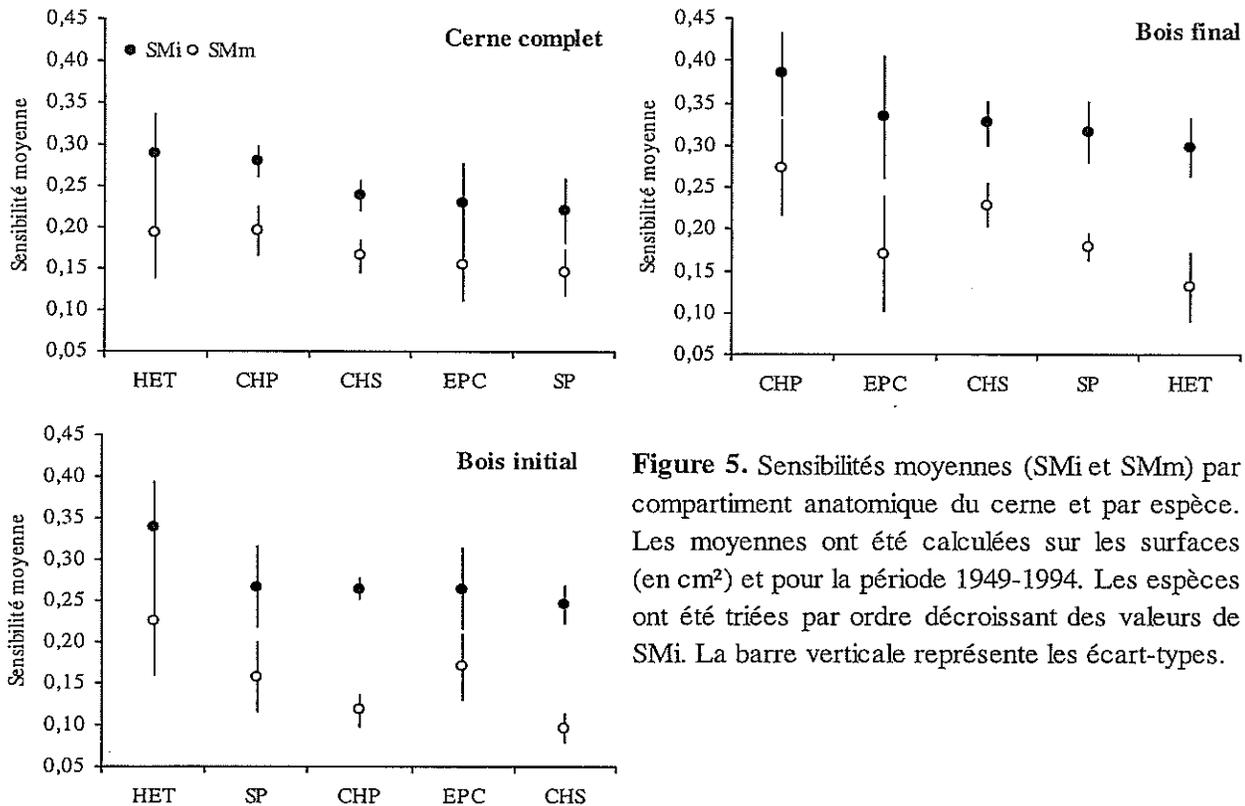


Figure 5. Sensibilités moyennes (SMi et SMm) par compartiment anatomique du cerne et par espèce. Les moyennes ont été calculées sur les surfaces (en cm²) et pour la période 1949-1994. Les espèces ont été triées par ordre décroissant des valeurs de SMi. La barre verticale représente les écart-types.

Pour toutes les espèces et les compartiments du cerne considérés, la sensibilité moyenne est :

- moins forte quand elle est calculée directement à partir de la chronologie maîtresse
- plus forte pour des données exprimées en surfaces de cernes annuels

La sensibilité moyenne discrimine nettement les espèces en liaison avec des différences de structure anatomique des cernes

L'analyse couplée de la sensibilité moyenne (SM_m) et du coefficient d'interdatation (SR) suggère que :

- pour le chêne, le signal climatique est plus marqué dans le bois final avec une réponse homogène des arbres
- pour le hêtre, le signal climatique est plus marqué dans le bois initial avec une réponse homogène des arbres
- pour les résineux, le signal climatique est plus marqué dans le bois final mais la réponse des arbres est moins homogène que pour le bois initial

Code	Nb d'arbres	Période	Nb de cernes	Age (à 1.30 m)			Diamètre (cm)			Hauteur (m)			Surf. Ter (m ² /ha)		Largeur (mm)		Aubier		
				moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	tot.	esp.	moy.	std	La (mm)	Sa (cm ²)	%
CHP 18	30	1951-1994	1652	58	49	92	29	23	39	17,8	15,5	20,0	20,0	15,9	2,0	0,87	2,4	155,3	21,2
CHP 49	30	1934-1994	2087	70	63	85	46	35	61	28,4	24,0	31,5	32,2	24,2	2,6	1,10	3,3	350,5	17,9
CHP 59	30	1932-1994	2051	70	64	74	41	32	53	22,9	20,5	24,5	28,3	21,9	2,5	1,24	2,6	277,1	14,7
CHP 65	29	1947-1994	1525	54	48	68	31	21	42	24,9	22,0	26,5	22,6	20,2	2,4	0,95	2,9	217,8	22,7
CHS 01	30	1921-1994	2563	88	79	111	40	33	48	25,9	20,8	28,7	24,2	21,8	1,9	0,68	3,4	324,9	20,8
CHS 03	30	1900-1994	3338	115	105	122	47	39	58	30,5	27,5	35,0	35,0	30,3	1,7	0,62	2,6	297,0	13,4
CHS 18	29	1932-1994	2196	78	63	103	43	35	52	28,2	26,0	30,0	32,6	30,1	2,4	0,88	3,2	340,3	17,3
CHS 51	26	1892-1994	3555	139	105	228	53	38	72	25,2	21,5	28,5	29,3	19,1	1,6	0,79	3,1	411,1	13,7
CHS 57a	30	1920-1994	2496	85	81	89	41	34	47	27,8	25,5	30,0	31,9	25,9	2,2	0,80	3,6	379,8	19,2
CHS 57b	29	1886-1994	3675	128	114	133	45	35	70	28,7	26,8	31,5	28,2	23,7	1,5	0,62	2,3	278,0	11,7
CHS 58	30	1945-1994	1760	61	56	66	31	24	38	23,4	21,0	27,0	27,9	21,7	2,3	0,81	3,5	268,1	25,0
CHS 61	30	1914-1994	2558	88	83	92	36	30	42	26,9	24,0	29,0	32,0	25,2	1,8	0,63	3,5	306,5	23,0
CHS 72	30	1942-1994	1872	64	57	72	47	26	41	24,1	19,5	27,5	29,5	25,4	2,3	0,86	2,9	253,6	19,7
CHS 81	30	1903-1994	2895	98	93	103	38	32	45	27,8	23,0	30,0	24,8	24,7	1,6	0,65	2,1	204,1	13,5
CHS 86	30	1929-1994	2391	82	71	88	46	29	43	25,2	23,5	26,5	31,8	26,0	1,9	0,84	3,2	292,6	20,2
EPC 39a	30	1940-1994	1724	58	56	69	45	37	54	30,4	25,0	34,0	48,1	48,1	3,5	1,52	5,2	604,4	25,2
EPC 39b	30	1902-1994	3267	106	94	262	44	37	55	23,6	19,0	28,0	39,2	37,8	1,8	0,74	6,6	683,8	33,4
EPC 71	30	1953-1994	1404	48	43	50	41	33	50	27,0	24,0	30,0	32,7	31,9	4,1	2,14	6,0	633,0	31,0
EPC 73	28	1838-1994	5209	185	159	209	45	38	54	22,7	18,5	27,2	36,2	36,2	1,0	0,59	5,6	577,3	29,8
EPC 88	30	1913-1994	2633	89	85	92	52	44	61	35,5	33,2	40,5	62,7	61,3	2,8	1,35	4,3	640,9	16,5
HET 02	30	1952-1994	1554	54	46	66	42	31	57	29,7	25,0	32,5	30,5	22,4	3,7	1,48			
HET 03	30	1939-1994	2558	87	59	117	39	29	53	29,0	26,0	33,0	25,6	21,8	2,0	0,96			
HET 04	30	1918-1994	2577	85	80	156	38	31	50	26,1	24,0	29,0	21,5	21,3	1,9	0,83			
HET 09	30	1871-1994	4409	152	125	166	37	30	50	21,8	18,5	24,5	28,2	28,2	1,1	0,60			
HET 14	30	1920-1994	2424	83	78	97	44	37	55	25,7	22,0	28,5	23,6	23,6	2,4	1,01			
HET 21	30	1887-1994	3779	128	112	156	44	37	55	28,6	26,0	33,0	21,0	20,1	1,6	0,78			
HET 29	30	1943-1994	1867	64	52	70	29	23	42	24,1	21,3	26,5	30,6	25,1	2,1	0,95			
HET 52	30	1900-1994	3126	106	96	113	42	33	53	30,2	27,0	33,0	25,8	23,9	1,8	0,71			
HET 54a	30	1926-1994	2739	95	70	127	44	31	58	29,3	27,0	32,0	30,3	26,6	2,2	1,11			
HET 54b	30	1929-1994	2912	99	72	158	44	35	53	28,7	26,5	30,5	22,6	21,4	2,0	0,92			
HET 55	30	1924-1994	2577	88	71	108	46	37	61	29,4	25,3	32,0	26,2	19,3	2,4	1,04			
HET 60	30	1945-1994	1806	62	56	70	34	28	47	26,8	23,5	29,0	29,1	27,2	2,5	1,00			
HET 64	30	1940-1994	1934	67	55	83	41	29	67	28,8	25,5	32,0	25,1	21,0	2,7	1,04			
HET 65	30	1861-1994	4725	160	149	169	50	43	59	29,7	26,0	34,0	25,9	25,9	1,4	0,77			
HET 88	30	1943-1994	1989	68	53	78	32	27	41	25,4	21,5	27,8	25,8	23,9	2,3	0,89			
SP 05	30	1939-1994	2917	99	56	152	50	40	67	28,3	22,9	33,5	33,3	29,4	2,3	0,95	8,8	1034,8	38,8
SP 07	30	1924-1994	2376	80	74	86	58	49	73	25,7	23,0	28,8	58,5	56,4	3,4	1,26	10,1	1411,0	37,4
SP 09	29	1835-1994	4828	168	162	183	44	35	53	25,8	21,0	30,0	40,3	40,2	1,1	0,61	7,0	675,9	36,7
SP 57	30	1950-1994	1595	54	46	60	39	29	48	27,8	25,3	31,2	38,8	26,8	3,4	1,45	7,8	721,6	42,9
SP 63	29	1919-1994	3061	100	77	225	53	40	67	26,9	20,8	32,5	38,6	38,1	2,3	1,48	11,3	1398,5	45,1
SP 68	30	1902-1994	3095	104	93	114	53	45	66	29,5	25,9	34,0	57,8	48,0	2,4	1,15	9,4	1247,7	36,7

Tableau 12. Caractéristiques dendrométriques des 41 placettes. Les données sur les âges, les diamètres et les hauteurs correspondent aux mesures effectuées en 1994. Le diamètre correspond au diamètre sur écorce à hauteur de carottage (entre 1 et 1.30 m). Les mesures de hauteur ont été effectuées sur les arbres observations (52 arbres dominants mesurés tous les ans) et non sur les 26 à 30 arbres dominants échantillonnés pour l'étude dendrochronologique. tot = surface terrière totale du peuplement en 1995 ; esp. = surface terrière de l'espèce dominante en 1995, c'est-à-dire de l'espèce étudiée. La largeur du cerne correspond à la moyenne calculée sur l'ensemble des cernes disponibles par site (std=écart-type).

Plac.	Cerne complet (CC)				Bois initial (BI)				Bois final (BF)			
	tte période		1949-94		tte période		1949-94		tte période		1949-94	
	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²
CHP18	0,268	0,303	0,266	0,291	0,235	0,269	0,223	0,250	0,368	0,399	0,372	0,394
CHP49	0,262	0,289	0,272	0,280	0,251	0,284	0,249	0,260	0,343	0,365	0,363	0,369
CHP59	0,284	0,311	0,298	0,296	0,270	0,302	0,263	0,277	0,409	0,429	0,451	0,444
CHP65	0,234	0,270	0,226	0,255	0,250	0,291	0,240	0,271	0,307	0,341	0,303	0,329
	0,262	0,293	0,266	0,281	0,252	0,287	0,244	0,265	0,357	0,384	0,372	0,384
CHS01	0,238	0,258	0,215	0,226	0,259	0,279	0,238	0,252	0,317	0,336	0,305	0,312
CHS03	0,212	0,229	0,204	0,213	0,215	0,233	0,191	0,199	0,294	0,308	0,300	0,308
CHS18	0,248	0,271	0,231	0,245	0,232	0,257	0,218	0,234	0,329	0,349	0,317	0,329
CHS51	0,242	0,253	0,235	0,241	0,259	0,272	0,242	0,247	0,339	0,348	0,336	0,341
CHS57a	0,235	0,257	0,250	0,262	0,224	0,248	0,204	0,218	0,325	0,344	0,360	0,371
CHS57b	0,219	0,231	0,222	0,229	0,245	0,262	0,242	0,249	0,301	0,311	0,325	0,330
CHS58	0,226	0,256	0,228	0,252	0,254	0,283	0,253	0,274	0,290	0,318	0,296	0,319
CHS61	0,228	0,249	0,213	0,227	0,264	0,285	0,251	0,265	0,299	0,319	0,289	0,302
CHS72	0,220	0,255	0,197	0,218	0,236	0,271	0,219	0,243	0,282	0,314	0,257	0,276
CHS81	0,239	0,258	0,248	0,258	0,259	0,282	0,257	0,265	0,317	0,333	0,337	0,346
CHS86	0,291	0,315	0,250	0,264	0,270	0,293	0,239	0,253	0,392	0,414	0,332	0,346
	0,236	0,257	0,227	0,240	0,247	0,270	0,232	0,245	0,317	0,336	0,314	0,325
EPC39a	0,214	0,241	0,217	0,231	0,248	0,271	0,247	0,261	0,320	0,349	0,312	0,325
EPC39b	0,169	0,187	0,181	0,188	0,202	0,219	0,214	0,220	0,244	0,260	0,245	0,252
EPC71	0,278	0,310	0,274	0,300	0,308	0,334	0,304	0,323	0,416	0,453	0,416	0,450
EPC73	0,171	0,179	0,177	0,179	0,209	0,217	0,212	0,214	0,300	0,305	0,313	0,316
EPC88	0,224	0,240	0,243	0,245	0,288	0,300	0,301	0,303	0,329	0,348	0,324	0,325
	0,211	0,231	0,218	0,229	0,251	0,268	0,256	0,264	0,322	0,343	0,322	0,334
HET02	0,225	0,263	0,213	0,241	0,267	0,302	0,253	0,279	0,295	0,333	0,297	0,323
HET03	0,227	0,253	0,233	0,250	0,277	0,300	0,281	0,296	0,238	0,265	0,237	0,253
HET04	0,248	0,271	0,209	0,224	0,286	0,308	0,242	0,255	0,215	0,240	0,200	0,214
HET09	0,342	0,355	0,333	0,339	0,420	0,431	0,398	0,402	0,311	0,324	0,299	0,304
HET14	0,301	0,327	0,297	0,309	0,360	0,383	0,351	0,362	0,276	0,299	0,264	0,277
HET21	0,307	0,321	0,325	0,332	0,375	0,388	0,388	0,394	0,293	0,308	0,290	0,298
HET29	0,310	0,343	0,313	0,328	0,370	0,400	0,375	0,389	0,270	0,306	0,271	0,283
HET52	0,298	0,315	0,322	0,331	0,360	0,376	0,385	0,393	0,320	0,338	0,332	0,342
HET54a	0,312	0,330	0,320	0,332	0,364	0,380	0,367	0,377	0,310	0,328	0,299	0,312
HET54b	0,322	0,339	0,324	0,336	0,376	0,392	0,369	0,381	0,339	0,359	0,331	0,343
HET55	0,245	0,267	0,225	0,242	0,297	0,317	0,267	0,283	0,276	0,300	0,278	0,294
HET60	0,298	0,330	0,303	0,325	0,365	0,393	0,366	0,387	0,297	0,331	0,300	0,325
HET64	0,211	0,244	0,204	0,224	0,252	0,284	0,245	0,265	0,278	0,308	0,276	0,292
HET65	0,271	0,282	0,276	0,281	0,323	0,334	0,324	0,329	0,274	0,282	0,272	0,279
HET88	0,242	0,272	0,214	0,237	0,297	0,323	0,262	0,283	0,288	0,319	0,284	0,306
	0,277	0,301	0,274	0,289	0,333	0,354	0,325	0,338	0,285	0,309	0,282	0,296
SP05	0,162	0,189	0,173	0,179	0,214	0,238	0,214	0,218	0,256	0,278	0,271	0,276
SP07	0,184	0,214	0,189	0,193	0,211	0,240	0,221	0,223	0,266	0,293	0,262	0,269
SP09	0,216	0,224	0,204	0,208	0,268	0,275	0,236	0,239	0,305	0,315	0,325	0,328
SP57	0,215	0,257	0,216	0,234	0,286	0,319	0,287	0,291	0,335	0,368	0,331	0,353
SP63	0,214	0,233	0,209	0,220	0,277	0,295	0,274	0,283	0,303	0,319	0,304	0,314
SP68	0,227	0,251	0,282	0,288	0,284	0,306	0,342	0,347	0,308	0,328	0,344	0,350
	0,203	0,228	0,212	0,220	0,257	0,279	0,262	0,267	0,296	0,317	0,306	0,315

Tableau 13a. Sensibilité moyenne (SM_i) des séries chronologiques. Pour chaque site et chaque modalité, la valeur présentée correspond à la moyenne des sensibilités moyennes des séries individuelles (S_j) (23 à 30 arbres par site). La période 1949-1994 correspond à la période de calcul des fonctions de réponse des arbres au climat.

Plac.	Cerne complet (CC)				Bois initial (BI)				Bois final (BF)			
	tte période		1949-94		tte période		1949-94		tte période		1949-94	
	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²
CHP18	0,220	0,246	0,199	0,206	0,167	0,186	0,110	0,113	0,308	0,335	0,272	0,277
CHP49	0,203	0,233	0,202	0,203	0,115	0,162	0,099	0,098	0,259	0,285	0,267	0,270
CHP59	0,216	0,234	0,220	0,219	0,146	0,188	0,143	0,145	0,313	0,325	0,341	0,341
CHP65	0,185	0,229	0,151	0,154	0,147	0,199	0,101	0,115	0,239	0,282	0,201	0,202
	0,206	0,236	0,193	0,196	0,144	0,184	0,113	0,118	0,280	0,307	0,270	0,273
CHS01	0,173	0,180	0,151	0,154	0,127	0,146	0,072	0,077	0,233	0,230	0,225	0,226
CHS03	0,159	0,184	0,155	0,156	0,102	0,129	0,082	0,080	0,218	0,244	0,230	0,232
CHS18	0,189	0,206	0,175	0,176	0,125	0,156	0,118	0,118	0,247	0,261	0,237	0,236
CHS51	0,186	0,184	0,169	0,168	0,160	0,177	0,098	0,099	0,246	0,250	0,242	0,241
CHS57a	0,194	0,216	0,190	0,192	0,107	0,135	0,083	0,084	0,258	0,278	0,264	0,266
CHS57b	0,167	0,182	0,152	0,149	0,105	0,125	0,078	0,078	0,222	0,237	0,226	0,221
CHS58	0,158	0,215	0,157	0,165	0,130	0,172	0,108	0,116	0,202	0,248	0,202	0,206
CHS61	0,172	0,181	0,137	0,135	0,125	0,156	0,108	0,109	0,227	0,231	0,191	0,190
CHS72	0,162	0,203	0,143	0,147	0,093	0,150	0,087	0,088	0,211	0,243	0,186	0,188
CHS81	0,180	0,208	0,192	0,192	0,107	0,138	0,092	0,092	0,234	0,263	0,262	0,263
CHS86	0,209	0,240	0,182	0,183	0,135	0,165	0,121	0,121	0,285	0,314	0,237	0,237
	0,177	0,200	0,164	0,165	0,120	0,150	0,095	0,097	0,235	0,254	0,227	0,228
EPC39a	0,167	0,226	0,161	0,167	0,194	0,253	0,175	0,181	0,192	0,235	0,174	0,187
EPC39b	0,113	0,116	0,128	0,127	0,133	0,134	0,149	0,148	0,095	0,095	0,099	0,098
EPC71	0,222	0,275	0,222	0,226	0,228	0,280	0,224	0,230	0,265	0,320	0,255	0,278
EPC73	0,102	0,115	0,112	0,113	0,118	0,130	0,122	0,124	0,121	0,135	0,135	0,144
EPC88	0,133	0,167	0,140	0,142	0,153	0,188	0,169	0,168	0,163	0,186	0,143	0,143
	0,147	0,180	0,153	0,155	0,165	0,197	0,168	0,170	0,167	0,194	0,161	0,170
HET02	0,135	0,168	0,117	0,123	0,157	0,194	0,141	0,145	0,116	0,162	0,101	0,122
HET03	0,161	0,175	0,143	0,145	0,201	0,209	0,169	0,173	0,099	0,125	0,079	0,084
HET04	0,231	0,233	0,144	0,143	0,262	0,263	0,163	0,162	0,096	0,116	0,057	0,063
HET09	0,174	0,197	0,234	0,235	0,211	0,234	0,270	0,270	0,118	0,139	0,150	0,151
HET14	0,219	0,255	0,201	0,205	0,260	0,297	0,236	0,239	0,110	0,147	0,087	0,089
HET21	0,247	0,267	0,262	0,261	0,294	0,312	0,310	0,308	0,178	0,197	0,165	0,165
HET29	0,183	0,213	0,173	0,168	0,213	0,239	0,201	0,194	0,104	0,142	0,105	0,102
HET52	0,241	0,261	0,278	0,278	0,283	0,306	0,326	0,327	0,196	0,223	0,220	0,222
HET54a	0,237	0,253	0,241	0,238	0,266	0,279	0,272	0,268	0,176	0,192	0,128	0,126
HET54b	0,236	0,247	0,262	0,264	0,273	0,284	0,3	0,301	0,18	0,192	0,176	0,183
HET55	0,188	0,208	0,140	0,143	0,215	0,232	0,166	0,170	0,166	0,189	0,113	0,120
HET60	0,235	0,271	0,245	0,251	0,281	0,317	0,295	0,303	0,167	0,201	0,160	0,168
HET64	0,149	0,170	0,125	0,127	0,179	0,196	0,146	0,144	0,120	0,151	0,103	0,110
HET65	0,164	0,175	0,166	0,167	0,188	0,200	0,187	0,190	0,121	0,136	0,118	0,122
HET88	0,155	0,192	0,145	0,154	0,186	0,217	0,176	0,184	0,126	0,174	0,130	0,135
	0,197	0,219	0,192	0,193	0,231	0,252	0,224	0,225	0,138	0,166	0,126	0,131
SP05	0,131	0,148	0,122	0,126	0,159	0,170	0,116	0,119	0,162	0,183	0,167	0,171
SP07	0,143	0,173	0,138	0,138	0,155	0,182	0,152	0,154	0,184	0,214	0,186	0,187
SP09	0,140	0,160	0,129	0,128	0,151	0,169	0,123	0,122	0,166	0,182	0,193	0,192
SP57	0,142	0,192	0,135	0,143	0,163	0,210	0,155	0,161	0,169	0,221	0,162	0,179
SP63	0,153	0,175	0,131	0,135	0,200	0,219	0,148	0,154	0,166	0,195	0,153	0,150
SP68	0,160	0,195	0,200	0,201	0,187	0,225	0,231	0,234	0,157	0,182	0,190	0,188
	0,145	0,174	0,143	0,145	0,169	0,196	0,154	0,157	0,167	0,196	0,175	0,178

Tableau 13b. Sensibilité moyenne (SM_m) des séries chronologiques. Pour chaque site et chaque modalité, la valeur présentée correspond à la sensibilité moyenne calculée à partir de la chronologie moyenne de référence (23 à 30 arbres par site). La période 1949-1994 correspond à la période de calcul des fonctions de réponse des arbres au climat.

Plac.	Cerne complet (CC)				Bois initial (BI)				Bois final (BF)			
	tte période		1949-94		tte période		1949-94		tte période		1949-94	
	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²	mm	cm ²
CHP18	0,821	0,812	0,748	0,708	0,711	0,691	0,493	0,452	0,837	0,840	0,731	0,703
CHP49	0,775	0,806	0,743	0,725	0,458	0,570	0,398	0,377	0,755	0,781	0,736	0,732
CHP59	0,761	0,752	0,738	0,740	0,541	0,623	0,544	0,523	0,765	0,758	0,756	0,768
CHP65	0,791	0,848	0,668	0,604	0,588	0,684	0,421	0,424	0,779	0,827	0,663	0,614
	0,787	0,805	0,724	0,694	0,574	0,642	0,464	0,444	0,784	0,801	0,722	0,704
CHS01	0,727	0,698	0,702	0,681	0,490	0,523	0,303	0,306	0,735	0,685	0,738	0,724
CHS03	0,750	0,803	0,760	0,732	0,474	0,554	0,429	0,402	0,741	0,792	0,767	0,753
CHS18	0,762	0,760	0,758	0,718	0,539	0,607	0,541	0,504	0,751	0,748	0,748	0,717
CHS51	0,769	0,727	0,719	0,697	0,618	0,651	0,405	0,401	0,726	0,718	0,720	0,707
CHS57a	0,826	0,840	0,760	0,733	0,478	0,544	0,407	0,385	0,794	0,808	0,733	0,717
CHS57b	0,763	0,788	0,685	0,651	0,429	0,477	0,322	0,313	0,738	0,762	0,695	0,670
CHS58	0,699	0,840	0,689	0,655	0,512	0,608	0,427	0,423	0,697	0,780	0,682	0,646
CHS61	0,754	0,727	0,643	0,595	0,473	0,547	0,430	0,411	0,759	0,724	0,661	0,629
CHS72	0,736	0,796	0,726	0,674	0,394	0,554	0,397	0,362	0,748	0,774	0,724	0,681
CHS81	0,753	0,806	0,774	0,744	0,413	0,489	0,358	0,347	0,738	0,790	0,777	0,760
CHS86	0,718	0,762	0,728	0,693	0,500	0,563	0,506	0,478	0,727	0,758	0,714	0,685
	0,751	0,777	0,722	0,689	0,484	0,556	0,411	0,394	0,741	0,758	0,724	0,699
EPC39a	0,780	0,938	0,742	0,723	0,782	0,934	0,709	0,693	0,600	0,673	0,558	0,575
EPC39b	0,670	0,620	0,705	0,678	0,657	0,611	0,695	0,674	0,388	0,367	0,403	0,389
EPC71	0,799	0,887	0,810	0,753	0,740	0,838	0,737	0,712	0,637	0,706	0,613	0,618
EPC73	0,596	0,642	0,633	0,631	0,565	0,599	0,575	0,579	0,403	0,443	0,431	0,456
EPC88	0,594	0,696	0,576	0,580	0,531	0,627	0,561	0,554	0,495	0,534	0,441	0,440
	0,688	0,757	0,693	0,673	0,655	0,722	0,655	0,643	0,505	0,545	0,489	0,496
HET02	0,600	0,639	0,549	0,510	0,588	0,642	0,557	0,520	0,393	0,486	0,340	0,378
HET03	0,709	0,692	0,614	0,580	0,726	0,697	0,601	0,584	0,416	0,472	0,333	0,332
HET04	0,930	0,861	0,690	0,638	0,916	0,854	0,673	0,635	0,444	0,485	0,287	0,296
HET09	0,509	0,555	0,703	0,693	0,502	0,543	0,678	0,672	0,379	0,429	0,502	0,497
HET14	0,728	0,780	0,677	0,663	0,722	0,775	0,672	0,660	0,399	0,492	0,330	0,321
HET21	0,805	0,832	0,806	0,786	0,784	0,804	0,799	0,782	0,608	0,640	0,569	0,554
HET29	0,590	0,621	0,553	0,512	0,576	0,598	0,536	0,499	0,385	0,464	0,387	0,360
HET52	0,809	0,829	0,863	0,840	0,786	0,814	0,847	0,832	0,613	0,660	0,663	0,649
HET54a	0,760	0,767	0,753	0,717	0,731	0,734	0,741	0,711	0,568	0,585	0,428	0,404
HET54b	0,732	0,728	0,810	0,786	0,726	0,726	0,813	0,791	0,532	0,534	0,531	0,534
HET55	0,767	0,779	0,622	0,591	0,724	0,732	0,622	0,601	0,601	0,630	0,406	0,408
HET60	0,789	0,821	0,809	0,772	0,770	0,807	0,806	0,783	0,562	0,607	0,533	0,517
HET64	0,706	0,697	0,613	0,567	0,710	0,690	0,596	0,543	0,432	0,490	0,373	0,377
HET65	0,605	0,621	0,601	0,594	0,582	0,599	0,577	0,578	0,442	0,482	0,434	0,437
HET88	0,640	0,706	0,678	0,650	0,626	0,672	0,672	0,650	0,438	0,545	0,458	0,441
	0,712	0,728	0,689	0,660	0,698	0,712	0,679	0,656	0,481	0,533	0,438	0,434
SP05	0,809	0,783	0,705	0,704	0,743	0,714	0,542	0,546	0,633	0,658	0,616	0,620
SP07	0,777	0,808	0,730	0,715	0,735	0,758	0,688	0,691	0,692	0,730	0,710	0,695
SP09	0,648	0,714	0,632	0,615	0,563	0,615	0,521	0,510	0,544	0,578	0,594	0,585
SP57	0,660	0,747	0,625	0,611	0,570	0,658	0,540	0,553	0,504	0,601	0,489	0,507
SP63	0,715	0,751	0,627	0,614	0,722	0,742	0,540	0,544	0,548	0,611	0,503	0,478
SP68	0,705	0,777	0,709	0,698	0,658	0,735	0,675	0,674	0,510	0,555	0,552	0,537
	0,719	0,763	0,671	0,659	0,665	0,704	0,584	0,586	0,572	0,622	0,578	0,570

Tableau 14. Coefficient d'interdatation $SR (=SM_m/SM_p)$ des séries chronologiques. Pour chaque site et chaque modalité, un synchronisme parfait s'exprime par une valeur proche de 1. La valeur correspondant à l'asynchronisme (SR_a) total dépend de la taille de l'échantillon. Pour $n=23$ arbres, $SR_a = 0.209$ et pour $n=30$, $SR_a=0.183$. La période 1949-1994 correspond à la période de calcul des fonctions de réponse des arbres au climat.

6 Modélisation ARMA

6.1 Analyse globale

Pour les 7314 chronologies élémentaires étudiées (6 chronologies par arbre : cerne complet, bois initial et bois final exprimés en largeur (mm) et surface (cm²)), 82 modèles différents ont été observés. Parmi ces 82 modèles, du plus simple (0.0) aux plus complexes (13.0 et 5.13), 9 apparaissent dans la grande majorité des cas (**Tableau 15**). Il s'agit des modèles auto-régressifs simples (de 0.0 à 5.0) ou couplant un facteur de moyenne mobile d'ordre 1 à 2 (1.1, 1.2 et 2.2). Les deux modèles les plus simples 1.0 et 1.1 sont les plus fréquents. Ils permettent de modéliser entre 33% et 71% des séries élémentaires selon l'espèce, le compartiment ou l'unité des cernes considérés.

L'espèce ne semble pas jouer pas un rôle important dans le déterminisme des modèles ARMA. En effet, quelle que soit l'essence considérée, les modèles simples restent les plus fréquents. En revanche, l'expression des cernes en surfaces tend à augmenter la diversité et la fréquence des modèles plus complexes (2.2, 3.0, 4.0 et 5.0).

La fréquence des modèles varie selon le compartiment. Pour les espèces à zone de bois initial importante (hêtre, sapin et épicéa), les modèles observés pour ce compartiment sont très comparables à ceux obtenus pour le cerne complet. Pour les chênes, c'est l'inverse qui est observé (zone de bois final plus importante).

La complexité et la diversité des modèles ARMA observés par placette augmentent parallèlement à la longueur des séries élémentaires analysées, c'est-à-dire avec l'âge du peuplement (**Figure 6**). La relation est nette pour les données exprimées en surface (cm²). Pour le cerne complet, le nombre de modèles ARMA différents passe de 10 pour les jeunes arbres à 29 pour les arbres âgés de plus de 160 ans, et la fréquence d'apparition du modèle simple 1.0 diminue de près de 50% (**Tableau 16**). Pour les 131 arbres de plus de 140 ans, un total de 35 modèles ARMA différents a été observé soit plus de 40% des modèles observés sur l'ensemble de l'échantillon (82 différents). Ceci peut s'expliquer par le fait que, pour chaque âge, le modèle prend en compte les différentes phases de croissance de l'arbre c'est-à-dire la phase juvénile et adulte et éventuellement la sénescence.

6.2 Etude de l'effet espèce

L'étude de l'effet espèce sur le déterminisme des modèles ARMA a été faite à partir des surfaces de cerne complet (en cm²) sur le sous-échantillon des 799 arbres âgés d'au moins de 75 ans en 1994 (32 placettes ; 2 à 30 arbres par site) (**Tableau 17**). La seule prise en compte du cerne complet permet d'éliminer le problème des différences de structure anatomique des cernes entre les espèces. Cette limite d'âge a été choisie car elle permet :

- De calculer pour tous les arbres les modèles ARMA sur la période utilisée pour le calcul des fonctions de réponse, c'est-à-dire les années 1949-1994 ;
- D'éliminer, en partie, le biais potentiel lié à la croissance juvénile. En effet, cette période ne prend en compte que des cernes élaborés quand les arbres avaient au moins 30 ans ;

- De conserver un nombre d'arbres et de sites suffisants pour obtenir un résultat statistiquement fiable.

Tableau 17. Caractéristiques des 32 placettes retenues pour l'étude du déterminisme des modèles ARMA selon l'espèce. Seuls les arbres âgés d'au moins 75 ans ont été retenus. Les modèles ARMA ont été déterminés sur la période commune 1949-1994 et sur les surfaces de cerne complet (cm²).

Espèce	Code	Nb de sites	Nb d'arbres	Age
Chêne sessile	CHS	3	13	83 [75 à 93]
Chêne pédonculé	CHP	9	257	101 [76 à 229]
Hêtre	HET	12	293	111 [76 à 170]
Epicéa commun	EPC	3	89	127 [83 à 262]
Sapin pectiné	SP	5	147	112 [75 à 226]
		32	799	109 [75 à 262]

Pour les 799 chronologies élémentaires analysées, 29 modèles ont été observés (**Tableaux 18 et 19**). Parmi ces 29 modèles, du plus simple (0.0) au plus complexe (9.0), le modèle 1.0 apparaît sur tous les sites et standardise plus de 60% des séries élémentaires. Les quatre modèles 1.0, 1.1, 2.0 et 3.0 modélisent plus de 80% des arbres. La distribution des placettes dans le plan factoriel de l'ACP révèle une structuration des 32 placettes liée à la fréquence des modèles arma 1.0 et 2.0 mais sans répartition préférentielle selon l'espèce (**Figure 7**).

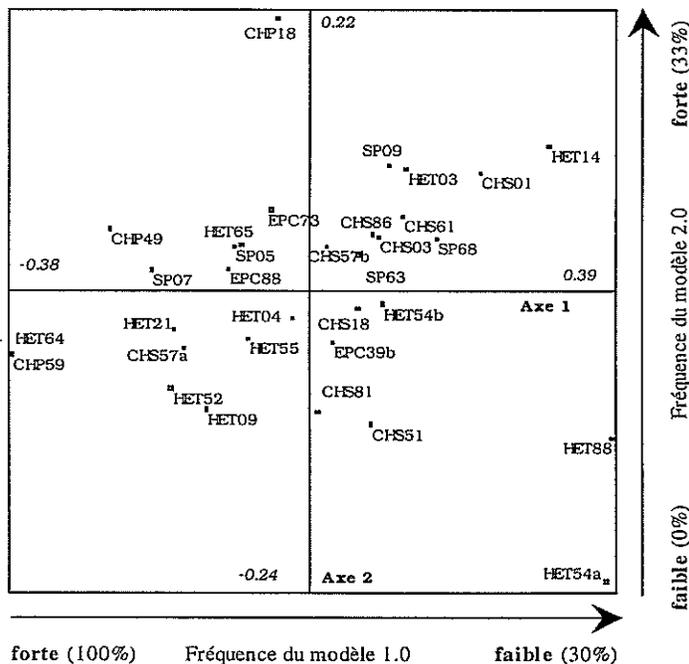


Figure 7. Répartition des 32 placettes dans le plan factoriel 1-2 de l'ACP sur matrice de covariance. Les variables d'entrées sont les fréquences par site des 29 modèles arma différents observés sur les 799 chronologies élémentaires. Les modèles ont été déterminés sur le cerne complet exprimé en surface et pour la période 1949-1994. het = hêtre ; chs et chp = chêne sessile et pédonculé ; epc = épicéa ; sp = sapin pectiné. Le numéro suivant le code de l'espèce indique le département.

Toutes espèces		N=1219 arbres		41 placettes		1 placette : 26 à 30 arbres	
Type de modèle	Cerne complet mm	cm ²	Bois initial mm	cm ²	Bois final mm	cm ²	
0.0					10,3%	125	
1.0	53,1%	647	42,0%	513	37,8%	460	28,3%
1.1	11,1%	135	13,0%	158	8,5%	103	17,4%
1.2			5,6%	68			5,9%
2.0	9,6%	117	5,5%	67	16,1%	196	6,7%
2.2					6,7%	82	15,5%
3.0	7,3%	89	6,4%	78	11,5%	143	9,9%
4.0							8,0%
5.0			5,9%	68			6,2%
	81,1%	78,4%	73,9%	81,1%	82,6%	76,8%	
Nb total modèles	45	56	46	51	44	50	
processus (AR)	12.0	11.0	10.1	13.0	10.0	13.0	
processus (MA)	5.8	5.12	5.9	5.12	5.12	5.13	

Chênes		N=443 arbres		15 placettes		1 placette : 26 à 30 arbres	
Chêne sessile (119 arbres ; 4 placettes)		Chêne pédonculé (324 arbres ; 11 placettes)					
Type de modèle	Cerne complet mm	cm ²	Bois initial mm	cm ²	Bois final mm	cm ²	
0.0			5,9%	26			
1.0	59,1%	262	39,5%	175	27,0%	119	12,0%
1.1	11,5%	51	18,0%	80	5,9%	26	25,5%
1.2			7,9%	35			10,4%
2.0	9,0%	40	6,3%	28	23,1%	102	5,9%
2.2			5,6%	25	5,4%	24	12,2%
3.0	5,9%	26	5,9%	26	16,3%	72	13,5%
5.0							6,8%
	85,5%	83,2%	83,4%	79,5%	81,5%	80,1%	
Nb total modèles	22	34	22	30	26	34	
processus (AR)	9.1	9.0	8.0	13.0	9.0	10.0	
processus (MA)	3.6	5.12	5.9	5.6	5.12	5.7	

Sapin pectiné		N=148 arbres		5 placettes		1 placette : 28 à 30 arbres	
Type de modèle	Cerne complet mm	cm ²	Bois initial mm	cm ²	Bois final mm	cm ²	
1.0	37,6%	67	43,2%	77	33,1%	59	30,0%
1.1	15,2%	27	11,2%	20	17,4%	31	19,7%
1.2							
2.0	20,8%	37	11,2%	20	20,8%	37	16,9%
2.2							28,7%
3.0	7,8%	14	5,0%	9	7,9%	14	5,6%
4.0	5,0%	9					11,8%
	86,4%	70,6%	79,2%	72,2%	78,7%	76,3%	
Nb total modèles	17	25	20	27	20	24	
processus (AR)	12.0	10.0	9.0	12.0	7.0	7.0	
processus (MA)	5.6	5.6	5.5	3.1	4.1	3.1	

Hêtre		N=450 arbres		15 placettes		1 placette : 30 arbres	
Type de modèle	Cerne complet mm	cm ²	Bois initial mm	cm ²	Bois final mm	cm ²	
0.0							21,4%
1.0	50,9%	229	42,4%	191	49,4%	222	40,0%
1.1	9,8%	44	10,9%	49	6,9%	31	10,9%
1.2							10,5%
2.0	6,4%	29			7,8%	35	
2.2							13,1%
3.0	8,7%	39	6,7%	30	8,9%	40	8,0%
4.0							6,7%
5.0			12,2%	55	6,7%	30	12,9%
	75,8%	72,2%	79,7%	71,8%	83,6%	75,4%	
Nb total modèles	36	39	36	34	30	35	
processus (AR)	9.1	11.0	10.1	11.0	8.3	13.0	
processus (MA)	5.8	5.12	5.8	5.12	6.6	4.6	

Épicéa commun		N=148 arbres		5 placettes		1 placette : 28 à 30 arbres	
Type de modèle	Cerne complet mm	cm ²	Bois initial mm	cm ²	Bois final mm	cm ²	
0.0							6,1%
1.0	60,1%	82	47,3%	70	40,5%	60	43,2%
1.1	8,8%	13	6,1%	9	10,1%	15	10,1%
1.2	5,4%	8	6,1%	9			
2.0	7,4%	11			14,9%	22	7,4%
2.2							23,1%
3.0	6,8%	10	8,8%	13	9,5%	14	9,5%
4.0							10,9%
	88,5%	68,3%	75,0%	70,2%	78,1%	73,6%	
Nb total modèles	18	25	22	25	22	25	
processus (AR)	8.1	7.0	9.0	8.1	10.0	11.0	
processus (MA)	5.6	5.5	5.6	5.7	5.12	5.13	

Tableau 15. Fréquence des modèles ARMA par compartiment et selon l'unité des largeurs de cernes (en mm et cm²). Seuls les modèles apparaissant dans au moins 5% des cas ont été retenus. Le nombre total de modèles ARMA différents ainsi que les deux modèles les plus complexes observés ont été indiqués. (AR) : processus auto-régressif le plus complexe ; (MA) : valeur de moyenne mobile la plus forte.

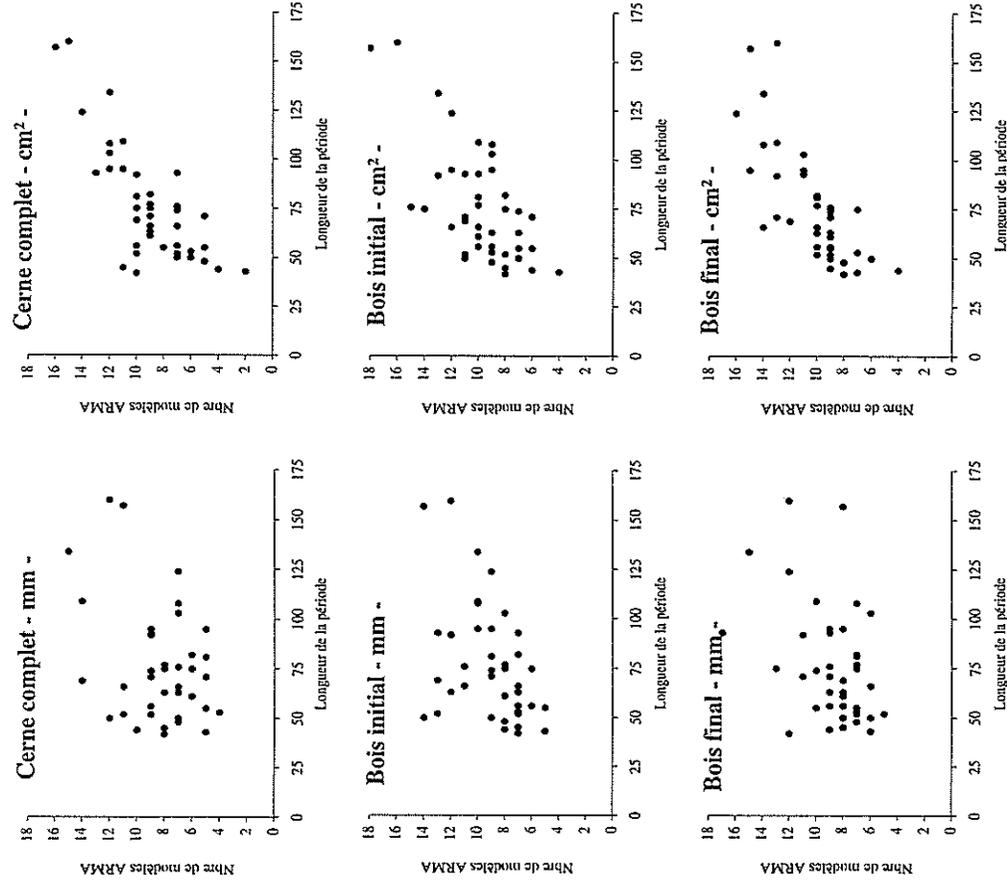


Figure 6. Relation entre le nombre de modèles ARMA différents observés par placette et la longueur des séries élémentaires analysées pour chaque compartiment anatomique et selon l'unité d'expression du cerne. N=41 placettes ; n=26 à 30 arbres par placette. Toutes espèces confondues.

	[41 à 50]	[51 à 55]	[56 à 60]	[61 à 65]	[66 à 70]	[71 à 80]	[81 à 85]
Age moyen	48	53	58	63	68	76	83
Nb arbres	46	55	110	85	84	106	111
Nb modèles	10	13	13	11	14	13	20
Modèle le plus fréquent	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Modèle le plus fréquent	67%	60%	61%	47%	48%	56%	45%
Modèle le plus simple	1.0	1.0	1.0	0.0	0.2	1.0	0.8
Modèle le plus complexe	4.2	4.4	7.0	5.5	5.1	7.1	9.0

	[86 à 90]	[91 à 100]	[101 à 110]	[111 à 120]	[121 à 140]	[141 à 160]	> [60]
Age moyen	88	96	106	114	129	155	177
Nb arbres	128	114	108	63	78	50	81
Nb modèles	20	20	15	16	22	16	29
Modèle le plus fréquent	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Modèle le plus fréquent	41%	33%	32%	25%	21%	32%	22%
Modèle le plus simple	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Modèle le plus complexe	14%	13%	15%	18%	15%	8%	11%
Modèle le plus simple	1.0	1.0	1.0	0.1	1.0	1.0	0.1
Modèle le plus complexe	8.0	8.0	8.1	7.1	7.1	8.0	11.0

Tableau 16. Nombre de modèles ARMA différents et fréquences des modèles les plus souvent observés pour le cerne complet (en cm²) selon l'âge des arbres (en 1994 à 1.30 m) (toutes les espèces et tous les sites confondus).

Tableau 18. Fréquence des modèles ARMA par site (n=32) et pour les 799 arbres retenus pour l'étude de l'effet espèce. Seuls les arbres âgés d'au moins 75 ans ont été retenus. Les modèles ARMA ont été déterminés sur la période commune 1949-1994 et la surface du cerne complet (cm²).

<i>modèle</i>	<i>0.0</i>	<i>0.1</i>	<i>0.2</i>	<i>1.0</i>	<i>1.1</i>	<i>1.2</i>	<i>1.3</i>	<i>2.0</i>	<i>2.1</i>	<i>2.2</i>	<i>2.3</i>	<i>2.4</i>
Nb de sites	9	8	3	32	25	6	4	22	3	7	4	1
Fréq.	28.1%	25.0%	9.4%	100%	78.1%	18.8%	12.5%	68.8%	9.4%	21.9%	12.5%	3.1%
Nb d'arbres	12	8	3	499	76	9	4	57	3	7	5	1
Fréq.	1.5%	1.0%	0.4%	62.5%	9.5%	1.1%	0.5%	7.1%	0.4%	0.9%	0.6%	0.1%

<i>modèle</i>	<i>3.0</i>	<i>3.1</i>	<i>3.3</i>	<i>3.4</i>	<i>4.0</i>	<i>4.2</i>	<i>4.4</i>	<i>4.6</i>	<i>5.0</i>	<i>5.1</i>	<i>5.2</i>	<i>5.5</i>
Nb de sites	16	3	1	2	17	1	2	1	8	2	3	4
Fréq.	50.0%	9.4%	3.1%	6.3%	53.1%	3.1%	6.3%	3.1%	25.0%	6.3%	9.4%	12.5%
Nb d'arbres	40	3	1	2	25	1	2	1	17	2	3	4
Fréq.	5.0%	0.4%	0.1%	0.3%	3.1%	0.1%	0.3%	0.1%	2.1%	0.3%	0.4%	0.5%

<i>modèle</i>	<i>6.0</i>	<i>7.0</i>	<i>7.1</i>	<i>8.0</i>	<i>9.0</i>
Nb de sites	4	3	2	3	1
Fréq.	12.5%	9.4%	6.3%	9.4%	3.1%
Nb d'arbres	4	4	2	3	1
Fréq.	0.5%	0.5%	0.3%	0.4%	0.1%

Tableau 19. Fréquence des modèles ARMA les plus fréquents par espèce. Seuls les arbres âgés d'au moins 75 ans ont été retenus. Les modèles ARMA ont été déterminés sur la période commune 1949-1994 et sur la surface du cerne complet (cm²). Pour chaque espèce, les 4 modèles présentés modélisent plus de 80% des arbres. N= nombre d'arbres ; Nb = nombre de modèles différents.

	<i>N</i>	<i>Nb mod.</i>	<i>1.0</i>	<i>1.1</i>	<i>2.0</i>	<i>3.0</i>
CHS	13	2	85% (11)		15% (2)	
CHP	257	22	59% (152)	12% (32)	6.6% (17)	5.4% (14)
HET	293	24	62% (183)	9.2% (27)	4.8% (14)	6.1% (18)
EPC	89	13	67% (60)	5.6% (5)	8.9% (8)	4.5% (4)
SP	147	19	63% (93)	8.2% (12)	10.9% (16)	2.7% (4)

6.3 Conclusions

Pour chaque site et chaque compartiment (exprimé en largeur et en surface), le modèle statistiquement le plus valide et biologiquement le plus simple a été sélectionné. Pour chaque série élémentaire, le modèle fournit une série de résidus dont la moyenne représente la chronologie de référence ou maîtresse de la population analysée. Il est à noter que l'élimination de la fraction déterministe du modèle ARMA entraîne la disparition d'une partie de l'information contenue dans les séries de cernes, en particulier, les rapports entre la croissance de l'année en cours et les accroissements (et le climat) des années antérieures (élimination des « arrière-effets ») (Gadbin-Henry 1994).

Les modèles ARMA les plus simples (1.0, 1.1, 2.0 et 3.0) permettent de standardiser la très grande majorité des séries chronologiques individuelles

La complexité et la diversité des modèles tendent à augmenter avec l'âge des arbres et pour les cernes exprimés en surfaces

L'espèce ne joue aucun rôle dans le déterminisme des modèles ARMA

7 Déficit de réserve en eau des peuplements

A partir des données journalières élémentaires, des paramètres stationnels et des caractéristiques des peuplements (voir **Tableaux 2 et 11**), les moyennes mensuelles et les normales trentennaires (1961-1990) des paramètres climatiques élémentaires (T, P, nombre de jours de gelées...) et des déficits moyens de réserve en eau (voir paragraphe 3.3 pour les explications détaillées) ont été calculées pour chaque station de référence et chaque peuplement (Lebourgeois 1999). Ces données ont été cartographiées afin de rendre compte :

- Des conditions climatiques locales moyennes de croissance des peuplements ;
- Des niveaux moyens des contraintes en eau subies par les arbres ;
- De l'amplitude des gradients bioclimatiques rencontrés pour chaque espèce.

7.1 Analyse globale

Selon la carte bioclimatologique (simplifiée) de la France, les 41 placettes appartiennent à 4 grandes zones climatiques (**Figure 8**) :

- *Zone à climat océanique à semi-océanique* (hiver frais à très frais et été frais à chaud). Il s'agit du grand quart nord-ouest de la France. 4 placettes de hêtre (HET02, 14, 29, 60) et 4 placettes de chênes (CHP59, 49 et CHS61, 72) appartiennent à cette zone ;
- *Zone à climat semi-océanique à semi-continental* (hiver très frais à froid et été frais à chaud). 6 placettes de chênes (CHS01, 03, 18, 58, 81, 86, CHP18), une placette de hêtre (HET03) et une placette d'érable (EPC71) appartiennent à cette zone ;
- *Zone à climat semi-continental* (hiver froid et été frais). Il s'agit du grand quart nord-est de la France où ont été échantillonnés 6 placettes de hêtre (HET21, 52, 54a, 54b, 55, 88), 3 placettes de chênes (CHS51, 57a, 57b), 1 placette de sapin (SP57, 68) ;
- *Zone montagnarde* (hiver très froid et été frais à chaud) :
 - ✓ Vosges : EPC88
 - ✓ Jura : EPC39a et 39b ;
 - ✓ Pyrénées : HET09, 64, 65 ; CHP65 et SP09 ;
 - ✓ Alpes, Puy de Dôme et Ardèche : HET04 ; SP05, 07, 63 ; EPC73.

Le cumul annuel moyen des pluies varie de 1912 mm pour la station d'altitude des Rousses dans le Jura (1110 m) à 614 mm pour la station de plaine de Longue-Jumelles dans le Maine-et-Loire (30 m). Les placettes en zones montagnarde et océanique (HET29 et HET14) bénéficient de précipitations totales annuelles supérieures à 1000 mm (**Figure 8**). Pendant la saison de végétation (de mai à septembre), il apparaît un net gradient ouest-est des précipitations qui augmentent de 250-300 mm à 350-400 mm. Les placettes d'altitude s'individualisent nettement avec des pluies généralement supérieures à 500 mm. Cette variation du cumul pendant la saison de

végétation s'accompagne d'une augmentation du nombre de jours de pluie de 10 à 15 jours selon le même gradient ouest-est (50-55 jours à 60-65 jours).

La température moyenne annuelle varie de 5.1°C pour la station d'altitude de Lamoura dans le Jura (1120 m) à 13°C pour la station de Montélimar dans la Drôme (73 m) (**Figure 9**). Le gradient ouest-est se traduit par une différence annuelle de 1.5°C à 2°C (10.5-11.5°C à 10.5-9°C). En ce qui concerne les zones de montagne, les placettes du sud de la France bénéficient de températures moyennes annuelle et pendant la saison nettement supérieures aux autres zones montagneuses échantillonnées (différence de 1.5 à 2°C). Le nombre de jours de gelée ($T_{min} < 0$) augmente également sensiblement d'une zone à l'autre. Il fait plus que doubler quand on passe de l'extrême ouest (Lorient ; 34 jours) à l'extrême est (Strasbourg ; 77 jours) (**Figure 9**). Il dépasse 100 jours par an pour 5 stations : Lamoura : 168 jours (EPC39a et 39b) ; Issanlas : 142 jours (SP07) ; Bourg-St-Maurice : 121 jours (EPC73) ; Embrun : 104 jours (SP05) ; Luxeuil : 101 jours (HET 88).

Pour 16 des 28 stations ETP de référence, la durée moyenne de la sécheresse annuelle dépasse 2.5 mois (**Figure 10**). Elle dépasse 2 mois pour 23 sites. Un total de 4 sites dépasse la valeur de 60 de déficit annuel mais 10 ont des stress annuels moyens inférieurs à 30. Il apparaît une bonne correspondance entre les estimations de la période de sécheresse données par les diagrammes ombrothermiques de Gaussen (période pour laquelle la valeur de 2T est supérieure à celle des précipitations) et les évolutions mensuelles moyennes des contraintes en eau (nombre de jours de sécheresse et intensité du stress) (**Figure 11**). Pour l'ouest de la France, caractérisé par des longues périodes de stress, l'intensité varie très sensiblement selon le site. Ainsi, si l'on considère les stations d'Alençon, Le Mans et Angers, le niveau moyen de stress augmente de 40, 50 à 70 soit une variation de près de 75% avec une augmentation moyenne de la durée de la sécheresse de +30% (**Figure 11**). Même si les périodes de déficits en eau dépassent très souvent les 2 mois dans l'est, leurs intensités sont nettement inférieures à celles de l'ouest de la France ; les moyennes les plus élevées étant observées à Colmar (43) et à Strasbourg (38).

Le gradient ouest-est apparaît donc également nettement sur les caractéristiques du bilan hydrique. Pour les conditions de peuplement fixées (feuillus ; RUM=150 mm ; LAI=6m²/m² et saison de végétation des jours juliens 120 à 300), *l'intensité moyenne annuelle du déficit de réserve en eau varie de 50-60 pour l'Ouest à 30-50 et 20-40 pour le Centre et l'Est (moyenne 1961-1990)*. Pour le sud, le sud-est se distingue nettement du sud-ouest avec des longues périodes (> 2.5 mois) de fortes sécheresses (> 60). Pour le sud-ouest, seul Toulouse présente des sécheresses longues et intenses (**Figure 10**).

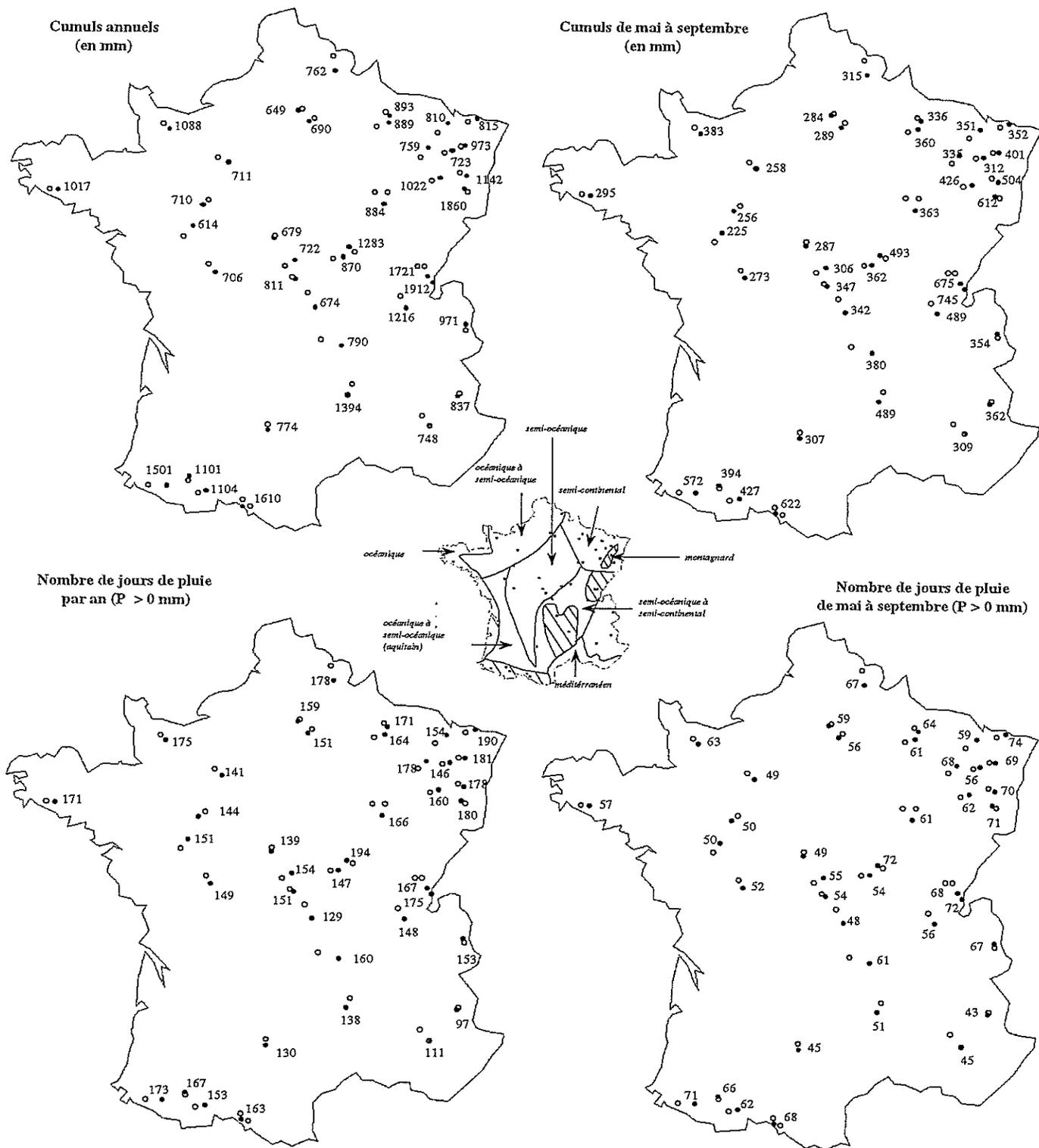


Figure 8. Conditions pluviométriques moyennes pour les 41 sites d'étude (ronds blancs). Les moyennes des différents paramètres ont été calculées à partir des séries climatiques journalières des 39 postes météorologiques de référence (ronds noirs) et sur la période 1961-1990 (dans la grande majorité des cas). La liste des postes météorologiques rattachés à chaque site est donnée dans le tableau 2.

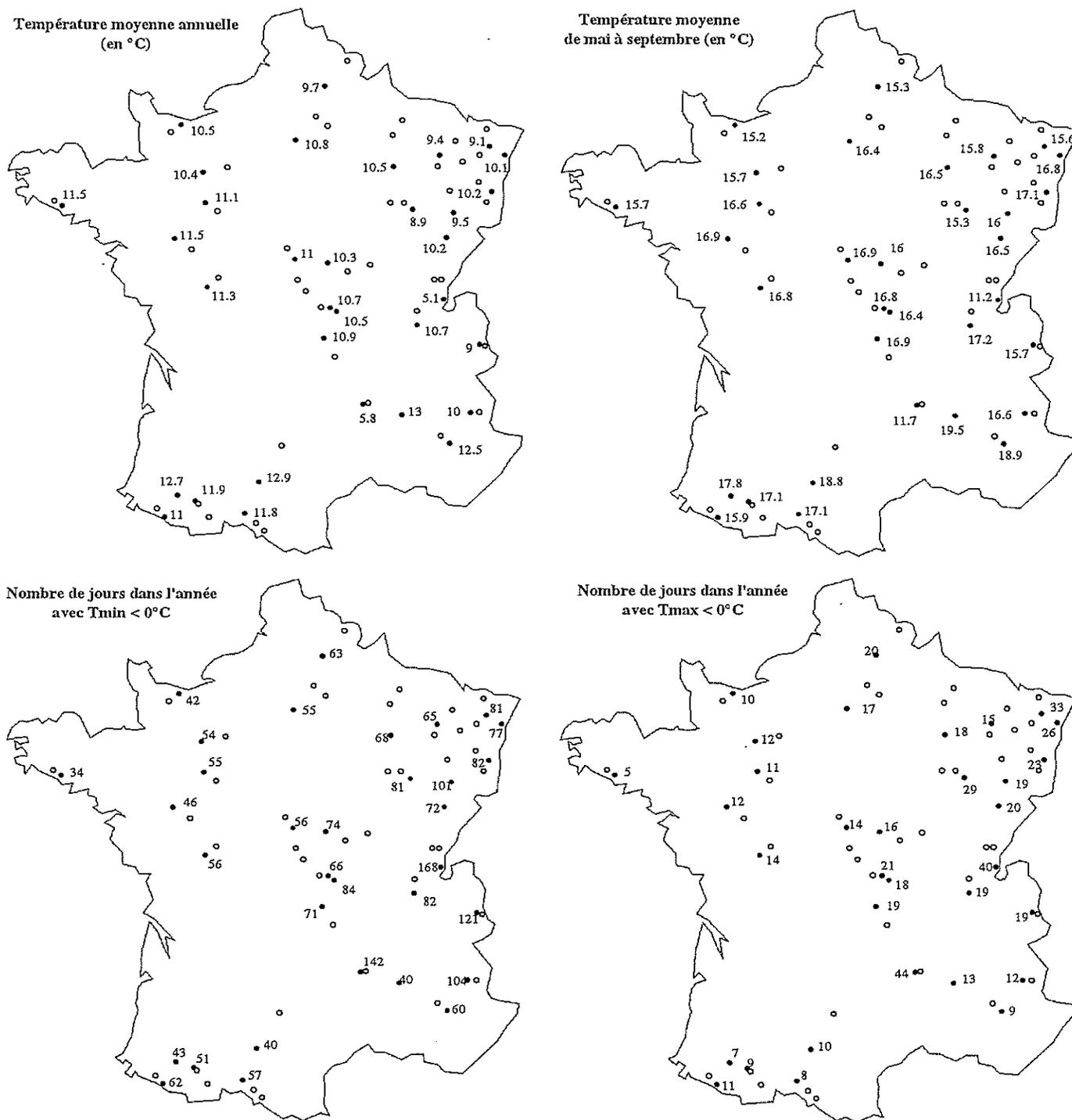


Figure 9. Conditions thermiques moyennes pour les 41 sites d'étude (ronds blancs). Les moyennes des différents paramètres ont été calculées à partir des séries climatiques journalières des 33 postes météorologiques de référence (ronds noirs) et sur la période 1961-1990 (dans la grande majorité des cas). La liste des postes météorologiques rattachés à chaque site est donnée dans le tableau 2.

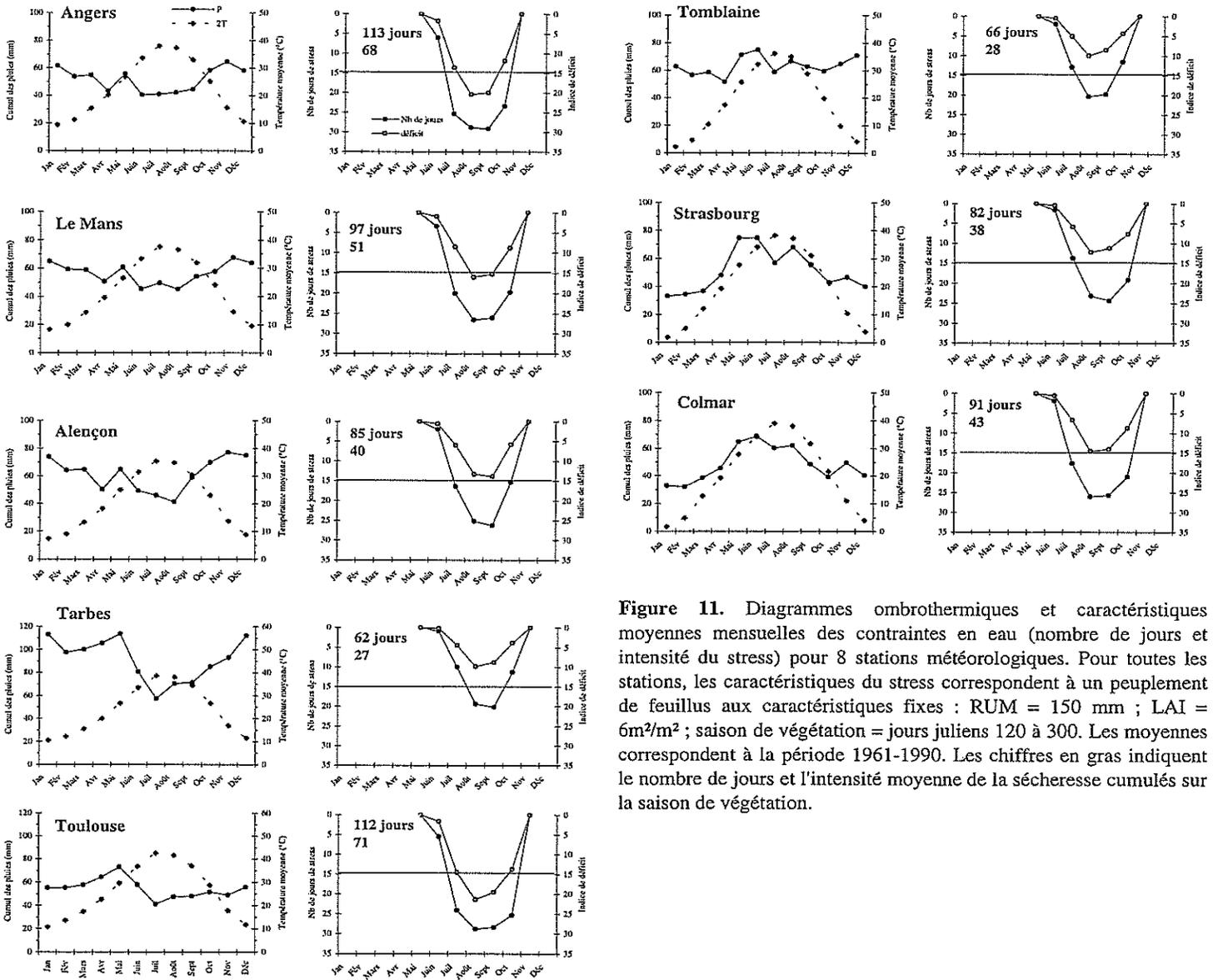


Figure 11. Diagrammes ombrothermiques et caractéristiques moyennes mensuelles des contraintes en eau (nombre de jours et intensité du stress) pour 8 stations météorologiques. Pour toutes les stations, les caractéristiques du stress correspondent à un peuplement de feuillus aux caractéristiques fixes : RUM = 150 mm ; LAI = 6m²/m² ; saison de végétation = jours juliens 120 à 300. Les moyennes correspondent à la période 1961-1990. Les chiffres en gras indiquent le nombre de jours et l'intensité moyenne de la sécheresse cumulés sur la saison de végétation.

7.2 Analyse par espèce

7.2.1 Les placettes de chênes

Le cumul annuel moyen des pluies varie de 614 mm pour la placette CHP 49 à 1216 mm pour la placette CHS 01 (Figure 12). La température moyenne annuelle varie de 9.1 °C (CHS 57b) à 12.9 °C pour la placette CHS 81. La fréquence des années présentant un déficit de réserve varie de 48 à 100% (Tableau 20). Le nombre moyen de jours de déficit varie de 48 à 120 ce qui correspond à une fréquence annuelle de jours de stress comprise entre 23 et 58%. En moyenne, le déficit de réserve varie de 14 (CHP 65) à 66 (CHS 86).

La répartition des placettes dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des déficits annuels de réserve en eau (période 1961-1990) permet de discerner 5 groupes différents (Figure 12). 13 des 15 placettes ayant été échantillonnées dans la partie nord de la France, la variabilité exprime surtout un gradient ouest-est. Ce gradient apparaît fortement lié aux années très sèches 1962, 1964, 1976, 1989, 1990 ; années qui contribuent le plus à l'explication de la répartition des placettes le long de l'axe 1 qui explique plus de 65% de la variance totale.

- **Groupe 1 (placettes de l'Ouest) : CHP 49, CHS 72 et CHS 86**
 Pour ces placettes, les cumuls annuel des précipitations et pendant la saison varient de 600-700 mm et 200-300 mm. Les températures moyennes annuelle et pour la saison de végétation sont comprises entre 11-11.5°C et 16.5-17°C. Les précipitations sont assez régulièrement réparties sur l'année avec cependant des pluies moins abondantes en été (40-50 mm) et des températures estivales assez élevées (19°C en juillet et août). Les sécheresses estivales très sont fréquentes (plus de 95% des années présentent des déficits en eau) et marquées. Pendant la saison de végétation, 60% des jours sont déficitaires (plus de 2.5 mois) avec un déficit moyen de près de 60.
- **Groupe 2 (placettes du « Centre ») : CHS 03, CHS 18, CHP 18, CHS 51, CHS 58 et CHS 61**
 Pour ces placettes, les cumuls annuel des précipitations et pendant la saison varient de 700-900 mm et 250-350 mm. Les températures moyennes annuelle et pour la saison de végétation sont comprises entre 10.5-11°C et 16-17°C. Les précipitations sont assez régulièrement réparties sur l'année (60-80 mm) avec un pic au printemps (70-90 mm en Mai). Les températures estivales sont comprises entre 17 et 19°C. Les sécheresses sont très fréquentes (plus de 90% des années présentent des déficits en eau). Pendant la saison de végétation, 45% des jours sont déficitaires (2 à 2.5 mois) avec un déficit moyen de près de 40.
- **Groupe 3 (placettes du « Nord-Est ») : CHS 01, CHS 57a, CHS 57b et CHP 59**
 Pour ces placettes, les cumuls annuel des précipitations et pendant la saison sont supérieurs à 750 mm et 350 mm. Les températures moyennes annuelle et pour la saison de végétation sont comprises entre 9-10.5°C et 15-17°C. Les précipitations sont assez régulièrement réparties sur

l'année (60-90 mm) avec un pic au printemps. Les températures estivales sont comprises entre 17 et 18°C. Les sécheresses sont fréquentes (70% des années présentent des déficits en eau) mais, pendant la saison de végétation, seuls 31% des jours sont déficitaires (1.5 à 2 mois) avec un déficit moyen faible de 20.

- **Groupe 4 (placettes du « Sud ») : CHP 65 et CHS 81**

- * Pour la placette CHP 65, le régime pluviométrique varie très fortement pendant l'année avec une très nette diminution des pluies en été ; le niveau restant néanmoins élevé (100 mm mensuels pour les mois d'hiver et 60-70 mm pour la période estivale) . Seule une année sur deux présente des déficits en eau. Pour ces années, la sécheresse dure entre 1 et 1.5 mois avec une intensité de l'ordre de 15.

- * Pour la placette CHS 81, les pluies sont maximales en mai (70 mm) et diminuent fortement par la suite (40 à 50 mm). Toute les années sont déficitaires avec une période de stress qui dépasse 2.5 mois et un déficit moyen supérieur à 55.

La variabilité climatique locale permet de discriminer 5 situations différentes pour les 15 peuplements de chênes

D'Ouest et Est, la fréquence annuelle des jours de stress diminue de moitié (60% contre 30%) avec une intensité moyenne du déficit réduite de plus de 65% (60 contre 20)

Les deux peuplements du Sud de la France s'individualisent nettement entre eux avec des durées et des niveaux de contraintes radicalement différents

7.2.2 Les placettes de hêtre

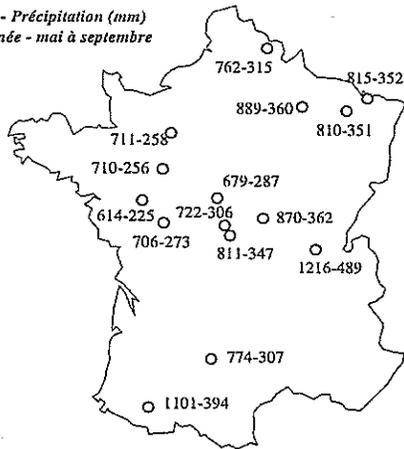
Le cumul annuel moyen des pluies varie de 649 mm pour la placette HET 60 à 1610 mm pour la placette HET 09 (Figure 13). La température moyenne annuelle varie de 9.4 °C (HET 54a et b) à 12.7 °C pour la placette HET 64. La fréquence des années présentant un déficit de réserve varie de 65 à 100% (Tableau 20). Le nombre moyen de jours de déficit varie de 39 à 130 ce qui correspond à une fréquence annuelle de jours de stress comprise entre 21 et 68%. En moyenne, le déficit de réserve varie de 15 (HET 64) à 86 (HET 04).

La répartition des placettes dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des déficits annuels de réserve en eau (période 1961-1990) permet de discerner différents groupes (Figure 13). Globalement, le plan factoriel sépare les sites du Nord de la France des placettes du Sud. Comme pour les placettes de chênes, les années sèches 1962, 1964, 1976, 1989, 1990 contribuent le plus à l'explication de la répartition des placettes dans le plan factoriel.

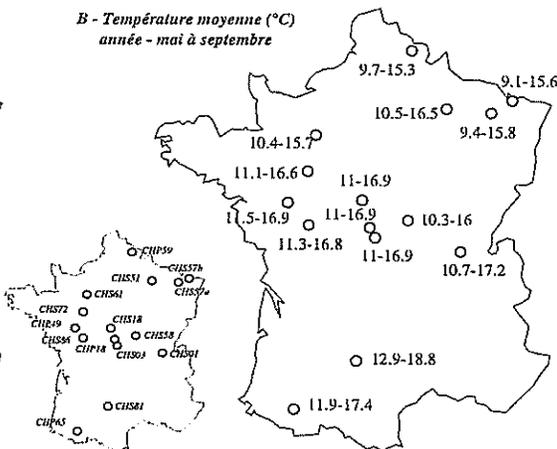
Placette	Période	Longueur de la saison de vég.	Nbre d'année			Nbre de jours de déficit hydrique				Indice de déficit hydrique		
			sans déficit	avec déficit	Fréq.	min	moy	max	Fréq.	min	moy	max
CHP 18	1950-1997	185	6	42	88	1	65	129	0,35	0,6	24,2	68,3
CHP 49	1950-1997	185	0	48	100	28	101	140	0,55	5,5	57,8	107,4
CHP 59	1949-1997	180	24	25	51	3	51	123	0,28	0,1	16,7	71,2
CHP 65	1956-1997	190	22	20	48	3	44	91	0,23	0,1	13,9	44,8
CHS 01	1950-1997	180	16	32	67	1	47	115	0,26	0,1	18,1	66,1
CHS 03	1952-1997	185	4	42	91	2	65	122	0,35	0,1	26,8	71,9
CHS 18	1950-1997	185	1	47	98	46	101	133	0,55	6,7	55,5	102
CHS 51	1962-1997	180	0	36	100	22	88	140	0,49	12,5	48,5	90,4
CHS 57a	1950-1997	180	12	36	75	2	52	131	0,29	0,2	15,3	66,8
CHS 57b	1950-1997	180	6	42	88	1	62	134	0,34	0,1	28	80,2
CHS 58	1952-1997	185	13	33	72	1	62	118	0,34	0,1	23,6	64
CHS 61	1949-1997	185	2	47	96	11	77	135	0,42	1,4	34,2	92,9
CHS 72	1949-1997	185	4	45	92	13	74	131	0,40	0,8	31,6	94,8
CHS 81	1949-1997	190	0	49	100	51	98	138	0,52	15,1	55	96,7
CHS 86	1949-1997	185	0	49	100	1	107	139	0,58	7	64,8	99,4
EPC 39a	1949-1997	365	12	37	76	1	33	124	0,09	0,1	18,7	78,1
EPC 39b	1949-1997	365	24	25	51	1	33	106	0,09	0,8	13,9	51,7
EPC 71	1952-1997	365	11	35	76	2	55	130	0,15	0,1	23,7	72,2
EPC 73	1960-1997	365	0	38	100	8	94	180	0,26	0,6	43,9	105,8
EPC 88	1963-1997	365	0	35	100	4	68	141	0,19	0,2	30	52,2
HET 02	1949-1997	180	14	35	71	2	66	124	0,37	0,6	25,3	87,1
HET 03	1950-1997	185	1	47	98	39	90	137	0,49	7,4	44,5	84,4
HET 04	1968-1997	190	0	30	100	63	118	152	0,62	31,9	80,5	122,8
HET 09	1956-1997	190	12	30	71	2	39	88	0,21	0,1	15,5	54,8
HET 14	1952-1997	185	13	33	72	3	45	108	0,24	0,1	17,9	66,1
HET 21	1956-1997	180	0	42	100	30	87	141	0,48	4,9	48,2	96,1
HET 29	1968-1997	185	1	32	97	5	78	127	0,42	0,3	36,3	92,1
HET 52	1956-1997	180	0	42	100	21	86	142	0,48	2,8	48,6	97,6
HET 54a	1950-1997	180	9	39	81	11	74	136	0,41	1	28,1	84,9
HET 54b	1950-1997	180	0	48	100	13	88	139	0,49	4,2	46,8	86
HET 55	1962-1997	180	0	36	100	4	83	143	0,46	0,4	40,3	92,5
HET 60	1949-1997	180	0	49	100	8	107	146	0,59	1,2	63,2	115,2
HET 64	1955-1997	190	15	28	65	3	38	92	0,20	0,4	13,7	56,3
HET 65	1956-1997	190	11	31	74	3	46	89	0,24	0,1	15,8	49,2
HET 88	1956-1997	180	10	32	76	2	57	125	0,32	0,1	23,6	65,4
SP 05	1953-1997	365	1	44	98	10	99	173	0,27	1,2	48,8	111,1
SP 07	1949-1997	365	2	47	96	12	79	210	0,22	2,5	43	140,9
SP 09	1956-1997	365	1	41	98	1	39	108	0,11	0,1	17,7	64,8
SP 57	1950-1997	365	4	44	92	2	69	155	0,19	0,1	29,9	94
SP 63	1949-1997	365	2	46	96	33	115	227	0,32	14,2	56,5	124,2
SP 68	1963-1997	365	0	35	100	16	64	141	0,18	4,3	31,9	86,6

Tableau 20. Caractéristiques des déficits de réserve (nombre d'années, de jours et niveau des stress) par peuplement. Le déficit est calculé par différence entre la réserve critique (quand REW =0.4) et la réserve du sol actuelle sur la saison de croissance des arbres. Pour le nombre de jours de stress, la fréquence est le rapport entre le nombre moyen de jours avec déficit et la longueur de la saison de végétation. Pour la placette CHP18, environ 40% des jours de la saison de croissance sont déficitaires au niveau hydrique et le déficit moyen de réserve sur cette période est de l'ordre de 24.

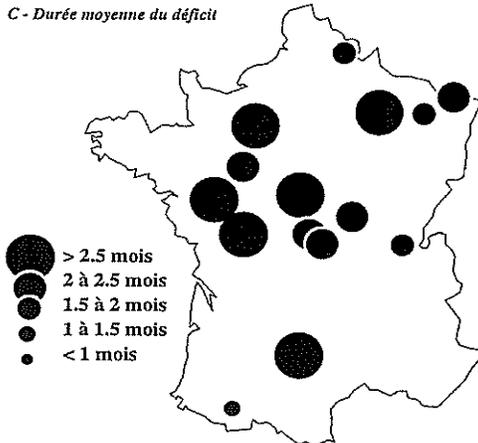
A - Précipitation (mm)
année - mai à septembre



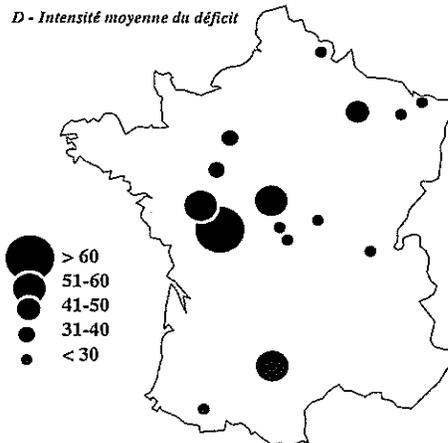
B - Température moyenne (°C)
année - mai à septembre



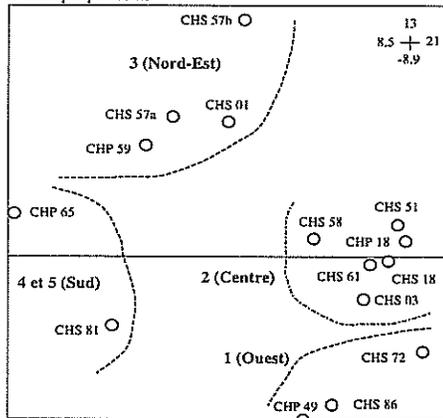
C - Durée moyenne du déficit



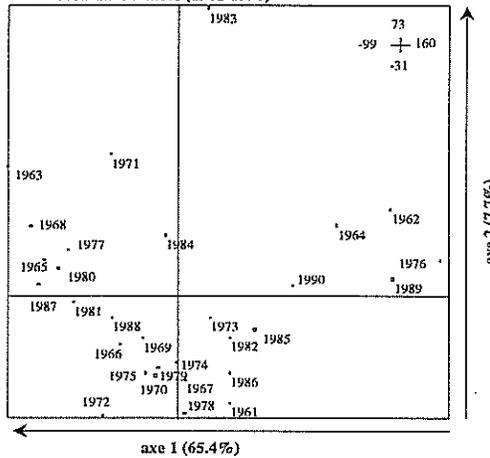
D - Intensité moyenne du déficit



E- ACP 1x2: peuplements



F- ACP 1x2: années (1961-1990)



G - Regroupement des peuplements (selon l'ACP)

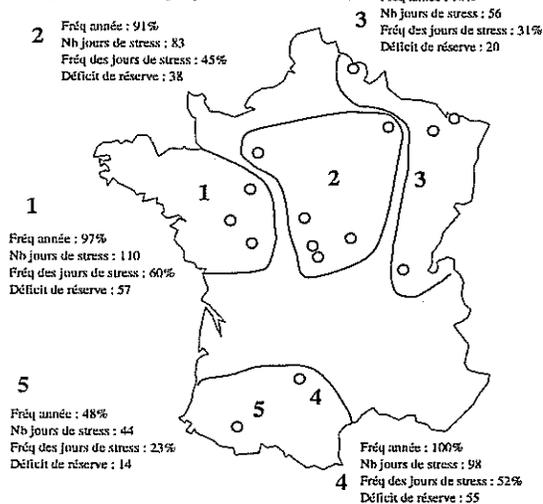


Figure 12. Conditions climatiques moyennes et caractéristiques du déficit de réserve des 15 peuplements de chênes. Pour les précipitations et les températures (A et B), les moyennes correspondent à la période 1961-1990. Pour le bilan hydrique (C et D), les valeurs cartographiées sont les moyennes calculées sur 30 à 49 ans selon le peuplement. Les graphes E et F donnent la répartition des 15 placettes et des 30 années (période 1961-1990) dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP sur matrice de covariance réalisée à partir des indices de déficit annuels de chaque peuplement. Les caractéristiques moyennes de chaque groupe sont données dans la figure G. La fréquence "année" est le rapport entre le nombre total d'années disponibles et le nombre d'années présentant un indice de déficit non nul. La fréquence des jours de stress est le rapport entre le nombre moyen de jours avec déficit et la longueur de la saison de végétation. La liste des postes météorologiques rattachés à chaque site est donnée dans le tableau 2. Les caractéristiques des peuplements pour le calcul des contraintes en eau sont présentées dans le tableau 11.

- **Groupe 1 : HET 02, HET 14, HET 54a et HET 60**

Bien que soumis aux mêmes conditions climatiques (cumuls annuel et pendant la saison inférieurs à 700 et 300 mm, pluies régulières sur l'année (50-60 mm) et températures estivales de l'ordre de 18.5°C), les peuplements HET02 et HET60 présentent un comportement radicalement différents. Ce comportement trouve en grande partie son explication par les différences de capacité de stockage en eau du sol (tableau ci-dessous).

	Age moyen	Type de Sol	RUM (mm)	LAI (m ² /m ²)	Hauteur (m)	Diamètre (cm)
HET02	54 ans	Pseudogley	274	10.2	29.7	42
HET60	62 ans	Sol brun calcique hydromorphe	110	9.2	26.8	34

La diminution de 60% de la RUM se traduit par une augmentation de plus de 55% du nombre de jours de stress pendant la saison (68 jours pour HET02 et 106 pour HET60) et de plus de 110% du niveau moyen de déficit de réserve (29 contre 63).

Pour la placette HET14, environ 70% des années présentent des déficits en eau mais, pendant la saison de végétation, seuls 24% des jours sont déficitaires (1 à 1.5 mois) avec un déficit moyen faible de 19.

- **Groupe 2 : HET 21, HET 29, HET 54b, HET 52, HET 55 et HET 88**

Il s'agit des 5 des 6 placettes du nord-est de la France et de la placette de l'extrême ouest. Les sécheresses sont très fréquentes (plus de 95% des années présentent des déficits en eau). Pendant la saison de végétation, plus de 45% des jours sont déficitaires (2.5 mois) avec un déficit moyen de près de plus de 40.

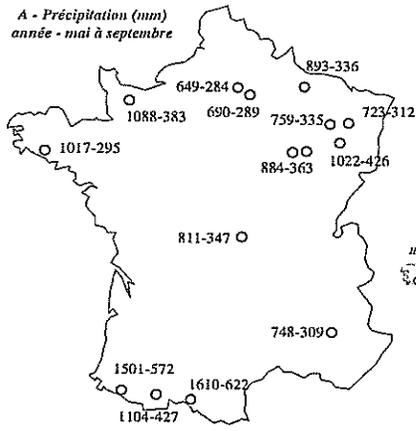
- **Groupe 3 : HET 09, HET 64 et HET 65**

Pour ces placettes du Sud, les cumuls annuel des précipitations et pendant la saison sont supérieurs à 1000 mm et 400 mm. Les températures moyennes annuelle et pour la saison de végétation sont comprises entre 12-13°C et 17-18°C. Les précipitations sont élevées toute l'année (généralement supérieures à 100 mm par mois) et les températures estivales de l'ordre de 19°C. Environ 70% des années présentent des déficits en eau mais, pendant la saison de végétation, seuls 22% des jours sont déficitaires (1 à 1.5 mois) avec un déficit moyen faible de 15.

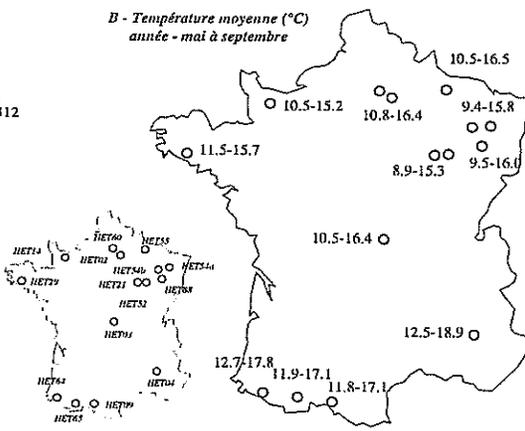
- **« Groupe » 4 : HET 03**

Pour la placette HET 03, le régime pluviométrique varie de 40 à 60 mm par mois avec néanmoins un pic au printemps (70-90 mm). La température estivale est de l'ordre de 19°C. Presque toutes les années sont déficitaires et, pendant la saison, près de 50% des jours présentent un déficit avec un déficit moyen annuel élevé de 45.

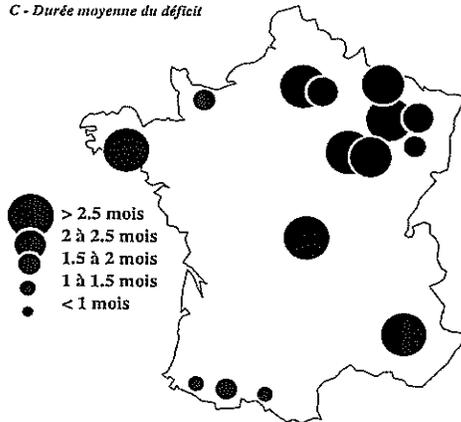
A - Précipitation (mm)
année - mai à septembre



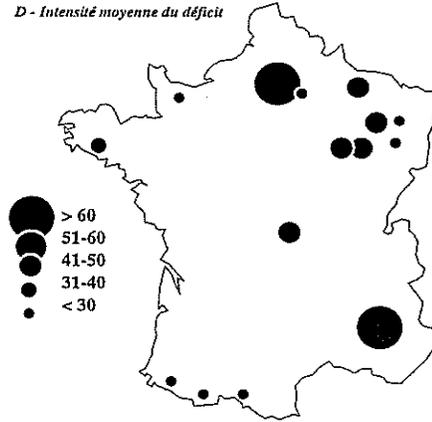
B - Température moyenne (°C)
année - mai à septembre



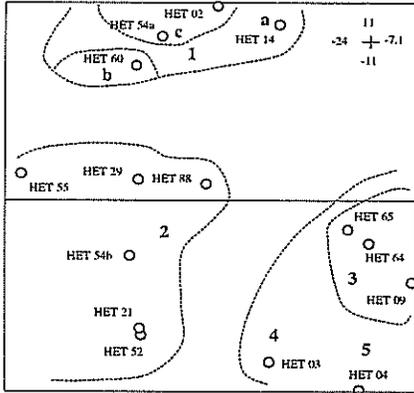
C - Durée moyenne du déficit



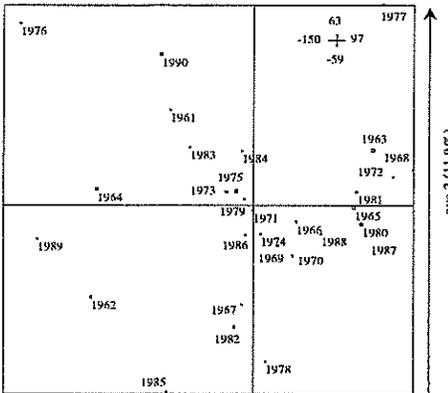
D - Intensité moyenne du déficit



E- ACP 1x2: peuplements



F- ACP 1x2: années (1961-1990)



G - Regroupement des peuplements (selon l'ACP)

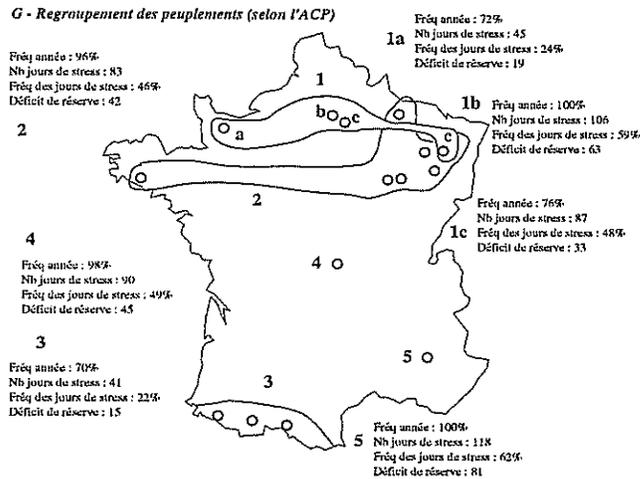


Figure 13. Conditions climatiques moyennes et caractéristiques du déficit de réserve des 15 peuplements de hêtre. Pour les précipitations et les températures (A et B), les moyennes correspondent à la période 1961-1990. Pour le bilan hydrique (C et D), les valeurs cartographiées sont les moyennes calculées sur 30 à 49 ans selon le peuplement. Les graphes E et F donnent la répartition des 15 placettes et des 30 années (période 1961-1990) dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP sur matrice de covariance réalisée à partir des indices de déficit annuels de chaque peuplement. Les caractéristiques moyennes de chaque groupe sont données dans la figure G. La fréquence "année" est le rapport entre le nombre total d'années disponibles et le nombre d'années présentant un indice de déficit non nul. La fréquence des jours de stress est le rapport entre le nombre moyen de jours avec déficit et la longueur de la saison de végétation. La liste des postes météorologiques rattachés à chaque site est donnée dans le tableau 2. Les caractéristiques des peuplements pour le calcul des contraintes en eau sont présentées dans le tableau 11.

- « Groupe » 5 : HET 04

Pour la placette HET 04, le régime pluviométrique varie très fortement pendant l'année avec une très nette diminution des pluies en été. Les températures estivales sont très élevées (22°C) avec une période de sécheresse de 4 mois environ. Toutes les années sont déficitaires et, pendant la saison, plus de 60% des jours présentent un déficit avec un déficit moyen annuel très élevé de 81.

La variabilité climatique locale permet de discriminer 5 situations différentes pour les 15 peuplements de hêtre

Les trois peuplements du Sud de la France s'individualisent nettement avec des durées et des intensités de sécheresse faibles

Pour les placettes de l'est, près de 50% des jours sont déficitaires pendant la saison de végétation avec un déficit moyen de l'ordre de 40 mm.

L'analyse des placettes HET02 et HET60, soumises aux mêmes conditions climatiques locales, montre qu'une diminution de 60% de la capacité de stockage en eau du sol se traduit par une augmentation de plus de 55% du nombre de jours de stress pendant la saison et de plus de 110% du niveau moyen de déficit de réserve.

7.2.3 Les placettes de sapin pectiné et d'épicéa commun

Les 6 placettes de sapin pectiné ont été échantillonnées dans la grande partie est de la France (**Figure 14**). Deux placettes correspondent au nord-est (SP 57 et SP 68) et 4 à la zone sud-est (SP 05, 07, 09 et SP 63). Le cumul annuel moyen des pluies varie de 790 mm pour la placette SP 63 à 1860 mm pour la placette SP68. Les placettes d'épicéa sont localisées essentiellement au « centre de la zone est » (**Figure 14**). Le cumul moyen varie de 971 mm pour EPC 73 à plus de 1900 mm pour EPC 39b. Toutes les placettes de résineux bénéficient de précipitations abondantes sur l'année avec des totaux pendant la saison de végétation nettement supérieurs à 400 mm dans la grande majorité des cas. Au niveau thermique, les placettes EPC 39a et 39b et la placette SP 63 se distinguent par des températures annuelle et sur la saison très faibles (respectivement inférieures à 6° et 12°C). A l'opposé, la placette SP 09 bénéficie de températures plus clémentes (12°C et 17°C sur l'année et la saison de végétation). Les autres peuplements sont soumis à des conditions intermédiaires : température annuelle entre 10 et 11°C et entre 16 et 17°C pour la période de mai à septembre.

Pour les placettes d'épicéa commun, la fréquence des années présentant un déficit de réserve varie de 51 à 100% (**Tableau 20**). Le nombre moyen de jours de déficit varie de 33 à 94 ce qui correspond à une fréquence annuelle de jours de stress entre 9 et 26% (moyenne : 16%). En moyenne, le déficit de réserve est faible et varie de 14 (EPC 39b) à 44 (EPC 73) (moyenne : 26).

Pour les placettes de sapin pectiné, la fréquence des années présentant un déficit de réserve varie de 92 à 100% (**Tableau 20**). Le nombre moyen de jours de déficit varie de 39 à 115 ce qui correspond à une fréquence annuelle de jours de stress entre 11 et 32% (moyenne : 21%). En moyenne, le déficit de réserve varie de 18 (SP

09) à 57 (SP 63) (moyenne : 38).

- **Groupe 1 : EPC 88, SP 57 et SP 68**

Il s'agit des placettes du nord-est de la France. Les sécheresses sont très fréquentes (plus de 95% des années présentent des déficits en eau). Sur l'année, environ 20% des jours sont déficitaires (2 mois) avec un déficit moyen de l'ordre de 30.

- **Groupe 2 : EPC 39a et 39b**

Il s'agit des deux placettes du Jura. Les sécheresses sont peu fréquentes et, sur l'année, à peine 10% des jours sont déficitaires (1 mois) avec un déficit moyen faible de l'ordre de 15.

- **« Groupe 3 » : EPC 71**

Pour ce peuplement, les sécheresses sont peu fréquentes et, sur l'année, 15% des jours sont déficitaires (1.5 mois) avec un déficit moyen de l'ordre de 24.

- **Groupe 4 : SP 05, SP 07, SP 63 et EPC 73**

Pour ces peuplements, les sécheresses sont très fréquentes (plus de 95% des années présentent des déficits en eau). Sur l'année, près de 30% des jours sont déficitaires (2.5 à 3 mois) avec un déficit moyen de l'ordre de 50.

- **« Groupe 5 » : SP 09**

Pour ce peuplement du Sud de la France, les sécheresses sont très fréquentes (plus de 95% des années présentent des déficits en eau) mais, sur l'année, seulement 11% des jours sont déficitaires (1 à 1.5 mois) avec un déficit moyen faible de l'ordre de 20.

Les 11 placettes de résineux, toutes échantillonnées dans la partie est de la France, bénéficient de précipitations abondantes toute l'année avec des cumuls saisonniers souvent très supérieurs à 400 mm

Sur l'année, la fréquence des jours de stress est généralement faible (de 10 à 30%) avec des sécheresses peu intenses (déficits entre 20 et 30).

7.3 Conclusions

Les conditions moyennes de stress, notamment en ce qui concerne l'intensité du déficit annuel de réserve, sont cohérentes avec l'analyse de la variabilité climatique locale. Le gradient climatique ouest-est qui se caractérise par une augmentation 1) des précipitations pendant la saison de végétation de 30 à 40% (250-300 mm à 350-400 mm), 2) du nombre de jours de pluie de 10 à 15 jours (50-55 jours à 60-65 jours) et par une diminution de la température moyenne annuelle de 1.5°C à 2°C (10.5-11.5°C à 10.5-9°C) s'exprime également à

travers les niveaux de contraintes en eau qui, pour un peuplement feuillus et une réserve en eau du sol de 150 mm, diminuent de 50-60 pour l'Ouest à 30-50 et 20-40 pour le Centre et l'Est (moyenne 1961-1990) (Figure 10).

Pour 31 des 41 peuplements étudiés, 75% des années présentent un déficit de réserve en eau (33 à 49 années disponibles par placette). La fréquence moyenne annuelle des jours déficitaires varie de 9 à 68% avec un déficit moyen de 14 à 86 (valeurs extrêmes : 0.1 et 141).

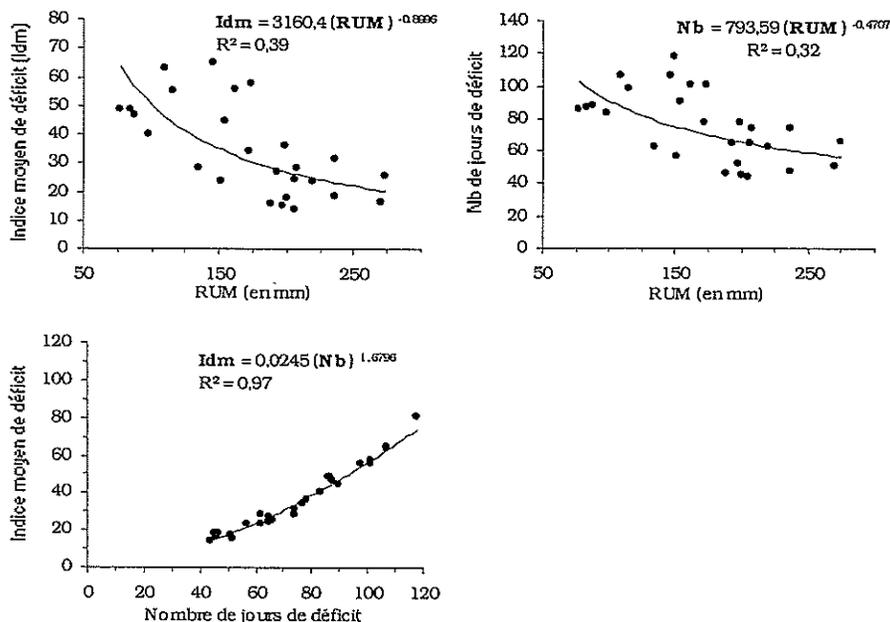
Les peuplements de feuillus présentent des déficits de réserve (fréquence et niveau de stress) plus marqués que les placettes de résineux.

Pour les chênes, principalement échantillonnés dans la partie Nord de la France, la fréquence annuelle des jours de stress diminue de moitié (60% contre 30%) quand on passe de l'ouest à l'est de la France avec une intensité moyenne du déficit réduite de plus de 65% (60 contre 20).

Pour les hêtres, les peuplements du Sud présentent les niveaux de contraintes les plus faibles. Pour les autres peuplements, les intensités de stress sont plus importantes mais, contrairement aux chênes, il n'apparaît pas nettement de gradient ouest-est. Pour les placettes de l'est, près de 50% des jours sont déficitaires pendant la saison de végétation avec un déficit moyen de l'ordre de 40. L'analyse des placettes HET02 et HET60, soumises aux mêmes conditions climatiques locales, montre qu'une diminution de 60% de la capacité de stockage en eau du sol se traduit par une augmentation de plus de 55% du nombre de jours de stress pendant la saison et de plus de 110% du niveau moyen de déficit de réserve.

Les placettes de résineux bénéficiant de précipitations abondantes toute l'année, la fréquence annuelle des jours de stress est faible (10 à 30%) avec des sécheresses peu intenses (20-30).

L'indice moyen de déficit et le nombre de jours de stress diminuent selon la réserve utile en eau du sol. Pour les feuillus (chênes et hêtre), le doublement de la réserve utile en eau du sol (100 à 200 mm) diminue de 40 à 50% l'intensité du stress et de 30% le nombre de jours de déficit (figure ci-dessous).



8 Dérives climatiques à moyen terme

8.1 Analyse des paramètres élémentaires

Pour chaque station et chaque mois, les dérives ont été étudiées, dans un premier temps, à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible : 1968 à 1997 pour la plus courte et 1949-1997 pour les plus longues. A partir des données journalières, les paramètres étudiés ont été :

- Le cumul des précipitations mensuelle, annuelle et de mai à septembre pour 63 stations ;
- La température minimale (Tmin), maximale (Tmax) et l'amplitude thermique (Tmax-Tmin) mensuelle, annuelle et de mai à septembre pour 32 stations. Pour la température moyenne (Tmoy), l'analyse a porté sur 33 stations (pas de données de Tmin et Tmax à Tomblaine mais une seule donnée de Tmoy) ;
- Le nombre et la fréquence des jours de gelées (Tmin < 0°C) en mai et sur l'année pour 32 stations ;
- La durée mensuelle cumulée d'insolation (en heures) ou de rayonnement global (W/m²) et de l'ETP (en mm selon la formule de Penman) pour les 28 stations « ETP » de référence.

Pour les paramètres variant significativement une analyse des rangs par période a ensuite été effectuée. Pour chaque station, 9 périodes de 5 à 7 ans ont été considérées : 1949-1955, 1956-1960, 1961-1965, 1966-1970, 1971-1975, 1976-1980, 1981-1985, 1986-1990 et 1991-1997. Pour chaque paramètre retenu, la moyenne a été calculée par période. Les périodes ont ensuite été triées par ordre décroissant selon la valeur moyenne du paramètre. Pour les températures, le rang 1 a été attribué à la période la plus chaude et le rang 9 à la période la plus froide. Pour les amplitudes thermiques, le rang 1 correspond à l'amplitude la plus forte et le rang 9 à la plus faible. Dans un dernier temps, le rang moyen de chaque période a été calculé en prenant en compte l'ensemble des stations disponibles.

8.1.1 Les précipitations

Il n'apparaît pas de tendance générale très marquée de variation du régime pluviométrique depuis les dernières décennies bien qu'une diminution des précipitations au mois août soit observée dans 35% des stations analysées (**Tableau 21**). Pour la période 1950-1997, la diminution a été en moyenne de 1 mm/an ce qui correspond à une variation relative de -45% (-34% à -64%) (**Figure 15**). Des variations de précipitations en mai sont observées dans 18 stations, et environ 20% des stations présentent une augmentation de la pluviométrie annuelle.

8.1.2 Les températures

Pour les 32 stations analysées, les températures minimales ont augmenté significativement depuis les dernières années (**Tableau 22**). La tendance est particulièrement marquée en fin de printemps (mai et juin) et en été avec une augmentation des températures minimales du mois d'août observable dans 28 stations sur 32 (88% des cas). La tendance apparaît fortement au niveau annuel (88% des cas) et dans une moindre mesure sur la saison de végétation (69% des cas). Les températures maximales ont peu varié. Au niveau mensuel, seul le mois d'août se distingue nettement avec une augmentation significative pour 30 des 32 stations analysées. Au niveau annuel, la tendance apparaît dans 18 des 32 stations.

L'augmentation des températures moyennes annuelle et pendant la saison de végétation est observable dans respectivement 82 et 64% des cas. Cette augmentation est principalement due à un réchauffement des mois d'été (juillet et surtout août) (**Tableau 23**). Au niveau annuel, une augmentation de l'amplitude thermique est observable dans 8 stations et une diminution dans 10 stations. Pour le mois d'août, l'amplitude augmente dans 12 stations et diminue dans 1.

Selon les pentes des ajustements linéaires, les augmentations annuelles de température minimale pour le mois d'août varient de 0.069 °C/an pour la station d'altitude de Lamoura (1120 m ; période 1962-1997) à 0.023 °C/an pour la station de Vichy (249 m ; période 1949-1997) (**Figure 16**). Pour les 12 stations disposant d'au moins 48 années de données et présentant une dérive positive significative, l'augmentation varie de 0.023°C/an pour Vichy à 0.055°C/an pour Angers. Pour ces 12 stations, la dérive de la T_{min} du mois d'août a été en moyenne de 0.037°C/an soit une température minimale actuellement supérieure de 1.9°C au niveau de 1950. Pour la période estivale (juin-juillet-août), l'augmentation varie de 0.9 à 2.2°C avec une valeur moyenne de 1.4°C (**Tableau 23b et Figure 16b**). Au niveau annuel, la tendance varie de 0.013°C/an (Phalsbourg et Bourges) à 0.055°C/an pour Lamoura (**Figure 16**). Pour les 10 séries les plus longues présentant une dérive positive, la T_{min} annuelle a augmenté en moyenne de 0.023°C/an (de 0.013°C/an à 0.032°C/an) soit une augmentation de 1.1°C par rapport au niveau de 1950 (**Figure 16b et Tableau 23b**).

Pour les températures moyennes du mois d'août, l'augmentation varie de 0.022°C/an (Caen) à 0.097°C/an (Lamoura) (**Figure 16**). Pour les 15 plus longues séries présentant une dérive significative, la température moyenne du mois d'août a augmenté en moyenne de 2.1°C (0.042°C/an) depuis 50 ans (0.029 à 0.056°C/an). Pour la période estivale (juin-juillet-août), l'augmentation varie de 1.0 à 2.1°C avec une valeur moyenne de 1.5°C (**Tableau 23b et Figure 16c**). Sur l'année, l'augmentation est comprise entre 0.015°C/an (Alençon) à 0.064°C/an (Lamoura). Pour les plus longues séries, la dérive de la température moyenne annuelle a été en moyenne de 1.0°C (0.019°C/an) sur les 50 dernières années (0.015 à 0.025°C/an).

Pour 29 des 33 stations, la période récente 1991-1997 a été la période la plus chaude depuis 1949 (**Tableau 24**). Pour la T_{min} du mois d'août, elle correspond aux années les plus chaudes pour toutes les stations. Globalement, les rangs moyens des 3 périodes les plus récentes (1981-85, 1986-90, 1991-1997) sont non seulement inférieurs aux rangs des autres périodes mais évoluent dans un sens décroissant, c'est-à-dire que les 3 périodes successives sont de plus en plus chaudes (**Figure 17**).

Station	Période	Alt. (m)	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année	Mai-Sept.
Alençon	1949	140														
Ambérieu	1950	250					+			-						
Angers	1949	57		(+)												
Aulus-les-Bains	1953	733														
Besançon	1949	307					+			-						
Betz	1956	100														+
Bonneuil-en-France	1949	51			+											
Bourges	1950	61														
Bourg-St-Maurice	1960	865					+	(+)				(+)				
Bretmy	1949	240														
Buzy	1951	303														
Caen	1952	64														
Château-Chinon	1945	598									(-)	+				(+)
Chaumousey	1935	357					+									
Chevrières	1943	31			+											
Clermont-Ferrand	1949	329														
Culmar	1963	220			(-)							+	(-)			
Cordes-sur-Ciel	1942	175		+												(+)
Dun-sur-Auron	1947	160								(+)						(+)
Ebreuil	1928	310	(+)	+			+								+	+
Embrun	1953	871					+								+	+
Etreux	1933	141			+										(+)	+
Faulquemont	1950	278								(+)						+
Fraize	1950	515			(+)					(+)						+
Isle-et-Bardais	1954	260													(+)	+
Kruth	1954	500										(+)				
La Chapelle-Moulière	1949	121														
Laneuveville-aux-Bois	1958	240						+		(+)	+				+	+
Langres	1956	467														
Le Mans	1949	51														
Les Orres	1953	1445					+									
Les Rousses	1948	1110			+						(-)					
Longue-Jumelles	1950	30									(-)					
Lorient	1965	42														
Luxeuil	1956	271														
Mansigné	1951	73									(-)				(+)	(+)
Marsac-en-Livradois	1944	550					+	(+)				+				+
Montélimar	1949	73			(-)	(+)			+							
Nestier	1948	504														
Neuville-sur-Ain	1946	275														
Nevers	1952	175						+								
Niiting	1950	270							+			(+)			+	+
Poitiers	1949	117														
Quimperlé	1958	40														
Recey-sur-Ource	1921	330														
Renalard	1951	160														
Rolbing	1954	275										(+)				
St Dizier	1962	138														
St Quentin	1949	98							+							
St-Auban	1968	461								(-)						
Ste-Menehould	1950	210														
St-Etienne-de-Ludgares	1951	1035	(+)							(+)						+
St-Girons	1956	411														
St-Laurent-en-Grandvaux	1946	910								(+)						(+)
Strasbourg	1950	150										+				+
Tarbes	1956	360														
Tomblaine	1950	212									(-)					
Toulouse	1949	151														
Uzein	1955	183														
Vandenesse	1955	220														
Varennes-en-Argonne	1960	180											+	+		+
Vichy	1950	249														
Vierzon	1947	98								(-)	(+)					

Nbre de cas (seuil de 5 et 10%) :																
	2	4	8	5	18	2	4	22	1	10	2	8	14	4		
Fréq (n=63 stations) :																
	0,03	0,06	0,13	0,08	0,29	0,03	0,06	0,35	0,02	0,16	0,03	0,13	0,22	0,06		
Nbre de cas (seuil de 5%) :																
	0	3	5	1	10	0	2	19	0	6	1	4	11	3		
Fréq (n=63 stations) :																
	0,00	0,05	0,08	0,02	0,16	0,00	0,03	0,30	0,00	0,10	0,02	0,06	0,17	0,05		



Figure 15. Diminution des précipitations du mois d'août observée pour 22 des 63 stations pluviométriques du réseau national météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR.

Tableau 21. Dérive climatique observée dans les données de précipitation pour les 63 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. Pour chaque mois, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible. Un signe + indique une augmentation des pluies significative au seuil de 5% et le signe - une réduction. Les signes entre parenthèses indiquent des tendances significatives au seuil de 10%. La date indique le début de la période analysée (dernière année : 1997).

Station	Alt. (m)	Période	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année	Mai-Sept.
Accous	495	1952		(+)						+						
Alençon	140	1949					+	+	+	+					+	+
Ambérieu	250	1950					+	+	+	+		+			+	+
Angers	57	1950	(+)		(+)		+	+	+	+		+			+	+
Besançon	307	1949								+					(+)	
Bonneuil-en-France	51	1949			(+)										(+)	
Bourges	61	1950							(+)	+		(+)			+	
Bourg-St-Maurice	865	1960					(+)		+	+				+	+	+
Caen	64	1952	(+)		+		+	+	+	+			(+)		+	+
Chareil-Cintrat	280	1951	+	+	+		+	+	+	+		+	(+)	+	+	+
Clermont-Ferrand	329	1949					(+)	+	+	+		+			+	(+)
Colmar	220	1963					(+)	+	+	+				+	+	+
Danne-et-quatre-vents	377	1950							(+)	+					+	(+)
Embrun	871	1953	+						+	+					+	
Issanlas	1220	1956							+	+				+	+	+
Lamoura	1120	1962	(+)		+		+		+	+				+	+	+
Langres	467	1956							(+)	+				(+)	+	
Le Mans	51	1949	(+)		+		+	+	+	+		(+)			+	+
Lorient	42	1965			+		+	+	+	+					+	+
Luxeuil	271	1956					+	(+)	+	+		(+)		+	+	+
Montélimar	73	1949		(+)	(+)		(+)	(+)	+	+		+	+	(+)	+	+
Nevers	175	1952									(-)					
Pau	183	1955	+	+			+	+	+	+		+	+	(+)	+	+
Poitiers	117	1949				(-)					(-)					
St Auban	461	1968							+	+		(+)			+	+
St Dizier	138	1962			+		(+)	+	+	+				+	+	+
St Girons	411	1956						(+)	+	+			(+)		+	+
St Quentin	98	1949														
Strasbourg	150	1950			(+)		(+)		+	+		+			+	+
Tarbes	360	1956		(+)	(+)		(+)	+	+	+		+	+	+	+	+
Tomblaine	212	1950														
Toulouse	151	1949	+	(+)			+	+	+	+		+	+		+	+
Vichy	249	1950					(+)		+	+		+			(+)	
Nbre de cas (seuil de 5 et 10%):			6	6	13	1	19	13	24	28	3	14	7	11	28	22
Fréq (n=32 stations):			0,19	0,19	0,41	0,03	0,59	0,41	0,75	0,88	0,09	0,44	0,22	0,34	0,88	0,69
Nbre de cas (seuil de 5%):			2	3	7	0	11	10	21	28	1	10	4	8	25	20
Fréq (n=32 stations):			0,06	0,09	0,22	0,00	0,34	0,31	0,66	0,88	0,03	0,31	0,13	0,25	0,78	0,63

Tableau 22. Dérive climatique observée dans les températures minimales moyennes (Tmin) pour les 32 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR (pas de données pour Tomblaine). Pour chaque mois, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible. Un signe + indique une augmentation des températures significative au seuil de 5% et le signe - une réduction. Les signes entre parenthèses indiquent des tendances significatives au seuil de 10%. La fin de la période correspond à l'année 1997.

Station	Alt. (m)	Période	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année	Mai-Sept.
Accous	495	1952		+	+								+	(+)	+	
Alençon	140	1949							(+)	+					+	(+)
Ambérieu	250	1950								+					+	
Angers	57	1950							+	+		+			+	+
Besançon	307	1949								+						
Bonneuil-en-France	51	1949								+						
Bourges	61	1950							(+)	+					(+)	
Bourg-St-Maurice	865	1960	+		+		(+)		+	+				+	+	+
Caen	64	1952			(+)				+	+		+			+	+
Chareil-Cintrat	280	1951		(+)					+	+		+			+	+
Clermont-Ferrand	329	1949								+					(+)	
Colmar	220	1963			(+)					+				(+)	+	+
Danne-et-quatre-vents	377	1950							+	+					+	+
Embrun	871	1953	+						+	+					+	(+)
Issanlas	1220	1956							(+)	+			(+)	+	+	+
Lamoura	1120	1962	+	(+)	+		+		+	+			+	+	+	+
Langres	467	1956							+	+				(+)	+	+
Le Mans	51	1949							(+)	+					+	+
Lorient	42	1965			+		+		(+)	+			(+)		+	+
Luxeuil	271	1956					(+)	(+)	+	+				+	+	+
Montélimar	73	1949								+					+	
Nevers	175	1952				(-)				+						
Pau	183	1955					+		+	+		+	+	(+)	+	+
Poitiers	117	1949				(-)				+						
St Auban	461	1968			+					+					+	(+)
St Dizier	138	1962			+				+	+				+	+	+
St Girons	411	1956							+	+			+	+	+	+
St Quentin	98	1949								(+)	(-)					
Strasbourg	150	1950								+					+	(+)
Tarbes	360	1956					(+)		+	+			+	+	+	+
Tomblaine	212	1950							(+)	+		(+)			+	+
Toulouse	151	1949	(+)	(+)			(+)		(+)	+		(+)	+		+	+
Vichy	249	1950								+						
Nbre de cas (seuil de 5 et 10%):			4	4	8	2	7	1	20	32	1	5	9	11	27	21
Fréq (n=33 stations):			0,12	0,12	0,24	0,06	0,21	0,03	0,61	0,97	0,03	0,15	0,27	0,33	0,82	0,64
Nbre de cas (seuil de 5%):			3	1	6	0	3	0	13	31	0	3	7	7	25	17
Fréq (n=33 stations):			0,09	0,03	0,18	0,00	0,09	0,00	0,39	0,94	0,00	0,09	0,21	0,21	0,76	0,52

Tableau 23. Dérive climatique observée dans les températures moyennes (Tmoy) pour les 33 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. Pour chaque mois, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible. Un signe + indique une augmentation des températures significative au seuil de 5% et le signe - une réduction. Les signes entre parenthèses indiquent des tendances significatives au seuil de 10%. La fin de la période correspond à l'année 1997.

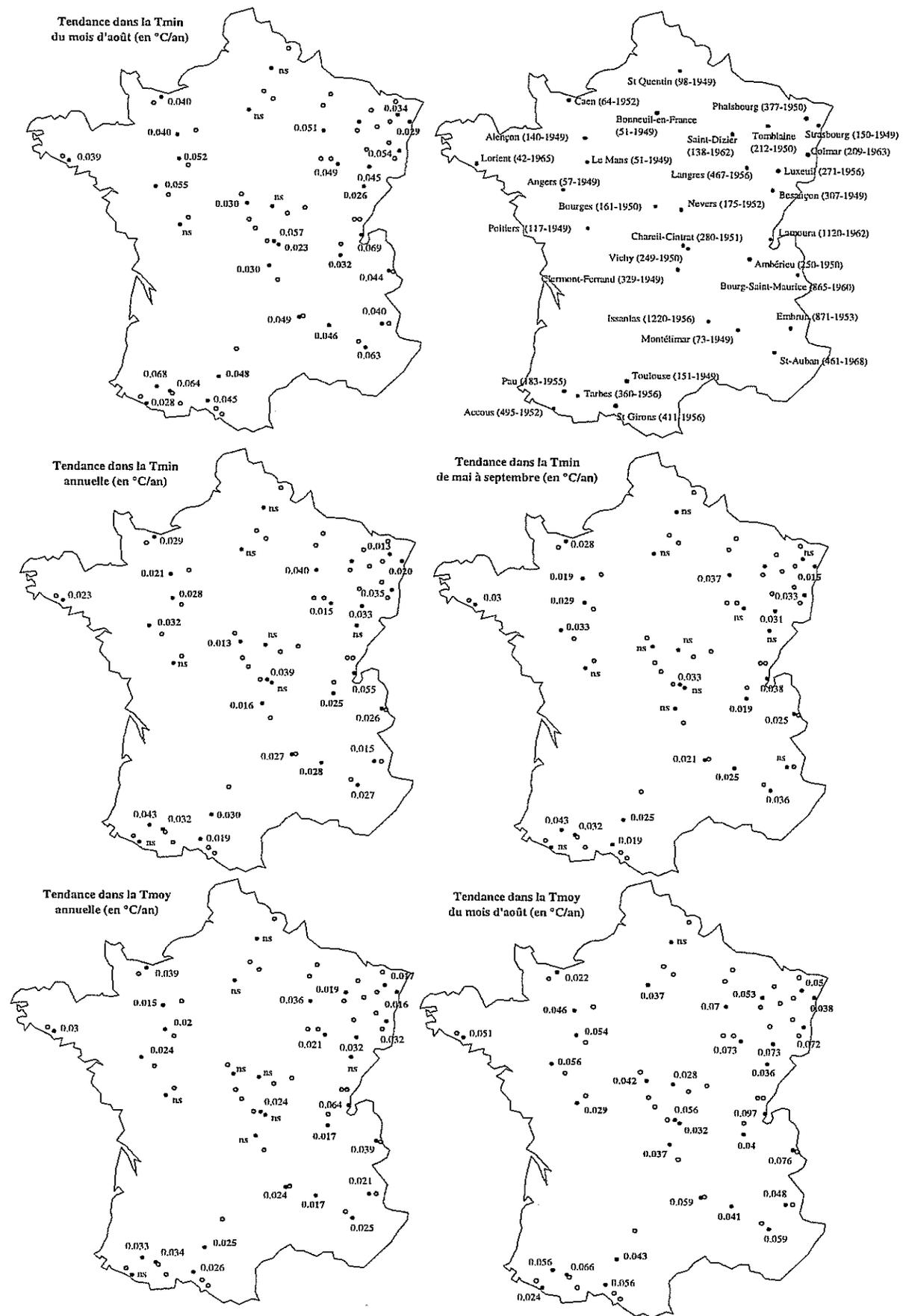


Figure 16. Dérive climatique observée dans les températures minimales (Tmin) et les températures moyennes (Tmoy) pour les 33 stations météorologiques du réseau Météo-France (ronds noirs) utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR (ronds blancs). Pour la carte des stations, le premier chiffre indique l'altitude du poste et le second la première année disponible. Pour les autres cartes, les chiffres indiquent la pente (en °C/an) de l'ajustement linéaire calculé sur toute la période disponible. ns = non significatif au seuil de 5%. Les données en gras indiquent les stations pour lesquelles des données sur les plus longues périodes sont disponibles (1949-1997 et 1950-1997).

Station	Alt. (m)	Période	ΔT moyenne						ΔT minimale					
			T_{dp}	T_{1997}	ΔT été (°C)	T_{dp}	T_{1997}	ΔT annuelle (°C)	T_{dp}	T_{1997}	ΔT été (°C)	T_{dp}	T_{1997}	ΔT annuelle (°C)
Accous	495	1952	ns	ns	ns	10,7	11,7	1,0	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Alençon	140	1949	16,3	17,5	1,2	10,2	10,9	0,7	10,7	12,1	1,4	5,5	6,6	1,0
Ambérieu	250	1950	ns	ns	ns	ns	ns	ns	12,1	13,3	1,2	5,3	6,5	1,2
Angers	57	1950	17,4	19,0	1,7	11,0	12,2	1,1	11,7	13,6	1,9	6,5	8,0	1,5
Besançon	307	1949	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Bonneuil-en-France	51	1949	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Bourges	61	1950	ns	ns	ns	ns	ns	ns	12,4	13,3	0,9	6,3	6,9	0,6
Bourg-St-Maurice	865	1960	16,3	18,1	1,8	8,5	9,9	1,5	10,3	11,4	1,1	3,1	4,1	1,0
Caen	64	1952	15,7	16,9	1,2	10,0	11,0	1,0	11,0	12,5	1,5	6,1	7,4	1,3
Chareil-Cintrat	280	1951	17,7	19,0	1,3	10,2	11,3	1,1	11,1	12,9	1,8	4,5	6,3	1,8
Clermont-Ferrand	329	1949	ns	ns	ns	ns	ns	ns	11,8	12,8	1,0	5,6	6,4	0,8
Colmar	220	1963	18,0	19,4	1,4	9,8	10,9	1,1	12,0	13,4	1,4	5,0	6,2	1,2
Danne-et-quatre-vents	377	1950	16,5	17,9	1,4	8,7	9,5	0,8	12,2	13,1	0,9	5,4	6,0	0,6
Embrun	871	1953	17,5	18,9	1,3	9,6	10,5	0,9	10,9	12,0	1,1	4,1	4,8	0,7
Issanlas	1220	1956	12,8	14,2	1,5	5,5	6,5	1,0	7,5	8,9	1,4	1,3	2,4	1,1
Lamoura	1120	1962	11,9	13,9	2,0	4,3	6,6	2,3	6,5	8,0	1,5	0,2	1,6	1,4
Langres	467	1956	16,1	17,8	1,8	8,6	9,4	0,9	12,0	13,1	1,1	5,3	5,9	0,6
Le Mans	51	1949	17,5	18,9	1,5	10,7	11,7	0,9	11,5	13,3	1,8	6,1	7,4	1,3
Lorient	42	1965	16,3	17,6	1,3	11,1	12,1	1,0	11,9	13,0	1,1	7,5	8,2	0,7
Luxeuil	271	1956	16,4	18,5	2,1	9,0	10,3	1,3	10,3	12,0	1,7	3,8	5,1	1,4
Montélimar	73	1949	21,0	21,9	1,0	12,6	13,4	0,8	14,5	16,0	1,5	7,6	8,9	1,3
Nevers	175	1952	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Pau	183	1955	18,3	19,9	1,6	12,1	13,5	1,4	12,8	15,0	2,2	6,8	8,6	1,8
Poitiers	117	1949	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
St Auban	461	1968	20,0	21,1	1,1	12,0	12,7	0,7	13,2	14,5	1,3	6,3	7,1	0,8
St Dizier	138	1962	17,3	18,9	1,6	9,9	11,1	1,3	11,7	13,4	1,7	5,3	6,7	1,4
St Girons	411	1956	17,7	19,2	1,5	11,4	12,4	1,0	12,5	13,8	1,3	6,1	6,9	0,8
St Quentin	98	1949	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Strasbourg	150	1950	17,8	18,8	1,0	9,7	10,5	0,7	12,5	13,5	0,9	5,4	6,3	1,0
Tarbes	360	1956	17,5	19,3	1,8	11,2	12,6	1,4	12,5	14,3	1,8	6,4	7,7	1,3
Tomblaine	212	1950	16,8	18,1	1,3	9,2	10,1	0,9						
Toulouse	151	1949	19,7	20,9	1,3	12,3	13,5	1,2	13,7	15,3	1,6	7,5	9,0	1,5
Vichy	249	1950	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Tableau 23b. Augmentation des températures moyennes et minimales annuelles et estivales (juin-juillet-août) pour les 32 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR (pas de Tmin pour Tomblaine). T_{dp} = température en début de période ; T_{1997} = température en 1997. Pour chaque station, les températures sont des estimations à partir des ajustements linéaires. ns = tendance non significative au seuil de 5%.

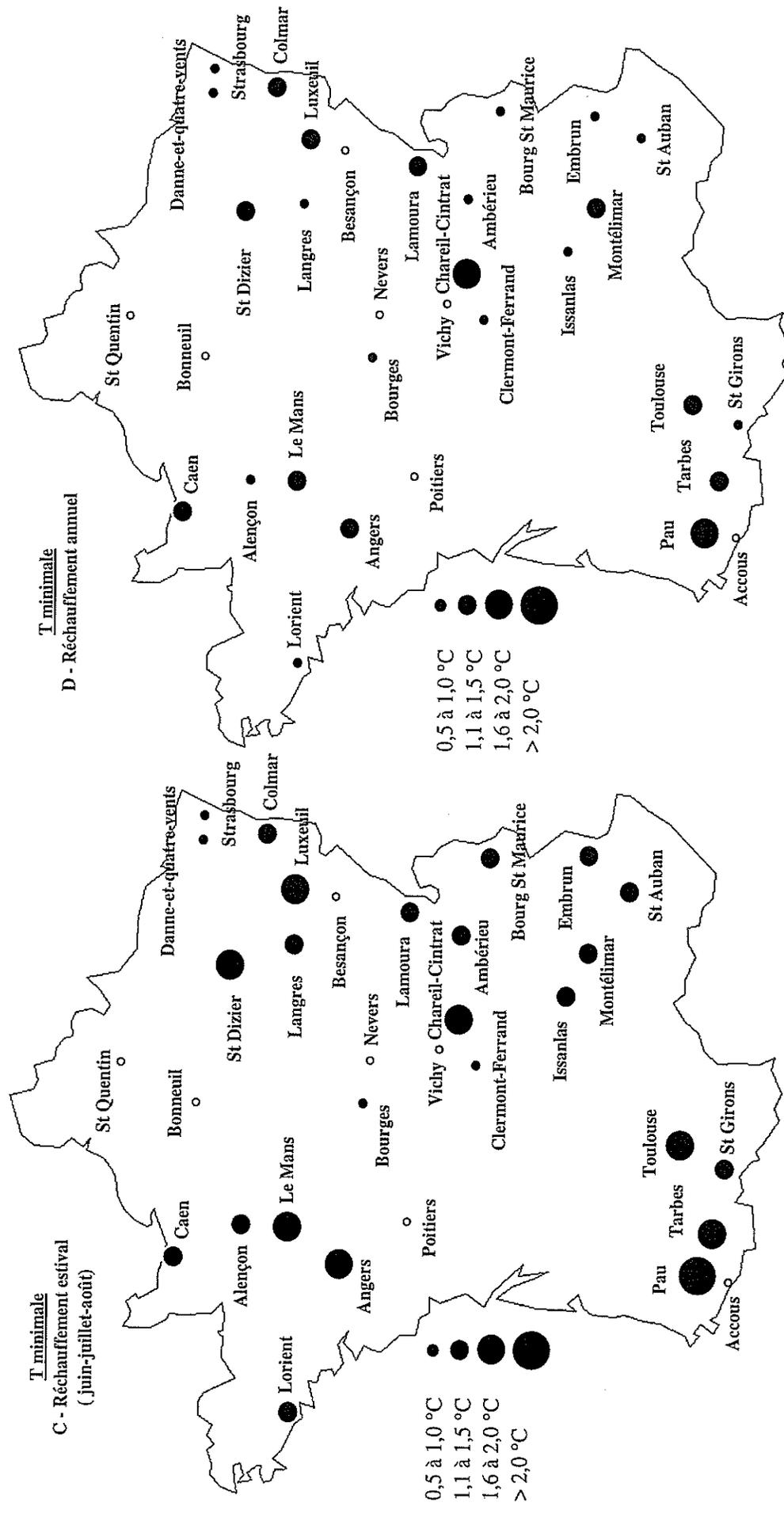


Figure 16b. Augmentation de la température minimale annuelle (B) et estivale (A) (juin-juillet-août) pour les 33 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. La taille des ronds noirs indique l'ampleur du réchauffement entre le début de la période et 1997. Pour chaque station, les estimations ont été faites à partir des ajustements linéaires calculés sur toute la période disponible. Les ronds blancs indiquent des tendances non significatives au seuil de 5%.

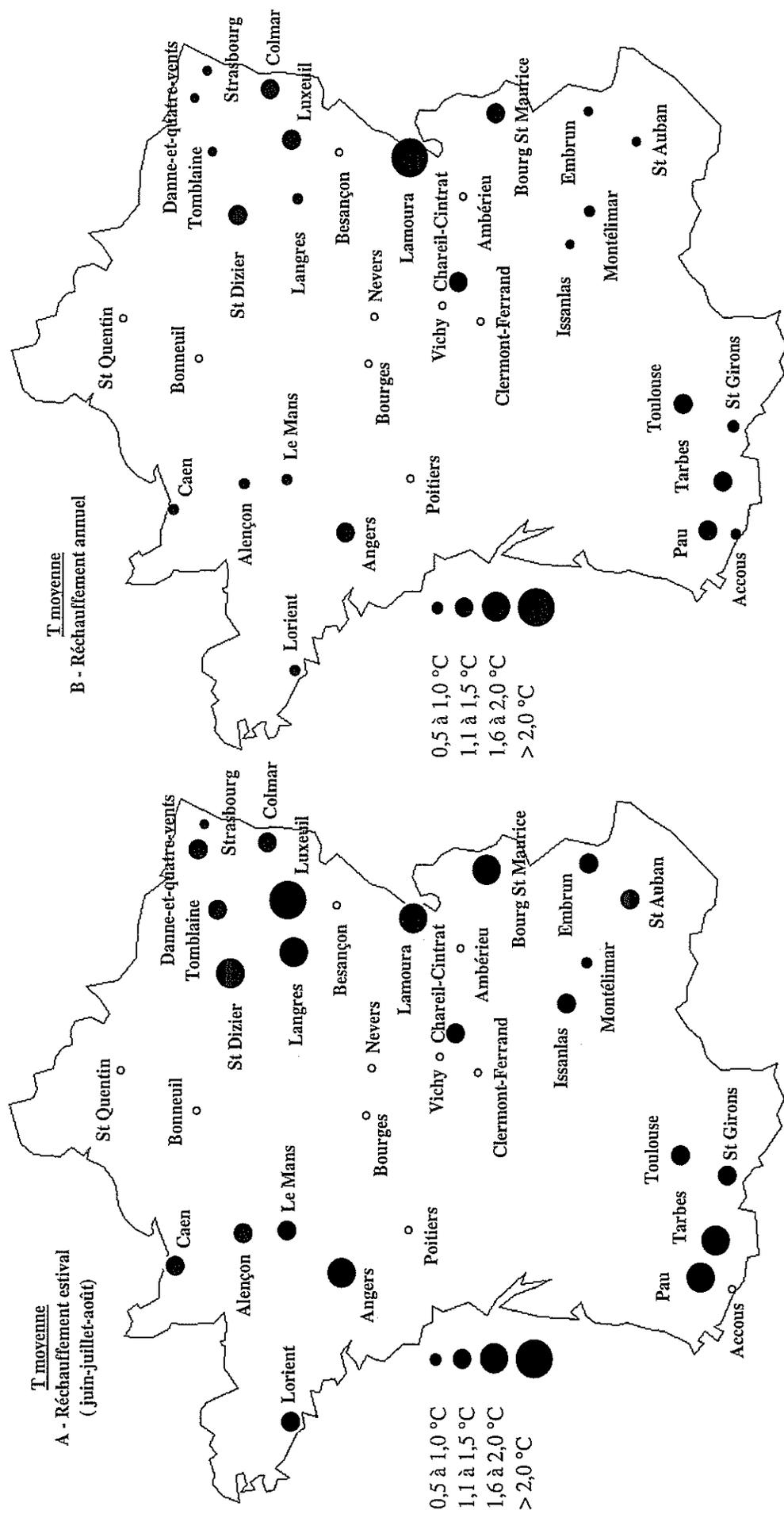


Figure 16c. Augmentation de la température moyenne annuelle (B) et estivale (A) (juin-juillet-août) pour les 33 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des parcelles du réseau RENECOFOR. La taille des ronds noirs indique l'ampleur du réchauffement entre le début de la période et 1997. Pour chaque station, les estimations ont été faites à partir des ajustements linéaires calculés sur toute la période disponible. Les ronds blancs indiquent des tendances non significatives au seuil de 5%.

Température minimale (Tmin) annuelle											Température moyenne (Tmoy) annuelle													
Période	Rang									Rang moyen	Nbre de station	Période	Rang									Rang moyen	Nbre de station	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1991-1997	25	6	1							1,3	32	1991-1997	29	4							1,1	33		
1986-1990	5	21	4	2						2,2	32	1986-1990	5	25	3							1,9	33	
1981-1985		5	11	7	3	2	2	1	1	4,0	32	1981-1985		2	15	10	2	4				3,7	33	
1976-1980			1	1	13	6	6	3	2	6,0	32	1976-1980			1	2	3	8	9	7	3	6,7	33	
1971-1975				1	2	5	8	12	4	7,3	32	1971-1975				4	4	6	7	7	5	6,7	33	
1966-1970	1		7	12	5	3	3	1		4,4	32	1966-1970				6	4	7	9	4	3	5,3	33	
1961-1965			2		3	3	6	6	11	7,4	31	1961-1965					1	3	3	8	5	12	7,5	32
1956-1960	1		3	7	4	8	2	1	1	5,1	27	1956-1960				4	5	12	4		2	1	5,0	28
1949-1955			3	4	2	4	3	3	2	5,8	21	1949-1955			1	5	9	1		1	5		4,8	22

Température minimale (Tmin) de la saison de végétation											Température moyenne (Tmoy) de la saison de végétation												
Période	Rang									Rang moyen	Nbre de station	Période	Rang									Rang moyen	Nbre de station
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1991-1997	21	8	2		1					1,5	32	1991-1997	24	9								1,3	33
1986-1990	4	13	11	1		1	2			2,7	32	1986-1990	8	18	5	1	1					2,1	33
1981-1985	2	9	11	5	2	2	1			3,2	32	1981-1985		5	17	8	1	2				3,3	33
1976-1980				2		3	4	8	15	7,9	32	1976-1980						6	6	5	16	7,9	33
1971-1975					7	8	8	8	1	6,6	32	1971-1975			1	5	7	4	7	9		6,2	33
1966-1970			3	10	2	10	4	3		5,3	32	1966-1970			1	4	5	8	12	3		6,1	33
1961-1965			2	2	5	4	10	4	4	6,5	31	1961-1965				4	7	6	6	4	5	6,4	32
1956-1960	2		1	8	10	3	3			4,7	27	1956-1960				2	6	12	3	2	3	5,2	28
1949-1955	2	2	2	4	5	1		3	2	4,8	21	1949-1955	1	2	7	7	1	1		3		4,0	22

Température minimale (Tmin) du mois d'août											Température maximale (Tmax) du mois d'août													
Période	Rang									Rang moyen	Nbre de station	Période	Rang									Rang moyen	Nbre de station	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1991-1997	32									1,0	32	1991-1997	29	3								1,1	32	
1986-1990		11	11	5	2		2	1		3,3	32	1986-1990	2	20	9	1						2,3	32	
1981-1985		5	2	12	6	4	2		1	4,4	32	1981-1985			2	12	12	3	3			4,8	32	
1976-1980					1	5	8	7	11	7,7	32	1976-1980				1	6	14	4	2	5	6,5	32	
1971-1975		15	12	5						2,7	32	1971-1975			7	17	7	1				3,1	32	
1966-1970			3	4	11	8	4		2	5,4	32	1966-1970					1	6	11	10	4	7,3	32	
1961-1965				1	3	4	7	10	6	7,3	31	1961-1965					1	7	9	7	6	1	6,4	31
1956-1960			1		1	7	6	5	7	6,2	27	1956-1960				1	1	2	6	7	10	7,7	27	
1949-1955		2	2	4	4	3	4	2		5,1	21	1949-1955	1	3	2	9	5				1	4,0	21	

Température moyenne (Tmoy) du mois d'août											Amplitude thermique du mois d'août												
Période	Rang									Rang moyen	Nbre de station	Période	Rang									Rang moyen	Nbre de station
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1991-1997	33									1,0	33	1991-1997	7	9	5	3	5	1		2		3,1	32
1986-1990		18	12	2	1					2,6	33	1986-1990	14	10	7	1						1,8	32
1981-1985		2	1	18	10		2			4,3	33	1981-1985	1		4	1	11	4	4	3	4	5,8	32
1976-1980					1	9	8	9	6	7,3	33	1976-1980	1	1	3	8	8	6	3	1	1	4,9	32
1971-1975		11	18	3	1					2,8	33	1971-1975			5	5	13	5	3	1		4,0	32
1966-1970					8	8	12	2	3	6,5	33	1966-1970					1	3	11	11	6	7,6	32
1961-1965					5	13	2	6	6	6,8	32	1961-1965	1	2	5	2	1	11	8	1		5,3	31
1956-1960					2	4	6	10	6	7,5	28	1956-1960	1	1		1		2	3	9	10	7,5	27
1949-1955		2	2	10	5	1	1		1	4,4	22	1949-1955	8	3	3	3	1	2	1			2,8	21

Température minimale (Tmin) du mois juillet											Amplitude thermique de l'année												
Période	Rang									Rang moyen	Nbre de station	Période	Rang									Rang moyen	Nbre de station
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1991-1997	18	13	1							1,5	32	1991-1997	2	4	4	3	5	1	9	1	3	5,1	32
1986-1990	1	4	16	6	3		1	1		3,5	32	1986-1990	4	6	6	2	3	6	2	1	2	4,2	32
1981-1985	13	13	6							1,8	32	1981-1985	4	4	2	3	5	3	6	4	1	4,9	32
1976-1980				5	3	7	7	5	5	6,6	32	1976-1980		2	2	1	7	7	5	6	2	6,0	32
1971-1975				4	8	8	8	1	3	6,1	32	1971-1975	6	6	4	10	3		2	1		3,3	32
1966-1970				2	7	9	6	8		6,3	32	1966-1970	1		2	4	2	7	5	2	9	6,5	32
1961-1965				4	2	3	4	6	12	7,4	31	1961-1965			6	4	3	9	3	2	2	4,7	31
1956-1960			1	4	4	7	4	3	3	1	5,3	27	1956-1960	2	2	8	3	1	4		7	4,7	27
1949-1955		1	5	7	2	1	2	3		4,7	21	1949-1955	14	2	2	2					1	2,0	21

Tableau 24. Fréquence des rangs par période pour les différents paramètres de température présentant une augmentation significative. Pour chaque station et chaque paramètre analysés, les 9 périodes ont été triées par ordre décroissant selon la valeur du paramètre. Pour les températures, le rang 1 a été attribué à la période la plus chaude et le rang 9 à la période la plus "froide". Pour les amplitudes thermiques, le rang 1 correspond à l'amplitude la plus forte et le rang 9 à la plus faible. Par exemple, pour la température minimale annuelle, la période 1991-1997 correspond à la période la plus chaude pour 25 stations, à la deuxième période la plus chaude pour 6 stations et à la troisième période la plus chaude pour 1 station ; le rang moyen étant de 1.3. La saison de végétation regroupe les mois de mai à septembre.

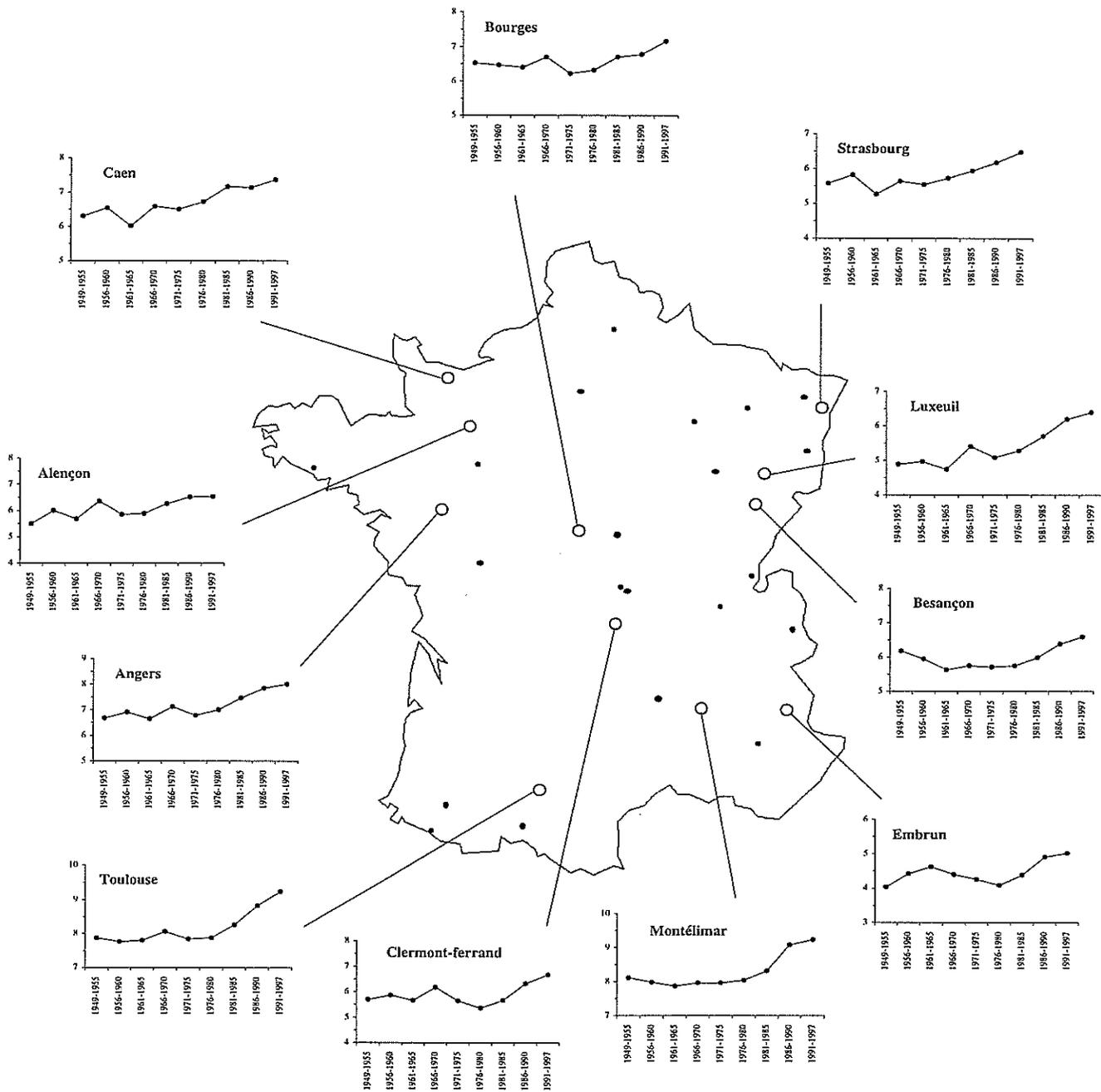


Figure 17. Exemple d'évolution de la température moyenne minimale annuelle (T_{min} en °C) par période pour 11 des 33 stations thermiques du réseau météorologique national utilisées pour l'étude du bilan hydrique. Les ronds noirs indiquent la localisation des 22 autres stations.

8.1.3 Les gelées

Pour le mois de mai, aucune dérive du nombre et de la fréquence des jours de gelées ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) n'a été observée pour les 32 stations analysées (**Tableau 25**). Sur l'année, le nombre et la fréquence des jours de gelées a diminué dans plus de 50% des cas, de moins 10 jours à Clermont-Ferrand à moins 26 jours à Pau (**Tableau 25**). Selon les pentes des droites de régression, la diminution est de l'ordre de 1 jour tous les 2 à 3 ans (**Figure 18**).

8.1.4 L'ETP

Une diminution de l'ETP de 1 à 2% par an au mois d'août est observable dans près de 90% des cas (**Tableau 26**). Les variations de l'ETP sont plus fréquentes en fin d'été et en automne que pour les autres périodes de l'année. Sur l'année, 60% des stations présentent une augmentation de l'ETP de l'ordre de 0.7% par an.

8.1.5 La durée d'insolation

Des augmentations d'insolation en août et novembre sont observées dans 10 stations, et environ 30% des stations présentent une diminution de l'ensoleillement au printemps (mai et juin) (**Tableau 27**). Pour le mois de novembre, l'augmentation est en moyenne de 40 min/an (de 28 min/an à Bourges à 55 min/an à Bonneuil-en-France) ce qui correspond à une augmentation relative entre 1950 et 1997 de 49% (15% à Ambérieu et 94% à Bonneuil-en-France). Pour le mois d'août, la durée d'insolation a augmenté en moyenne de 61 min/an (36 min/an à Vichy et 88 min/an à Bonneuil-en-France) soit une augmentation relative de 25% entre 1950 et 1997 (13 à 41% à Vichy et Bonneuil-en-France). Aucune tendance n'est observée pour la station de Clermont-Ferrand alors que pour Montélimar la durée d'insolation a diminué significativement depuis 1949 pour 6 des 12 mois de l'année (**Tableau 27**).

8.1.6 Les 28 stations de référence « ETP »

Le **Tableau 28** récapitule les principales dérives climatiques observées pour les 28 stations utilisées pour le calcul de l'ETP. Parmi les 28 stations, 19 présentent des variations de la durée d'insolation. Cependant, seuls 7 postes présentent à la fois une diminution des précipitations et une augmentation de la température et de l'ensoleillement au mois d'août. Pour deux de ces 7 stations, cet ensoleillement plus important se traduit par une augmentation au niveau annuel.

Au niveau annuel, des températures plus élevées ne se traduisent pas par une augmentation de la durée d'insolation. Au contraire, celle-ci a diminué dans 9 stations.

8.1.7 Conclusions

L'analyse des séries climatiques montre une très nette *dérive positive des températures* depuis 40-50 ans. Celle-ci s'exprime essentiellement à travers une augmentation des températures minimales et plus particulièrement par un réchauffement en fin de printemps (mai et juin) et en été (principalement au mois d'août). Ce réchauffement mensuel se traduit par une augmentation des températures annuelle et pendant la saison de végétation. Depuis 1950, l'augmentation de la température minimale est en moyenne de 0.037°C/an pour le mois d'août et de 0.023°C/an sur l'année, soit une augmentation respectivement de +1.9°C et +1.1°C en 50 ans. Pour les températures moyennes, les augmentations moyennes sont respectivement de 0.042°C/an et 0.019°C/an pour le mois d'août et sur l'année, soit une augmentation de +2.0°C et +0.9°C en 50 ans. Ce réchauffement entraîne une réduction notable du nombre de jours de gelées annuelles de l'ordre de 18 jours mais aucune modification dans la fréquence des gelées tardives du mois de mai (qui restent des événements rares).

Les précipitations et la durée d'insolation varient moins et, contrairement aux températures, aucune tendance générale n'est observable. La durée d'insolation tend à diminuer au printemps et à augmenter au mois d'août et au début de l'hiver. Sur l'année, la tendance est à la diminution.

Il n'apparaît pas de liaisons directes entre le réchauffement et les variations de la durée d'insolation et le régime pluviométrique. Le réchauffement du mois d'août s'accompagne d'une diminution des pluies et d'une augmentation de l'ensoleillement dans un quart des cas seulement.

Dans une étude sur l'évolution de la température en France au cours de la période 1921-1974, Betout (1979) mentionnait déjà un réchauffement du mois d'août ; réchauffement non imputable à des changements de type de matériel ou de localisation des postes météorologiques. Des observations récentes pour quatre stations des Alpes françaises ont montré une augmentation significative des températures minimales, spécialement en juillet, parallèlement à une diminution des températures maximales d'avril à juin pour la période 1946-1993 (Rolland *et al.* 1998). En étudiant des longues séries (110 à 238 ans), ces auteurs ont également mis en évidence des dérives positives dans les températures moyennes à Lyon (France), Genève (Suisse) et Turin (Italie). Pour Lyon, Rolland *et al.* (1998) notent une augmentation de la température moyenne de juillet de 1.18°C/100 ans (période 1881-1990). Pour 8 stations du réseau national, Dessens (1995) estime à 0.76°C l'augmentation moyenne de la température minimale estivale moyenne pour la période 1946-1992. Pour la station de Bordeaux, une augmentation de la température moyenne estivale (juillet et août) de l'ordre de +2°C a été observée pour la période 1949-1995 (Loustau *et al.* 1999).

Pour l'Europe Centrale, des études récentes ont montré que la température minimale a augmenté plus vite que la température maximale sur la période 1951-1990, respectivement de +0.6°C et +0.52°C (Brazdil *et al.* 1996 ; Heino *et al.* 1999). En Suisse, la température minimale annuelle a augmenté fortement durant le 20^{ième} siècle (environ 2°C/100 ans) tandis que les valeurs maximales ont peu varié (Beniston *et al.* 1994 ; Rebetez et Beniston 1998). Dans un contexte plus général, différents travaux ont montré que, durant le 20^{ième} siècle, la température moyenne à la surface de la terre avait augmenté de 0.5 à 0.6°C (Bradley *et al.* 1987 ; Jones and Wigley 1990 ; Overpeck *et al.* 1997 ; Balling *et al.* 1998 ; Mann *et al.* 1998). Cette augmentation est en partie le résultat de la (Suisse) et Tuérente de la température minimale par rapport à la température maximale ; cette différence étant à

Station	Alt. (m)	Période (xxxx)	Mois de mai				Année		
			Nb d'années avec gelée	Fréq (%)	Nb moyen de jours de gelées	Fréq (%)	Tendance de xxxx à 1997		
							Nb de jours	Dim. relative	pente (jour/an)
Accous	495	1952	5	11	52	14	-21 jours	-33%	-0,5
Alençon	140	1949	15	31	54	15	-17 jours	-27%	-0,4
Angers	57	1950	5	10	41	11	-17 jours	-34%	-0,4
Besançon	307	1949	8	16	67	18			
Biard	117	1949	7	14	53	14			
Blagnac-Toulouse	151	1949	1	2	37	10	-19 jours	-41%	-0,4
Bonneuil-en-France	51	1949	4	8	49	13			
Bourges	61	1950	5	10	52	14			
Bourg-St-Maurice	865	1960	17	45	113	31	-15 jours	-12%	-0,4
Carpiquet (Caen)	64	1952	5	10	37	10	-18 jours	-39%	-0,4
Chareil-Cintrat	280	1951	12	26	64	17			
Charmeil (Vichy)	249	1950	25	52	77	21			
Château-Arnoux	461	1968	2	6	56	15			
Château-Gaillard	250	1950	15	31	77	21	-15 jours	-18%	-0,3
Clermont-Ferrand	329	1949	19	39	68	19	-10 jours	-13%	-0,2
Embrun	871	1953	18	40	98	27			
Entzheim (Strasbourg)	150	1950	11	23	72	20	-17 jours	-21%	-0,4
Fontaine-les-clercs	98	1949	8	16	57	16			
Issanlas	1220	1956	37	88	137	37	-16 jours	-11%	-0,4
Lamoura	1120	1962	33	92	158	43			
Langres	467	1956	3	7	77	21			
Le Mans	51	1949	16	33	53	14	-17 jours	-28%	-0,4
Lorp-Sentaraille	411	1956	3	7	51	14			
Marzy	175	1952	26	57	72	20			
Meyenheim	220	1963	10	29	79	22	-22 jours	-24%	-0,5
Montélimar	73	1949	1	2	33	9	-15 jours	-38%	-0,3
Ossun (Tarbes)	360	1956	2	5	44	12	-23 jours	-40%	-0,5
Phalsbourg	377	1950	4	8	76	21			
Quéven (Lorient)	42	1965	3	9	27	7			
St Dizier	138	1962	8	22	64	17	-22 jours	-28%	-0,5
St Sauveur	271	1956	25	60	93	25	-17 jours	-19%	-0,5
Tomblaine *	212	1965							
Uzein	183	1955	1	2	38	10	-26 jours	-50%	-0,6

Tableau 25. Variations du nombre et de la fréquence des jours de gelées ($T_{min} < 0^{\circ}C$) en mai et sur l'année pour les 32 stations thermiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR (pas de T_{min} pour Tomblaine). Pour l'année, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible (seuil de 5%). Pour le mois de mai, aucune tendance n'apparaît mais pour l'année il y a en moyenne 1 jour de gelée en moins tous les 3 ans.

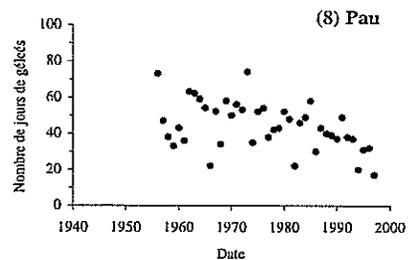
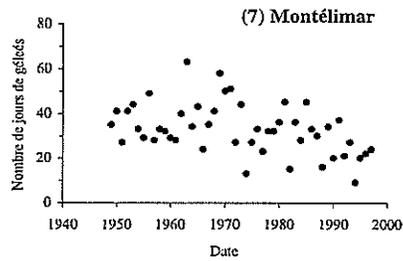
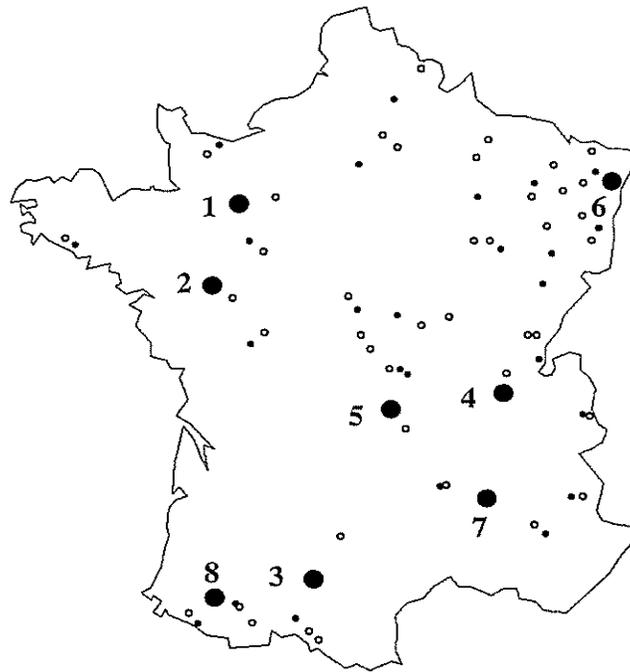
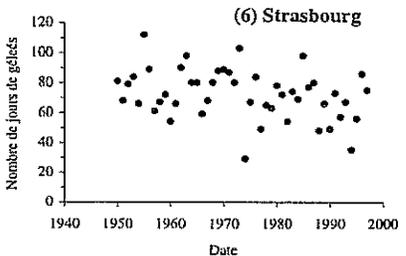
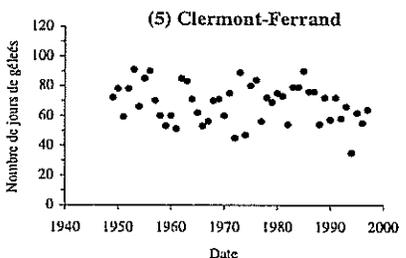
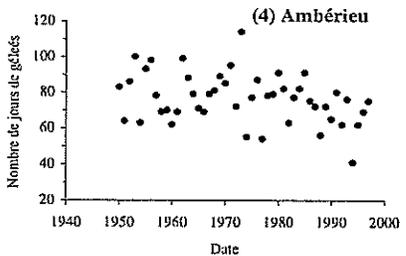
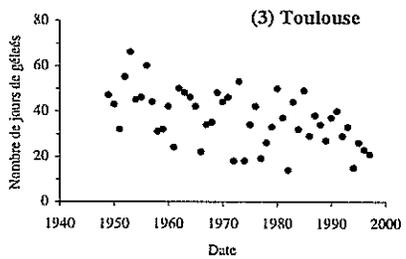
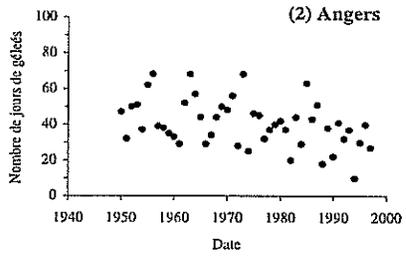
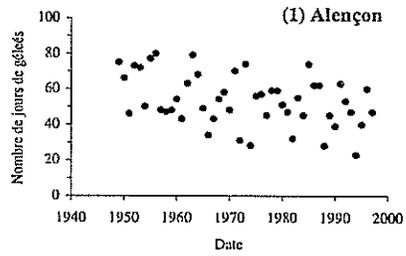


Figure 18. Evolution du nombre de jours de gélées ($T_{min} < 0^{\circ}C$) sur l'année selon la date pour 8 des 32 stations thermiques du réseau météorologique national utilisées pour l'étude du bilan hydrique. Les ronds noirs indiquent la localisation des stations et les ronds blancs des placettes RENECOFOR.

Station	Alt. (m)	Période	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
Angers	57	1950					(+)		+	+ 0,022	+	+			+ 0,0070
Besançon	307	1949	(+)							+ 0,017	(+)	(+)			+ 0,0055
Biard	117	1949								(+) 0,010					
Blagnac-Toulouse	151	1949								+ 0,011	+	+			+ 0,0052
Bonneuil-en-France	51	1949				(-)				+ 0,012					
Bourges	61	1950								+ 0,016					
Bourg-St-Maurice	865	1960	(+)						(+)	+ 0,023					+ 0,0069
Carpiquet (Caen)	64	1952	+	+						(+) 0,009		+	(+)	+	+ 0,0040
Charneil (Vichy)	249	1950								+ 0,010					
Château-Arnoux	461	1968			+					+ 0,028					+ 0,0108
Château-Gaillard	250	1950	(+)		+	(+)				+ 0,018		+		+	+ 0,0062
Clermont-Ferrand	329	1949													
Embrun	871	1953	(+)				(-)		(+)	+ 0,013					
Entzheim (Strasbourg)	150	1950							(+)	+ 0,014	(+)	+			+ 0,0061
Fontaine-les-clercs	98	1949			-	-				(+) 0,009					
Langres	467	1956	-							+ 0,019					
Lorp-Sentaraille	411	1956	+		(+)				+	+ 0,017		(+)	+	+	+ 0,0064
Marzy	175	1952				(-)	(-)			(+) 0,008					
Meyenheim	220	1963			+		(+)			+ 0,019					+ 0,0074
Montélimar	73	1949	-	-		-	-	(-)						(-)	- 0,0072
Ossun (Tarbes)	360	1956					(+)			+ 0,015	(+)	+	+		+ 0,0064
Quéven (Lorient)	42	1965					+								
St Sauveur	271	1956			(+)				+	+ 0,023		+			+ 0,0061
Tomblaine	212	1965						(+)	+	+ 0,022		(-)	(-)		+ 0,0045
Uzein	183	1955	+				+	+	+	+ 0,016	+	+	+	+	+ 0,0110
Nbre de cas (seuil de 5 et 10%) :			9	2	6	5	8	3	8	22	6	12	8	6	15
Fréq (n=25 stations) :			0,36	0,08	0,24	0,20	0,32	0,12	0,32	0,88	0,24	0,48	0,32	0,24	0,60
Nbre de cas (seuil de 5%) :			5	2	4	2	3	1	5	18	3	9	6	5	15
Fréq (n=25 stations) :			0,20	0,08	0,16	0,08	0,12	0,04	0,20	0,72	0,12	0,36	0,24	0,20	0,60

Tableau 26. Dérive climatique observée de l'ETP (calculée par Météo-France) (en mm) pour 25 des 28 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. Pour chaque mois, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible. Un signe + indique une augmentation significative au seuil de 5% et le signe - une réduction. Les signes entre parenthèses indiquent des tendances significatives au seuil de 10%. Pour le mois d'août et l'année, les chiffres indiqués correspondent aux pentes (en mm/an) des ajustements linéaires.

Station	Alt. (m)	Période	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
Alençon	140	1949					(-)				+	(+)	(+)		
Angers	57	1950					(-)								
Besançon	307	1949			(-)			(-)							(-)
Biard	117	1949				(-)	-	-							-
Blagnac-Toulouse	151	1949	+									(+)	+		
Bonneuil-en-France	51	1949	+						+	+		(+)	+	+	+
Bourges	61	1950								+					(+)
Bourg-St-Maurice	865	1960													
Carpiquet (Caen)	64	1952	-		-										-
Charneil (Vichy)	249	1950								(+)		(+)			
Château-Arnoux	461	1968		(+)	+							(-)			
Château-Gaillard	250	1950	+						+	+			+	+	+
Clermont-Ferrand	329	1949													
Embrun	871	1953				(-)	-	(-)	-			(-)			-
Entzheim (Strasbourg)	150	1950								+					
Fontaine-les-clercs	98	1949								+			+		
Langres	467	1956								(+)			+		
Le Mans	51	1949	(-)	-											-
Lorp-Sentaraille	411	1956										(+)	+		
Marzy	175	1952													-
Meyenheim	220	1963						(-)		+					
Montélimar	73	1949		(-)		-	-	-	-						-
Ossun (Tarbes)	360	1956	(+)										+	+	
Quéven (Lorient)	42	1965			(-)										(-)
St Sauveur	271	1956								+					
Tomblaine *	212	1965								+					
Uzein	183	1955						(-)							(-)
Nbre de cas (seuil de 5 et 10%) :			6	3	4	3	8	9	4	10	1	5	10	5	11
Fréq (n=27 stations) :			0,22	0,11	0,15	0,11	0,30	0,33	0,15	0,37	0,04	0,19	0,37	0,19	0,41
Nbre de cas (seuil de 5%) :			4	1	2	1	6	5	4	8	1	1	5	5	8
Fréq (n=27 stations) :			0,15	0,04	0,07	0,04	0,22	0,19	0,15	0,30	0,04	0,04	0,19	0,19	0,30

Station	Alt. (m)	Période	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
St Dizier **	138	1962-1978	-											+	
		1979-1994								+					

Tableau 27. Dérives climatiques observées dans les durées d'insolation mensuelles cumulées (en heures) pour les 27 stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des placettes du réseau RENECOFOR. Pour chaque mois, les dérives ont été étudiées à partir d'une régression linéaire sur toute la période disponible. Un signe + indique une augmentation significative au seuil de 5% et le signe - une réduction. Les signes entre parenthèses indiquent des tendances significatives au seuil de 10%. Pour Tomblaine, les données correspondent au rayonnement global. Pour St Dizier, la période 1962-1978 correspond à des données d'insolation et la période 1979-1994 au rayonnement global (W/m²).

Station (altitude en m)	Période (début)	Août										Été (juin-juillet-août)	
		P		Ins		ETP		Tmin		Tmoy		ΔTmin (°C)	ΔTmoy (°C)
		mm/an	ΔP (mm)	min/an	ΔIns (h)	mm/an	ΔETP (mm)	°C/an	ΔT (°C)	°C/an	ΔT (°C)		
Alençon (140)	1949					*	*	0,040	1,9	0,046	2,2	1,4	1,2
Ambérieu (250)	1950	-1,3	-61	82	64	0,018	0,8	0,032	1,5	0,040	1,9		
Angers (57)	1950					0,022	1,0	0,055	2,6	0,056	2,6	1,9	1,7
Besançon (307)	1949	-1,0	-48			0,017	0,8	0,026	1,2	0,036	1,7		
Bonneuil-en-France (51)	1949			88	70	0,012	0,6			0,037	1,8		
Bourges (161)	1950	-0,7	-33	67	52	0,016	0,8	0,030	1,4	0,042	2,0	0,9	
Bourg-Saint-Maurice (865)	1960					0,023	0,9	0,044	1,6	0,076	2,8	1,1	1,8
Caen (64)	1952					0,009	0,4	0,040	1,8	0,022	1,0	1,5	1,2
Clermont-Ferrand (329)	1949							0,030	1,4	0,037	1,8		
Colmar (209)	1963	-1,4	-48	61	35	0,019	0,6	0,054	1,8	0,072	2,4	1,4	1,4
Embrun (871)	1953					0,013	0,6	0,040	1,8	0,048	2,1	1,1	1,3
Langres (467)	1956	-1,1	-45	54	37	0,019	0,8	0,049	2,0	0,073	3,0	1,1	1,8
Le Mans (51)	1949					*	*	0,052	2,5	0,054	2,6	1,8	1,5
Lorient (42)	1965							0,039	1,2	0,051	1,6	1,1	1,3
Luxeuil (271)	1956	-1,3	-53	57	39	0,023	0,9	0,045	1,8	0,073	3,0	1,7	2,1
Montélimar (73)	1949	-1,1	-53					0,046	2,2	0,041	2,0	1,5	1
Nevers (175)	1952					0,008	0,4			0,028	1,3		
Pau (183)	1955					0,016	0,7	0,068	2,9	0,056	2,4	2,2	1,6
Poitiers (117)	1949					0,01	0,5			0,029	1,4		
Saint-Dizier (138)	1962					*	*	0,051	1,8	0,070	2,5	1,7	1,6
St Girons (411)	1956					0,017	0,7	0,045	1,8	0,056	2,3	1,3	1,5
St Quentin (98)	1949			60	48	0,009	0,4						
St-Auban (461)	1968					0,028	0,8	0,063	1,8	0,059	1,7	1,3	1,1
Strasbourg (150)	1950	-0,8	-38	43	34	0,014	0,7	0,029	1,4	0,038	1,8	0,9	1
Tarbes (360)	1956					0,015	0,6	0,064	2,6	0,066	2,7	1,8	1,8
Tomblaine (212)	1950	-0,6	-28	95 *	*	0,022	1,0	*	*	0,053	2,5	*	1,3
Toulouse (151)	1949					0,011	0,5	0,048	2,3	0,043	2,1	1,6	1,3
Vichy (249)	1950			36	28	0,01	0,5	0,023	1,1	0,032	1,5		

Station (altitude en m)	Période (début)	Année											
		P		Tmin		Tmoy		Ins		ETP		Gélées	
		mm/an	ΔP (mm)	°C/an	ΔT (°C)	°C/an	ΔT (°C)	min/an	ΔIns (h)	mm/an	ΔETP (mm)	Nb jours	
Alençon (140)	1949			0,021	1,0	0,015	0,7						-17 jours
Ambérieu (250)	1950			0,025	1,2	0,017	0,8	320	251	0,006	0,3		-15 jours
Angers (57)	1950			0,032	1,5	0,024	1,1			0,007	0,3		-17 jours
Besançon (307)	1949							-219	-175	0,005	0,2		
Bonneuil-en-France (51)	1949							406	325				
Bourges (161)	1950			0,013	0,6								
Bourg-Saint-Maurice (865)	1960			0,026	1,0	0,039	1,4			0,007	0,3		-15 jours
Caen (64)	1952			0,029	1,3	0,039	1,8	-350	-263	0,004	0,2		-18 jours
Clermont-Ferrand (329)	1949			0,016	0,8								-10 jours
Colmar (209)	1963			0,035	1,2	0,032	1,1			0,007	0,2		-22 jours
Embrun (871)	1953			0,015	0,7	0,021	0,9	-319	-234				
Langres (467)	1956			0,015	0,6	0,021	0,9						
Le Mans (51)	1949			0,028	1,3	0,02	1,0	-288	-230				-17 jours
Lorient (42)	1965			0,023	0,7	0,03	1,0	-358	-191				
Luxeuil (271)	1956	3,7	155	0,033	1,4	0,032	1,3			0,006	0,2		-17 jours
Montélimar (73)	1949			0,028	1,3	0,017	0,8	-406	-325	0,007	0,3		-15 jours
Nevers (175)	1952							-253	-190				
Pau (183)	1955			0,043	1,8	0,033	1,4	-191	-134	0,011	0,5		-26 jours
Poitiers (117)	1949							-329	-263				
Saint-Dizier (138)	1962			0,040	1,4	0,036	1,3						-22 jours
St Girons (411)	1956			0,019	0,8	0,026	1,1			0,006	0,2		
St Quentin (98)	1949												
St-Auban (461)	1968			0,027	0,8	0,025	0,7			0,011	0,3		
Strasbourg (150)	1950			0,020	0,9	0,016	0,8			0,006	0,3		-17 jours
Tarbes (360)	1956			0,032	1,3	0,034	1,4			0,006	0,2		-23 jours
Tomblaine (212)	1950			*	*	0,019	0,9			0,004	0,2		
Toulouse (151)	1949			0,030	1,4	0,025	1,2			0,005	0,2		-19 jours
Vichy (249)	1950												

Tableau 28. Dériver climatiques observées pour les 28 stations du réseau Météo-France utilisées pour le calcul de l'ETP (6 données journalières). Pour chaque station et chaque paramètre, la première valeur correspond à la pente de la droite de régression établie sur toute la période disponible et la seconde à la variation du paramètre entre le début de la période et 1997. Pour Tomblaine, seule l'évolution de la température moyenne (Tmoy) a été prise en compte (Tmin et Tmax non disponibles). Pour cette station, les données d'insolation correspondent au rayonnement global (W/m²). Pour St Dizier, l'évolution de l'insolation n'a pas été testée car la période 1962-1978 correspond à des données d'insolation et la période 1979-1994 au rayonnement global (W/m²). L'ETP provient des calculs de Météo-France (* données non disponibles).

l'origine d'une diminution de l'amplitude thermique diurne (Karl *et al.* 1993 ; Easterling *et al.* 1997). A partir de 5400 stations localisées à travers le monde, Easterling *et al.* (1997) ont montré une augmentation des températures maximales et minimales moyennes annuelles respectivement de + 0.88°C et + 1.86°C pour 100 ans pour la période 1950-1993. Pour l'hémisphère Nord, les augmentations sont maximales en hiver (DJF) et au printemps (MAM) avec des valeurs pour Tmax et Tmin respectivement de 1.26 et 2.74°C/100 ans en hiver et 1.39 et 2.28°C/100 ans au printemps. Sur l'année, les auteurs estiment les augmentations de Tmax et Tmin à 0.77 et 1.74°C/100 ans. En éliminant les 1300 stations urbaines, c'est-à-dire celles localisées à proximité d'une ville d'au moins 50 000 habitants, les auteurs ont mis en évidence une tendance plus faible de l'ordre de 0.1°C/100 ans (0.82 contre 0.88°C/100 ans pour Tmax et 1.79 contre 1.86°C/100 ans pour Tmin).

Nos observations locales sont donc cohérentes avec ces changements mais les amplitudes sont beaucoup plus fortes. Ceci peut être du en partie au fait que les fluctuations régionales sont largement gouvernées par des changements locaux de masses d'air qui sont minimisés quand les phénomènes sont observés au niveau global (Hasselmann 1997). Bien que des progrès importants aient été faits dans l'analyse des données climatiques, la question de l'origine de ces changements – effets des activités humaines ou simple expression de la variabilité naturelle à des très grandes échelles spatiales et temporelles – est encore actuellement très controversée (Hasselmann 1997 ; Jones 1998).

L'analyse des séries climatiques a permis de mettre en évidence une très nette dérive positive des températures depuis 40-50 ans au niveau national

Les précipitations et la durée d'insolation ont moins variée et, contrairement aux températures, aucune tendance générale n'est observable

Il n'apparaît pas de liaisons directes entre le réchauffement et les variations de la durée d'insolation et le régime pluviométrique

8.2 Effet des changements climatiques sur le bilan hydrique

L'analyse des séries climatiques a mis en évidence un réchauffement très important depuis 50 ans. L'augmentation des températures peut avoir un effet direct sur les différents processus physiologiques (photosynthèse, transpiration...) ou s'exprimer indirectement à travers le cycle de croissance des peuplements et plus précisément sur le cycle phénologique. Ainsi, l'application du modèle prédictif phénologique (voir paragraphe 3.3.2.1) prédit, depuis 1988, une date de débourrement avancée de 12 jours par rapport aux années précédentes.

Dans un premier temps, l'évolution temporelle des déficits de réserve a été analysée pour les 41 peuplements afin de mettre en évidence une éventuelle dérive à moyen terme du niveau local des stress. Afin de mieux appréhender l'effet des seules dérives climatiques sur le bilan hydrique et de pouvoir comparer directement les observations locales, l'évolution temporelle du déficit annuel de réserve en eau d'un même peuplement de feuillus a été calculée dans un second temps à partir des 28 stations de référence ETP. Pour cette comparaison, la réserve utile en eau du sol a été fixée à 150 mm, l'indice foliaire à $6\text{m}^2/\text{m}^2$ et le cycle de croissance à 180 jours (jours juliens 120 à 300).

L'effet du cycle phénologique sur le déficit de réserve annuel a été quantifié pour trois peuplements de hêtre (HET02, 60 et 52) présentant des caractéristiques dendrométriques et phénologiques comparables mais des réserves utiles en eau du sol très différentes (respectivement 274, 110 et 77 mm). Quatre hypothèses ont été testées sur l'ensemble des années disponibles (1949-1997 pour HET02 et HET60 et 1956-1997 pour HET52) et sur la période récente 1988-1997 :

- Débourrement plus précoce de 12 jours sans variation de la sénescence ;
- Débourrement et sénescence plus précoces de 12 jours ;
- Débourrement plus précoce de 12 jours et sénescence plus tardive de 12 jours ;
- Sénescence plus tardive de 12 jours sans variation du débourrement.

8.2.1 Evolution temporelle des déficits de réserve des 41 peuplements

Quel que soit l'indice de stress considéré (déficit moyen et cumul par période ou moyenne et cumul du nombre de jours de stress), seuls 7 des 41 peuplements présentent une tendance à l'augmentation du déficit de réserve au cours du temps (Tableau 29 et Figure 19). Pour la placette HET54b, le déficit de réserve annuel était en moyenne de 40 avant 1980. Depuis 1980, il augmente de l'ordre de 3 à 5 % par an. Il est à noter que le peuplement HET54a, soumis aux mêmes conditions climatiques et présentant des caractéristiques dendrométriques comparables, ne présente aucune évolution comparable du niveau de stress, probablement en raison du fait que la réserve en eau du sol nettement supérieure (208 mm contre 88 mm) « tamponne » les effets climatiques.

Placette	Période	1951-1955	1956-1960	1961-1965	1966-1970	1971-1975	1976-1980	1981-1985	1986-1990	1991-1995
CHP 18	1950-1997 ns	110	57	147	60	94	114	126	151	71
CHP 49	1950-1997 ns	252	204	280	257	386	322	267	342	259
CHP 59	1949-1997 ns	29	71	51	13	9	70	47	84	23
CHP 65	1956-1997 ns		1	60	3	7	22	34	90	61
CHS 01	1950-1997 ns	34	66	89	27	4	47	100	111	75
CHS 03	1952-1997 ns		64	181	55	90	158	123	137	105
CHS 18	1950-1997 ns	276	227	312	262	283	238	317	302	217
CHS 51	1962-1997 *				180	245	273	244	228	275
CHS 57a	1950-1997 ns	52	62	85	4	26	68	53	53	103
CHS 57b	1950-1997 (*)	57	80	154	53	130	75	182	117	166
CHS 58	1952-1997 ns		57	147	27	28	102	88	96	64
CHS 61	1949-1997 (*)	117	98	188	145	104	217	171	232	152
CHS 72	1949-1997 ns	146	84	159	140	103	157	137	219	118
CHS 81	1949-1997 ns	305	202	266	282	235	238	324	335	246
CHS 86	1949-1997 ns	355	252	316	321	318	327	310	333	329
EPC 39a	1949-1997 ns	104	99	86	11	17	28	27	74	62
EPC 39b	1949-1997 ns	62	54	58	0	0	16	10	17	16
EPC 71	1952-1997 ns		71	144	33	37	103	126	109	75
EPC 73	1960-1997 ns			210	200	241	223	258	247	209
EPC 88	1963-1997 ns				93	221	110	182	129	155
HET 02	1949-1997 ns	140	111	112	34	85	144	40	123	64
HET 03	1950-1997 ns	252	202	234	196	164	224	201	250	203
HET 04	1968-1997 ns					352	377	423	440	394
HET 09	1956-1997 ns		6	80	55	52	32	94	81	65
HET 14	1952-1997 ns		70	77	2	29	72	82	99	41
HET 21	1956-1997 ns		214	274	210	265	226	299	258	200
HET 29	1968-1997 ns					178	224	213	179	119
HET 52	1956-1997 ns		216	276	208	266	226	303	260	204
HET 54a	1950-1997 ns	54	141	264	64	58	95	76	134	128
HET 54b	1950-1997 (*)	213	168	274	190	208	194	254	249	311
HET 55	1962-1997 *				125	204	220	200	198	246
HET 60	1949-1997 ns	285	333	288	244	295	333	323	365	339
HET 64	1955-1997 * ¹		1	97	33	13	19	48	72	84
HET 65	1956-1997 * ¹		3	68	54	36	42	67	119	99
HET 88	1956-1997 * ¹		66	126	56	52	71	117	98	123
SP 05	1953-1997 ns		276	259	275	199	244	254	269	170
SP 07	1949-1997 ns	568	121	165	149	52	146	160	198	173
SP 09	1956-1997 ns		21	110	95	72	57	152	111	95
SP 57	1950-1997 ns	96	112	165	70	172	98	124	204	157
SP 63	1949-1997 ns	289	238	295	288	240	175	277	259	212
SP 68	1963-1997 ns				143	208	151	184	152	146

Tableau 29. Evolution du cumul de déficit de réserve par période. Pour chaque peuplement, seules les périodes avec 5 années complètes ont été prises en compte. * : significatif à 5% ; (*) : significatif à 10% ; ns = non significatif ; *¹ : significatif à 5% à partir de 1966. Pour HET64, 65 et 88, la valeur moyenne pour la période 1961-1965 est principalement due au stress extrême de 1962. Si on exclut cette année, la tendance est positive sur l'ensemble de la période étudiée.

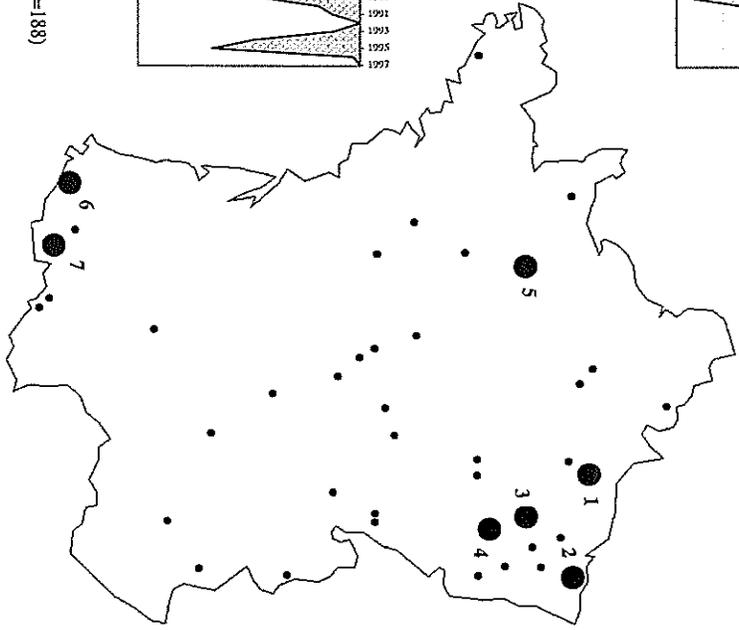
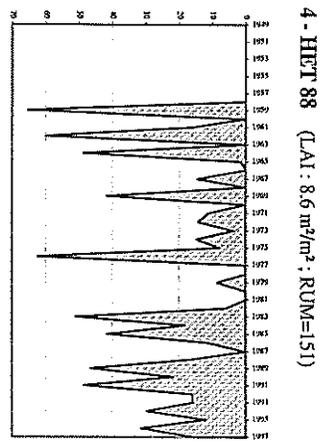
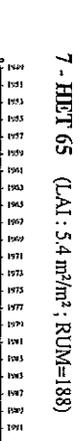
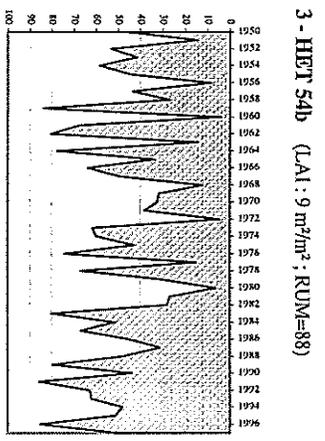
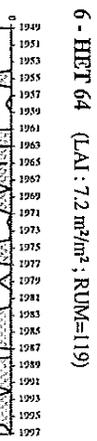
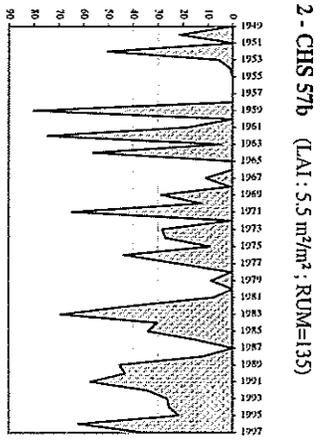
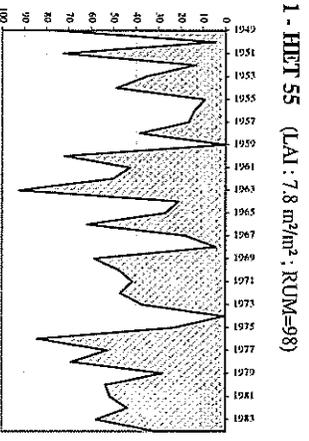
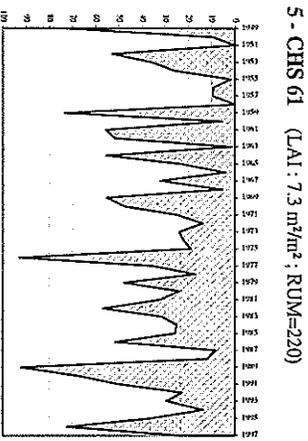


Figure 19. Evolution de l'indice de déficit de réserve selon la date pour 7 peuplements du réseau RENCOFOR. Le déficit est calculé sur la saison de croissance des arbres (de 180 à 190 jours) par différence entre la réserve critique (quand $REW = 0.4$) et la réserve actuelle du sol (RUM). LAI= Leaf Area Index. HET=hêtre ; CHS=chêne sessile. Le numéro suivant le code indique la région d'échantillonnage du peuplement. Les petits ronds noirs indiquent la localisation géographique des 34 autres peuplements étudiés.

8.2.2 Evolution régionale des déficits

L'analyse temporelle du déficit de réserve, estimée à partir d'un peuplement de feuillus présentant les mêmes caractéristiques pour toutes les stations, montre que parmi les 19 stations présentant une nette dérive climatique depuis 40-50 ans (température et/ou précipitations), seuls 3 cas se traduisent par une augmentation continue et significative du stress (Alençon, Le Mans et Tomblaine) (**Figure 20**). Pour les autres sites, les déficits sont très variables selon les périodes et n'augmentent pas systématiquement pour les périodes récentes.

Les dérives climatiques locales ont peu de répercussions sur la durée et l'intensité de la sécheresse subie par les peuplements

Au niveau national, seuls 3 cas se traduisent par une aggravation des contraintes pour un peuplement de feuillus et une hypothèse de réserve utile de 150 mm

Pour les peuplements du réseau, seuls 7 des 41 peuplements subissent une augmentation des contraintes

8.2.3 Effet sur le cycle phénologique

8.2.3.1 Sur l'ensemble des périodes disponibles (1949-1997 et 1956-1997)

Parmi les quatre modalités testées, c'est l'allongement de la saison de végétation de 24 jours (débourrement plus précoce de 12 jours et sénescence plus tardive de 12 jours) qui a le plus de répercussion sur le déficit de réserve des trois peuplements de hêtre étudiés (**Tableau 30**). Cet allongement se traduit par une augmentation du nombre de jours de déficits de +7%, +11% et +13% pour respectivement HET52, HET02 et HET60 ; le déficit de réserve augmentant de +7%, +15% et +12%.

Un débourrement plus précoce de 12 jours sans variation de la sénescence a peu d'effet pour les trois peuplements aussi bien sur le nombre de jours de stress (+3 à +6%) que sur le niveau du déficit (+5 à +6%).

Un décalage du cycle de croissance sans variation de la longueur de la saison (débourrement et sénescence plus précoces) n'a aucun effet pour le peuplement HET60 (RUM=110 mm). Ce décalage tend à minimiser le déficit (-5% à -10%) pour HET02 (RUM=274 mm) et à l'augmenter (+5%) pour HET52 (RUM=77 mm).

Une sénescence tardive n'a pas d'effet pour la placette HET52 mais tend à augmenter le déficit de 5 à 10% pour les deux autres peuplements.

8.2.3.2 Sur la période 1988-1997

Quelle que soit la modalité considérée, les effets du cycle phénologique sur le déficit de réserve de la placette HET52 (RUM=77 mm) sont faibles. Ils varient de +4% à +7% selon la modalité et le paramètre considérés (**Tableau 30**). Pour la placette HET60 (RUM=110 mm), une sénescence tardive se traduit par une augmentation

du nombre de jours de stress de +15% et une aggravation du déficit de +11%. Les autres modalités ont des effets peu importants. Pour la placette HET02 (RUM=274 mm), une sénescence tardive se traduit par une augmentation du nombre de jours de stress de 36%. Couplée à un débourrement précoce, le nombre de jours de déficit augmente de 30% et le déficit de réserve s'aggrave de 13%.

8.2.3.3 Sur les années à forts déficits de réserve (période 1988-1997)

Pour la placette HET60 (RUM=110 mm) et HET52 (RUM=77 mm), l'effet d'une modification du cycle phénologique est d'autant plus fort que le déficit de l'année est élevé (**Tableau 31**). Pour les trois peuplements, l'aggravation la plus importante du déficit est observée avec un allongement de 24 jours de la saison de croissance. Pour l'année 1989 (HET52), l'augmentation du déficit est de +9%. Pour 1990, il varie de +13% à +16.5% pour HET60 et HET02. Pour ces deux peuplements, il est à noter qu'un décalage du cycle phénologique (débourrement et sénescence précoces) minimise les déficits pour les deux années étudiées.

Parmi les quatre hypothèses testées, seul un allongement de la saison de végétation de 24 jours (débourrement précoce et sénescence tardive) a des répercussions notables sur le déficit de réserve des trois peuplements aussi bien sur le nombre de jours de stress que sur son intensité (+10% en moyenne pour la période 1949-1997)

Pour la période récente, les effets les plus importants sont observés pour un allongement de la saison de croissance essentiellement dû à une sénescence plus tardive. La précocité de débourrement ne joue pas un rôle important sur le déficit de réserve. Les effets de l'allongement de la saison sont d'autant plus négatifs que la réserve utile en eau du sol est élevée

L'effet d'une modification du cycle phénologique est d'autant plus fort que le déficit de l'année est élevé

Placette	Période	Jour Julien	Saison de végétation		Nb d'années		Nb de jours de stress			Déficit de réserve		
			Longueur (en jours)		sans déficit	avec déficit	min	moy	max	min	moy	max
HET 02 RUM=274 mm	1949-1997	108-288	180		14	35	2	68	124	0,6	28,7	87,1
		96-288	192	Déb. Précoce	12	37	1	70	150	0,1	30,5	92,7
		96-276	180	Déb. et Sén. précoces	13	36	1	62	132	0,4	27,0	84,7
		96-300	204	Déb. précoce et Sén. tardive	10	39	1	76	167	0,5	33,0	99,9
		108-300	192	Sén. tardive	13	36	2	75	137	0,6	30,2	94,3
	1988-1997	108-288	180		1	9	4	56	91	0,6	22,9	58,8
		96-288	192	Déb. précoce	1	9	5	62	101	0,1	22,9	63,2
		96-276	180	Déb. et Sén. précoces	2	8	21	58	82	1,8	22,2	57
		96-300	204	Déb. précoce et Sén. tardive	1	9	14	73	120	1,1	25,9	68,5
		108-300	192	Sén. tardive	1	9	13	76	106	1	23,1	63,9
HET 60 RUM=110 mm	1949-1997	108-288	180		0	49	8	106	146	1,2	63,2	115,2
		96-288	192	Déb. précoce	0	49	8	113	158	1,2	67,3	121,6
		96-276	180	Déb. et Sén. précoces	0	49	8	105	146	1,2	62,9	111,8
		96-300	204	Déb. précoce et Sén. tardive	0	49	30	120	166	2,5	70,6	130,2
		108-300	192	Sén. tardive	0	49	30	113	157	2,5	66,6	123,8
	1988-1997	108-288	180		0	10	93	119	145	44,8	74,5	115,2
		96-288	192	Déb. précoce	0	10	93	126	154	51,1	78,4	121,6
		96-276	180	Déb. et Sén. précoces	0	10	92	116	142	48,6	72,8	111,8
		96-300	204	Déb. précoce et Sén. tardive	0	10	93	136	166	51,7	82,9	130,7
		108-300	192	Sén. tardive	0	10	93	129	157	45,4	79,0	123,8
HET 52 RUM=77 mm	1956-1997	117-297	180		0	42	21	86	142	2,8	48,6	97,6
		105-297	192	Déb. précoce	0	42	21	90	149	2,8	51,0	104,2
		105-285	180	Déb. et Sén. précoces	0	42	16	87	140	2	49,0	94,6
		105-309	204	Déb. précoce et Sén. tardive	0	42	21	92	157	2,8	52,0	108,9
		117-309	192	Sén. tardive	0	42	21	88	154	2,8	49,8	103,5
	1988-1997	117-297	180		0	10	43	84	137	18,6	47,5	89,9
		105-297	192	Déb. précoce	0	10	43	89	141	18,1	50,4	96,6
		105-285	180	Déb. et Sén. précoces	0	10	43	88	140	14,9	49,6	94,6
		105-309	204	Déb. précoce et Sén. tardive	0	10	43	90	153	18,6	50,6	98
		117-309	192	Sén. tardive	0	10	43	86	149	19,1	47,7	91,2

Tableau 30. Effet d'un décalage phénologique de 12 jours sur le déficit de réserve pour trois peuplements de hêtre du réseau RENECOFOR. Pour chaque placette, les quatre modalités étudiées ont été appliquées sur l'ensemble de la période disponible (1949-1997 et 1956-1997) et sur la période récente 1988-1997. Cette dernière a été choisie car elle correspond aux années pour lesquelles le modèle phénologique prédit un débournement plus précoce de 12 jours (voir paragraphe 3.3.2.1). RUM = réserve utile maximale en eau du sol.

Placette	Longueur de la Saison de végétation	1990		1996			
		Déficit	Ecart (%)	Déficit	Ecart (%)		
HET 02 RUM=274 mm	180	58,8		35,1			
	192	63,2	7,5	39,8	13,4		
	180	57,0	-3,1	31,9	-9,1		
	204	68,5	16,5	47,1	34,2		
	192	63,9	8,7	41,7	18,8		
HET 60 RUM=110 mm	180	115,2		88,5			
	192	121,6	5,6	93,1	5,2		
	180	111,8	-3,0	85,5	-3,4		
	204	130,2	13,0	97,5	10,2		
	192	123,8	7,5	92,8	4,9		
Placette	Longueur de la Saison de végétation	1989		1991		1996	
		Déficit	Ecart (%)	Déficit	Ecart (%)	Déficit	Ecart (%)
HET 52 RUM=77 mm	180	89,9		77,3		64,1	
	192	96,6	7,5	80,8	4,5	64,1	0,0
	180	94,6	5,2	80,6	4,3	63,6	-0,8
	204	98,0	9,0	80,8	4,5	64,2	0,2
	192	91,2	1,4	77,3	0,0	64,2	0,2

Tableau 31. Effet d'un décalage phénologique de 12 jours sur le déficit de réserve des 5 années présentant les indices de stress les plus forts (période 1988-1997) pour trois peuplements de hêtre du réseau RENECOFOR. RUM = réserve utile maximale en eau du sol. Pour chaque placette et chaque année, la valeur en gras indique le déficit de réserve observé pour une saison "normale" de 180 jours sans décalage phénologique.

9 Années caractéristiques

9.1 Effets du compartiment anatomique (bois initial, bois final et cerne complet) et de l'unité d'expression du cerne (mm et cm²)

Pour toutes les espèces, le nombre d'années caractéristiques varie selon le compartiment anatomique du cerne (**Tableau 32**). Pour les chênes, les années caractéristiques s'expriment essentiellement à travers le bois final. Par rapport au cerne complet, la prise en compte de ce compartiment augmente de 25% le nombre d'années repères définies. Bien que de moindre importance, le même comportement est observé pour le pin sylvestre.

Pour le douglas, le pin maritime et le sapin pectiné, les deux compartiments présentent des comportements comparables et le nombre moyen d'années caractéristiques est plus grand pour le cerne complet que pour les deux compartiments considérés séparément.

Pour le hêtre, les extrêmes climatiques s'expriment essentiellement à travers le bois initial et sa prise en compte augmente le nombre d'années repères par rapport au cerne complet. Bien que de moindre importance, le même comportement est observé pour l'épicéa commun.

Pour toutes les espèces et les trois compartiments du cerne, le passage en surface de cerne (cm²) augmente le nombre d'années positives et diminue le nombre d'années négatives (**Tableau 32**). En moyenne, deux années positives supplémentaires sont définies à partir des surfaces pour tous les compartiments. Pour les années négatives, la diminution moyenne est de 2 pour le cerne complet et de 1 pour le bois initial et le bois final. Pour le nombre total d'années, le passage en surface définit 1 à 2 années supplémentaires selon le compartiment.

9.2 Relation avec la sensibilité moyenne (SM_i) des séries chronologiques

Le nombre d'années caractéristiques augmente parallèlement à la sensibilité moyenne des séries chronologiques (**Figure 21**). Pour les chênes, une augmentation de la sensibilité moyenne du bois final de 0.25 à 0.35 se traduit par un doublement du nombre d'années caractéristiques dans ce compartiment. Pour le pin sylvestre, la relation est également très significative non seulement pour le bois final mais également pour le cerne complet. Pour le hêtre, une augmentation de la sensibilité moyenne de 50% dans le cerne complet (0.2 à 0.3) correspond à une progression du nombre d'années caractéristiques de 5 à 30. La même relation est observable pour le bois initial. Pour l'épicéa commun, la relation s'exprime essentiellement à travers le bois final et ceci bien que, en moyenne, le nombre d'années repères calculé dans ce compartiment soit nettement inférieur à celui du bois initial et du cerne complet. Pour le douglas, le pin sylvestre et le sapin pectiné aucune relation statistiquement significative n'est observée.

9.3 Relation avec la réserve utile maximale en eau du sol (RUM)

Pour le hêtre, le nombre d'années caractéristiques augmente quand la réserve utile en eau du sol diminue (Figure 22). Pour la période récente 1955-1994, il double quand la réserve utile diminue de 200 à 50 mm.

Pour les autres espèces, le nombre d'années caractéristiques varie indépendamment de la réserve utile en eau du sol et ceci pour toutes les périodes analysées.

Pour toutes les espèces, le nombre d'années caractéristiques varie selon le compartiment anatomique du cerne considéré. Pour les chênes, les brusques variations de croissance sont plus fréquentes dans le bois final que dans le bois initial. C'est l'inverse pour le hêtre. Ces observations sont cohérentes avec les calculs des sensibilités moyennes qui montrent que le signal climatique s'exprime essentiellement dans le bois final pour le chêne et dans le bois initial pour le hêtre (voir paragraphe 5)

Pour toutes les espèces et les trois compartiments du cerne, le passage en surface de cerne (cm²) augmente le nombre d'années positives et diminue le nombre d'années négatives

Le nombre d'années caractéristiques augmente parallèlement à la sensibilité moyenne des séries chronologiques

Pour le hêtre, le nombre d'années caractéristiques augmente quand la réserve utile en eau du sol diminue

9.4 Variabilité inter-espèces et inter-régions

L'échantillon initial des 41 placettes retenues pour le calcul du bilan hydrique a été complété par 30 sites correspondant aux placettes de feuillus, d'épicéa et de sapin non prises en compte et aux placettes de pin sylvestre. En raison de chronologies trop courtes ou du nombre restreint de placettes disponibles, l'ensemble des placettes de douglas (n=6), de pin maritime (n=7), de pin laricio (n=2) et de mélèze (n=1) ont été exclues de l'analyse. L'étude a donc porté sur un sous-échantillon de 71 placettes (sur les 102 initiales) et sur la période 1955-1994, soit 40 ans (Tableau ci-dessous).

Espèce	Code	Nb de sites	Nb d'arbres
Chêne pédonculé	CHP	7	203
Chêne sessile	CHS	21	614
Hêtre	HET	19	569
Epicéa commun	EPC	6	178
Pin sylvestre	PS	8	240
Sapin pectiné	SP	10	298

Espèce	Nb de placettes d'arbres	période 1955-1994												Surface (cm²)												Différences entre mm/cm²											
		CC (mm)				BI (mm)				BF (mm)				CC (cm²)				BI (cm²)				BF (cm²)				CC				BI				BF			
		tot	pos	neg	tot	tot	pos	neg	tot	tot	pos	neg	tot	tot	pos	neg	tot	tot	pos	neg	tot	tot	pos	neg	tot	tot	pos	neg	tot	tot	pos	neg	tot	tot	pos	neg	tot
Chênes	30	884	11	6	5	20	10	10	3	2	1	25	13	12	20	12	8	4	3	1	26	15	11	2,1	-1,6	1,0	-0,4	1,8	-1,4								
Pin sylvestre	14	419	8	7	7	11	5	6	7	3	4	12	6	6	11	7	4	8	4	3	13	8	5	1,6	-1,3	1,4	-1,1	1,9	-0,9								
Douglas	6	179	4	2	2	4	1	2	4	2	2	3	1	2	5	4	1	5	4	1	5	4	1	2,8	-1,2	2,3	-1,3	2,5	-1,0								
Pin maritime	7	210	7	3	4	7	3	4	6	2	3	5	3	2	6	4	2	6	4	2	6	4	1	1,3	-2,1	1,6	-1,0	1,7	-1,0								
Sapin pectiné	11	328	9	4	5	17	8	9	13	6	7	11	6	5	18	11	7	15	9	6	13	8	5	2,9	-2,2	2,9	-0,7	1,8	-0,6								
Hêtre	20	598	13	7	6	23	13	10	25	13	12	5	2	3	24	15	9	25	15	10	6	3	3	2,5	-1,3	1,9	-1,6	0,7	-0,3								
Epicéa commun	11	328	8	3	5	10	4	6	10	4	5	4	2	2	11	7	4	10	7	4	4	3	1	2,7	-1,5	2,1	-1,3	0,7	-0,5								

Tableau 32. Nombre moyen d'années caractéristiques par espèce selon le compartiment anatomique et l'unité du cerne. CC = cerne complet ; BI = Bois initial ; BF = Bois final. Pos = années à forte croissance ; Neg = années à croissance réduite. La placette de mélèze et les deux placettes de pin laïc de Corse ont été exclues de l'analyse. Une année est caractéristique quand au moins 75% des arbres de la placette présentent une variation relative d'au moins 10% du cerne correspondant.

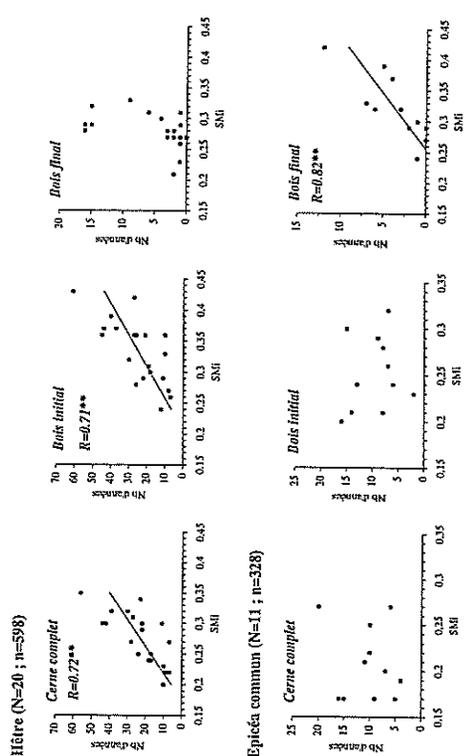
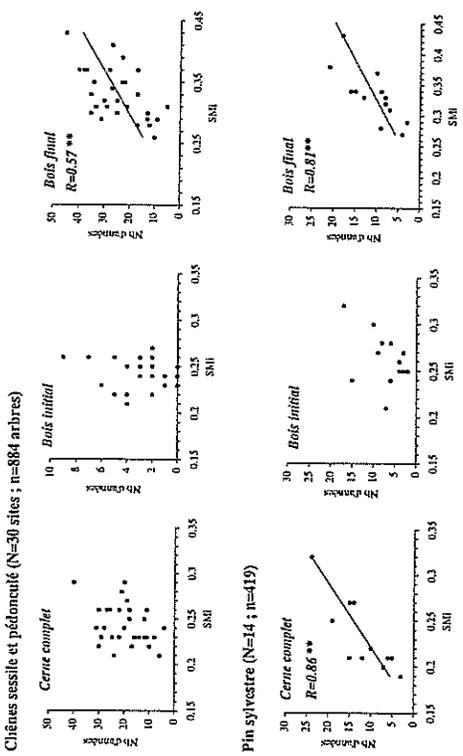


Figure 21. Relation entre la sensibilité moyenne (SMI) des séries chronologiques et le nombre d'années caractéristiques pour les différents compartiments anatomiques du cerne et selon l'espèce. Pour chaque placette, SMI correspond à la moyenne des sensibilités moyennes des séries individuelles (23 à 30 arbres par site). ** : significatif à 1%.

Figure 22. Relation entre le nombre d'années caractéristiques et la réserve utile maximale en eau du sol (RUM en mm) pour les chênes et le hêtre. Les graphes [A] présentent la relation observée pour les années caractéristiques calculées sur l'ensemble des dates disponibles et [B] pour la période commune 1955-1994. Pour chaque placette, le RUM a été calculée en prenant en compte la texture, l'épaisseur et la charge en cailloux de chaque horizon de sol (Bredtes et Ulrich 1997).

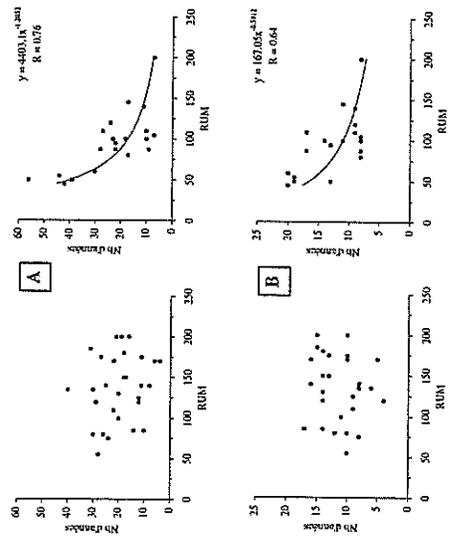


Figure 23. Relation entre le nombre d'années caractéristiques et la réserve utile maximale en eau du sol (RUM en mm) pour les chênes et le hêtre. Les graphes [A] présentent la relation observée pour les années caractéristiques calculées sur l'ensemble des dates disponibles et [B] pour la période commune 1955-1994. Pour chaque placette, le RUM a été calculée en prenant en compte la texture, l'épaisseur et la charge en cailloux de chaque horizon de sol (Bredtes et Ulrich 1997).

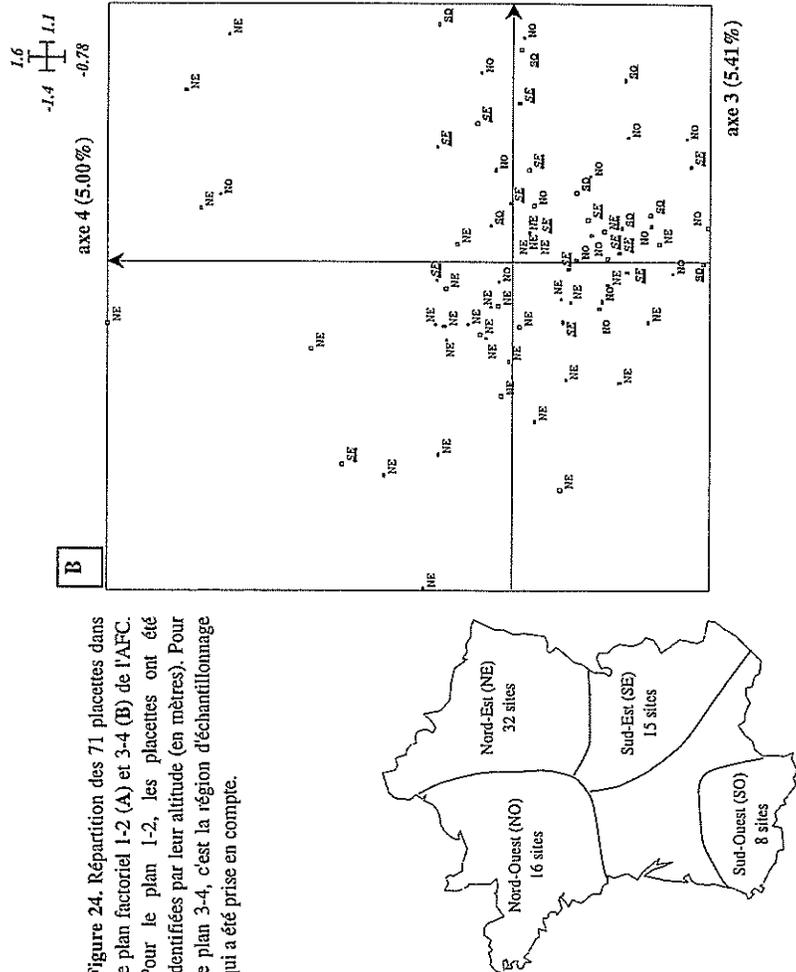
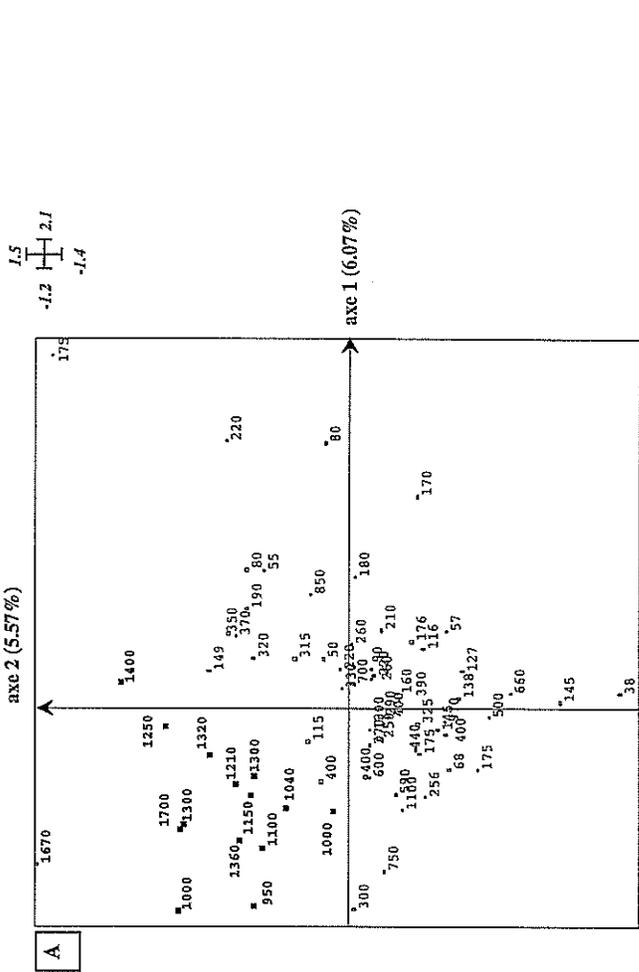


Figure 24. Répartition des 71 placettes dans le plan factoriel 1-2 (A) et 3-4 (B) de l'AFC. Pour le plan 1-2, les placettes ont été identifiées par leur altitude (en mètres). Pour le plan 3-4, c'est la région d'échantillonnage qui a été prise en compte.

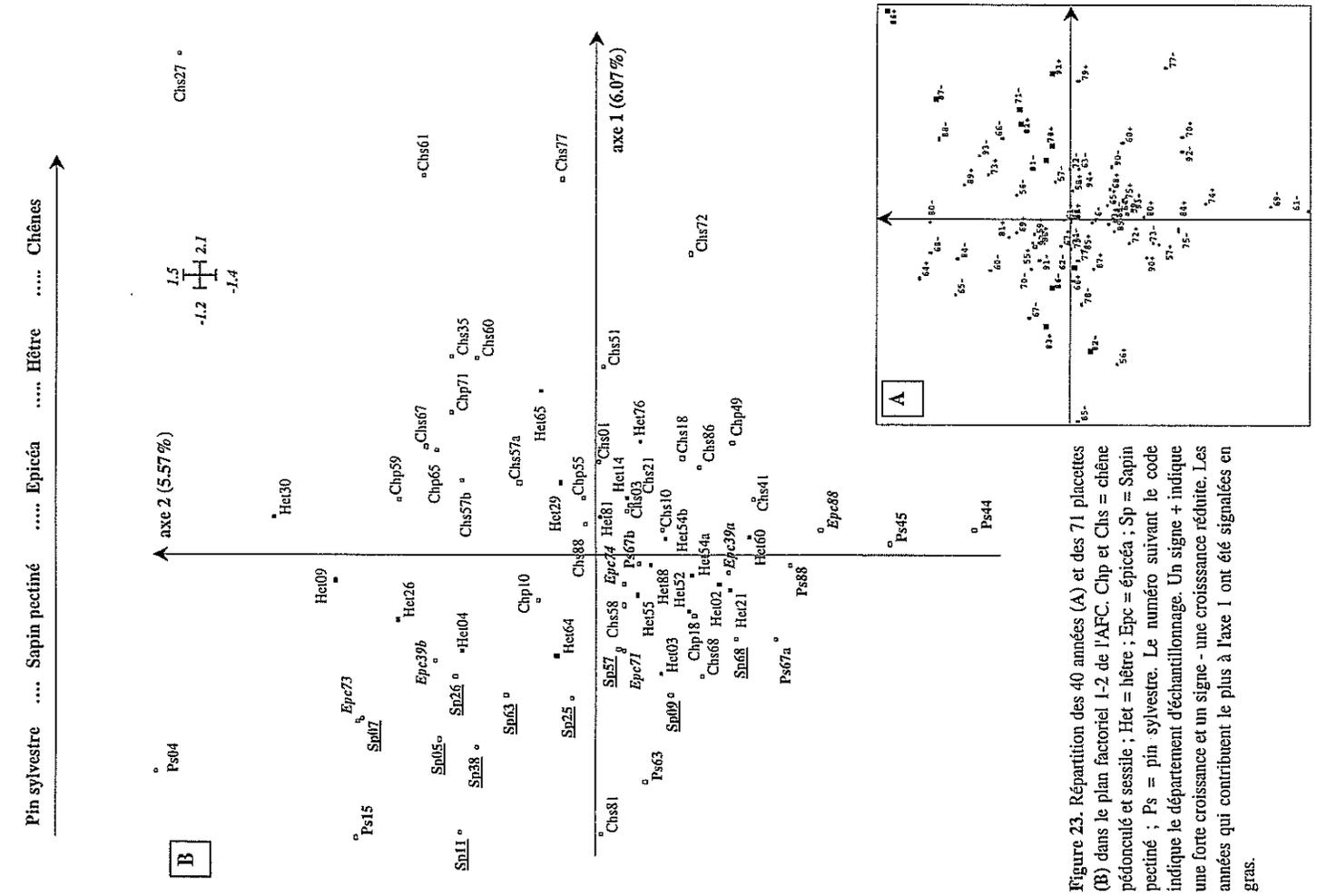
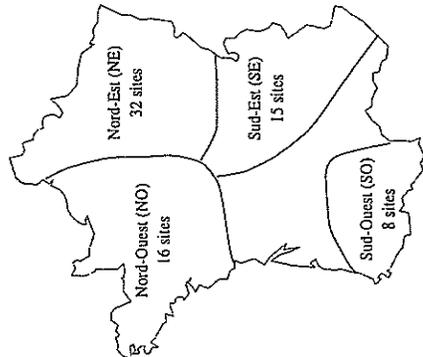


Figure 23. Répartition des 40 années (A) et des 71 placettes (B) dans le plan factoriel 1-2 de l'AFC. Chp et Chs = chêne pédonculé et sessile ; Het = hêtre ; Epc = épicea ; Sp = Sapin pectiné ; Ps = pin sylvestre. Le numéro suivant le code indique le département d'échantillonnage. Un signe + indique une forte croissance et un signe - une croissance réduite. Les années qui contribuent le plus à l'axe 1 ont été signalées en gras.

Pour cette analyse globale, les années caractéristiques ont été calculées à partir des données brutes exprimées en largeur. Elles correspondent aux années pour lesquelles la variation relative de croissance, d'au moins 10%, est observable pour au moins 75% des arbres de la placette.

9.4.1 Fréquence des années caractéristiques

Sur la période 1955-1994, 4 années apparaissent dans au moins 50% des sites. Il s'agit des années négatives 1976 (année présente dans 73% des cas), 1989 (58%) et 1962 (55%) et de l'année positive 1977 (51%). Pour les années 1976 et 1989, les réductions moyennes de croissance sont respectivement de -33% (-59% à -13%) et -20% (-47% à -19%). Pour l'année 1962, la croissance a été réduite en moyenne de 28% avec une amplitude de -15% à -52%. Même si sa fréquence d'apparition est légèrement moindre que celles des 4 années précédentes, l'année 1958 est également remarquable car elle apparaît positive dans près de 50% des sites avec une augmentation de croissance de +23% à +157% (moy = +56%).

Si l'année 1976 a été une année de faible croissance pour l'ensemble des espèces, la fréquence d'apparition d'une croissance réduite pour l'année 1989 est très forte pour le hêtre et faible pour les résineux (Tableau 33). Pour l'année 1958, les fortes croissances sont observées pour les placettes de feuillus alors que la majorité des placettes de résineux ne présente pas de comportement particulier. Pour l'année 1962, la fréquence d'apparition de faible croissance est nettement plus importante chez les résineux que chez les feuillus.

Tableau 33. Fréquence d'observation (en % du nombre N de placettes) des 5 années caractéristiques les plus remarquables par espèce. (période 1955-1994). ↑ : forte croissance ; ↓ : faible croissance.

Année		Toute espèce (N=71 sites)	Chênes (N=28)	Hêtre (N=19)	Epicéa (N=6)	Pin sylvestre (N=8)	Sapin pectiné (N=10)
1989	↑	6	7	5	0	12	0
	↓	52	50	79	17	37	40
1976	↑	0	0	0	0	0	0
	↓	73	75	84	50	63	70
1977	↑	48	25	74	50	25	80
	↓	3	7	0	0	0	0
1962	↑	0	0	0	0	0	0
	↓	55	46	37	100	50	90
1958	↑	49	71	63	0	0	30
	↓	0	0	0	0	0	0

Sur la période 1955-1994, le nombre d'années caractéristiques varie de 4 à 26 selon le site avec, en moyenne, 14 années remarquables par placette. En moyenne, 34% des années correspondent à une croissance remarquable (2 à 3 années tous les 10 ans). Par espèce, la fréquence des événements remarquables apparaît également variable. De 35% à près de 40% pour les feuillus, elle apparaît moindre pour les résineux (28% à 32%).

9.4.2 Analyse globale des effets espèce et région

Pour étudier la structuration des années caractéristiques selon l'espèce et la région, des analyses factorielles des correspondances (AFC) ont été effectuées sur un tableau comportant 40 années et 71 relevés. Pour chaque année, deux modalités ont été considérées : modalité + (forte croissance) et - (faible croissance). Pour chaque site, chaque modalité a été encodée 0 ou 1 selon que l'année était caractéristique ou non.

Les quatre premiers axes de l'AFC mise en œuvre sur le tableau de données ainsi construit expliquent 22.06% de la variance totale (inertie totale = 4.30). Leur signification a pu être mise en évidence grâce à l'étude de la répartition des années et des relevés le long de ces axes et aux différents descripteurs stationnels disponibles : espèce, région d'échantillonnage, pente, altitude, exposition...

Axe	Valeurs propres	% inertie	Somme
1	0.2611	0.0607	0.0607
2	0.2396	0.0557	0.1164
3	0.2327	0.0541	0.1705
4	0.2151	0.0500	0.2206

9.4.2.1 Interprétation du premier axe (6.07% de la variance totale)

La distribution des années le long des axes factoriels est présentée dans la **Figure 23**. Pour l'axe 1, les années qui contribuent le plus à sa détermination sont 1991, 1987, 1986, 1983, 1982, 1981, 1978, 1977, 1971, 1962. Pour chacune de ces années, l'axe 1 discrimine les croissances fortes (signe +) des croissances réduites (signe -). A l'extrémité négative de l'axe sont projetées les sites pour lesquels les années 1987, 1983, 1981, 1977 sont positives et les années 1991, 1986, 1982, 1982, 1981, 1978 et 1962 négatives. C'est l'inverse pour l'extrémité positive de l'axe.

Cette distribution des années traduit essentiellement une différenciation entre les espèces (**Figure 23**). En effet, à l'extrémité négative du premier axe extrait par l'AFC sont projetées les placettes de résineux (sapin pectiné, SP ; pin sylvestre, PS et épicéa commun, EPC). Sur la zone médiane apparaissent préférentiellement les placettes de hêtre (HET). A l'extrémité positive se trouvent les placettes de chênes (sessile et pédonculé, CHS et CHP).

La distribution des placettes le long de l'axe 1 permet ainsi de mettre en évidence un gradient de réactivité au climat lié à l'espèce.

9.4.2.2 Interprétation du deuxième axe (5.57% de la variance totale)

Les années contribuant le plus à l'élaboration du deuxième axe sont 1992, 1987, 1986, 1984, 1980, 1973, 1969, 1968, 1964. A l'extrémité négative de l'axe 2 sont projetées les sites pour lesquels les années 1992, 1986,

1973, 1969, 1964 correspondent à une forte croissance (signe +) et les années 1987, 1984, 1980, 1968 à une croissance réduite (signe -). C'est l'inverse pour l'extrémité positive de l'axe (Figure 23).

L'interprétation de l'axe 2 apparaît plus difficile. La prise en compte de l'altitude des relevés pour expliquer leur distribution le long de cet axe met en évidence une opposition entre les placettes d'altitude supérieure à 950 mètres, qui se positionnent préférentiellement dans la partie positive, et les autres sites (Figure 24). Il est cependant à noter que si on prend en compte la région d'échantillonnage de ces relevés, on constate également qu'ils correspondent en grande partie au quart sud-est de la France et s'opposent aux autres régions, nord-est et nord-ouest notamment.

9.4.2.3 Interprétation des axes 3 et 4 (5.41% et 5.0% de la variance totale)

Les années contribuant significativement à l'axe 3 sont, dans la partie négative, des faibles croissances en 1993, 1980, 1974, 1971, 1964 et des fortes croissances en 1994, 1981, 1972, 1965, 1955. Dans la partie positive, les années les plus discriminantes sont les années à forte croissance telles que 1983, 1974, 1970, 1964 et à croissances réduites comme 1987, 1979, 1977, 1969, 1968, 1965.

Cette distribution traduit l'opposition entre les placettes échantillonnées dans le quart nord-est de la France (pôle négatif de l'axe) et celles échantillonnées dans les autres régions (Figure 24). L'axe 3 semble donc pouvoir s'interpréter comme un gradient régional.

L'axe 4 est plus difficile à interpréter et tend à opposer les placettes de pin sylvestre aux autres placettes et en particulier aux autres placettes de résineux (figure non présentée).

9.4.2.4 Conclusions partielles

Cette première analyse globale met en évidence la pertinence des années caractéristiques pour l'étude du comportement des peuplements forestiers vis-à-vis des extrêmes climatiques. L'espèce et la région jouent des rôles majeurs dans la réponse des arbres au climat. Même si cette première analyse tend à montrer la prépondérance du facteur espèce sur le facteur région, il apparaît difficile de conclure nettement sur l'importance respective de ces deux paramètres ; l'écologie d'une espèce donnée conditionnant sa présence dans certaines régions et sur certains sites. Ainsi, l'analyse de la localisation des sites étudiés montre que les peuplements de chênes sont localisés dans la partie nord de la France (nord-est et nord-ouest). Les autres espèces se répartissant entre les régions nord-est et sud-est. D'une façon parallèle, l'altitude des placettes de chênes échantillonnées est faible (55 à 370 m) sur des sites à pente modérée (3% en moyenne). A l'opposé, les placettes d'épicéa et de sapin pectiné sont dans la majorité des cas sur des sites d'altitude à fortes pentes et dans la partie est de la France (nord-est et sud-est).

9.4.3 Analyses discriminantes des effets espèce et région

Afin de préciser l'importance respective des effets région et espèce, des analyses discriminantes ont été entreprises. Elles permettent de se focaliser sur des deux effets et de corroborer les résultats précédemment obtenus à partir de l'AFC sur données qualitatives. Pour chacun des effets étudiés (effet espèce et effet région), l'analyse discriminante inter-classes permet de mettre en évidence l'effet de la variable étudiée et l'analyse intra-classes d'étudier l'origine des variations dans chaque classe. Par exemple, si l'analyse inter-espèce met en évidence une discrimination des relevés selon ce paramètre, l'analyse intra-classe conjointe peut mettre en évidence un effet région pour chacune des espèces (et réciproquement pour l'effet région). Les modalités dans chacune des classes sont présentées ci dessous :

Effet espèce				Effet région			
Numéro de la classe	Espèce	Nb de placettes	Fréq (%)	Numéro de la classe	Région	Nb de placettes	Fréq (%)
1	CHP	7	9.9	1	NE	32	45.1
2	CHS	21	29.6	2	SE	15	21.1
3	HET	19	26.8	3	NO	16	22.5
4	EPC	6	8.4	4	SO	8	11.3
5	PS	8	11.3				
6	SP	10	14.1				

Au lieu d'utiliser des données qualitatives, cette technique analyse des données quantitatives. Ainsi, pour chaque année, c'est le pourcentage d'arbres présentant un comportement particulier qui a été pris en compte. Si l'année, qui possède deux modalités (+ forte croissance; - faible croissance), n'est pas caractéristique alors elle est encodée 0. Si l'année est caractéristique, c'est le pourcentage d'arbres présentant une forte et une faible croissance qui est encodé (par exemple, 1994+ 80 et 1994- 20). Comme précédemment, l'analyse porte sur 71 sites et sur la période 1955-1994.

Les quatre premiers axes de l'ACP mise en œuvre sur le tableau de données ainsi construit expliquent 39.31% de la variance totale (inertie totale = $6.757 \cdot 10^4$). Les années qui contribuent le plus à la définition de l'axe 1 (forte corrélation) sont majoritairement des années caractérisées par un régime pluviométrique particulier comme des sécheresses (1976, 1989, 1962) ou au contraire des pluies abondantes (1977, 1958, 1993) (Tableau 34). L'axe 2 semble exprimer davantage un gradient thermique car les années froides 1962, 1986 et 1956 contribuent d'une façon importante à la signification de l'axe. La répartition des 71 sites dans la plan factoriel 1-2 suggère une discrimination entre les différentes espèces : hêtre, chênes et pin sylvestre le long de l'axe 1 et sapin pectiné et épicéa le long de l'axe 2.

Tableau 34. Années caractéristiques contribuant le plus à la signification des axes 1 et 2 de l'ACP sur matrice de covariance (valeurs exprimées 1/10 000). + : forte croissance ; - : faible croissance (période 1955-1994).

Axe 1 (% inertie = 20.86%)			Axe 2 (% inertie = 7.15%)		
Année	signe	contribution	Année	signe	contribution
1976	-	2002	1969	+	1246
1989	-	770	1962	-	1195
1962	-	730	1986	-	1053
1977	+	659	1956	-	689
1958	+	598	1959	-	652
1959	-	290	1964	+	518
1961	+	261	1975	+	367
1993	+	236	1980	+	310
1955	+	227	1978	+	310
1986	-	167	1955	+	305
1987	+	164	1965	-	288
1975	+	146	1984	-	257
1971	+	129	1977	+	255
1955	-	122	1965	+	250
1978	+	118	1970	-	213

9.4.3.1 Etude de l'effet espèce

a. Analyse inter-espèces

Avant de décrire des différences éventuelles entre les classes, on peut s'interroger sur la signification statistique de la variabilité inter-classes. Le test mis en œuvre calcule pour chaque répartition aléatoire des individus (ici 71 sites) dans les groupes (ici 6 espèces), l'inertie inter-classe totale (Test de permutation multivarié de Romesburg). La proportion de valeurs calculées (simulées) inférieures ou supérieures à la valeur d'inertie observée permet de conclure quant à la validité de l'analyse. Si la grande majorité des valeurs simulées est inférieure à la valeur observée ceci indique une ressemblance globalement plus forte entre individus d'une même classe et justifie la description des différences par l'analyse discriminante. Le test est hautement significatif. Il existe donc bien forte une variabilité entre les espèces.

Nombre de permutations aléatoires : 1000
 Valeurs calculées minimum : 3437.4
 Nombre de simulations $X < \text{obs}$: 1000
 Nombre de simulations $X \gg \text{obs}$: 0

Inertie inter-classes observée (obs) : 10170.2
 maximum : 10170.2
 (fréquence : 1.00)
 (fréquence : 0.00)

L'inertie inter-classes vaut $1.017 \cdot 10^4$ (soit 15.05% de l'inertie totale qui vaut $6.757 \cdot 10^4$) dont 61% s'exprime sur les deux premiers axes (somme des deux valeurs propres = $6.2139 \cdot 10^3$).

Axe	Valeurs propres	% inertie	Somme
1	$3.6656 \cdot 10^3$	0.3604	0.3604
2	$2.5483 \cdot 10^3$	0.2506	0.6110
3	$1.9355 \cdot 10^3$	0.1903	0.8013
4	$1.0639 \cdot 10^3$	0.1046	0.9059

L'analyse inter-classes confirme l'effet espèce mis en évidence précédemment (**Figure 25**). Le premier axe discrimine nettement les placettes de feuillus et de résineux en opposant nettement le sapin pectiné aux chênes. Le second axe oppose nettement le hêtre aux autres espèces. Pour le chêne, l'analyse ne permet pas de discriminer les deux espèces qui, dans nos conditions d'échantillonnage, apparaissent donc avoir le même comportement.

La matrice des distances entre les différentes classes au sens de la métrique de Mahalanobis (inverse de la matrice de covariances intra-classes) est présentée dans la tableau suivant. Ces distances fournissent une image globale de la configuration des poids moyens.

	CHP	CHS	HET	EPC	PS	SP
CHP	0					
CHS	226.81	0				
HET	290.89	252.21	0			
EPC	518.83	458.1	379.66	0		
PS	534.59	547.16	394.45	231.59	0	
SP	505.45	482.25	253.58	183.73	215.9	0

b. Analyse intra-espèces

L'inertie intra-classes vaut $5.740 \cdot 10^4$ soit 84.95% de l'inertie totale dont 18.88% s'exprime sur les deux premiers axes.

Axe	Valeurs propres	% inertie	Somme
1	$6.7170 \cdot 10^3$	0.1170	0.1170
2	$4.1223 \cdot 10^3$	0.0718	0.1888
3	$3.7391 \cdot 10^3$	0.0651	0.2540
4	$3.3074 \cdot 10^3$	0.0576	0.3116

L'analyse intra-classes regroupe, pour chaque espèce, les relevés selon leur région d'échantillonnage (**Figure 26**). Pour les placettes de chêne sessile, l'analyse discrimine nettement les sites de l'est des placettes de l'ouest. Pour le hêtre, les placettes du nord-est s'opposent à celles du sud-est et sud-ouest.

c. Décomposition de la variance

La part de chacune des années dans l'inertie inter-classes et intra-classes est présentée dans le **Tableau 35**. 13 années participent pour au moins 20% dans la variabilité entre les 6 espèces. Ce sont les années caractérisées par une croissance réduite telles que 1993, 1989 (hêtre et chênes), 1986 (sapin, épicéa, hêtre), 1981, 1969 et 1959 et des années à forte croissance comme 1984 (pin sylvestre), 1982, 1981, 1978, 1977, 1958 (chênes et hêtre) et 1957 (pin sylvestre).

Figure 26. Répartition des placettes de chaque espèce dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante intra-espèce réalisée après l'ACP sur matrice de covariance. Le nuage est projeté sur le plan optimisant la variance moyenne par groupe de coordonnées. Le numéro indique la région d'échantillonnage de la placette.

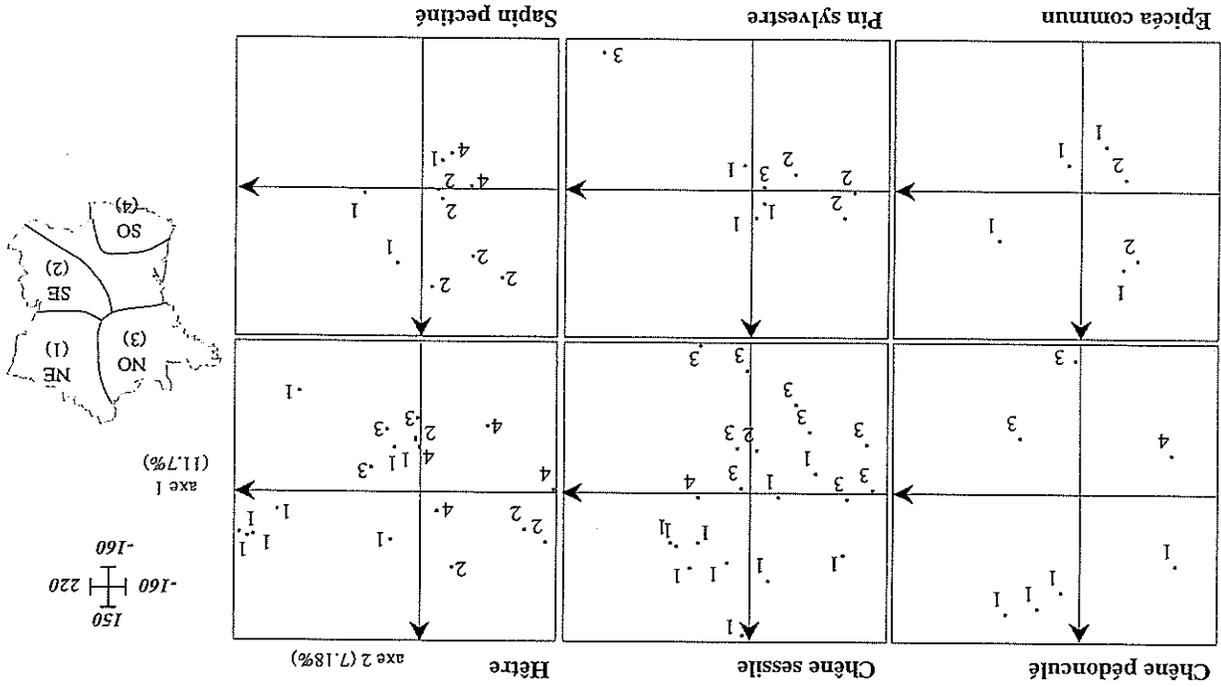
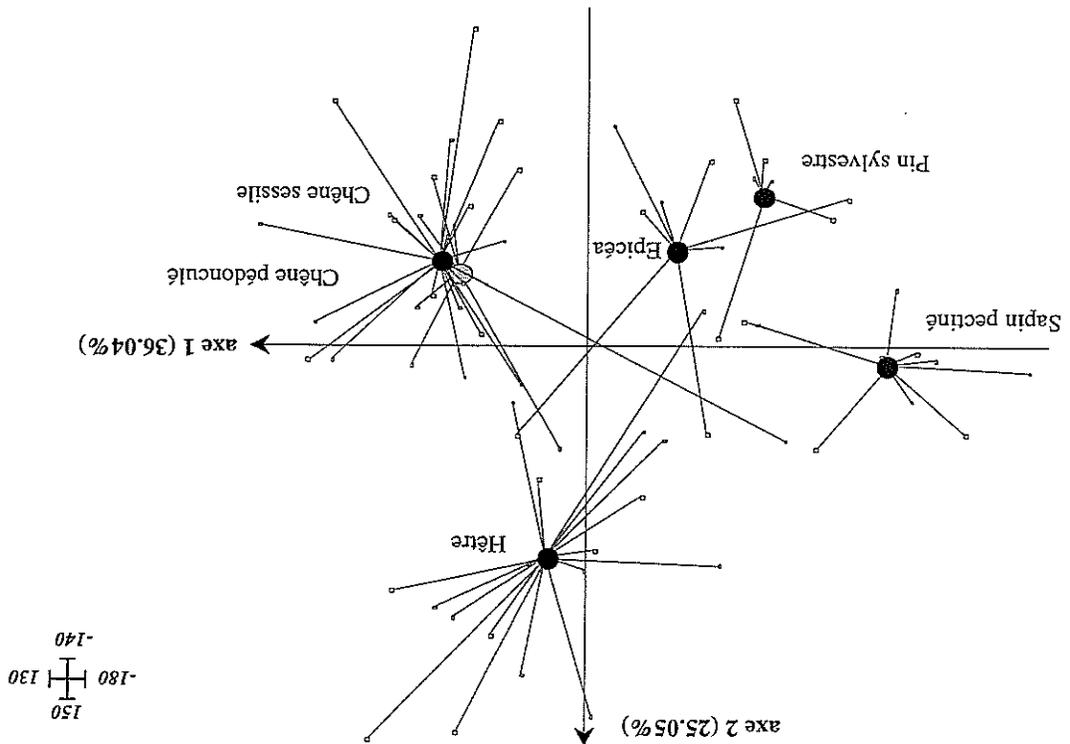


Figure 25. Répartition des 6 espèces dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante inter-espèce réalisée après l'ACP sur matrice de covariance. Les 71 placettes, figurées par des points, sont positionnées par des codes de variance 1 optimisant la variance inter-espèce. Le rond représente le centre de gravité pour chaque espèce.



Année	Inertie inter-espèce	Inertie intra-espèce	Inertie totale	Part de l'année (en %) dans l'inertie		Chênes		Hêtre		Épicéa		Pin sylvestre		Sapin		
				inter-espèce	intra-espèce	% sites	% arbres	% sites	% arbres	% sites	% arbres	% sites	% arbres	% sites	% arbres	
1993	-	94,3	150,0	244,3	38,6	61,4	57*	59*	79	87	50	80	75	65	40	74
1989	-	367,8	1412,0	1779,8	20,7	79,3	57	76	42	85	50	80			90	96
1986	-	655,8	1113,0	1768,8	37,1	62,9										
1984	+	195,4	503,2	698,6	28,0	72,0										
1982	+	430,3	1129,8	1560,1	27,6	72,4	57	83								
1981	+	114,6	415,8	530,4	21,6	78,4										
1981	-	287,3	1125,8	1413,1	20,3	79,7	43	70	42	86	50	83			80	88
1978	+	370,9	1239,4	1610,3	23,0	77,0	54	82	47	75	50	83				
1977	+	440,9	1357,4	1798,3	24,5	75,5			68	84	50	75				
1969	-	80,9	223,1	304,0	26,6	73,4										
1959	-	396,5	1368,7	1765,2	22,5	77,5			68	88						
1958	+	673,1	1314,7	1987,8	33,9	66,1	71	90	58	88						
1957	+	266,9	448,2	715,1	37,3	62,7							63			81
		1.017 10 ⁴	5.74 10 ⁴	6.757 10 ⁴	15,1	84,9										

Tableau 35. Décomposition du poids de chaque année dans l'analyse discriminante de l'effet espèce (réalisée après l'ACP). L'inertie inter-espèce représente 15% de l'inertie totale. Seules les 13 années participant pour au moins 20% dans la discrimination des 6 espèces sont présentées. Pour chaque espèce, les % sites et % arbres représentent les fréquences d'observation de l'année par rapport au nombre total de placettes et d'arbres disponibles. Seules les années observées dans au moins 40% des sites sont signalées. Pour le sapin, l'année 1986 présente une réduction de croissance pour 90 % des placettes (N=10) et 96% des arbres échantillonnés (n=298). * L'année 1993 présente une croissance réduite pour les placettes de chêne pédonculé seulement.

Année	Inertie inter-région	Inertie intra-région	Inertie totale	Part de l'année (en %) dans l'inertie		Nord-est		Nord-ouest		Sud-est		Sud-ouest	
				inter-région	intra-région	% sites	% arbres	% sites	% arbres	% sites	% arbres	% sites	% arbres
1994	+	229,5	1143,2	1372,7	16,7	83,3			44	84			
1992	-	225,2	662,5	887,7	25,4	74,6			69	61			
1991	+	106,3	426,2	532,5	20,0	80,0			38	66			38
1990	-	229,5	751,3	980,8	23,4	76,6			56	75			52
1986	-	294,0	1474,8	1768,8	16,6	83,4	38	77			53	93	63
1984	-	238,4	820,8	1059,2	22,5	77,5					53	83	89
1983	+	88,5	460,3	548,8	16,1	83,9							38
1983	-	287,8	1108,4	1396,1	20,6	79,4	47	86					88
1979	-	146,5	477,9	624,3	23,5	76,5							5,00
1976	-	300,0	1345,5	1645,5	18,2	81,8	88	93	75	91	53	78	5,00
1969	+	264,2	1377,4	1641,6	16,1	83,9					67	87	84
1965	+	371,9	1067,7	1439,5	25,8	74,2	53	83					
1965	-	122,9	638,6	761,5	16,1	83,9							
1964	+	325,1	689,6	1014,7	32,0	68,0					53	90	
1964	-	366,7	1008,9	1375,6	26,7	73,3	47	88					38,00
1962	-	288,6	1607,3	1895,9	15,2	84,8	66	87					84
1958	+	294,4	1693,4	1987,8	14,8	85,2	59	90	63	84	73	87	5,00
		7348,3	60227	67575	10,9	89,1							91

Tableau 36. Décomposition du poids de chaque année dans l'analyse discriminante de l'effet région (réalisée après l'ACP). L'inertie inter-région représente 11% de l'inertie totale. Seules les 17 années participant pour au moins 15% dans la discrimination des 4 régions sont présentées. Pour chaque région, les % sites et % arbres représentent les fréquences d'observation de l'année par rapport au nombre total de placettes et d'arbres disponibles. Seules les années observées dans au moins 38% des sites sont signalées. Pour le nord-est, l'année 1983 présente une réduction de croissance pour 47 % des placettes (N=32) et 86% des arbres échantillonnés.

9.4.3.2 Etude de l'effet région

a. Analyse inter-région

L'analyse porte sur les 71 relevés regroupés en 4 classes définies par 4 grandes régions : nord-est (NE), nord-ouest (NO), sud-est (SE) et sud-ouest (SO). Comme pour le cas précédent, il est indispensable de tester préalablement la signification statistique de la variabilité inter-classes, c'est-à-dire ici de la variabilité inter-régions. Les résultats présentés ci-dessous montrent la signification du test et donc la réalité de l'effet région.

Nombre de permutations aléatoires : 1000	Inertie inter-classes observée (obs) : 7348
Valeurs calculées minimum : 1888	maximum : 7348
Nombre de simulations $X < \text{obs}$: 1000	(fréquence : 1.00)
Nombre de simulations $X \geq \text{obs}$: 0	(fréquence : 0.00)

L'inertie inter-classes vaut $7.348 \cdot 10^3$ (soit 10.87% de l'inertie totale) dont 84% s'exprime sur les deux premiers axes (somme des deux valeurs propres = $6.1866 \cdot 10^3$).

Axe	Valeurs propres	% inertie	Somme
1	$3.5248 \cdot 10^3$	0.4797	0.4797
2	$2.6618 \cdot 10^3$	0.3622	0.8419
3	$1.1617 \cdot 10^3$	0.1581	1.0000

L'analyse discriminante inter-classes confirme l'effet région mis en évidence précédemment (Figure 27). Le premier axe sépare nettement les placettes du nord de la France (nord-ouest et nord-est) des placettes du sud (sud-ouest et sud-est). L'axe deux oppose la région est (sud-est et principalement nord-est) à la région ouest (sud-ouest et nord-ouest). La matrice des distances entre les différentes classes au sens de la métrique de Mahalanobis (inverse de la matrice de covariances intra-classes) est présentée dans la tableau suivant. Ces distances fournissent une image globale de la configuration des poids moyens.

	NE	NO	SO	SE
NE	0			
NO	104.02	0		
SO	149.68	123.73	0	
SE	172.67	205.64	341.52	0

b. Analyse intra-régions

L'inertie intra-classes vaut $6.023 \cdot 10^4$ soit 89% de l'inertie totale dont 17.4% s'exprime sur les deux premiers axes. Pour chaque région, le regroupement des sites se fait selon l'espèce constituant le peuplement (Figure 28).

Axe	Valeurs propres	% inertie	Somme
1	$6.2758 \cdot 10^3$	0.1042	0.1042
2	$4.2104 \cdot 10^3$	0.0699	0.1741
3	$3.7515 \cdot 10^3$	0.0623	0.2364
4	$3.3183 \cdot 10^3$	0.0551	0.2915

c. *Décomposition de la variance*

Un total de 17 années participent pour au moins 15% dans la variabilité entre les 4 régions. Ce sont les années caractérisées par une croissance réduite telles que 1992, 1990, 1986, 1984, 1983, 1979, 1976, 1965, 1964 et 1962 et des années à forte croissance comme 1994, 1991, 1983, 1969, 1965, 1964 et 1958 (Tableau 36).

9.4.3.3 *Décomposition de la variance des effets espèce et région*

En conclusion, il apparaît un effet espèce et un effet région significatif dans la réponse des peuplements forestiers aux extrêmes climatiques. La dernière étape de l'analyse consiste donc à déterminer le poids de chaque effet dans la discrimination de sites et à décomposer la part de chaque année dans les deux effets analysés. En considérant que l'inertie totale du tableau initial de données (71 relevés et 40 années) est, dans chaque cas, la somme de l'inertie inter-classes et de l'inertie intra-classes, on peut appliquer les équations suivantes pour « quantifier » les deux effets :

Effet	Inertie totale (x10000)	Intra classe + Inter classe (x 10000)
espèce (6 espèces)	6.757 =	1.017 + 5.74
région (4 régions)	6.757 =	0.735 + 6.022

Chaque analyse décompose donc la variabilité totale en une variabilité régionale et un comportement lié à l'espèce. La majeure partie de cette variabilité est prise en compte par la première valeur propre de chaque analyse.

Analyse	Valeur propre du premier axe (x 10000)
(1) ACP initiale	1.4506
(2) Inter-espèces	0.3666
(3) Intra-espèces	0.6717
(4) Inter-régions	0.3525
(5) Intra-régions	0.6276

L'analyse de ces valeurs propres montre que les deux effets ont le même poids dans la réponse des arbres aux extrêmes climatiques. Par rapport à la valeur de l'ACP initiale (1), on perd à peu près autant de variabilité en éliminant l'effet espèce (3) que l'effet région (5) (valeurs propres comparables). D'une façon identique, l'effet espèce seul (2) et de l'effet région seul (4) expliquent globalement le même taux de variabilité. Globalement, les deux effets ainsi que leur interaction expliquent 50% de la variance des années caractéristiques.

Sur la période 1955-1994, les années 1958, 1962, 1976, 1977 et 1989 sont les années caractéristiques les plus fréquentes

La prise en compte des années caractéristiques permet de discriminer nettement les espèces et les régions d'échantillonnage des peuplements. Ces deux paramètres et leur interaction expriment 50% de la variance des années caractéristiques

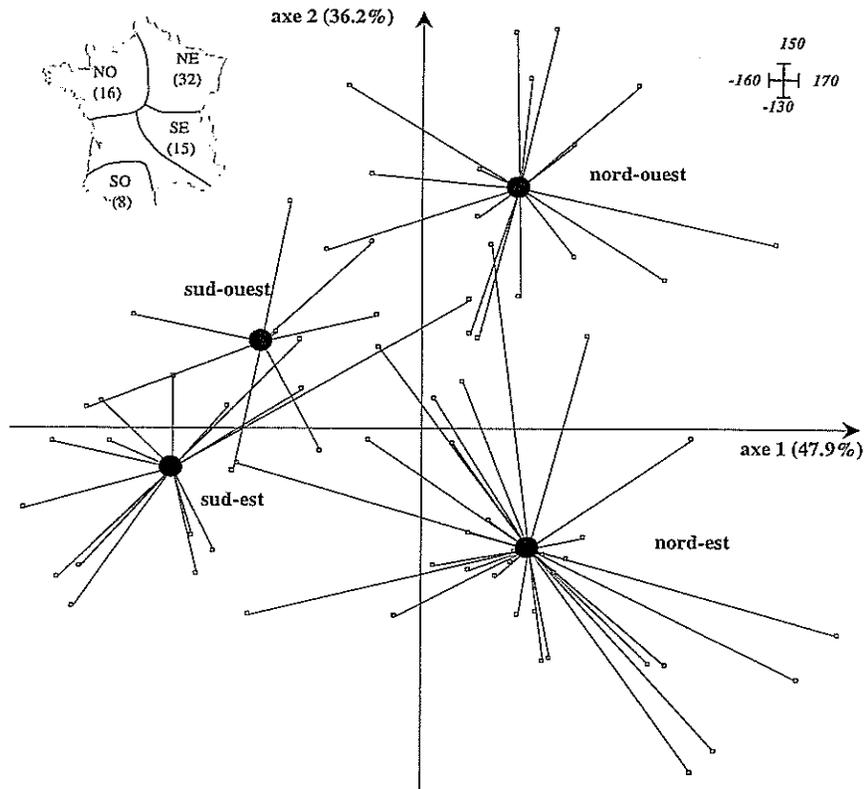


Figure 27. Répartition des 4 régions dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante inter-région réalisée après l'ACP sur matrice de covariance. Les 71 placettes, figurées par des points, sont positionnées par des codes de variance I optimisant la variance inter-région. Le rond représente le centre de gravité pour chaque région.

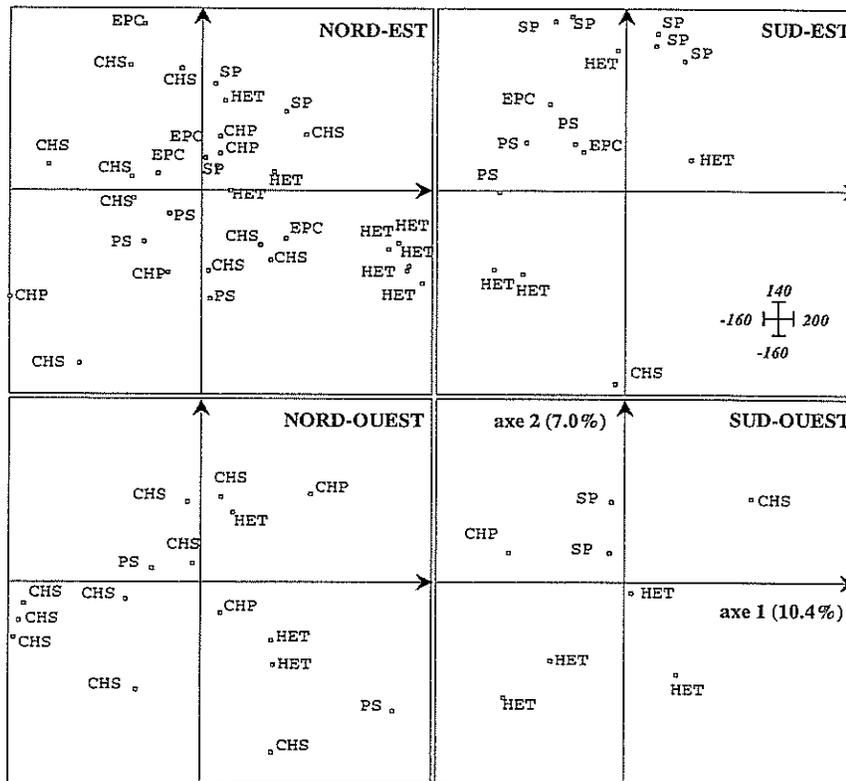


Figure 28. Répartition des espèces de chaque région dans le plan factoriel 1-2 de l'analyse discriminante intra-région réalisée après l'ACP. Le nuage est projeté sur le plan optimisant la variance moyenne par groupe de coordonnées.

Placette	Période de calcul	Nb de jours moy	Déficit annuel moy	Nb de jours de déficit annuel				Nb de jours de déficit annuel				Nb de jours de déficit annuel				
				tot	Fréq	pos	Fréq	tot	Fréq	pos	Fréq	tot	Fréq	pos	Fréq	
CHP 18	1950-1994	64	0,35	11	0,24	5	0,11	6	0,13	15	0,33	9	0,20	6	0,13	
CHP 49	1950-1994	101	0,55	18	0,40	8	0,18	10	0,22	18	0,40	9	0,20	9	0,20	
CHP 59	1949-1994	55	0,31	18,3	0,37	8	0,17	9	0,20	15	0,33	8	0,17	7	0,15	
CHP 65	1956-1994	42	0,22	12,9	0,21	2	0,05	6	0,15	5	0,13	3	0,08	2	0,05	
CHS 01	1950-1994	47	0,26	19,1	0,27	7	0,16	5	0,11	12	0,27	7	0,16	5	0,11	
CHS 03	1952-1994	64	0,35	26,5	0,23	5	0,12	5	0,12	12	0,28	6	0,14	6	0,14	
CHS 18	1950-1994	101	0,55	55,1	0,33	7	0,16	8	0,18	14	0,31	8	0,18	6	0,13	
CHS 51	1962-1994	86	0,48	48,2	0,24	5	0,15	3	0,09	8	0,24	5	0,15	3	0,09	
CHS 57a	1950-1994	51	0,28	15,7	0,42	10	0,22	9	0,20	19	0,42	10	0,22	9	0,20	
CHS 57b	1950-1994	62	0,34	22,4	0,27	7	0,16	5	0,11	12	0,27	7	0,16	5	0,11	
CHS 58	1952-1994	61	0,33	23,7	0,15	0,35	7	0,16	8	0,19	18	0,42	11	0,26	7	0,16
CHS 61	1949-1994	77	0,42	33,5	0,11	0,24	7	0,15	4	0,09	10	0,22	7	0,15	3	0,07
CHS 72	1949-1994	73	0,39	30,7	8	0,17	4	0,09	4	0,09	10	0,22	6	0,13	4	0,09
CHS 81	1949-1994	97	0,51	55,1	0,37	6	0,13	11	0,24	18	0,39	8	0,17	10	0,22	
CHS 86	1949-1994	105	0,57	65,1	0,28	5	0,11	8	0,17	14	0,30	7	0,15	7	0,15	
EPC 39a	1949-1994	35	0,10	19,9	11	0,24	4	0,09	7	0,15	13	0,28	7	0,15	6	0,13
EPC 39b	1949-1994	34	0,09	14,9	10	0,22	6	0,13	4	0,09	10	0,22	6	0,13	4	0,09
EPC 71	1952-1994	55	0,15	23,5	21	0,49	10	0,23	11	0,26	21	0,49	12	0,28	9	0,21
EPC 73	1960-1994	97	0,27	45,6	5	0,14	1	0,03	4	0,11	6	0,17	2	0,06	4	0,11
EPC 88	1963-1994	68	0,19	29,9	5	0,16	2	0,06	3	0,09	5	0,16	2	0,06	3	0,09
HET 02	1949-1994	70	0,39	26,1	9	0,20	4	0,09	5	0,11	9	0,20	7	0,15	2	0,04
HET 03	1950-1994	90	0,49	44,9	9	0,20	5	0,11	4	0,09	10	0,22	7	0,16	3	0,07
HET 04	1968-1994	115	0,61	79,2	5	0,19	2	0,07	3	0,11	5	0,19	2	0,07	3	0,11
HET 09	1956-1994	38	0,20	15,5	14	0,36	9	0,23	5	0,13	14	0,36	9	0,23	5	0,13
HET 14	1952-1994	46	0,25	17,6	13	0,30	8	0,19	5	0,12	13	0,30	7	0,16	6	0,14
HET 21	1956-1994	88	0,49	49,1	18	0,46	11	0,28	7	0,18	19	0,49	12	0,31	7	0,18
HET 29	1968-1994	76	0,41	34,7	8	0,27	5	0,17	3	0,10	8	0,27	5	0,17	3	0,10
HET 52	1956-1994	87	0,48	49,3	19	0,49	10	0,26	9	0,23	17	0,44	10	0,26	7	0,18
HET 54a	1950-1994	74	0,41	28,1	19	0,42	10	0,22	9	0,20	21	0,47	12	0,27	9	0,20
HET 54b	1950-1994	87	0,48	45,7	23	0,51	14	0,31	9	0,20	21	0,47	15	0,33	6	0,13
HET 55	1962-1994	82	0,46	39,9	6	0,18	4	0,12	2	0,06	6	0,18	4	0,12	2	0,06
HET 60	1949-1994	106	0,59	62,4	21	0,46	11	0,24	10	0,22	22	0,48	12	0,26	10	0,22
HET 64	1955-1994	37	0,19	13,6	9	0,23	6	0,15	3	0,08	10	0,25	8	0,20	2	0,05
HET 65	1956-1994	46	0,24	16,1	8	0,21	4	0,10	4	0,10	7	0,18	4	0,10	3	0,08
HET 88	1956-1994	58	0,32	23,9	8	0,21	4	0,10	4	0,10	7	0,18	4	0,10	3	0,08
SP 05	1953-1994	99	0,27	50,3	12	0,29	6	0,14	6	0,14	12	0,29	6	0,14	6	0,14
SP 07	1949-1994	79	0,22	43,9	10	0,22	5	0,11	5	0,11	10	0,22	5	0,11	5	0,11
SP 09	1956-1994	38	0,10	18,2	4	0,10	3	0,08	1	0,03	5	0,13	4	0,10	1	0,03
SP 57	1950-1994	68	0,19	29,6	9	0,20	4	0,09	5	0,11	13	0,29	9	0,20	4	0,09
SP 63	1949-1994	113	0,31	55,6	7	0,15	4	0,09	3	0,07	7	0,15	4	0,09	3	0,07
SP 68	1963-1994	64	0,18	32,6	6	0,19	1	0,03	5	0,16	5	0,16	1	0,03	4	0,13

Tableau 37. Caractéristiques des déficits de réserve (nombre d'années, de jours et niveau des stress) et des années caractéristiques par peuplement. Pour le nombre moyen de jours de stress, la fréquence est le rapport entre le nombre moyen de jours avec déficit et la longueur de la saison de végétation. Les années caractéristiques ont été calculées sur le cerne complet exprimé en mm et cm². La fréquence est le rapport entre le nombre d'années caractéristiques et le nombre total d'années disponibles.

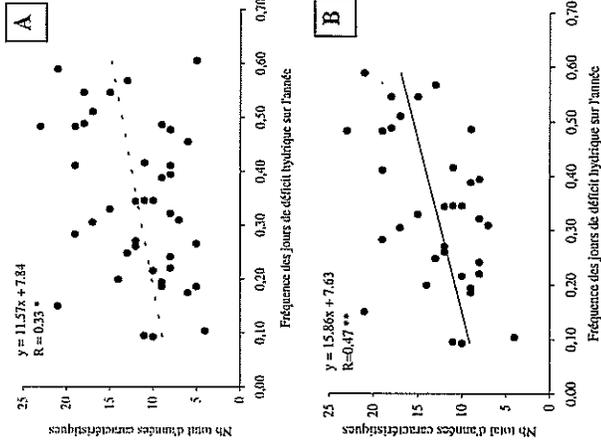
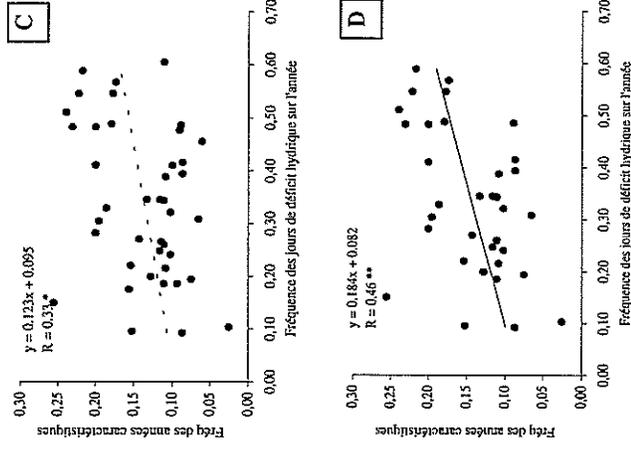
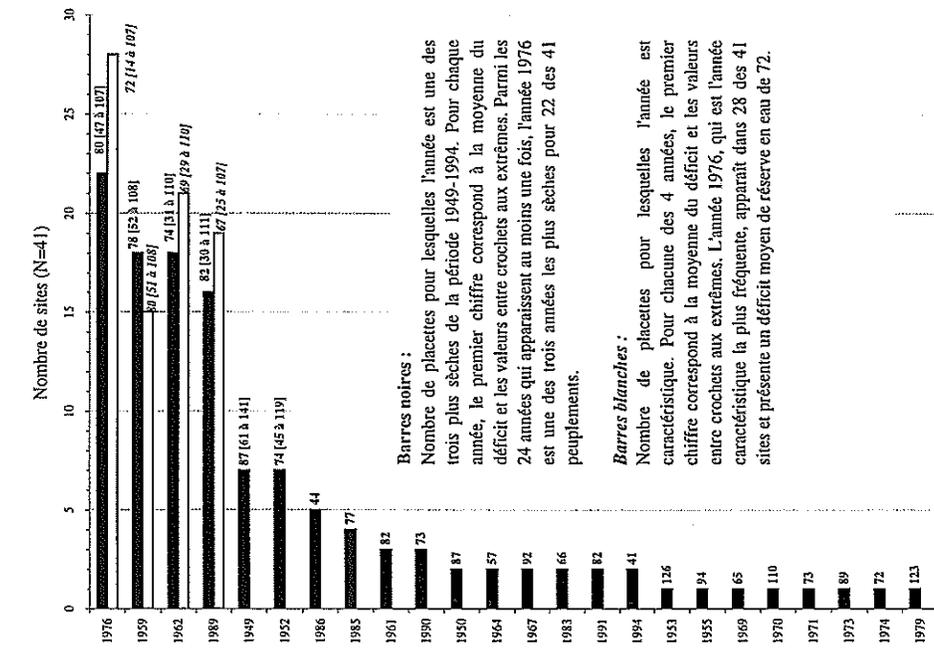


Figure 29. Relation entre la fréquence annuelle moyenne des jours de déficit de réserve en eau et le nombre total ou la fréquence des années caractéristiques (calculées sur la largeur du cerne complet). Pour les graphes [A] et [C], les 41 placettes ont été prises en compte. Pour les graphes [B] et [D], seules les 34 placettes disposant d'au moins 39 années de données météorologiques ont été prises en compte (39 à 46 années). Toutes les espèces ont été confondues. * : significatif à 5%; ** : significatif à 1%.



Code	Années les plus sèches			Déficit en eau			Réduction de croissance (%)			Déficit moyen	Réduction moyenne (%)
CHP 18	1976	1962	1989	68	63	63	-41	-32	-32	65	-35
CHP 49	1976	1989	1973	107	100	89	-35	-25		99	-30
CHP 59	1959	1976	1990	71	70	43				62	
CHP 65	1986	1962	1989	45	31	30				35	
CHS 01	1959	1989	1976	66	65	47	-32		-30	59	-31
CHS 03	1976	1962	1952	72	70	62	-34	-17		68	-26
CHS 18	1962	1959	1989	102	94	89	-20			95	
CHS 51	1976	1962	1989	90	89	85	-33		-26	88	-29
CHS 57a	1976	1959	1962	67	60	54	-31		-27	60	-29
CHS 57b	1959	1962	1983	80	75	69		-22		75	
CHS 58	1976	1952	1959	64	59	57	-40	-26		60	-33
CHS 61	1976	1989	1949	93	92	74				86	
CHS 72	1976	1989	1949	94	70	69	-26	-24		78	-25
CHS 81	1950	1952	1967	97	95	94		-25		95	
CHS 86	1976	1962	1961	99	93	92	-18			95	
EPC 39a	1959	1949	1952	78	75	53		-32		69	
EPC 39b	1949	1959	1952	67	52	45	-23			55	
EPC 71	1962	1959	1976	72	69	64	-28		-57	69	
EPC 73	1962	1989	1976	106	87	80				91	
EPC 88	1976	1985	1983	74	64	62				67	
HET 02	1976	1959	1949	87	84	61	-30	-22		77	-26
HET 03	1952	1991	1950	84	79	77				80	
HET 04	1979	1970	1989	123	110	107	-28	-28		113	-28
HET 09	1962	1986	1994	55	42	40				46	
HET 14	1959	1976	1961	66	64	50	-30	-50		60	-40
HET 21	1959	1989	1985	96	90	89	-32	-33	40	92	-8
HET 29	1989	1976	1990	92	83	62		-27	-55	79	-41
HET 52	1959	1989	1985	98	90	89	-47			92	
HET 54a	1959	1976	1962	85	82	69	-41	-49	-43	78	-44
HET 54b	1991	1959	1962	86	84	80		-38	-20	83	-29
HET 55	1976	1989	1962	93	84	77	-39			84	
HET 60	1990	1959	1976	115	108	102		-53	-54	109	-53
HET 64	1962	1964	1986	56	39	34			-23	43	
HET 65	1989	1986	1994	49	48	42				46	
HET 88	1959	1976	1962	65	62	60	-34	-18		63	-26
SP 05	1989	1962	1967	111	110	91		-30		104	
SP 07	1949	1953	1952	141	126	119				129	
SP 09	1985	1962	1986	65	65	51			-37	60	
SP 57	1959	1964	1971	94	75	73		-23		80	
SP 63	1949	1961	1955	124	103	94			37	107	
SP 68	1976	1974	1969	87	72	65	-42			74	

Tableau 38. Déficit de réserve en eau des 3 années les plus sèches observées pour chaque peuplement sur la période 1949-1994. Si l'année correspondante est caractéristique, la variation relative (%) de croissance (calculée à partir de la largeur du cerne complet) a été indiquée. Le déficit moyen correspond à la moyenne des 3 années.



Barres noires :
 Nombre de placettes pour lesquelles l'année est une des trois plus sèches de la période 1949-1994. Pour chaque année, le premier chiffre correspond à la moyenne du déficit et les valeurs entre crochets aux extrêmes. Parmi les 24 années qui apparaissent au moins une fois, l'année 1976 est une des trois années les plus sèches pour 22 des 41 peuplements.

Barres blanches :
 Nombre de placettes pour lesquelles l'année est caractéristique. Pour chacune des 4 années, le premier chiffre correspond à la moyenne du déficit et les valeurs entre crochets aux extrêmes. L'année 1976, qui est l'année caractéristique la plus fréquente, apparaît dans 28 des 41 sites et présente un déficit moyen de réserve en eau de 72.

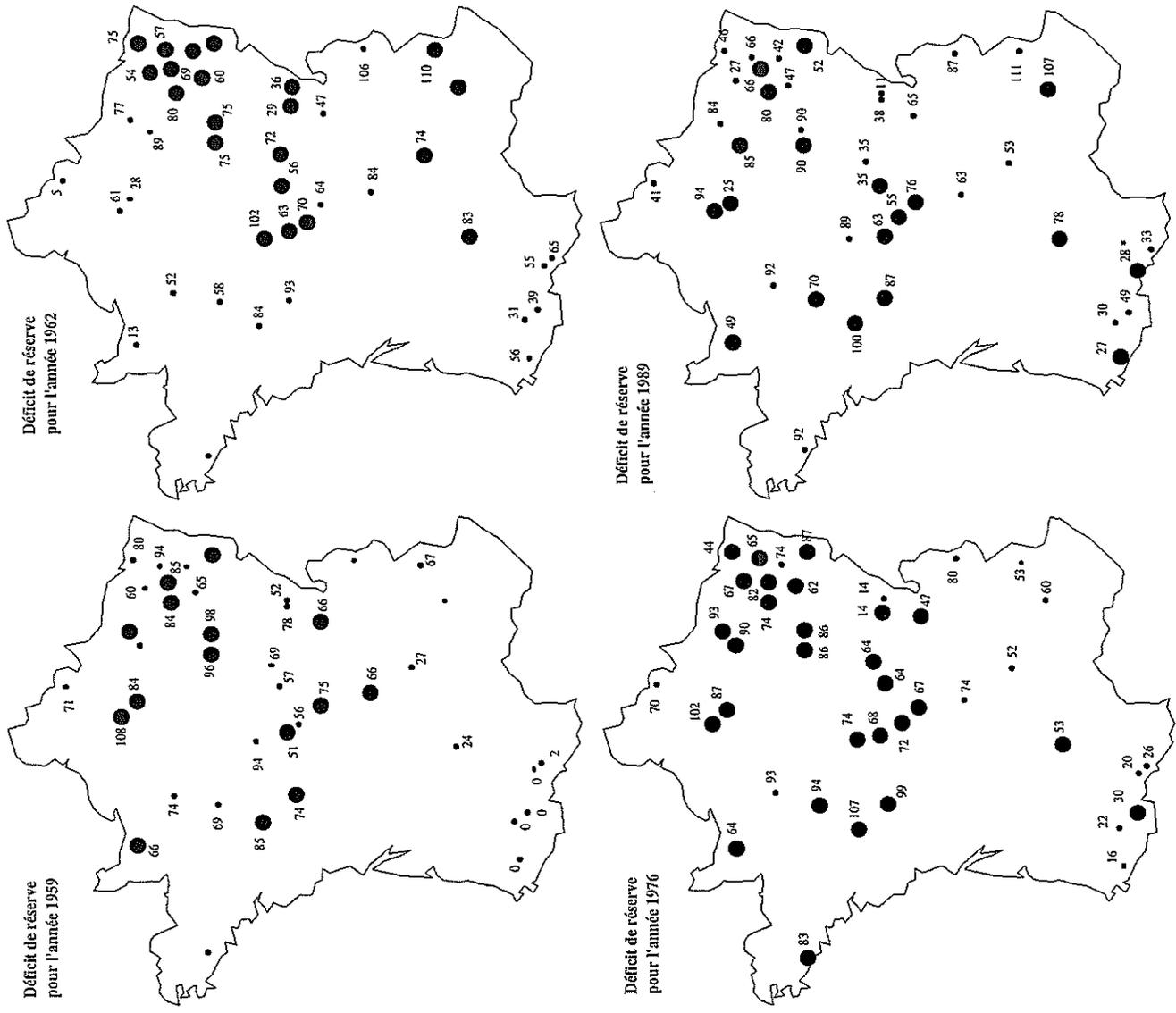


Figure 30. Déficients de réserve en eau observés pour chaque peuplement au cours des années sèches 1959, 1962, 1976 et 1989. Un rond noir large indique que l'année est caractéristique c'est-à-dire qu'elle présente une réduction de croissance d'au moins 10% (par rapport à l'année précédente) pour au moins 75% des arbres de la placette. Ces quatre années correspondent aux années caractéristiques négatives les plus fréquentes sur la période 1949-1994. * : Pour HET 09, l'année 1989 est une année à forte croissance.

10 Analyse des relations cerne-climat

10.1 Déterminisme des années caractéristiques

Le nombre total et la fréquence des années caractéristiques augmentent linéairement selon la fréquence annuelle des jours de sécheresse (**Tableau 37 et Figure 29**). Une augmentation de la fréquence annuelle des déficits de 10 à 40% se traduit par une augmentation de la fréquence des années caractéristiques de 10 à 15%.

Pour chaque peuplement, les 3 années les plus sèches observées sur la période 1949-1994 sont présentées dans le **Tableau 38** et la **Figure 30**. Parmi les 24 années apparaissant au moins une fois, les années 1989, 1976, 1962 et 1959 sont les plus fréquentes. L'année 1976 est une des trois années les plus sèches pour 22 des 41 sites (indice moyen de déficit = 80) et l'année la plus sèche pour 13 peuplements. Les années 1959, 1962 et 1989 sont parmi les trois plus fortes sécheresses pour 18, 18 et 16 sites et les années les plus sèches pour 10, 5 et 3 sites respectivement. Pour ces années, les indices moyens de déficit sont respectivement de 78, 74 et 82.

Ces quatre années sèches sont également les années caractéristiques négatives les plus fréquentes c'est-à-dire qu'elles se traduisent par des réductions importantes de croissance pour la majorité des arbres échantillonnés.

10.2 Croissance moyenne et indices de déficit de réserve

10.2.1 Corrélations avec les indices annuels de déficit

Globalement, l'indice annuel de déficit de réserve en eau permet d'expliquer la variation inter-annuelle de croissance des arbres pour 24 des 41 placettes du réseau (**Tableau 39**). Pour 15 des 24 peuplements présentant une corrélation significative, la relation entre le déficit annuel de réserve et la croissance est plus forte avec des indices de croissance obtenus à partir des surfaces des cernes (cm²) (**Figure 31**).

Le déficit annuel explique entre 12 et 38% de la variation de croissance pour 12 des 15 peuplements de hêtre (**Figures 32 et 35**). Pour les placettes de chênes, la variance expliquée est plus faible (de 9.5 à 34%) et pour un nombre plus restreint de placettes (9 sur 15) (**Figures 33 et 35**). Pour les résineux, le déficit annuel explique entre 13 et 18% de la variation inter-annuelle de croissance pour seulement 3 placettes d'épicéa (**Figure 34**).

10.2.2 Corrélations avec les indices mensuels de déficit et les températures

a. Indices mensuels de déficit

L'analyse des profils des fonctions de réponse permet de préciser les périodes pour lesquelles le déficit hydrique joue un rôle significatif sur la croissance (**Tableau 40**). La prise en compte des indices de déficit mensuels permet d'expliquer les variations inter-annuelles de croissance de 29 placettes (contre 24 avec

l'approche annuelle) et augmente les pourcentages de variance expliquée (**Tableau 41 et figure 36**).

Pour près de 80% des peuplements de feuillus (23 placettes sur 30), le déficit de réserve en eau permet d'expliquer une part significative des variations inter-annuelles de croissance radiale des arbres correspondants. Pour 7 peuplements (CHS01, 72, 81 ; HET02, 55, 64, 88), c'est l'indice de déficit annuel qui joue un rôle dans le déterminisme des variations de croissance. Pour 16 peuplements, c'est le déficit d'un mois ou d'une combinaison de mois particuliers qui expliquent le mieux les fluctuations de croissance. Par rapport à l'indice annuel de déficit de réserve (cumul de mai à octobre), la prise en compte d'une période particulière augmente sensiblement le pourcentage de variance expliqué (**Tableau 41 et Figure 36**). Ainsi, pour HET21, le pourcentage de variance expliquée augmente de 21% à 42% quand on considère l'indice de déficit de juin-juillet (cumul des deux mois) au lieu de l'indice annuel. Pour HET14, l'indice de déficit du mois d'août explique à lui seul près de 43% de la variation inter-annuelle de croissance. Pour CHS03, l'indice de déficit de juillet explique 24% de la variance contre 10% pour l'indice annuel. Au niveau mensuel, 9 combinaisons de mois différentes apparaissent dans les modèles : mois uniques (juin, 1 fois ; juillet (3) ; août (2) ; septembre (1)), deux mois (mai-juin (1) ; juin-juillet (3) ; août-septembre (2)), trois mois (juin-juillet-août (1) ; juillet-août-septembre (2)). Le déficit de réserve apparaît plus déterminant pour le hêtre que pour le chêne aussi bien au niveau du nombre plus élevé de peuplements pour lesquels le déficit est une variable significative qu'au niveau du pourcentage de variance expliquée : 13 peuplements sur 15 avec des taux de variance expliquée de 12 à 43% pour le hêtre (moy=25%) et 10 peuplements sur 15 avec des taux de 8 à 32% pour le chêne (moy=19%).

Pour les résineux, la prise en compte des déficits mensuels permet d'expliquer plus de 20% des variations inter-annuelles de croissance pour 2 des 6 peuplements de sapin (SP05 et SP68) et augmente le taux de variance expliquée pour 2 des 5 peuplements d'épicéa (EPC39a, 71). Pour EPC71, l'indice de déficit de juillet-août explique plus de 30% de la variance inter-annuelle de croissance radiale.

b. Températures mensuelles

L'analyse des profils des fonctions de réponse permet également de préciser l'importance des températures sur la croissance radiale des arbres (**Tableau 40**). Pour les chênes, une variable température est significativement corrélée (au seuil de 5%) à la croissance dans 13 cas sur 15 (**Tableau 40**). Au moins une T_{min} apparaît dans 12 cas et une T_{max} dans 9 cas (**Tableau 42**). Globalement, les mois d'hiver et de printemps interviennent davantage que les mois d'été et d'automne ; les températures élevées pendant ces périodes tendant à stimuler la croissance (signe +) (**Figure 37**). Pour le hêtre, une variable température est significativement corrélée (au seuil de 5%) à la croissance dans 9 cas sur 15 (**Tableau 40**). Une T_{min} apparaît dans 5 cas et une T_{max} dans 9 cas (**Tableau 42**). Les mois de novembre et décembre de l'année n-1 et les mois de février et d'avril de l'année courante sont les plus significatifs (**Tableau 42 et Figure 37**). Pour les feuillus, les taux d'explication des seules variables thermiques sont "faibles" (entre 10 à 15%) par rapport aux indices de déficit de réserve. Parmi les variables considérées, la température de décembre (n-1) semble à part car elle intervient dans 8 cas sur 30 (environ 25%) avec un effet positif sur la croissance.

Pour les épicéas, une variable température est significativement corrélée (au seuil de 5%) à la croissance dans 4 cas sur 5. Une T_{min} apparaît dans 4 cas et une T_{max} dans 2 cas (**Tableaux 40 et 43**). Les 6 placettes de sapin

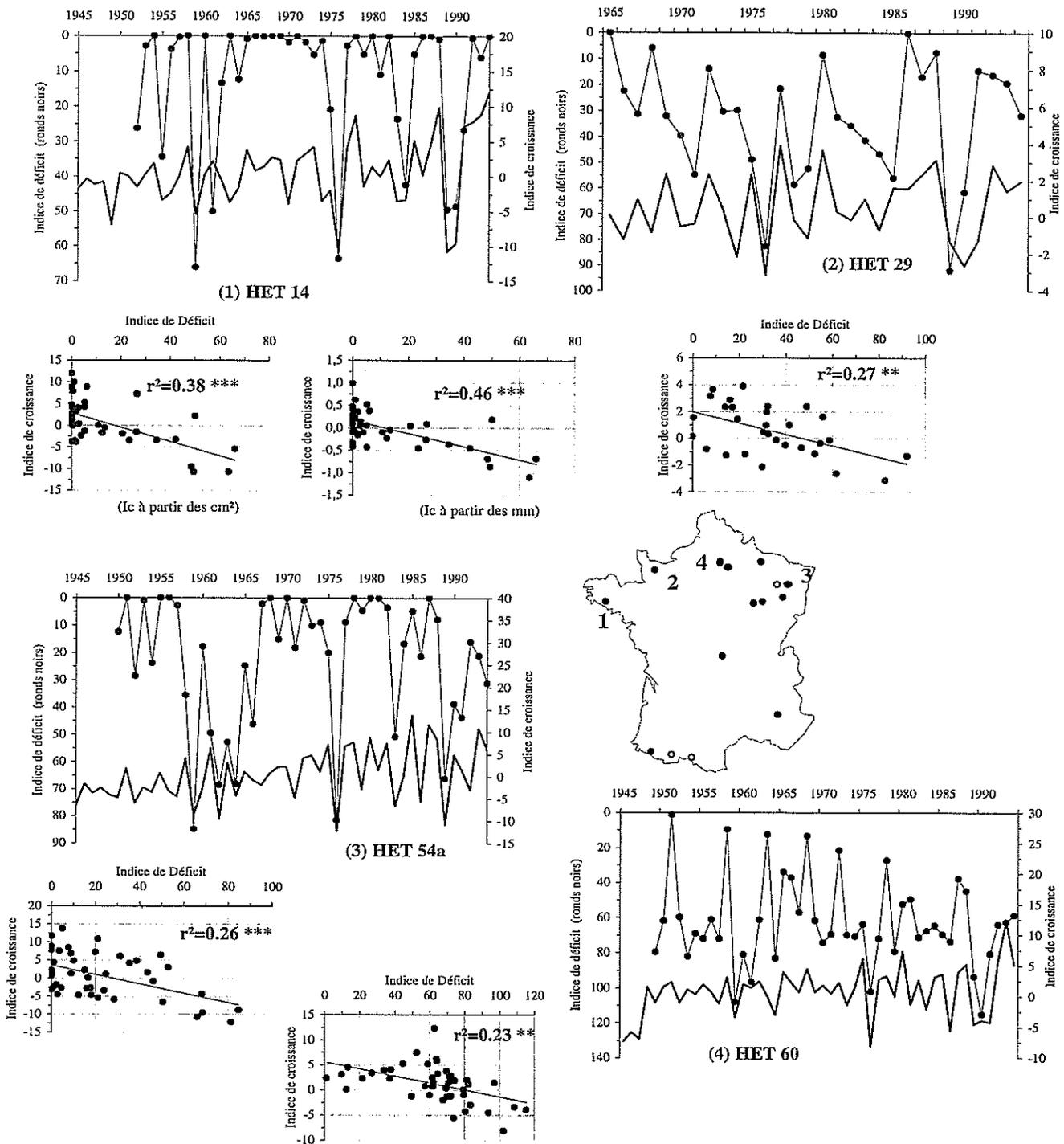


Figure 32. Exemples de relations entre les indices de croissance radiale et les indices de déficits annuels de réserve pour 4 des 12 peuplements de hêtre (sur un total de 15) présentant une corrélation significative (** et *** : significatif à 1 p.cent et 1 p. mille). Pour les courbes, les indices de croissance correspondent à des surfaces de cerne complet détendancées par modélisation ARMA. Pour HET 14, les corrélations étant meilleures avec les indices de croissance définis à partir des largeurs de cernes, les deux graphes ont été présentés.

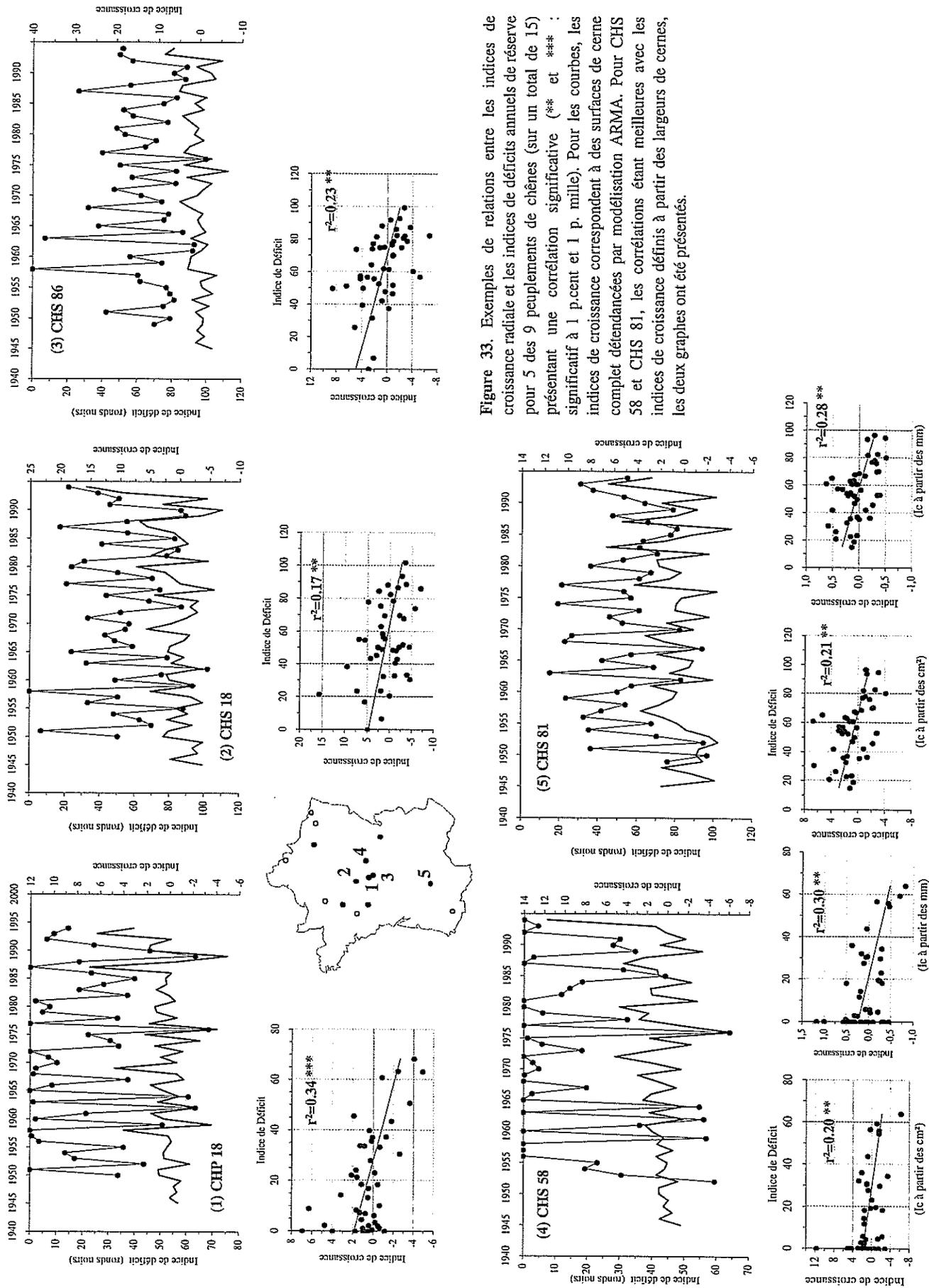


Figure 33. Exemples de relations entre les indices de croissance radiale et les indices de déficits annuels de réserve pour 5 des 9 peuplements de chênes (sur un total de 15) présentant une corrélation significative (** et *** : significatif à 1 p.cent et 1 p. mille). Pour les courbes, les indices de croissance correspondent à des surfaces de cerne complet dédanciées par modélisation ARMA. Pour CHS 58 et CHS 81, les corrélations étant meilleures avec les indices de croissance définis à partir des largeurs de cernes, les deux graphes ont été présentés.

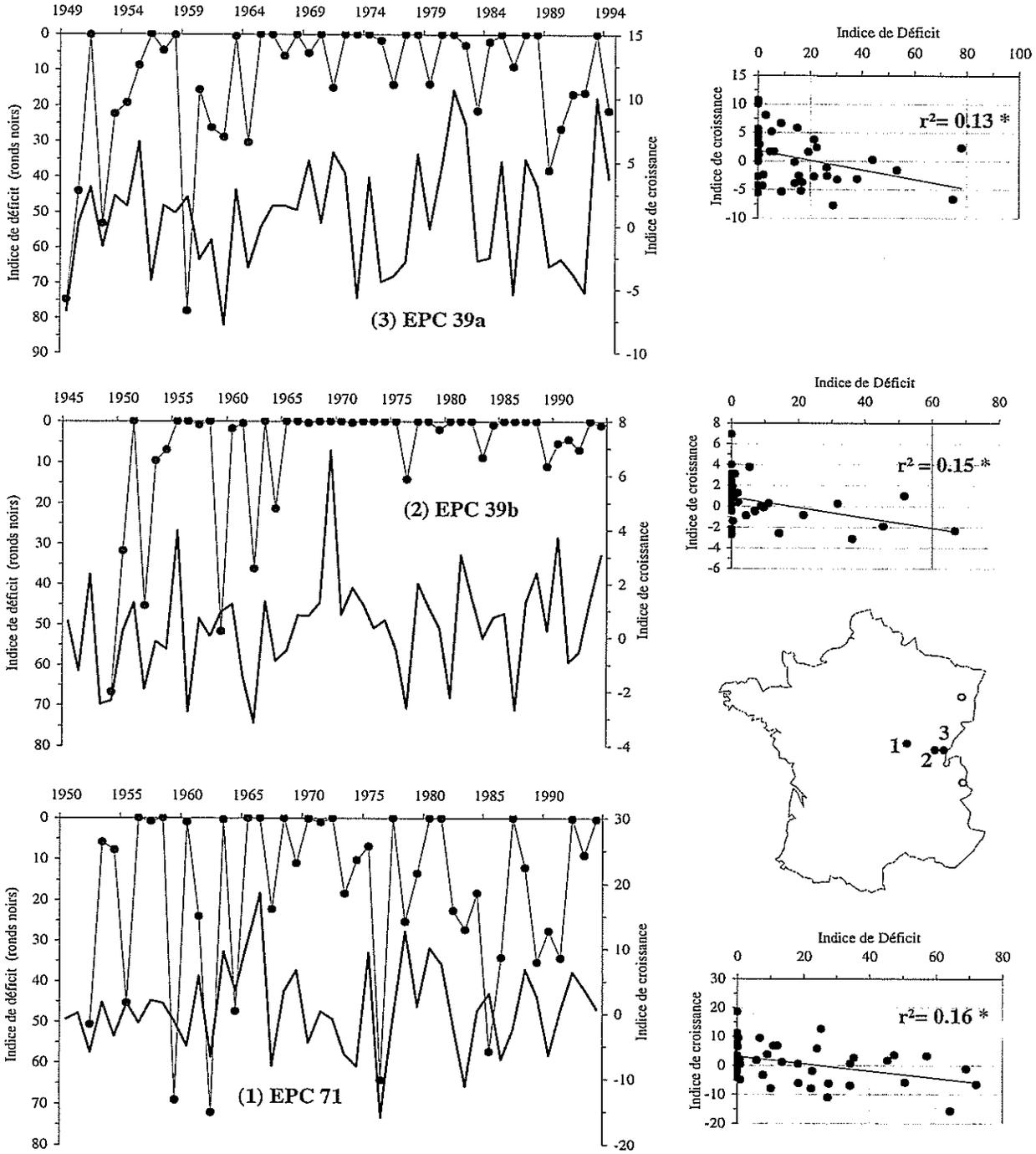


Figure 34. Exemples de relations entre les indices de croissance radiale et les indices de déficits annuels de réserve pour les 3 peuplements d'épicéa (sur un total de 5) présentant une corrélation significative (* : significatif à 5 p.cent). Pour les courbes, les indices de croissance correspondent à des surfaces de cerne complet détendancées par modélisation ARMA.

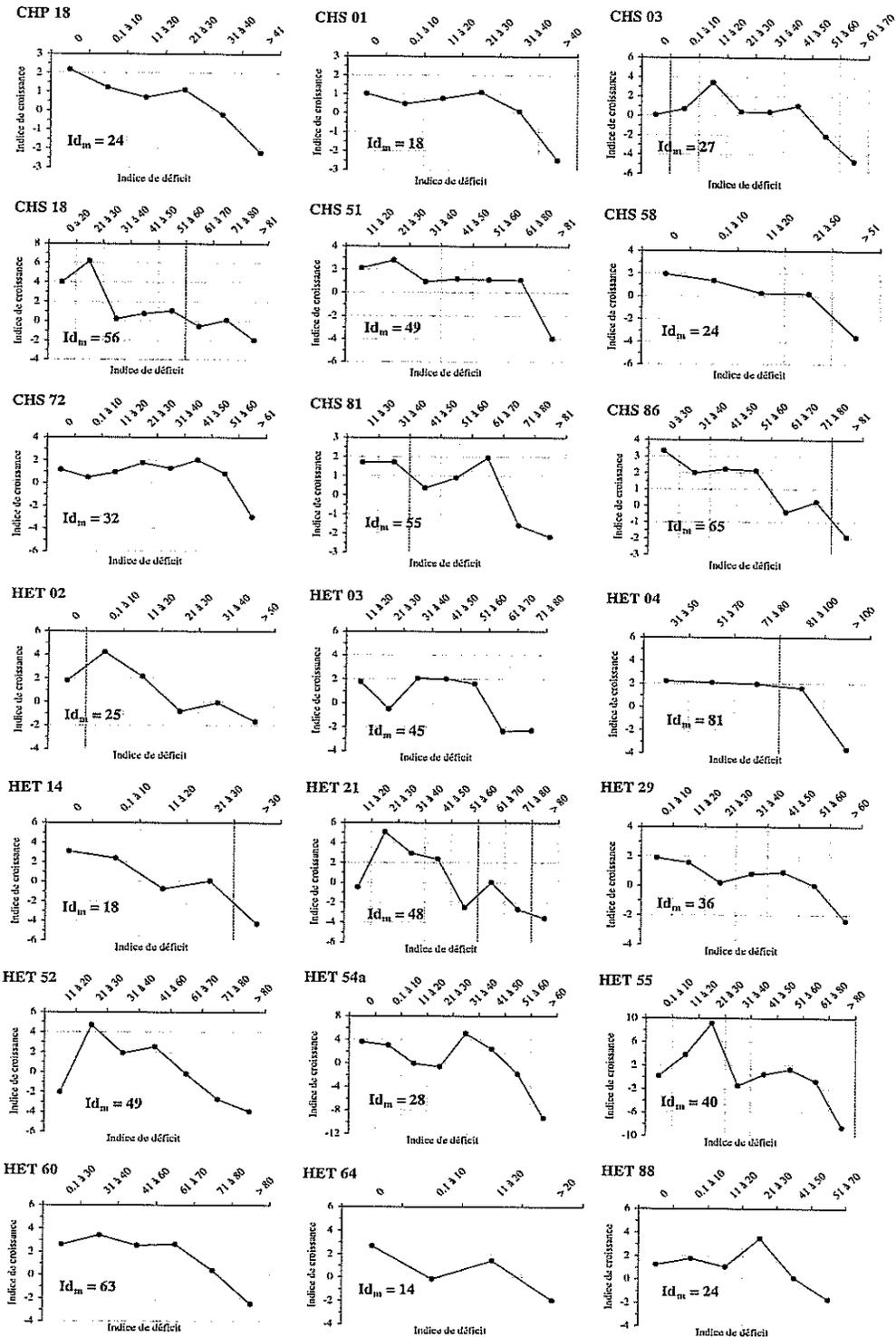


Figure 35. Evolution de l'indice de croissance radiale moyen par classe d'indice de déficit de réserve en eau pour les 9 peuplements de chênes et les 12 peuplements de hêtre présentant une corrélation significative entre la croissance et l'intensité du déficit. Pour chaque classe et chaque peuplement, les moyennes ont été calculées sur au moins trois années. Id_m correspond à l'indice de déficit hydrique moyen calculé sur toute la période (voir Tableau 20).

	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct.	r ²	N
CHP 18							0,323 (0,336)	45
CHP 49							ns	45
CHP 59							ns	46
CHP 65							ns	39
CHS 01							0,099	45
CHS 03							0,242 (0,095)	43
CHS 18							0,199 (0,171)	45
CHS 51							0,248 (0,133)	33
CHS 57a							0,076	45
CHS 57b							ns	45
CHS 58							0,229 (0,197)	43
CHS 61							ns	46
CHS 72							0,087	46
CHS 81							0,214	46
CHS 86							0,146 (0,230)	46
HET 02							0,166	46
HET 03							0,333 (0,172)	45
HET 04							0,156 (0,129)	27
HET 09							ns	39
HET 14							0,429 (0,378)	43
HET 21							0,418 (0,214)	39
HET 29							0,248 (0,267)	30
HET 52							0,259 (0,120)	39
HET 54a							0,256 (0,262)	45
HET 54b							0,231	45
HET 55							0,200	33
HET 60							0,235 (0,231)	46
HET 64							0,122	40
HET 65							ns	39
HET 88							0,128	39
EPC 39a							0,154 (0,128)	46
EPC 39b							0,148	46
EPC 71							0,312 (0,187)	41
EPC 73							ns	35
EPC 88							ns	32
SP 05							0,225	42
SP 07							ns	46
SP 09							ns	39
SP 57							ns	45
SP 63							ns	46
SP 68							0,210	32

Tableau 41. Corrélations (r²) entre les indices de croissance radiale et les indices de déficits de réserve en eau pour les 41 placettes. Pour chaque cas, seule la période présentant la corrélation la plus significative a été prise en compte (zone grisée) (synthèse des tableaux 39 et 40). Le premier chiffre correspond à la corrélation observée entre la croissance et les mois considérés (zones grisées). La valeur entre parenthèses donne la corrélation obtenue avec l'indice annuel de déficit de réserve (cumul de mai à octobre). Pour HET21, l'indice de déficit de juin-juillet explique 42% des variations de croissance inter-annuelles (21% pour l'indice annuel). N= nombre d'années pris en compte. ns= non significatif au seuil de 5%.

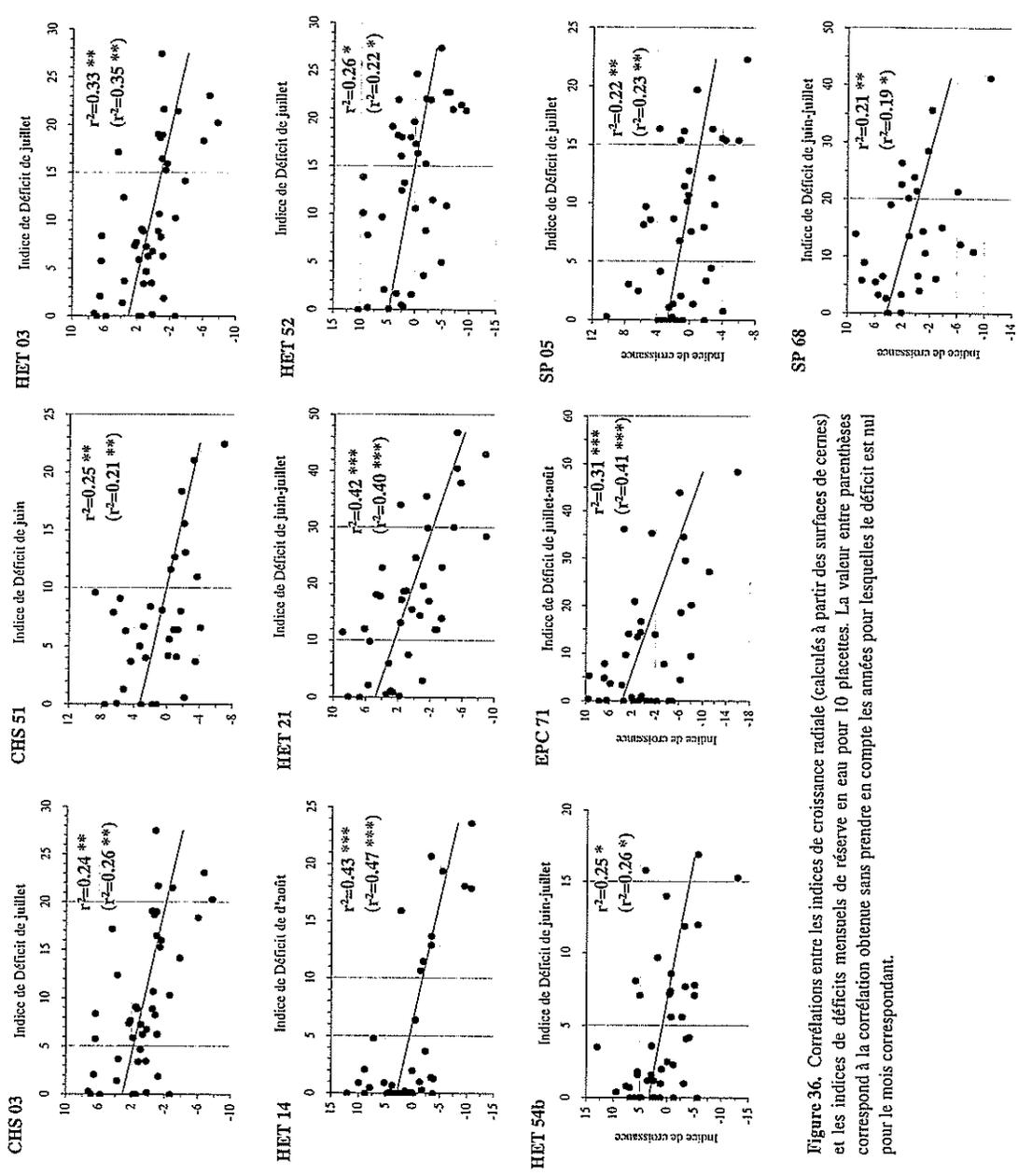


Figure 36. Corrélations entre les indices de croissance radiale (calculés à partir des surfaces de cerne) et les indices de déficits mensuels de réserve en eau pour 10 placettes. La valeur entre parenthèses correspond à la corrélation obtenue sans prendre en compte les années pour lesquelles le déficit est nul pour le mois correspondant.

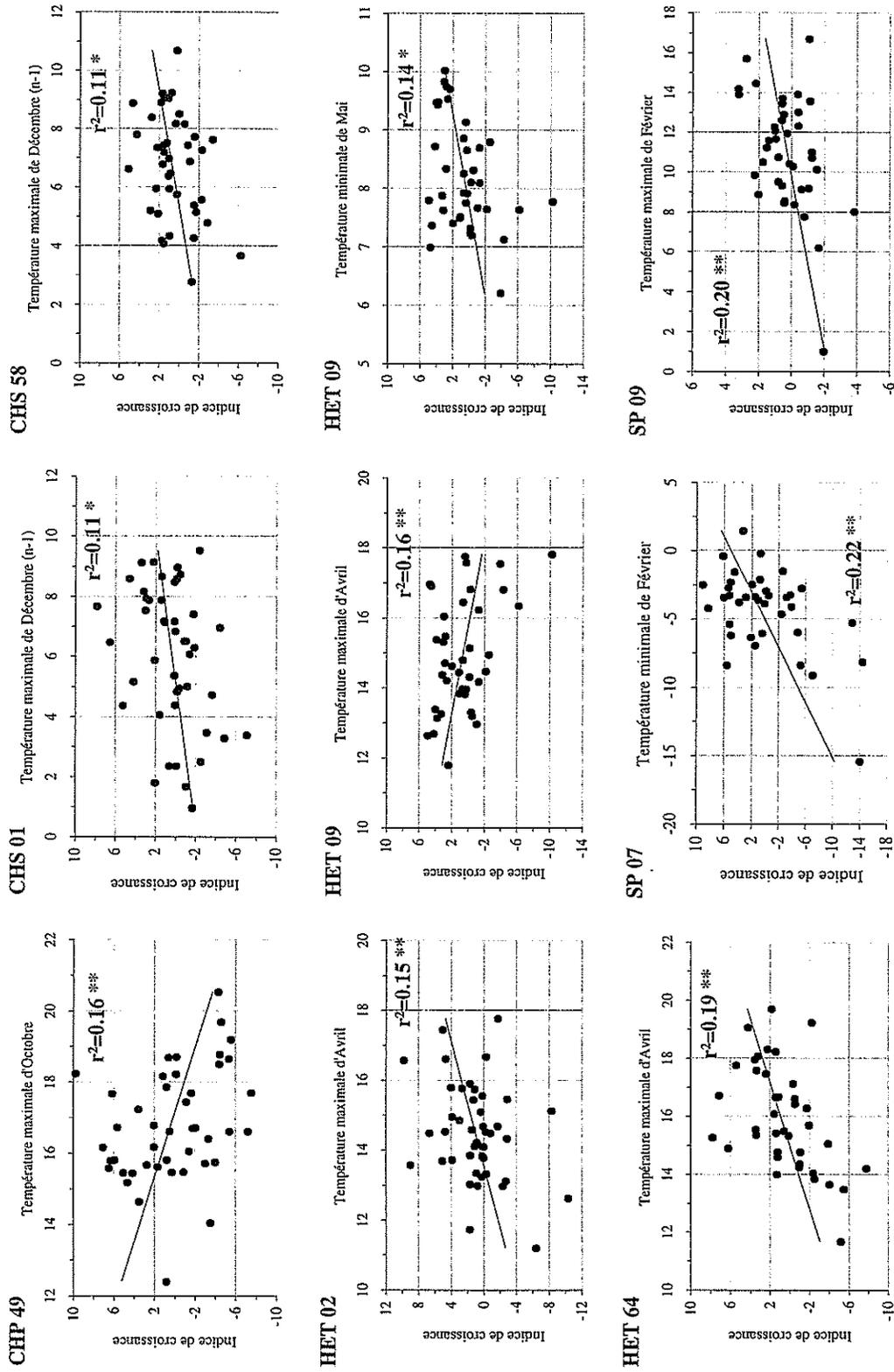


Figure 37. Corrélations entre les indices de croissance radiale (calculés à partir des surfaces de cerne) et les températures mensuelles pour 8 placettes. Les mois représentés ont été choisis suite à l'analyse des fonctions de réponse (Tableau 40). Le (n-1) signifie que c'est la mois de l'année précédant la mise en place du cerne n qui intervient.

présentent au moins une relation significative avec au moins une variable de température (Tableaux 40 et 43). La période hivernale apparaît prépondérante avec une action positive très significative sur la croissance. Les températures de février sont corrélées positivement à la croissance de 5 des 6 peuplements étudiés (Tableau 43 et figure 37)

Tableau 42. Relations entre les températures mensuelles et la croissance pour les 15 peuplements de chênes et les 15 peuplements de hêtre. Pour chaque espèce, N représente le nombre de placettes pour lesquelles la température du mois considéré intervient. N Tmin et N Tmax représentent le nombre de cas où la Tmin ou la Tmax sont significativement corrélées avec la croissance. Le signe + ou – donne le sens de la relation. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% ont été considérées (variable codée 2 dans le tableau 40). Pour les chênes, la température de décembre (n-1) intervient dans 5 cas sur 15. La Tmin dans 4 cas et la Tmax dans 3 cas. L'action de cette température est toujours positive.

	Chênes (15 placettes)					Hêtre (15 placettes)				
	N	N Tmin	Signe	N Tmax	Signe	N	N Tmin	Signe	N Tmax	Signe
Nov (n-1)	0					Nov (n-1)	2	2	+	
Déc (n-1)	5	4	+	3	+	Déc (n-1)	3	1	+	3
Jan	1	1	-			Jan	0			
Fév	1	1	+			Fév	2		2	+
Mars	2	2	+ et -	1	+	Mars	0			
Avril	2	1	-	1	+	Avril	3		3	2+ et -
Mai	1			1	+	Mai	1	1	+	1
Juin	3	3	+			Juin	1	1	-	
Juillet	1			1	+	Juillet	0			
Août	0					Août	0			
Sept	1	(Tmoy)	+			Sept	1	(Tmoy)	+	
Oct	2			2	+ et -	Oct	0			

Tableau 43. Relations entre les températures mensuelles et la croissance pour les 5 peuplements de d'Épicéa et les 6 peuplements de sapin. Pour chaque espèce, N représente le nombre de placettes pour lesquelles la température du mois considéré intervient. N Tmin et N Tmax représentent le nombre de cas où la Tmin ou la Tmax sont significativement corrélées avec la croissance. Le signe + ou – donne le sens de la relation. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% ont été considérées (variable codée 2 dans le tableau 40). Pour les sapins, la température de février intervient dans 5 cas sur 6. La Tmin dans 4 cas et la Tmax dans 3 cas. L'action de cette température est toujours positive.

	Épicéa (5 placettes)					Sapin (6 placettes)				
	N	N Tmin	Signe	N Tmax	Signe	N	N Tmin	Signe	N Tmax	Signe
Nov (n-1)	0					Nov (n-1)	3	2	+	1
Déc (n-1)	0					Déc (n-1)	2	2	+	
Jan	1	1	-			Jan	1		1	+
Fév	0					Fév	5	4	+	3
Mars	2	2	+	2	+	Mars	1		1	+
Avril	1	1	+			Avril	2		2	+
Mai	0					Mai	0			
Juin	1	1	+			Juin	0			
Juillet	0					Juillet	0			
Août	1	1	-			Août	0			
Sept	0					Sept	0			
Oct	0					Oct	2		2	+

c. Indices de déficit et Températures mensuels

L'analyse des profils des fonctions de réponse en considérant simultanément les indices mensuels de déficit et les températures permet de mieux juger du déterminisme thermique et hydrique des variations inter-annuelles de croissance radiale (**Tableau 40**). Pour les feuillus, les effets thermiques seuls pendant la saison de végétation (mai à octobre) ne sont significatifs que dans les cas où aucun indice de déficit de réserve n'apparaît lié à la croissance (CHP49, CHP59, CHP65, HET09, HET65). Pour les autres peuplements, les indices de déficit sont prépondérants par rapport aux températures. Seuls trois peuplements font exception : CHS18 avec un effet négatif du déficit de juin et positif de la Tmin ; CHS57a et HET54a avec un effet négatif du déficit de septembre et positif de la Tmoy. La prise en compte des températures permet de faire ressortir l'effet important de la période hivernale pour les résineux et dans une moindre mesure pour les feuillus (rôle de la température de décembre).

10.2.3 Régionalisation des fonctions de réponse

Pour chaque espèce, l'analyse de la cohérence des fonctions de réponse ne permet pas de dégager des tendances régionales nettes dans la réponse aux paramètres climatiques analysés (**Figures 38, 39 et 40**). Par exemple, pour les peuplements de chênes, le gradient climatique ouest-est ne se traduit pas par un gradient de réponse aux indices de déficit de réserve.

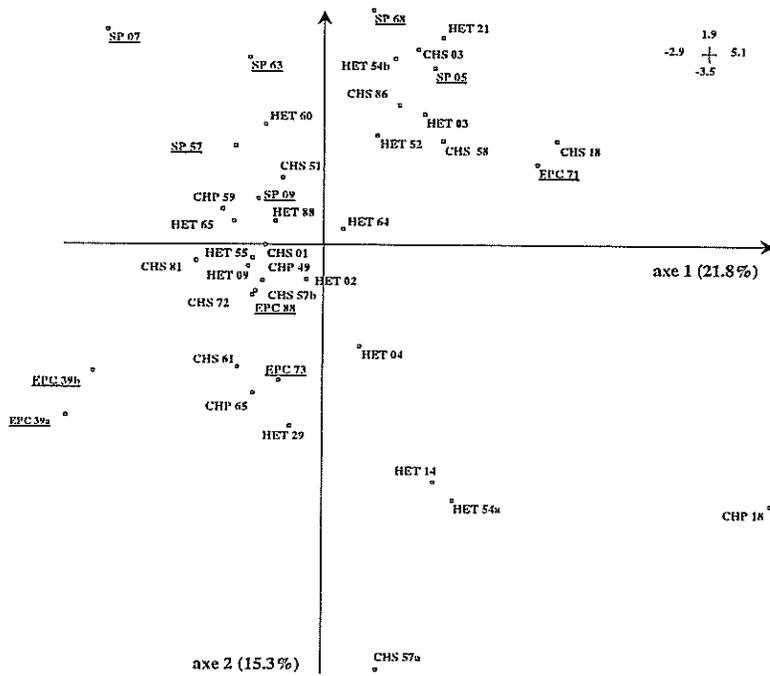
Cependant, la prise en compte des conditions pluviométriques locales et des conditions stationnelles (RUM essentiellement) permet d'expliquer en partie certaines différences de comportement observées (**Tableau 44**).

Pour les 4 peuplements du Sud de la France (HET09, 64, 65 et CHP65), l'absence de corrélations significatives entre la croissance et les indices de déficit peut s'expliquer par les précipitations abondantes dont bénéficient ces peuplements tout au long de l'année (> 1000 mm) et pendant la saison (500-800 mm). Ces pluies étant également bien réparties et élevées en été (80 à 100 mm mensuels), les arbres ne subissent généralement pas de contraintes hydriques importantes pendant la saison de croissance. Les mêmes observations peuvent être faites pour le peuplement CHS01 qui bénéficie, en plus, d'une très bonne réserve utile en eau (237 mm) (**Tableau 44**). La différence de comportement avec les deux peuplements de hêtre de l'extrême ouest de la France (HET14 et HET29) bénéficiant également de fortes pluies annuelles (> 1000 mm) pourrait s'expliquer par le caractère océanique du régime saisonnier des pluies qui se traduit par une diminution importante des précipitations en été. Ainsi, pour ces deux peuplements, la moyenne mensuelle des mois d'hiver est de l'ordre de 110-120 mm et diminue à 50-70 mm en période estivale (JJA). Pour ces peuplements, on peut émettre l'hypothèse que les fortes RUM (200 mm) compensent en partie ces diminutions notables des pluies. L'analyse des fonctions de réponse montrent que, en moyenne, la contrainte en eau intervient en fin de saison (déficits de août et septembre) ce qui suggère que la contrainte arrive après "épuisement" des réserves du sol (**Tableau 44**).

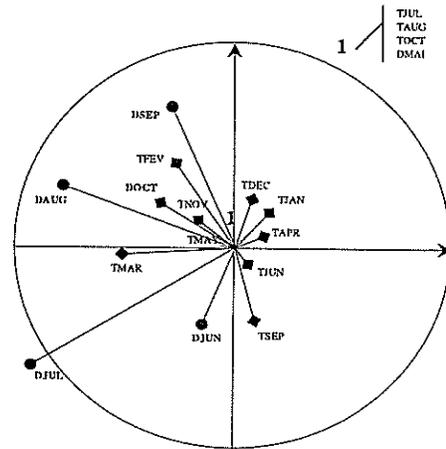
Pour les peuplements de la région Centre (CHS03, HET03, CHS18, CHP18, CHS58 et CHS86), les indices de déficit expliquent de 20 à 33% des variations inter-annuelles de croissance radiale. Les pluies annuelles varient de 700 à 800 mm avec un total de l'ordre de 350-400 mm pendant la saison de végétation. Les deux peuplements de l'Allier (CHS03 et HET03) ont un comportement comparable et c'est le déficit de juillet qui explique le mieux les variations de croissance radiale. Pour les autres peuplements, c'est une combinaison de

Déficits de réserve et Tmin mensuels

A - Placettes

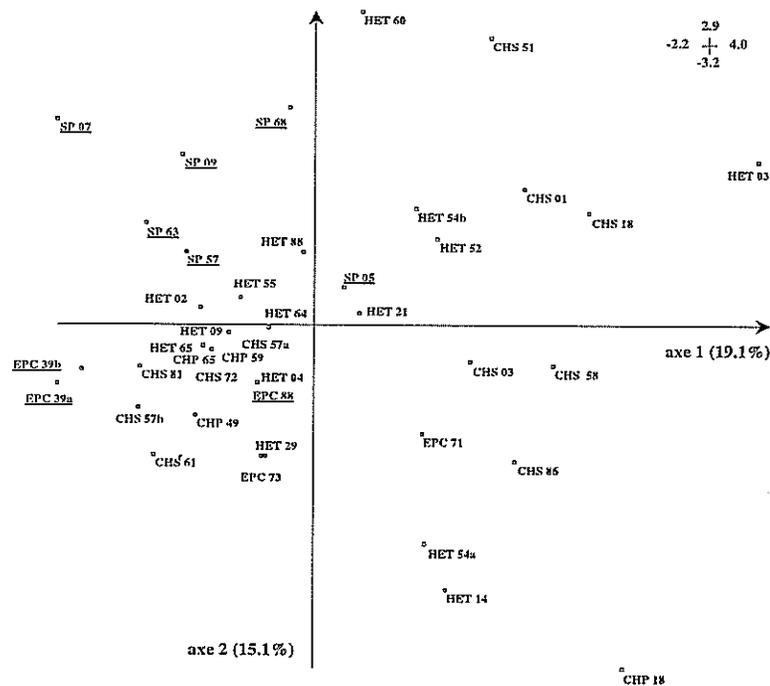


B - Régresseurs climatiques



Déficits de réserve et Tmax mensuels

A - Placettes



B - Régresseurs climatiques

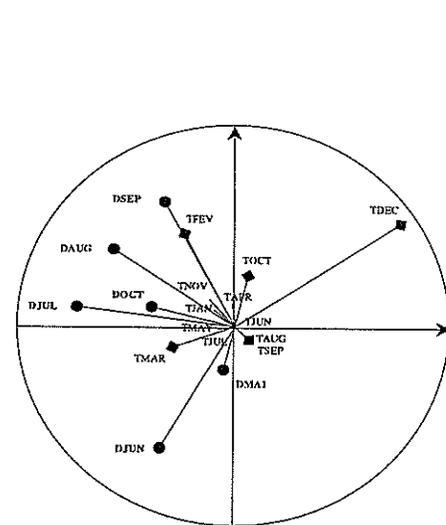
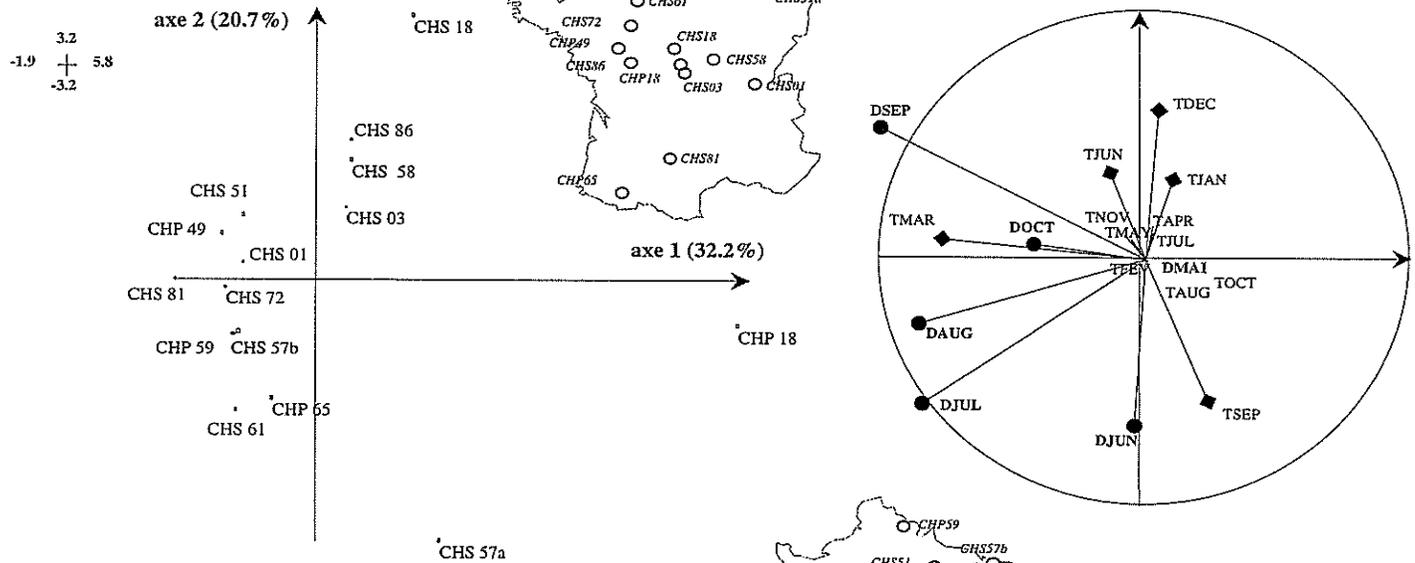


Figure 38. Analyse de la cohérence des fonctions de réponse. Les graphes représentent la répartition des 41 placettes et des 18 régresseurs climatiques dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des résultats des fonctions de réponse obtenues pour les combinaisons mensuelles (déficits et Tmin) et (déficits et Tmax) (voir Tableau 40).

A- Déficit de réserve et Tmin mensuels



B - Déficit de réserve et Tmax mensuels

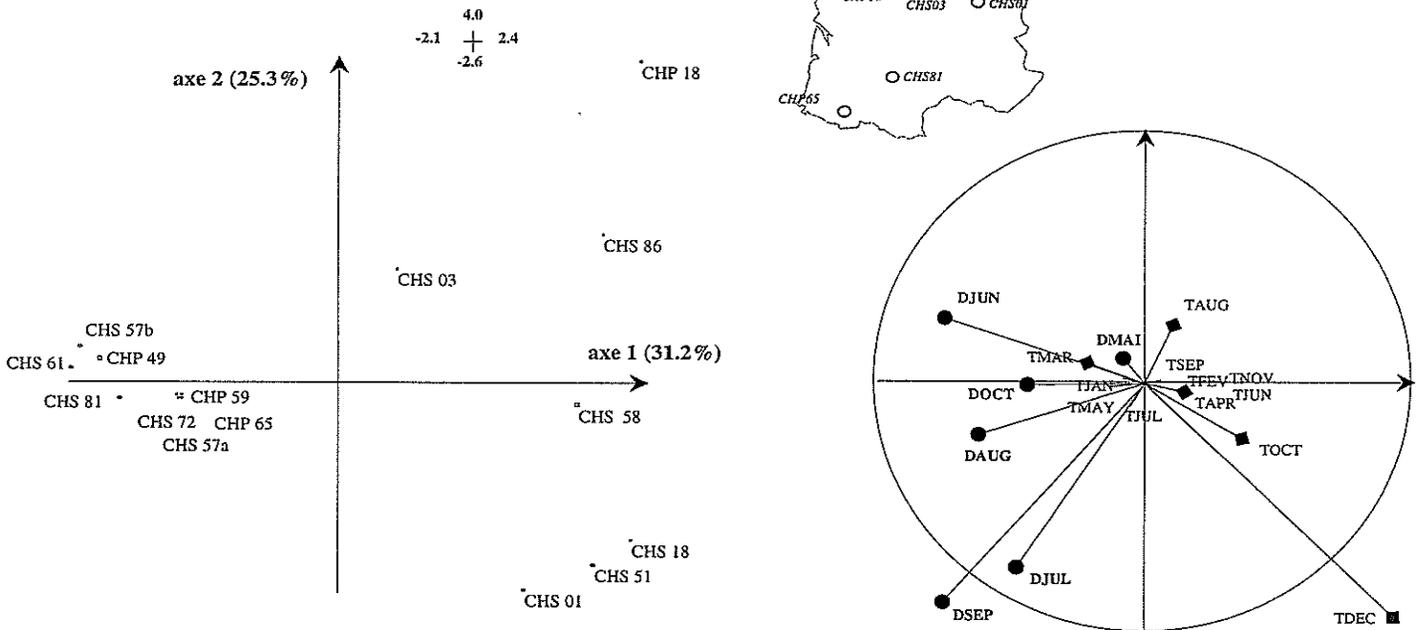
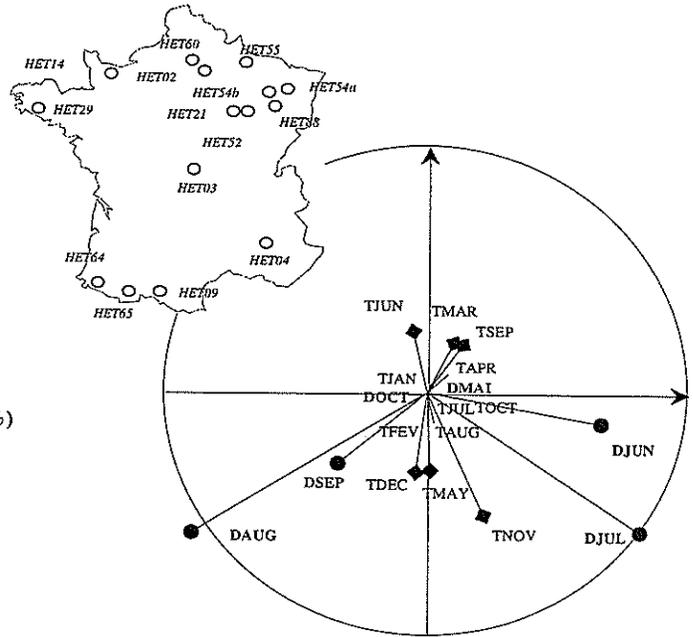
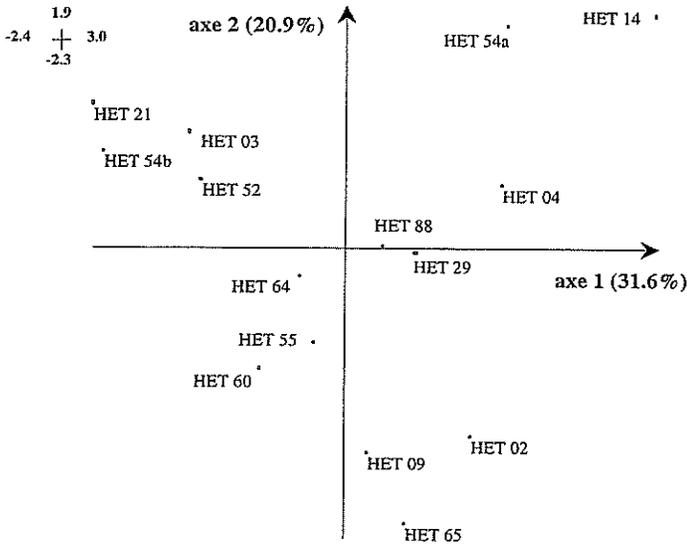


Figure 39. Analyse de la cohérence des fonctions de réponse des 15 Chênaies du réseau. Les graphes représentent la répartition des 15 placettes et des 18 régresseurs climatiques dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des résultats des fonctions de réponse obtenues pour les combinaisons mensuelles (déficit et Tmin) et (déficit et Tmax).

A - Déficits de réserve et Tmin mensuels



B - Déficits de réserve et Tmax mensuels

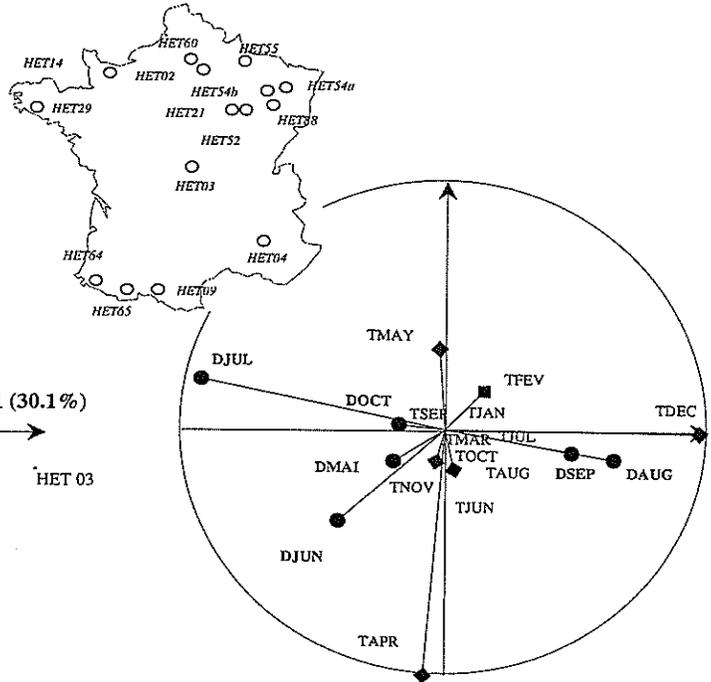
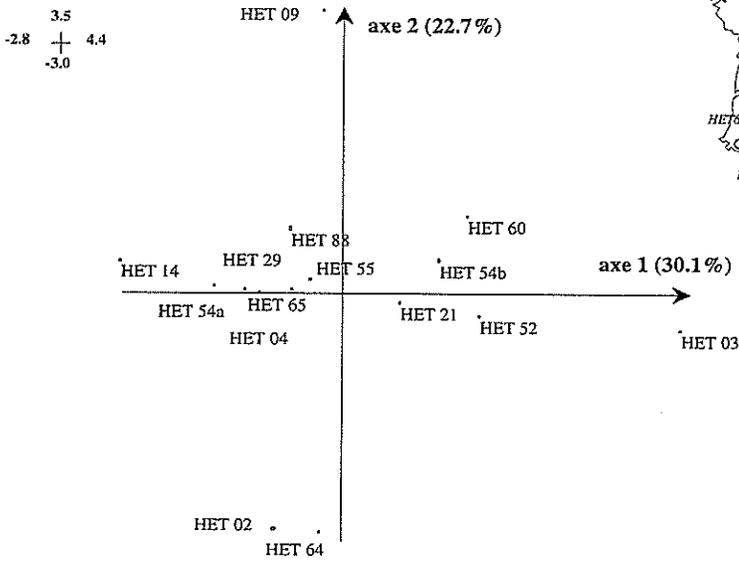


Figure 40. Analyse de la cohérence des fonctions de réponse des 15 Hêtraies du réseau. Les graphes représentent la répartition des 15 placettes et des 18 régresseurs climatiques dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des résultats des fonctions de réponse obtenues pour les combinaisons mensuelles (déficit et Tmin) et (déficit et Tmax).

RUM	Année		Mai-Octobre		Indice de déficit de réserve					r ²	N		
	(mm)	P (mm)	Tmoy (°C)	P (mm)	Tmoy (°C)	Mai	Juin	Juillet	Août			Sept	Oct.
HET 14	208	1088	10,5	485	14,6							0,429 (0,378)	43
HET 29	199	1017	11,5	390	15,2							0,248 (0,267)	30
CHS 61	172	710	10,4	321	15							ns	46
CHP 49	173	614	11,5	278	16,2							ns	45
CHS 72	237	710	11,1	320	15,9							0,087	46
CHS 03	193	811	10,3	417	15,3							0,242 (0,095)	43
HET 03	154	674	10,5	397	15,6							0,333 (0,172)	45
CHS 86	146	706	11,3	335	16,1							0,146 (0,230)	46
CHS 18	162	679	11	342	16,1							0,199 (0,171)	45
CHP 18	206	722	11	367	16,1							0,323 (0,336)	45
CHS 58	220	870	10,3	437	15,3							0,229 (0,197)	43
CHS 01	237	1216	10,7	595	16,3							0,099	45
CHS 51	59	889	10,5	435	15,7							0,248 (0,133)	33
HET 21	84	884	8,9	431	14,5							0,418 (0,214)	39
HET 54b	87	759	9,4	394	14,8							0,231	45
HET 52	77	884	8,9	431	14,5							0,259 (0,120)	39
HET 54a	208	723	9,4	368	14,8							0,256 (0,262)	45
CHS 57a	198	810	9,4	418	14,8							0,076	45
HET 88	151	1022	9,5	502	15,1							0,128	39
HET 55	98	889	10,5	435	15,7							0,200	33
CHS 57b	135	815	10,1	418	15,8							ns	45
HET 02	274	690	10,8	349	15,7							0,166	46
HET 60	109	649	10,8	341	15,7							0,235 (0,231)	46
CHP 59	270	762	9,7	380	14,5							ns	46
CHS 81	115	774	12,9	375	18							0,214	46
HET 04	150	748	12,5	392	18							0,156 (0,129)	27
HET 65	188	1104	11,9	518	16,5							ns	39
CHP 65	206	1100	11,9	479	16,5							ns	39
HET 09	115	1610	11,8	745	16,4							ns	39
HET 64	119	1501	12,7	690	17,2							0,122	40

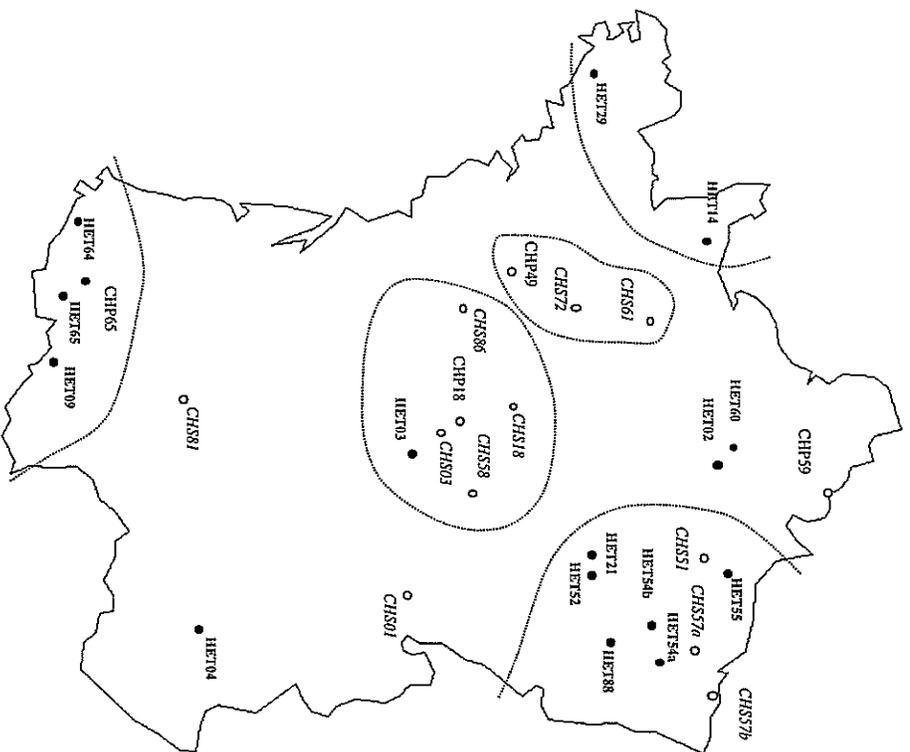
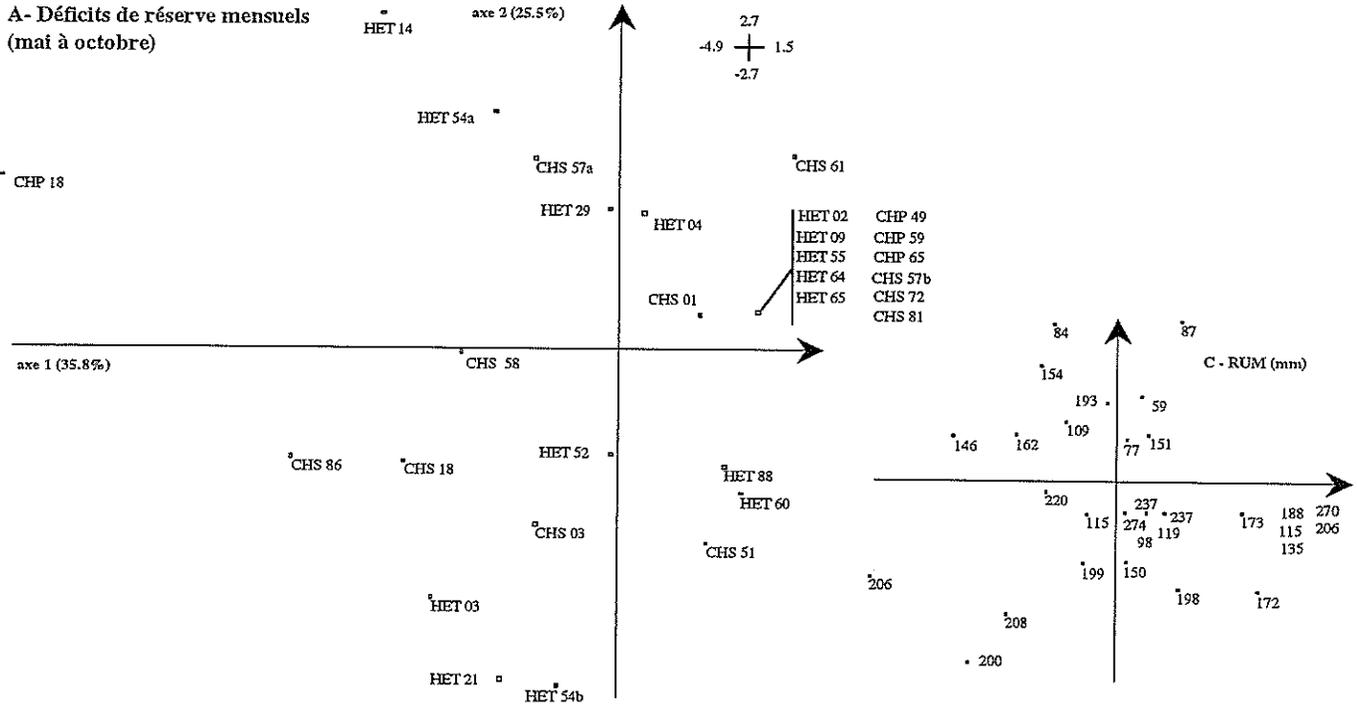


Tableau 44. Analyse de la cohérence de la réponse des 30 peuplements de feuillus aux indices mensuels de déficit de réserve. Les peuplements ont été regroupés selon leur localisation géographique. RUM = réserve utile maximale en eau du sol (en mm). Les moyennes climatiques (1961-1990) ont été calculées sur les stations météorologiques attachées à chaque placette (voir Tableau 2). Le r² indique la corrélation entre les indices de croissance radiale et les indices de déficits de réserve en eau. Pour chaque cas, seule la période présentant la corrélation la plus significative a été prise en compte (zone grisée) (Synthèse des Tableaux 39 et 40). Le premier chiffre correspond à la corrélation observée entre la croissance et les mois considérés (zones grisées). La valeur entre parenthèses donne la corrélation obtenue avec l'indice annuel de déficit de réserve (cumul de mai à octobre). Pour HET21, l'indice de déficit de juin-juillet explique 42% des variations de croissance inter-annuelles (21% pour l'indice annuel). N= nombre d'années pris en compte. ns= non significatif au seuil de 5%.

A - Déficits de réserve mensuels (mai à octobre)



B - Déficits de réserve mensuels et annuels (mai à octobre et année)

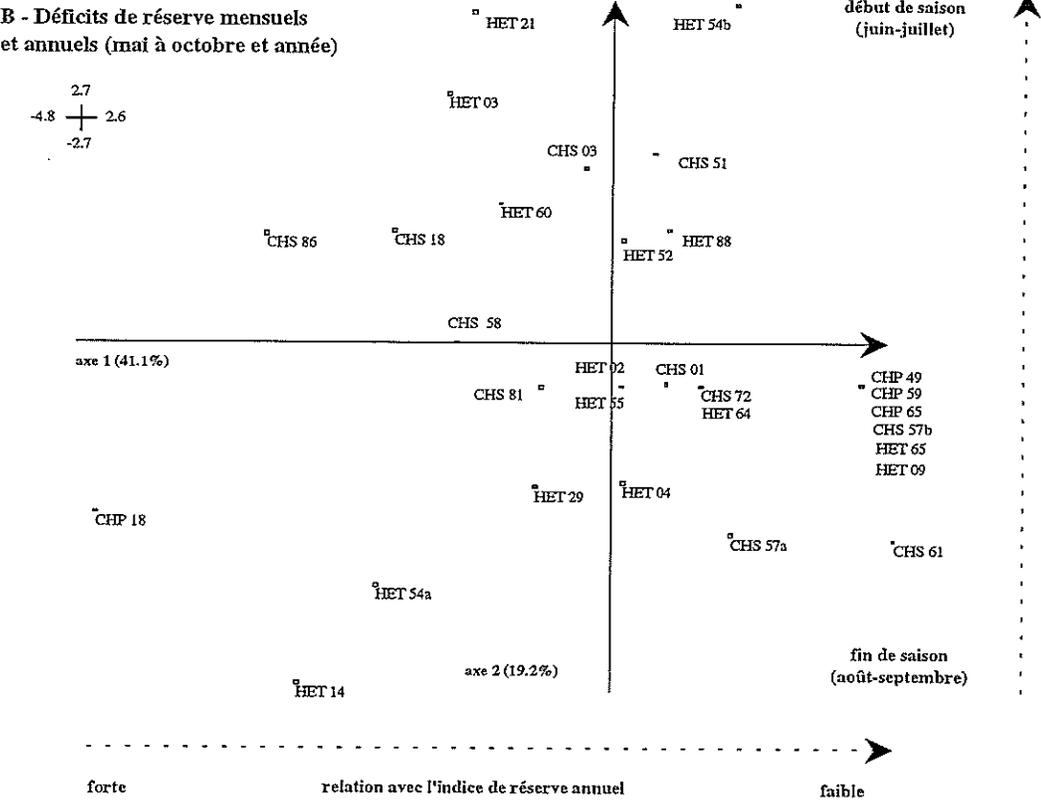


Figure 41. Répartition des 30 peuplements de feuillus dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des résultats des fonctions de réponse (voir Tableau 40). Pour cette ACP, seules les relations avec les déficits ont été prises en compte. Pour chaque placette, le code attribué à chaque mois correspond au seuil de signification le plus fort obtenu pour les combinaisons Déf-Tmin et Déf-Tmax. Les mois non significatifs ont été codés 0 et le seuil de 10% n'a pas été pris en compte (code -1 dans le tableau 40). Pour le graphe A, seuls les déficits mensuels ont été considérés. Pour le graphe B, le déficit annuel a également été pris en compte. La figure C représente la projection dans le plan factoriel 1x2 de la RUM associée à chaque peuplement.

deux ou trois mois qui intervient dans l'explication des variations de croissance. Bien que les RUM soient globalement assez élevées (150 à 220 mm), il apparaît que le déficit de juin intervient pour les plus "faibles" RUM (CHS18 et CHS86) et que, sur les plus fortes réserves, c'est le déficit de septembre qui se combine aux mois de juillet et août (CHP18 et CHS58).

Pour les peuplements de l'Est de la France, qui bénéficient de pluies annuelles de l'ordre de 850 mm et 400-500 mm pendant la saison, les indices de déficit expliquent en moyenne 25% des variations inter-annuelles de croissance radiale des arbres. Pour les plus faibles RUM (< 90 mm ; CHS51, HET21, HET54b et HET52) ce sont les déficits du début de saison (juin-juillet) qui jouent un rôle majeur sur la croissance (Tableau 44). La comparaison HET54b et HET54a (peuplements soumis aux mêmes conditions climatiques) permet de mettre en évidence le rôle important de la RUM dans la détermination des périodes clés pour la croissance. La faible RUM se traduit par une prépondérance des déficits du début de saison (juin-juillet ; HET54b) alors que, dans le cas d'une forte RUM, ce sont les déficits de fin de saison qui modulent la croissance annuelle. Les mêmes observations peuvent être faites pour les deux peuplements HET02 et HET60.

Les placettes échantillonnées de résineux bénéficiant généralement de précipitations très abondantes (1000 à 2000 mm annuels), les contraintes hydriques sont généralement faibles. Ainsi, ce sont les températures (hivernales) qui jouent le plus grand rôle sur les variations inter-annuelles de croissance radiale. Pour les placettes EPC39a et SP68, les faibles RUM (65 et 60 mm respectivement) pourraient expliquer en partie l'effet du déficit de réserve estival malgré les pluies abondantes.

La répartition des 30 peuplements de feuillus dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP réalisée à partir des résultats des fonctions de réponse permet de confirmer la structuration des relations observées entre la croissance et les contraintes en eau (Figure 41). Les deux premiers axes de l'ACP mise en œuvre sur le tableau de données (indices de déficits mensuels et annuels) expliquent 60% de la variance totale. Les sites qui contribuent le plus à la définition de l'axe 1 sont les peuplements caractérisés par une corrélation forte entre l'indice annuel de déficit de réserve et les variations de croissance (extrémité négative ; CHP18, HET14, CHS86...) ou au contraire par une absence de relation (extrémité positive ; CHP49, CHP59...). A l'extrémité positive de l'axe 2 se répartissent les peuplements pour lesquels les variations inter-annuelles de croissance radiale sont essentiellement déterminées par les contraintes en eau du début de saison (juin-juillet) (HET21, HET54b, HET03, CHS03...). Dans la majorité des cas, ces peuplements sont caractérisés par des réserves utiles moyennes à faibles (< 100 mm). A l'extrémité négative de l'axe, se localisent les sites à fortes RUM pour lesquels les déficits de fin de saison jouent un rôle majeur dans les variations de croissance.

10.3 Comparaison des approches mensuelle (P et T) et journalière (indices de déficit de réserve)

Le **Tableau 45** présente les fonctions de réponse obtenues à partir des données mensuelles de précipitation et de température. Globalement, les fonctions de réponse sont moins significatives (exemples ci-dessous de valeurs de r extraites des tableaux 40 et 45). Ceci peut être attribué d'une part au nombre de régresseurs initiaux plus importants (24 contre 16) et, d'autre part, aux seuils de signification des paramètres climatiques mensuels moins élevés.

	P-Tmin	Déf-Tmin	P-Tmax	Déf-Tmax
CHP18	0.312	0.535	0.260	0.404
CHS03	0.282	0.416	0.092	0.227
CHS18	0.292	0.355	0.093	0.170
HET03	0.108	0.302	0.369	0.479
HET60	0.290	0.349	0.388	0.498

Pour CHP18, le cumul des pluies de mai-juin-juillet explique 27% de la variance inter-annuelle de croissance alors que le déficit de juillet-août-septembre explique près de 33%. Pour HET14, les pluies de juillet expliquent 16% de la croissance annuelle alors que la prise en compte du déficit de réserve permet d'expliquer près de 43% de la variance avec le seul mois d'août. De la même façon pour HET21, les pluies de juillet expliquent 21% de la variance alors que le déficit de juillet-août en explique plus de 40% (**Tableau 45**).

10.4 Conclusions

Pour 23 des 30 peuplements de feuillus et 5 des 11 peuplements de résineux, le bilan hydrique s'est révélé être un outil performant pour expliquer les variations inter-annuelles de croissance radiale des arbres. Les analyses ont confirmé le rôle capital de l'alimentation hydrique du hêtre et du chêne dans la régulation de leur croissance radiale déjà mis en évidence sur le plateau lorrain (Becker *et al.* 1994 ; Badeau 1995) et dans la plaine d'Alsace (Bréda 1999). Pour les feuillus, les taux de variance expliquée varient de 8 à 43%. L'indice de déficit de réserve annuel intervient dans 7 cas. Pour 16 peuplements, c'est le déficit d'un mois ou d'une combinaison de mois particuliers qui expliquent le mieux les fluctuations de croissance. Le déficit de réserve apparaît plus déterminant pour le hêtre que pour le chêne aussi bien au niveau du nombre plus élevé de peuplements pour lesquels le déficit est une variable significative qu'au niveau du pourcentage de variance expliquée : 13 peuplements sur 15 avec des taux de variance expliquée de 12 à 43% pour le hêtre (moy=25%) et 10 peuplements sur 15 avec des taux de 8 à 32% pour le chêne (moy=19%). Ceci est cohérent avec les résultats concernant l'analyse des sensibilités moyennes des séries chronologiques qui, en apparaissant plus fortes pour le hêtre que pour les chênes, suggérait une plus forte sensibilité au climat des hêtraies. Les taux de variance sont cohérents avec les résultats récents de Bréda (1999) en forêt de la Harth (Haut-Rhin). Sur la période 1964-1994, le bilan hydrique explique respectivement 27 et 30% des variations inter-annuelles de croissance radiale des

et Granier *et al.* (1995) montrent que, sur la période 1950-1992, les déficits annuels expliquent 55% des variations inter-annuelles de croissance radiale des arbres.

Pour les feuillus, les taux d'explication des seules variables thermiques sont "faibles" (entre 10 à 15%) par rapport aux indices de déficit de réserve. Parmi les variables considérées, la température de décembre (n-1) intervient dans 8 cas sur 30 (environ 25%) avec un effet positif sur la croissance. D'une façon générale, les effets thermiques pendant la saison de végétation (mai à octobre) ne sont généralement significatifs que dans les cas où aucun indice de déficit de réserve n'apparaît lié à la croissance (5 peuplements). Sur résultat s'explique par le fait que pendant la saison de croissance, l'effet des températures est pris en compte dans les indices de déficit qui "synthétisent" le couplage pluie – température.

La variabilité de la réserve utile, de l'indice foliaire et de la pluviométrie entre placettes interagissent de manière complexe sur le bilan hydrique des sols, mais expliquent en grande partie les différences de comportement. Pour les résineux et une partie des peuplements feuillus (5 sites sur 30) bénéficiant de fortes pluies annuelles et bien réparties pendant la saison, les contraintes en eau sont en général assez faibles et ne jouent un rôle déterminant dans les variations inter-annuelles de croissance des arbres. Pour les résineux, ce sont les températures d'hiver et de printemps qui semblent moduler une grande part des variations inter-annuelles. Pour les autres peuplements, bénéficiant de régimes pluviométriques moins favorables, les périodes clés pour la croissance diffèrent selon la capacité du sol à stocker l'eau qui permet de tamponner ou de différer l'arrivée du stress : importance du début de saison pour les faibles réserves et de fin de saison pour les réserves plus importantes.

Par rapport à une approche pluviométrique classique, l'utilisation des indices de déficit hydrique améliore notablement les modèles climatiques : plus fortes corrélations entre les variables climatiques (prédicteurs) et les indices de croissance et réduction du nombre de prédicteurs. Dans notre cas, bien que le nombre de prédicteurs ait été réduit par la prise en compte des indices de stress, beaucoup de fonctions de réponse n'apparaissent pas globalement significative. Le problème est que les modèles avec un nombre élevé de prédicteurs ne satisfont pas au principe de parcimonie. Un bon modèle doit avoir un nombre restreint de paramètres et, quand un nombre important de prédicteurs ne sont pas utiles, le modèle n'est pas satisfaisant globalement. Dans une optique descriptive, ces modèles permettent de préciser les périodes clés pour la croissance mais ne doivent pas être utilisés dans une optique de prédiction. Pour un tel objectif, il est indispensable de sélectionner un sous-ensemble de prédicteurs (Guiot 1991).

IV. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Cette étude avait pour objectifs d'analyser les niveaux de contraintes en eau subis par 41 peuplements forestiers du réseau RENECOFOR et de tester la pertinence et la validité du bilan hydrique comme variable explicative des variations inter-annuelles de la croissance radiale des arbres. A partir des données climatiques journalières de 68 stations Météo-France et de la caractérisation des paramètres stationnels et dendrométriques spécifiques des placettes, le modèle de bilan hydrique au pas de temps journalier a permis de caractériser la durée et l'intensité des contraintes en eau. Les données météorologiques ont permis non seulement de caractériser les différents contextes et gradients bioclimatiques mais également de mettre en évidence un réchauffement notable depuis 40 à 50 ans variant de 1 à 2°C selon la station, le paramètre et la période de l'année considérés. Ces variations climatiques ne se traduisent par une aggravation importante et systématique des contraintes hydriques pour les peuplements étudiés. Cette conclusion doit néanmoins rester prudente et sa confirmation nécessiterait la poursuite des observations dans les années à venir. L'absence de données précises concernant les variations inter-annuelles et à plus long terme de la longueur de la saison de végétation (dates d'apparition et de chute des feuilles) et des indices foliaires des peuplements incite également à la prudence quant aux effets futurs des changements climatiques sur la croissance, la vitalité et la stabilité des écosystèmes forestiers étudiés. Pour les boisements futurs, et dans l'hypothèse où ces changements perdurent, il serait raisonnable, pour ne pas sensibiliser les peuplements aux aléas climatiques, et éviter l'apparition des symptômes de dépérissement à plus ou moins long terme, de limiter les boisements aux stations dont l'alimentation en eau n'est pas un facteur limitant essentiel. En effet, notre travail a clairement mis en évidence le rôle clé de ce paramètre dans la réduction non seulement de la durée du stress mais également de son intensité. Dans le cadre de ces changements, le problème de la gestion des peuplements est plus délicat. On ne peut pas recommander un type de gestion particulier. Il s'agirait plutôt de moduler les régimes d'éclaircies selon les types de stations et de peuplements de façon à minimiser la compétition pour l'eau lors de périodes à déficits pluviométriques importants (Lebourgeois et Becker 1996 ; Bréda 1999).

Même si des incertitudes demeurent quant aux effets de la variation inter-annuelle non prise en compte dans cette étude de certains paramètres du modèle (longueur de la saison de végétation, indices foliaires) et aux imprécisions sur le calcul de la réserve utile en eau du sol, les indices de contraintes issus du modèle de bilan hydrique sont plus performants que les pluviométries mensuelles pour expliquer les variations de la croissance radiale des peuplements et caractériser les périodes clés au cours de la saison de végétation. Jusqu'à présent, le modèle de bilan hydrique n'avait été utilisé que sur des peuplements de feuillus de plaine dans le quart nord-est de la France (Badeau 1995 ; Granier *et al.* 1995 ; Bréda 1999). Cette étude a montré que cette approche peut être utilisée dans une gamme beaucoup plus large de conditions pédo-climatiques et d'espèces même si dans des contextes particuliers de très fortes pluviométries (peuplements de résineux en montagne par exemple) et/ou des stations à réserve utile très élevée (250 à 300 mm), les sorties du modèle sont moins performantes pour expliquer le comportement moyen des peuplements. L'alimentation hydrique joue donc un rôle capital dans la régulation de la croissance du hêtre et des chênes sessile et pédonculé. Localement, le sol et sa capacité de stockage en eau apparaît cependant comme un facteur essentiel de la variabilité des réponses observées et du déterminisme des

phases clés pour la croissance. Le sol à réserve la plus faible est celui sur lequel la réserve relative atteint le plus précocement le seuil de déficit, ce qui signifie que la contrainte hydrique subie par les arbres sera plus précoce (début juin) et interviendra typiquement pendant la période de croissance active des arbres. En revanche, le sol à plus forte réserve utile atteint le seuil de contrainte hydrique plus tardivement alors que la croissance annuelle des arbres est pratiquement acquise (Bréda 1999). Une faible réserve utile s'épuise aussi plus rapidement et plus souvent, or ce niveau minimum de la réserve, s'il atteint des valeurs proches de zéro, peut affecter de manière irréversible certaines parties des arbres (racines, rameaux terminaux).

Cette étude a donc permis de confirmer l'intérêt du bilan hydrique forestier dans une approche de type dendroclimatologique. En intégrant à la fois des données stationnelles (sol, climat...) et dendrométriques (LAI...), les indices issus du modèle reflètent d'une façon fiable les contraintes subies par les arbres et permettent d'expliquer une large part des variations de croissance observées. Dans le futur, une meilleure prise en compte des variations de certains paramètres du modèle (évolution de l'indice foliaire, de la phénologie...), des processus de fonctionnement photosynthétique (par une approche des processus de limitation des échanges de carbone à la même échelle que la transpiration des arbres)... devrait augmenter l'efficacité du modèle aussi bien sur le plan descriptif que prédictif.

V. BIBLIOGRAPHIE

- Aussenac, G., Boulangeat, C., 1980. Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Annales des Sciences Forestières*, 36 (4), 91-107.
- Aussenac, G., Granier, A., 1979. Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France. II. Etude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Annales des Sciences Forestières*, 36, 265-280.
- Badeau, V., 1995. Etude dendroécologique du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole. *Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy I*, 238 p.
- Balling, R.C., Vose, R.S., Weber G.R., 1998. Analysis of long-term European temperature records: 1751-1995. *Climate Research*, 10, 193-200
- Baize, D., 1988. Guides des analyses courantes en pédologie. *INRA, Paris*, 172 pages
- Becker, M., 1987. Bilan de santé actuel et rétrospectif du sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Etude écologique et dendrochronologique. *Annales des Sciences Forestières*, 44 (4), 379-402.
- Becker, M., 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research*, 19, 1110-1117.
- Becker, M., Nieminen, T.M., Geremia, F., 1994. Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO₂. *Annales des Sciences Forestières*, 51, 477-492.
- Beniston, M., Rebetez, M., Giorgi, F., Marinucci, M.R., 1994. An analysis of regional climate change in Switzerland. *Theor. Appl. Climatol.*, 49, 135-139
- Betout, P., 1979. Recherche sur l'évolution de la température en France au cours des cinquante dernières années (période 1921-1974). *Note technique du Service Météorologique Métropolitain*. Novembre 1979.
- Black, T.A., 1979. Evapotranspiration from douglas fir stands exposed to soil water deficits. *Water Resources Research*, 15, 164-170.
- Bouten, W., Schaap, M.G., Bakker, D.J., Verstraten, J.M., 1992. Modelling soil water dynamics in a forested ecosystem. I – A site specific evaluation. *Hydrological Processes*, 6, 435-444.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., 1970. Time series analysis: Forecasting and control, Holden-Day, San Francisco, 575 p.
- Bradley, R.S., Diaz, H.F., Eischeid, J.K., Jones, P.D., Kelly, P.M., Goodess, C.M., 1987. Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere Land Areas since the Mid19th Century. *Science*, 237, 171-175,
- Brazdil, R., Budikova, M., Auer, I., Böhm, R., Cegnar, T., Fasko, P., Lapin, P., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Koleva, E., Niedzwiedz, T., Ustrnul, Z., Szalai, S., Weber, R.O., 1996. Trends of maximum and minimum daily temperatures in Central and Southeastern Europe. *Int. J. Climatol.*, 16, 765-782.
- Bréda, N., 1994. Analyse du fonctionnement hydrique des chênes sessile (*Quercus petraea*) et pédonculé (*Quercus robur*) en conditions naturelles ; effets des facteurs du milieu et de l'éclaircie. Nancy : Université Henri-Poincaré - Nancy I, 59p. + publications (Thèse).

- Bréda, N.**, 1998. Détermination de l'indice de surface foliaire de placettes permanentes de suivi des écosystèmes forestiers (RENECOFOR) et proposition de protocoles de suivi à long terme. Rapport UE, n°95.60.FR.0030, 70 pages
- Bréda, N.**, 1999a. Bilan hydrique et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes. Dépérissement forestier en vallée du Rhin. *Rapport Scientifique final Convention ONF / INRA*. 60 pages
- Bréda, N.**, 1999b. L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française*, 51 (2), 135-150.
- Bréda, N., Cochard, H., Dreyer, E., Granier, A.**, 1993. Water transfert in a mature oak stand (*Quercus petraea*) : seasonal evolution and effects of a severe drought. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 1136-1143.
- Bréda, N., Granier, A.**, 1996. Intra- and Inter-annual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Annales des Sciences Forestières*, 53, 521-536.
- Bréda, N., Landmann, G.**, 1995. Santé des forêts et contraintes environnementales : éléments d'interprétation. Les contraintes climatiques. Les contraintes hydriques : leur rôle dans les variations interannuelles de l'état des cimes des chênes. Département de la Santé des Forêts (1995). La santé des forêts (France) en 1994. Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (DERF) Paris, 57-59
- Brêthes (A.), Ulrich (E.)**. (coordinateurs). - RENECOFOR - Caractéristiques pédologiques des cent deux peuplements du réseau. Fontainebleau : Office National de Forêts, Département des Recherches Techniques, 1997. - 573 p. (ISBN 2 - 84207 - 112 - 3).
- Briffa, K.R.**, 1992. Increasing productivity of "natural growth" conifers in Europe over the last century. International Dendrochronological Symposium « Tree rings and Environment ». Lund University Department of Quaternary Geology, 34, 64-71.
- Cochard, H., Tyree, M.T.**, 1990. Xylem dysfunction in *Quercus* : vessel size, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. *Tree Physiology*, 6, 393-407.
- Comps, B., Letouzey, J., Savoie J.M.**, 1987. Phénologie du couvert arborescent dans une hêtraie-chênaie d'Aquitaine. *Annales des Sciences Forestières*, 44, 153-170.
- Cook, E.R.**, 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37-59.
- Cook, E.R.**, 1990. A conceptual linear aggregate model for tree rings. in " *Methods of dendrochronology : Applications in the environmental sciences* ". Kluwer Academic Publishers. COOK E.R., KAIRIUKSTIS L.A. (eds.), 98-104.
- Cook, E.R., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V.**, 1990. Tree-Ring standardisation and growth trend estimation. in " *Methods of dendrochronology : Applications in the environmental sciences* ". Kluwer Academic Publishers. COOK E.R., KAIRIUKSTIS L.A. (eds.), 104-123.
- Cook, E.R., Peters, K.**, 1997. Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *The Holocene*, 7 (3), 361-370.
- Courbet, F.**, 1981 Contribution à la phénologie des espèces forestières. Influence des sommes de températures. *DEA Sciences Forestières*, Université Nancy I, 48 p + annexes

- Desplanque, C., Rolland, C., Michalet, R., 1998. Dendroécologie comparée du sapin blanc (*Abies alba*) et de l'épicéa commun (*Picea abies*) dans une vallée alpine de France. *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 737-748.
- Dessens J., 1995. Severe consecutive weather in the context of a nighttime global warming, *Geophysical Research Letters*. 22, 1241-1244.
- Douglass, A.E., 1936. Climatic cycles and tree-growth. Vol. III. A study of cycle. *Carnegie Inst. Washington Publ.*, 289 pages
- Duchemin, B., 1998. Apport des capteurs satellitaires à large champ pour l'estimation de variables de fonctionnement des écosystèmes forestiers tempérés. *Thèse de l'Université Paul Sabatier – Toulouse III*.
- Duchemin, B., Laguarde, J.P., Guyon, D., 1999. Potential and limit of NOAA-AVHRR temporal composite data for phenology and water stress monitoring of temperate forest ecosystems. *Int. J. Remote. Sens.* (in press).
- Dupouey, J.L., Denis, J.B., Becker, M., 1992. A new method of standardization for examining long term trends in tree-ring chronologies. International Dendrochronological Symposium "Tree rings and Environnement", Lund University Department of Quaternary Geology, 34, 85-88.
- Efron, B., 1979. Bootstrap Methods : Another look at the Jackknife. *Annals of statistics*, 7, 1-26.
- Easterling, D.R., Horton, B., Jones, P.D., Peterson, T.C., Karl, T.R., Parker, D.E., Salinger, M.J., Razuvayev, V., Plummer, N., Jamason, P., Folland, C.K., 1997. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277, 364-367.
- Fritts H.C., Xiangding W., 1986. A comparison between response-function analysis and other regression techniques. *Tree-Ring Bulletin*, 46, 31-46.
- Fritts, H.C., 1971. Dendroclimatology and Dendroecology. *Quaternary Research*, 1 (4), 419-449.
- Fritts, H.C., 1976. Tree-ring and climate, Academic Press London, 576 p.
- Gadbin-Henry, C., 1994. Etude dendroécologique de *Pinus Pinea* L. Aspects méthodologiques. *Thèse de l'Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III*. Faculté des Sciences et Techniques Saint-Jérôme. 79 pages.
- Galoux, A., Schnock, G., Grulois, J., 1967. Recherches sur l'écosystème forêt. Série B : la chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont. Contribution n° 5 : la variabilité phénologique et les conditions climatiques. *Bulletin de la Société Royale Forestière de Belgique*, 100, 309-314.
- Gandolfo, C., Tessier, L., 1994. Analyse dendroécologique sur des sapins (*Abies alba* Mill) et des épicéas (*Picea abies* (L.) Karst) de différents classes de défoliation dans la forêt de Vigo di Ton (Trento, Italie). *Annales des Sciences Forestières*, 51, 391-406.
- Gower, S.T., Norman, J.M., 1991. Rapid Estimation of Leaf Area Index in Conifer and Broad-Leaf Plantations. *Ecology*, 72, (5), 1896-1900.
- Granier, A., Badeau, V., Bréda, N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, 47, n° spécial, 59-68.
- Granier, A., Bréda, N., 1996. Modelling canopy conductance and stand transpiration on an oak forest from sap flow measurements. *Annales des Sciences Forestières*, 53, 537-546.

- Granier, A., Bréda, N., Biron, P., Villette, S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological modelling*, 116, 269-283.
- Guiot, J., 1986. ARMA techniques for modelling Tree-ring response to climate and for reconstructing variations of paleoclimates. *Ecological Modelling*, 33, 149-171.
- Guiot, J., 1991. The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bulletin*, 51, 39-41.
- Guiot, J., Goeury, C., 1996. PPPBase, a software for statistical analysis of paleoecological and paleoclimatological data. *Dendrochronologia*, 14, 295-300.
- Guiot, J., Tessier, L., Serre-Bachet, F., 1982. Application de la modélisation ARMA en dendroclimatologie. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 294, 133-136.
- Hasselmann, K., 1997. Are we seeing global change. *Science*, 276, 914-915.
- Heino, R., Brazdil, R., Forland, E., Tuomenvirta, H., Alexandersson, H., Beniston, M., Pfister, C., Rebetez, M., Rosenhagen, G., Rösner, S., Wibig, J. 1999. Progress in the study of climatic extremes in northern and central Europe. *Climatic Change*, 42, 151-181.
- Huber, F., 1993. Déterminisme de la surface des vaisseaux du bois de chênes indigènes (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* Liebl.). Effet individuel, effet de l'appareil foliaire, des conditions climatiques et de l'âge de l'arbre. *Annales des Sciences forestières*, 50 (5), 509-524.
- Hunter, A.F., Lechowicz, M.J., 1992. Predicting the timing of budburst in temperate trees. *Journal of Applied Ecology*, 29, 597-604
- Jones, P., 1998. It was the best of times, it was the worst of times. *Science*, 280, 544-545.
- Jones, P.D., Wigley, T.M.L., 1990. Global warming trends. *Scientific American*, 263, 84-91
- Jordan, D.N., Lockaby B.G., 1990. Time series modelling of relationships between climate and long term radial growth of loblolly pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 738-742.
- Karl, T.R., Jones, P.D., Knight, R.W., Kukla, G., Plummer, N., Razuvayev, V., Gallo, K.P., Lindsey, J., Charlson, R.J., Peterson, T.C., 1993. A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 1007-1023.
- Kramer, K., 1994. Selecting a Model to Predict the Onset of Growth of *Fagus sylvatica*. *Journal of Applied Ecology*, 31, (1), 172-181.
- Landmann, G., 1993. Role of climate, Stand Dynamics and Past Management in Forest Declines : A Review of Ten Years of Field Ecology in France. In "*Forest Decline in the Atlantic and Pacific Region*". Ed. Huettl/Mueller-Dombois, 19-39.
- Leblanc, D.C., 1990. Relationships between breast-height and whole-stem growth indices for red spruce on Whiteface Mountain, New York. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 1399-1407.
- Lebourgeois, F., 1997. RENECOFOR - Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau. Editeur : Office National de Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 075 - 5, 307 pages.
- Lebourgeois, F., 1999. Les chênes sessile et pédonculé (*Quercus petraea* Liebl. et *Quercus robur* L.) dans le réseau RENECOFOR : rythme de croissance radiale, anatomie du bois, de l'aubier et de l'écorce. *Revue Forestière Française*, 51(4), 522-536.

- Lebourgeois, F., Becker, M., 1996. Dendroécologie du pin laricio de Corse dans l'Ouest de la France. Evolution du potentiel de croissance au cours des dernières décennies. *Annales des Sciences Forestières*, 53 (5), 931-946.
- Lebourgeois, F., Ulrich, E., Ponce, R., 1998. Réactivité d'arbres âgés à l'ouverture du peuplement. Quelques exemples livrés par l'étude des placettes du réseau RENECOFOR. *Revue Forestière Française*, 50(2), 139-148.
- Loustau, D., Cochard H., 1991. Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de pin maritime à Molinie [*Molinea coerulea* (L.) Moench]. *Annales des Sciences Forestières*, 48, 29-45.
- Loustau, D., Bert, D., Trichet, P., 1999. Fonctionnement primaire et productivité de la forêt landaise : implications pour une gestion durable. *Revue Forestière Française*, 51(5), 571-591.
- Malaisse, F., 1964. Contribution à l'étude des hêtraies de l'Europe occidentale. Note 4. Quelques observations phénologiques de hêtraies en 1963. *Bull. Soc. Roy. Bot. de Belgique*, 97, 85-87.
- Malgras, J., Debouzie, D., 1997. Les modèles ARMA peuvent-ils être utilisés avec confiance en écologie ? *Acta Oecologica*, 18, 427-447.
- Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K., 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392, 779-787.
- Messaoudène, M., Tessier, L., 1997. Relations cerne-climat dans des peuplements de *Quercus afares* Willd et *Quercus canariensis* Pomel en Algérie. *Annales des Sciences Forestières*, 54, 347-358.
- Monserud, R.A., 1986. Time-series analyses of tree-ring chronologies. *Forest Science*, 32, 2, 349-372.
- Munaut, A.V., 1966. Recherche dendroclimatologique sur le *Pinus sylvestris*. I. Etude de 45 *Pinus sylvestris* récents originaires de Belgique. *Agricultura*, XIV, 2 ième Série (2), 193-232.
- Nefaoui, M., 1996. Dendroécologie, productivité et dynamique de la croissance radiale du pin maritime naturel au Maroc. *Thèse de l'Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III*. Faculté des Sciences et Techniques Saint-Jérôme. 2 tomes, 142 et 156 pages.
- Nizinski, J., Saugier B., 1988. Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Ecol. Plant.*, 9, 311-329
- Overpeck, J., Hughen, K., Hardy, D., Bradley, R., Case, R., Douglas, M., Finney, B., Gajewski, K., Jacoby, G., Jennings, A., Lamoureux, S., Lasca, A., MacDonald, G., Moore, J., Retelle, M., Smith, S., Wolfe, A., Zielinski, G., 1997. Artic environmental change of the last four centuries. *Science*, 278, 1251-1256.
- Polge, H., 1973. Facteurs écologiques et qualité du bois. *Annales des Sciences Forestières*, 30 (3), 307-328.
- Polge, H., Keller, R., 1973. Qualité du bois et largeur d'accroissements en forêt de Tronçais. *Annales des Sciences Forestières*, 30 (2), 91-125.
- Rebetez, M. Beniston, M., 1998. Changes in temperature variability in relation to shifts in mean temperatures in the Swiss Alpine region this century. In "Past, present and future climate variability and extremes. The impact on forests", edited by Beniston M and Innes J, Springer-Verlag, Heidelberg/New-York, 49-58
- Rolland, C., Petitcolas, V., Michalet, R., 1998. Changes in radial tree growth for *Picea abies*, *Larix decidua*, *Pinus cembra* and *Pinus uncinata* near the alpine timberline since 1750. *Trees*, 13, 40-53.

- SAS., 1988. -SAS/STAT User's Guide, Release 6.03 Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1028 p.
- Savoie, J.M., Comps, B., Letouzey, J., Gelpe, J., 1988. Bilan hydrique des hêtraies mixtes en relation avec le comportement et la régénération du hêtre (*Fagus sylvatica* L.). *Ecol. Plant.*, 9, 285-300.
- Schulman, E., 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. Tucson University Arizona Press, 142 pages
- Schweingruber, F.H., 1985. Abrupt changes in growth reflected in tree ring sequences as an expression of biotic and abiotic influences. Inventorying and monitoring endangered forests. IUFRO Conference Zurich 1985, pp. 291-295, Birmensdorf, Eidg. Anstalt für das forstliche versuchswesen.
- Schweingruber, F.H., 1992. Event years and pointer years. International Dendrochronological Symposium "Tree rings and Environnement", Lund University Department of Quaternary Geology, 34, 288-292.
- Schweingruber, F.H., Eckstein, D., Serre-bachet, F., Braker, O.U., 1989. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. Informal meeting of dendrochronologists from southern and central Europe, Lourmarin, Provence, France, 4 May, 1989, 9-38.
- Schweingruber, F.H., Wehrli, U., Aellen-Rumo, K., Aellen, M., 1991. Weiserjahre als Zeiger extremer Standortseinflüsse., *Schweiz. Z. Forstwes.*, 142, 1, 33-52.
- Strackee, J., Jansma, E., 1996. The statistical properties of mean sensitivity - a reappraisal. *Tree-Ring Bulletin*, 121-135.
- Tessier du Cros, E., 1981. Principaux résultats en matière d'amélioration du hêtre. In "*Le hêtre*", INRA (Ed.), Paris, 198-205.
- Tessier, L., 1982. Analyse dendroclimatologique comparée de six populations de *Pinus sylvestris* L. dans la Drôme. *Ecologia mediterranea*, VIII (3), 185-202.
- Tessier, L., 1984. Dendroclimatologie et écologie de *Pinus sylvestris* L. et *Quercus pubescens* Willd. Dans le Sud-Est de la France. *Thèse de l'Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III*. Faculté des Sciences et Techniques Saint-Jérôme. 275 pages
- Tessier, L., 1986. Approche dendroclimatologique de l'écologie de *Pinus sylvestris* L et *Quercus pubescens* Willd dans le Sud-Est de la France. *Acta Oecologica Oecologica Plantarum*, 7(21), 4, 339-355.
- Tessier, L., 1989. Spatio-temporal analysis of climate-tree ring relationships. *New Phytol.*, 111, 517-529.
- Tessier, L., Guibal, F., Schweingruber, F.H., 1997. Research strategies in dendroecology and dendroclimatology in mountain environments. *Climatic Change*, 36, 499-517.
- Tessier, L., Nola, P., Serre-Bachet, F., 1994. Deciduous Quercus in the Mediterranean region: tree-ring/climate relationships. *New Phytol.*, 126, 355-367.
- Thioulouse, J., Chessel, D., Doledec, S., Olivier, J.M., 1997. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing*, 7(1), 75-83.
- Van Deusen, P.C., Reams, G.A., 1993. Frequency domain tree-ring standardization. *Forest Science*, 39 (1), 55-65.
- Vilette, S., 1994. Etablissement du bilan hydrique sur une chronoséquence de peuplements de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) du Beaujolais. Essai de modélisation. *Mémoire fin d'étude, ENITA Dijon*, 52 p + annexes.
- Visser, H., 1995. Note on the relation between ring widths and basal area increments. *Forest Science*, 41, 297-304.

- Visser, H., Molenaar, J., 1992. Estimating trends and stochastic response functions in dendroecology with an application to fir decline. *Forest Science*, 38(2), 221-234.
- Warren, W.G., Leblanc, D.C., 1990. Dynamic standardization of tree-ring series. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 1422-1431.