

une bonne corrélation entre pertes foliaires et besoins en eau décalés de 1 an sur la période 1989-94, mais à partir de 1995 les pertes foliaires deviennent beaucoup "trop" fortes eu égard à l'intensité des stress hydriques (fig. 35).

■ L'effet des sécheresses sur l'état des cimes a été confirmé pour plusieurs autres essences, mais le décalage est moins systématique que dans le cas du hêtre. Pour les chênes sessile et pédonculé, il semble que les pertes foliaires de l'année n soient influencées par les déficits hydriques des années $n-1$ et $n-2$. Les arrière-effets du climat sur les pertes foliaires de ces essences semblent donc plus importants que dans le cas du hêtre, et la dégradation progressive de l'état des houppiers est peut-être une conséquence des effets cumulés de plusieurs sécheresses consécutives, sachant en outre que des défoliations successives par les insectes peuvent également avoir un effet cumulatif. Dans le cas des chênes pubescent et vert, l'effet des sécheresses, avec un décalage de 1 an, est plus net, mais ce résultat devra être confirmé, ces deux essences étant peu représentées dans le réseau européen (seule la région méditerranéenne peut être étudiée). Pour les essences résineuses (sapin, pin maritime, pin d'Alep, mélèze), l'effet des sécheresses sur les pertes foliaires apparaît également, mais le décalage entre les pertes foliaires et les stress hydriques varie notablement (de 0 à 3 ans) selon les essences et les régions.

■ Cette étude a permis de réaliser un premier inventaire des facteurs susceptibles d'expliquer les variations inter-annuelles et les niveaux de pertes foliaires des arbres du réseau européen. Pour quelques essences, ces facteurs sont maintenant connus et les fluctuations de l'état des cimes sont mieux comprises, mais les résultats doivent être précisés. L'importance des facteurs biotiques est très variable selon les essences mais elle peut être prépondérante. De façon générale, leur impact est probablement sous-estimé en raison de la date assez tardive en saison des notations. Si l'influence des stress hydriques peut être mise en évidence, il n'est pas encore possible de déterminer des "seuils de sensibilité" : les changements intervenus dans la façon de noter pendant la période 1989-98, et l'importance variable des pertes foliaires d'une région à l'autre (le hêtre et les chênes présentent par exemple des niveaux de pertes foli-

aires plus forts dans l'Est de la France par rapport aux plaines du Nord-Ouest pour des niveaux de stress hydriques moins prononcés), compliquent la recherche de tels seuils. La prise en compte des effets de l'âge, de l'altitude et de la gestion forestière dans l'analyse des pertes foliaires est rendue difficile par le nombre restreint de placettes pour une essence dans une région donnée, eu égard au nombre de facteurs de l'environnement susceptibles d'expliquer ces pertes foliaires.

■ Cependant, en dépit de la difficulté indéniable d'interpréter les données de pertes foliaires acquises dans le cadre des réseaux d'observations, les résultats pour partie très positifs de cette étude suggèrent que les données récoltées sont relativement pertinentes à l'échelle régionale, et que des travaux complémentaires permettront peu à peu de connaître de façon plus précise l'impact des facteurs de l'environnement sur la santé des arbres forestiers ■

Ce projet de recherche a été cofinancé par la Commission Européenne (règlement 3528/86 sur la protection des forêts contre la pollution atmosphérique) et la DERE.

- **Badeau V.** (1999). Étude des relations entre l'état sanitaire des peuplements forestiers et les conditions de l'environnement. Premiers résultats de l'analyse spatio-temporelle de la partie française du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Rapport final à la CE et à la DERE, INRA Nancy, 172 p. + ann.
- **Badeau V., Bréda N., Landmann G.** (1997). La récente crise de vitalité du hêtre en plaine semble largement liée aux déficits hydriques. *Les Cahiers du DSF*, 1-1996 (La santé des forêts [France] en 1996, Min. Agri. Pêche (DERF), Paris, pp. 60-63
- **Landmann G., Nageleisen L.-M., Flot J.-L.** (1999). Le réseau systématique 16 x 16 km et la veille phytosanitaire : deux approches complémentaires de l'état sanitaire des forêts. *Les Cahiers du DSF*, 1-1999 (La santé des forêts [France] en 1998), Min. Agri. Pêche (DERF), Paris, ce vol.
- **Landmann G., Pierrat J.-C., Nageleisen L.-M.** (1999). 1995-97 : période de réajustement à la hausse de la notation de l'état des cimes des arbres forestiers en France. *Les Cahiers du DSF*, 1-1999 (La santé des forêts [France] en 1998), Min. Agri. Pêche (DERF), Paris, ce vol.

UNE NETTE TENDANCE À L'AUGMENTATION DES TEMPÉRATURES EN FRANCE DEPUIS LES ANNÉES 1950

François Lebourgeois, ENGREF Nancy,
André Granier et Nathalie Bréda, INRA
Nancy



A significant warming trend in France since 1950 - A total of 68 meteorological stations were used to detect possible climatic trends in France during the period 1950-97. 8 monthly parameters were analyzed: maximum and minimum temperatures, thermal amplitude, mean temperature, precipitation, number of frost days ($T_{\text{minimum}} < 0^{\circ}\text{C}$), of duration sunshine and potential evapotranspiration (ETP, Penman formula). Mean values were calculated for the year. The climatic data revealed: no general change in precipitation, thermal amplitude, of duration sunshine or ETP; where as a significant increase in mean annual temperature ($0,9^{\circ}\text{C}$), minimum temperature ($1,1^{\circ}\text{C}$), August temperature ($2,0^{\circ}\text{C}$) and minimum August temperature ($1,9^{\circ}\text{C}$) was noted. The period 1990-97 was the warmest since 1950. An average annuals of 18 days decrease in the number of winter frost days (-10 to -26 days) was also observed for 17 of the 33 thermal stations studied, but no change in the frequency of frost days occurred in May. No simple correlations appeared between changes in temperature and duration of sunshine or precipitation.

■ Dans le cadre du réseau RÉNÉCOFOR, une étude des relations entre les variations inter-annuelles de croissance des arbres et le climat a été entreprise sur 41 des 102 peuplements du réseau (Lebourgeois, 1999). Les données météorologiques de 68 stations du réseau national de Météo-France ont été utilisées pour juger du déterminisme climatique des variations inter-annuelles de croissance radiale des arbres, mais également pour analyser les dérives éventuelles du climat depuis 40 à 50 ans. Les tendances ont été étudiées aux niveaux mensuel et annuel, et sur la période de végétation des arbres (mai à septembre). Les paramètres analysés ont été le cumul des pluies, les températures minimale (T_{min}), maximale (T_{max}) et moyenne (T_{moy}), l'amplitude ther-

mique (Tmax-Tmin), et le nombre et la fréquence des jours de gelée (Tmin < 0°C). Les analyses ont porté sur 35 stations pluviométriques, 5 stations thermiques et 28 stations pluvio-thermiques réparties sur l'ensemble du territoire. Pour ces 28 stations, les évolutions mensuelles des durées d'insolation et d'évapotranspiration potentielle (ETP calculée selon la formule Penman) ont également été considérées.

Les températures ont nettement augmenté depuis le milieu du 20^{ème} siècle, et la période 1990-97 a été la plus chaude depuis 1950

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). Le réchauffement du mois d'août, qui apparaît dans 32 des 33 stations analysées, est le phénomène le plus marquant. Ces réchauffements mensuels se traduisent par une augmentation des températures annuelles et de la saison de végétation. Depuis 1950, l'augmentation de la température minimale a été en moyenne de +1,9°C pour le mois d'août et +1,1°C pour l'année en 50 ans. (Fig. 38 et Tabl. 10). Pour les températures moyennes, les augmentations ont été respectivement de +2,0°C pour le mois d'août et +0,9°C pour l'année en 50 ans. Pour près de 90 % des stations, il apparaît également que la période récente 1991-97 a été la période la plus chaude depuis 1949. Pour la température minimale du mois d'août, l'augmentation a été très régulière avec une succession de périodes de plus en plus chaudes depuis le début des années 1980 (1981-85, 1986-90, 1991-97).

Dans la moitié des cas (17 des 33 stations disposant de données thermiques), ce réchauffement a entraîné une réduction notable du nombre de jours de gelées annuelles de 18 jours en moyenne (-10 à -26), soit 1 jour de moins tous les 2 à 3 ans. Cependant, aucune modification de la fréquence des gelées tardives du mois de mai n'a été observée.

Les précipitations et la durée d'insolation varient moins et, contrairement aux températures, aucune tendance générale n'a pu être détectée. Les précipitations ont augmenté au mois de mai pour 18 des 63 stations et diminué au mois d'août dans 22 d'entre elles (-1 mm/an en moyenne). Pour 1/3 des stations, la durée d'insolation tend à diminuer au printemps, et à augmenter au mois d'août et au début de l'hiver. Pour l'évapotranspiration potentielle, la dérive est nette au mois d'août avec une augmentation moyenne de 1 à 2 % par an.

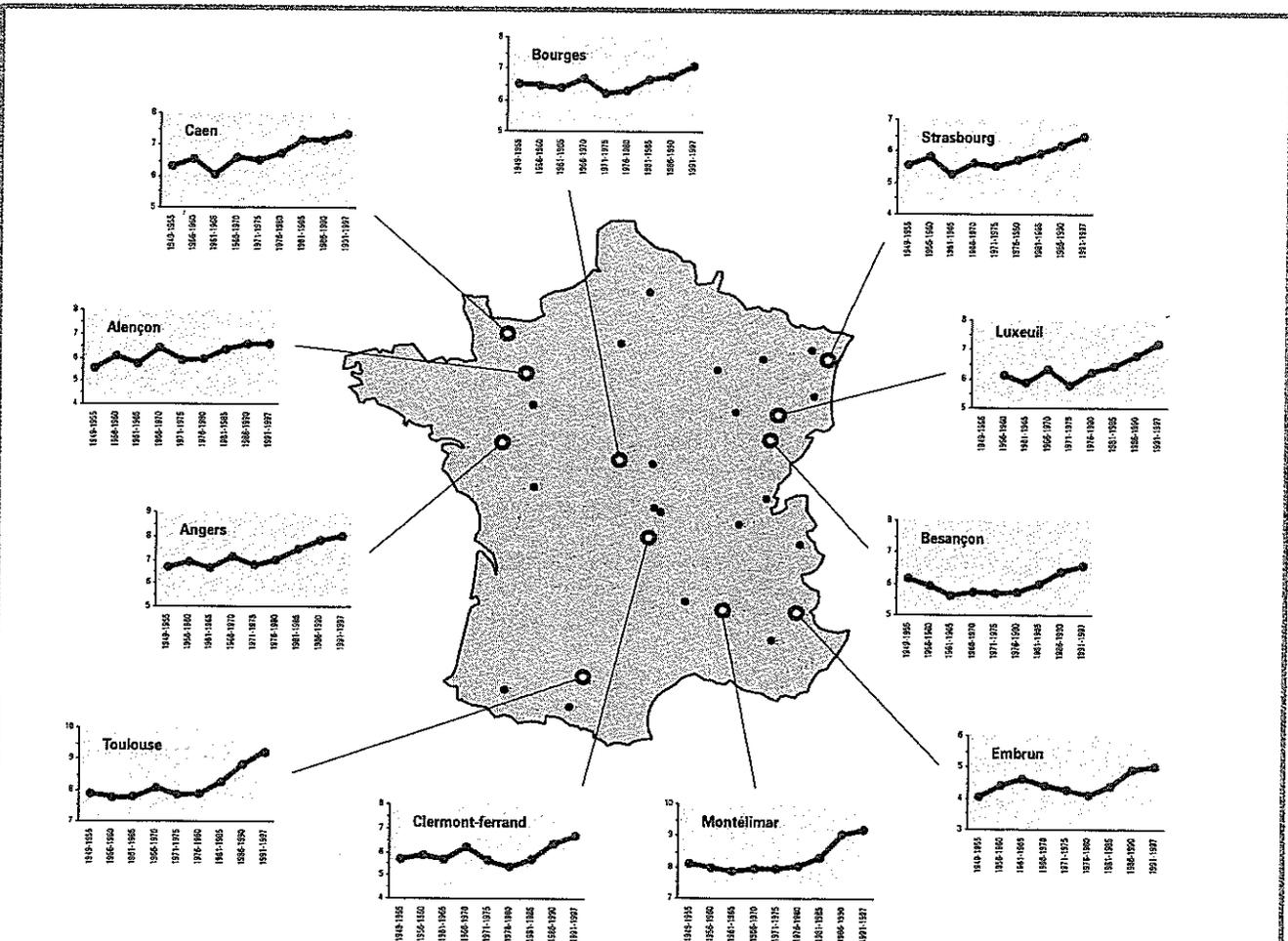


Fig. 38 : Exemple d'évolution de la température moyenne minimale annuelle (Tmin en °C) par périodes pour 11 des 33 stations thermiques du réseau météorologique national. Les ronds verts indiquent la localisation des 22 autres stations
Variations in minimum annual temperature (Tn in °C) by periods for 11 of the 33 thermal stations under study. Black circles indicate the location of the 22 other stations

Il n'apparaît pas de liaisons simples entre le réchauffement d'une part, et la durée d'insolation et le régime pluviométrique d'autre part. 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.

Cette dérive positive des températures est observée sur l'ensemble du territoire et dans de nombreuses autres régions du globe

Même si les séries analysées sont un peu courtes pour parler d'une véritable évolution à long terme du climat en France, la similitude des changements observés depuis 40 à 50 ans aussi bien dans des stations de plaine que dans des stations d'altitude situées dans des contextes climatiques très différents suggère qu'il s'agit d'un phénomène d'am-

pleur nationale. Cette similitude des changements exclut partiellement l'hypothèse de l'effet "île thermique urbaine", c'est-à-dire un réchauffement local dû à l'augmentation des activités humaines autour des stations météorologiques. Dans une étude sur l'évolution de la température en France au cours de la période 1921-74, Betout (1979) mentionnait d'ailleurs déjà un réchauffement du mois d'août non imputable à des changements de type de matériel ou de localisation des postes météorologiques. Des résultats similaires ont été observés dans d'autres sites en France (Dessens, 1995) et notamment dans les Alpes françaises où Rolland *et al.* (1998) ont montré une augmentation significative des températures minimales, spécialement en juillet, parallèlement à une diminution des températures maximales d'avril à juin. Pour Lyon, ces auteurs notent une augmentation de la température moyenne de juillet de 1,18°C/100 ans

(période 1881-90). 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 1949-95 (Bert, comm. pers.). Dans un contexte plus général, nos observations sont cohérentes avec les changements climatiques observés dans de nombreuses régions du globe depuis le milieu du 19^{ème} siècle (Jones, 1990). Pour les deux hémisphères, la température minimale moyenne annuelle a augmenté trois fois plus vite que la température maximale moyenne annuelle (sur l'année +0,84°C contre +0,28°C) pendant la période 1951-90 (Bradley *et al.* 1987 ; Jones et Wigley, 1990 ; Mann *et al.* 1998).

Les répercussions de tels changements sur la dynamique et la stabilité des écosystèmes forestiers restent à ce jour encore difficiles à analyser. L'augmentation des températures peut avoir un effet direct sur les différents processus physiologiques (photosynthèse, transpiration...) ou s'exprimer indirectement à travers une augmentation des contraintes hydriques, une modification du cycle de croissance des peuplements et plus précisément une modification de la durée de la saison de végétation. Dans notre étude, l'utilisation d'un modèle phénologique, fondé sur le cumul des températures journalières, prédit une date de débourrement avancée de 12 jours depuis 1988 par rapport aux années précédentes. Ces prédictions rejoignent celles faites récemment par Hasenauer *et al.* (1999) en Autriche avec une saison de végétation décalée de 11 jours.

Ainsi, quelles que soient les causes du réchauffement actuel - variabilité naturelle, ou plus vraisemblablement effet anthropique lié à une augmentation des gaz à effet de serre - il paraît important de mieux prendre en compte à l'avenir cette "nouvelle" donne, même si les effets de telles modifications à l'échelle de la vie d'un peuplement forestier sont encore largement inconnus.

Ces résultats ont été obtenus dans le cadre d'un projet financé par la Commission Européenne (règlement 3528/86 sur la protection des forêts contre la pollution atmosphérique).

Tabl. 10 : Évolution de la température minimale moyenne annuelle pour 32 stations du réseau Météorologique National (Météo-France). Pour chaque station, la pente de l'ajustement linéaire calculé sur les données annuelles indique l'augmentation moyenne de la température minimale (en °C/an) sur la période considérée (1968-97 pour la plus courte et 1949-97 pour les plus longues). Seules les augmentations significatives au seuil de 5 % ont été prises en compte. À partir de ces équations, l'augmentation de la température minimale annuelle a été estimée (en °C) entre 1950 et 1997. Par exemple, pour Angers, l'augmentation a été en moyenne de 0,032°C par an et, actuellement, la température minimale annuelle est supérieure de 1,54°C à celle de 1950

Variations in mean minimum annual temperature for 32 thermal stations in the French National Meteorological Network. For each station, the slope of the linear adjustment indicates the mean increase (in °C/year) over the study period (1968-97 and 1949-97 for the shortest and the longest periods respectively). Only the trends significant to 0,05 were taken into account. The increase in minimum annual temperature between 1950 and 1997 was estimated from the linear adjustment. For example, minimum annual temperature has increased by 0,032°C per year at Angers, and is now 1,54°C above the 1950 level

Station	Alt. (m)	Période (... à 1997)	Moyenne (°C)		Augmentation	
			1961-1990	1991-1997	pente (°C/an)	estimation
Accous	495	1952	5,8	6,6	ns	ns
Alençon	140	1949	6,1	6,5	0,021	1,03
Ambérieu	250	1950	5,7	6,7	0,025	1,2
Angers	57	1950	7,1	8	0,032	1,54
Besançon	307	1949	5,9	6,6	ns	ns
Bonneuil-en-France	51	1949	6,6	7,2	ns	ns
Bourges	61	1950	6,5	7,2	0,013	0,62
Bourg-St-Maurice	885	1950	3,5	4,4	0,026	0,99
Caen	64	1952	6,7	7,4	0,029	1,33
Chareil-Cintrat	280	1951	5,4	6,4	0,039	1,83
Clermont-Ferrand	329	1949	5,8	6,7	0,016	0,78
Colmar	220	1963	5,5	6,1	0,035	1,23
Phalsbourg	377	1950	5,6	6,0	0,013	0,62
Embrun	871	1953	4,5	5,0	0,015	0,68
Issanlas	1220	1956	1,7	2,4	0,027	1,13
Lamoura	1120	1962	0,3	1,7	0,055	1,98
Langres	467	1956	5,5	5,8	0,015	0,63
Le Mans	51	1949	6,6	7,4	0,028	1,37
Lorient	42	1965	7,7	8,1	0,023	0,76
Luxeuil	271	1956	4,2	5,2	0,033	1,39
Montélimar	73	1949	8,2	9,2	0,028	1,37
Nevers	175	1952	5,4	5,6	ns	ns
Pau	183	1955	7,7	8,6	0,043	1,85
Portiers	117	1949	6,6	6,7	ns	ns
St Auban	461	1968	6,7	7,2	0,027	0,81
St-Dizier	136	1962	6	6,7	0,040	1,44
St Girons	411	1956	6,5	7,0	0,019	0,79
St-Quentin	98	1949	5,8	6,1	ns	ns
Strasbourg	150	1950	5,7	6,5	0,020	0,96
Tarbes	380	1956	6,9	7,8	0,032	1,34
Toulouse	151	1949	8,1	9,2	0,03	1,47
Vichy	249	1950	5,2	6	ns	ns

■ **Bétout 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

■ **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 Mid 19th Century. *Science*, n°237, pp. 171-175

■ **Dessens J.** (1995). Severe consecutive weather in the context of a nighttime global warming. *Geophys. Res. Lett.*, n°22, pp. 1241-1244

- Hasenauer H., Nemani R.R., Schadauer K., Running S.W. (1999). Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *For. Ecol. Manage.*, n° 122(3), pp. 209-219
- Jones P.D. (1990). Le climat des mille dernières années. *La Recherche*, n° 219, pp. 304-312
- Jones P.D., Wigley T.M.L. (1990). Global Warming Trends. *Sci. Am.*, August 1990, pp. 66-73
- Lebourgeois F. (1999). Analyse du bilan hydrique et de la croissance des arbres dans les réseaux RENÉCOFOR. Rapport scientifique final. Contrat DGVI - INRA - Commission européenne (sous presse)
- Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. (1998). Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, n° 392, pp. 779-787
- 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*, n° 13, pp. 40-53

ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DES PRÉCIPITATIONS ATMOSPHÉRIQUES EN FRANCE DE 1993 À 1998 : MISE EN ŒUVRE DE NOUVEAUX INDICATEURS NATIONAUX

Erwin Ulrich et Marc Lanier, ONF
Fontainebleau



Changes in bulk precipitation chemistry in France from 1993 to 1998 and use of new national indicators - Mean national precipitation-weighted concentrations, the frequency of pH < 5.5 in ca. 350 bulk samples per year (each representing a 4-week sample period) and the frequency of acid solutions (titrated) were used. They were based on the measurements from 27 bulk precipitation collecting sites belonging to the RENÉCOFOR network. The overall tendency of all major ions (nitrate, ammonia, sulphate, calcium, sodium, chloride, magnesium and potassium) and pH was rather stable, with in some instances, irregular variations. The indicators presented have proven to be good tools for regular national reports on precipitation quality.

à noter : le signe □ renvoie au glossaire en fin d'article

Des analyses chimiques des précipitations ont été réalisées en France depuis plus de 150 ans (Ulrich et Williot, 1993). Ces mesures ont été effectuées jusqu'au milieu des années 70, le plus souvent de manière ponctuelle et pour une durée de quelques jours à 3 ans au maximum, ne permettant pas d'analyser une quelconque tendance à moyen ou long terme de la qualité des précipitations. Au début de la mise en place des réseaux, la France a d'abord participé, avec quelques sta-

tions de mesure de la qualité des précipitations, au Réseau Européen de Chimie Atmosphérique (European Air Chemistry Network), activité qui a commencé dans les années 50 mais a été arrêtée dans les années 60. Depuis 1977, la France participe, avec 3 à 6 stations, au réseau mondial BAPMoN (Background Air Pollution Monitoring Network, en français : réseau de surveillance de la pollution de l'air de fond, Cenac et Zéphoris, 1992). Avec 7 autres stations, la France contribue depuis 1984 à un réseau de surveillance européen nommé EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme, en français : programme européen de surveillance et d'évaluation). L'objectif de EMEP est de suivre à l'échelle européenne l'évolution de la qualité de l'air (ozone, composés organiques, composés azotés et précipitations), afin de pouvoir orienter la politique européenne de réduction des émissions. C'est une activité liée au travail de la Commission Économique pour l'Europe des Nations-Unies, qui a adopté en 1979 une convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, dont EMEP constitue un des protocoles d'application.

Des mesures récentes de la qualité des précipitations sont réalisées par deux réseaux : MERA (Mesure des Retombées Atmosphériques, géré par l'École des Mines de Douais ; 10 stations de mesure des précipitations *stricto sensu* □) et CATAENAT (Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les Écosystèmes Naturels Terrestres, sous-réseau RENÉCOFOR, Réseau National de suivi à long terme des Écosystèmes Forestiers, 102 placettes d'observation intensive, géré par l'Office National des Forêts) (Coddeville *et al.*, 1996). Ces réseaux constituent depuis plusieurs années les seuls réseaux à vocation nationale pour ce type de surveillance à long terme.

Dans le cadre du sous-réseau CATAENAT mentionné ci-dessus, des mesures de la qualité des "précipitations totales" □ sont, entre autres, réalisées depuis fin 1992 dans 27 sites "hors couvert forestier" (par opposition aux mesures faites sous les couverts) en métropole. L'objectif est de caractériser le niveau des "dépôts totaux annuels" □ des éléments majeurs et de suivre leur évolution, en liaison avec leur influence éventuelle sur le cycle nutritif des peuplements forestiers. La différence par rapport au réseau MERA est que ce dernier cherche plutôt à représenter des zones géographiques plus larges, et

cherche également à établir des relations entre les sources d'émission et le récepteur, ce qui ne serait pas possible avec l'analyse des précipitations totales, qui incluent une part non négligeable d'apports locaux ou régionaux de poussières.

L'évolution de la chimie des précipitations est suivie depuis 1993 dans les 27 placettes du réseau RENÉCOFOR qui constituent le réseau CATAENAT

Ceci devrait permettre de vérifier, avec le moyen indirect que représentent les précipitations, les baisses des émissions industrielles (surtout de soufre), des émissions liées à la circulation automobile (surtout d'oxydes d'azote) et des émissions liées à la production agricole (surtout d'ammoniac), auxquelles la France va s'engager sous peu. Un tel suivi est rendu possible par le fait que les gouttelettes dans les nuages, lors de leur passage au-dessus des lieux d'émission, incorporent ces différents gaz, qui sont ensuite soit réduits (l'ammoniac, NH₃, devient ammonium, NH₄), soit oxydés (le dioxyde de soufre, SO₂, devient sulfate, SO₄, et le dioxyde d'azote, NO₂, devient nitrate, NO₃).

Rappelons que dans un certain nombre de cas, ces différents composés cumulés apportés par les précipitations peuvent avoir un impact significatif sur le cycle nutritif des écosystèmes forestiers, pouvant déboucher sur un enrichissement, notamment en azote, et/ou un appauvrissement des sols, notamment en calcaire et en magnésium (voir par exemple Bonneau *et al.*, 1997). Des problèmes sanitaires d'intensité variable selon l'importance de la perte d'éléments par l'écosystème peuvent alors se manifester.

Les résultats présentés ici donnent un aperçu synthétique de l'évolution globale de la qualité des précipitations totales en France depuis 6 ans (période 1993-98).

Définition des nouveaux indicateurs synthétiques : concentration moyenne pondérée nationale, fréquence annuelle des pH "acides" □ et de l'acidité titrée sur l'ensemble du réseau CATAENAT

Pour suivre à long terme l'évolution de la qualité des précipitations dans un site donné, le seul moyen permettant de faire des comparaisons pluriannuelles par rapport à la même référence est de calculer des "concentrations moyennes pondérées nationales" □.