

FRANCE

LA SANTE DES FORETS



EN 1993

LE RÉSEAU RENECOFOR

ÉTAT NUTRITIONNEL DES PEUPELEMENTS DU RÉSEAU RENECOFOR :

brève synthèse de la première année
d'échantillonnage et d'analyse (1993)

Introduction

La nutrition minérale est certainement, comme le climat, l'un des éléments les plus importants pour assurer une bonne vigueur des arbres. Ce facteur a souvent été mis en cause lors de l'interprétation de nombreux phénomènes de dysfonctionnement dans les écosystèmes forestiers. Pour cette raison, un suivi annuel de la composition foliaire est effectué, depuis 1993, dans les placettes permanentes du réseau RENECOFOR (réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers), géré par l'office national des forêts. Ce suivi rendra possible l'interprétation des variations annuelles de l'état nutritif des peuplements, en fonction des paramètres de l'environnement mesurés sur ou à proximité des placettes. De plus, il devrait permettre de détecter de manière précoce des évolutions vers d'éventuels déséquilibres nutritionnels et de faciliter ainsi l'interprétation d'autres phénomènes éventuellement liés à ces dérèglements, notamment des attaques parasitaires, la défoliation ou le jaunissement du feuillage.

Grâce à l'échantillonnage des sols dans l'ensemble du réseau, il sera possible d'établir ultérieurement des relations entre l'état nutritif des arbres et les facteurs édaphiques et ainsi faire un premier constat des relations de causes à effets, dès la fin de l'année 1995, c'est-à-dire à l'issue des travaux d'échantillonnage des sols des mêmes placettes.

Nota : L'échantillonnage foliaire est réalisé à l'aide d'un fusil de chasse, muni d'un canon long (90 cm) et chocké, afin de permettre de regrouper les grains au mieux jusqu'à une distance de 25-30 m. Sur chaque placette sont échantillonnés chaque année les mêmes 8 arbres (numérotés), sauf si leur houppier est trop peu développé. Dans ce dernier cas, on alterne chaque année entre deux lots de 8 arbres. Le prélèvement est fait dans la partie supérieure du houppier. Dans les placettes de feuillus, l'échantillonnage est fait entre le

15 juillet et le 31 août et dans les placettes de résineux entre le 1^{er} octobre et le 15 janvier. Dans les 33 placettes de résineux de niveau 1 d'observation, seules les aiguilles de l'année courante sont prélevées. Dans les placettes plus intensives de niveaux 2 (mesure de dépôts atmosphériques) et 3 (en plus : mesure des concentrations des solutions de sol à 20 et 70 cm de profondeur) des résineux (n=19), on prélève également les aiguilles de l'année précédente. Pour le prélèvement on tient compte, autant que possible, des quatre directions cardinales (prélèvement de deux arbres pour chaque direction). L'échantillonnage est fait avec des gants en polyéthylène, afin d'éviter toute contamination venant des mains (poussière ou sueur qui provoquerait une contamination surtout par des chlorures). Dans un délai de 24-48 heures les échantillons arrivent au laboratoire central d'analyse, où ils sont immédiatement séchés. Toutes les analyses et pesées sont effectuées par le laboratoire d'analyses végétales de l'INRA-Bordeaux (directeur : A. Schneider). Le laboratoire utilise un programme "assurance qualité" strict, pour garantir la fiabilité des données. Les résultats sont communiqués, au plus tard 2 mois après la date limite pour l'échantillonnage sur le terrain, au centre de coordination.

Présentation et interprétation des résultats

L'analyse des résultats analytiques est faite en fonction des seuils de références définies par les spécialistes de la nutrition minérale : concentrations optimales, niveaux critiques et seuils de carence. Il s'agit des seuils proposés par Bonneau (1988), adaptés selon les propositions de Solberg (Norwegian Forest Research Institute) lors de la deuxième réunion du groupe d'experts européens sur les analyses foliaires en mars 1994, dans le cadre de la définition des mesures à prendre au niveau du continent européen sur cette question (mise en oeuvre de la résolution S1 de la Conférence de Strasbourg). Ces valeurs sont présentées dans le **tableau 1**. Les connaissances actuelles sont encore insuffisantes pour définir de tels seuils pour toutes les essences et pour tous ces éléments. Il en est de même pour les seuils de toxicité du sodium, chlorure et de l'aluminium. Comme

Bonneau (1988) l'indique, les seuils de carence présumés ne sont pas adaptés à toutes les conditions stationnelles et on devrait donc plutôt les utiliser comme valeurs "guide".

Le **tableau 2** rassemble les valeurs minimales et maximales des résultats analytiques des tissus foliaires pour 1993. Pour les résineux, les concentrations des aiguilles de 1992 ont également été prises en compte. En raison de la très forte hétérogénéité des résultats, les valeurs moyennes n'ont guère de sens et n'ont pas été indiquées.

Finalement, le **tableau 3** indique dans quelles placettes les teneurs des différents éléments sont au-dessous ou proches des niveaux critiques ou seuils de carence.

Nota : d'ici l'année prochaine, nous espérons pouvoir mieux définir les différents niveaux de nutrition grâce à une synthèse bibliographique sur l'analyse foliaire portant sur la plupart de ces essences. Néanmoins, les travaux réalisés dans le cadre du réseau RENECOFOR contribueront également, d'ici 5 ans environ, à mieux définir ces seuils pour la France.

Nota : les placettes du réseau RENECOFOR sont identifiées par un code comportant deux ou trois lettres indiquant l'essence dominante (SP pour le sapin pectiné, CHP pour le chêne pédonculé, EPC pour l'épicéa commun, ...) et deux chiffres pour le département d'implantation (70 pour la Haute-Saône, ...). Lorsqu'il y existe deux ou trois placettes de la même essence dans le même département, les chiffres du département sont suivis d'une lettre (a, b, c) pour identifier chaque placette.

Masse foliaire

La masse foliaire est habituellement exprimée en poids de 100 feuilles ou 1000 aiguilles (poids sec à 105°C). Le climat (notamment la pluviosité de l'année précédente et celle du printemps de l'année en cours, ainsi que la température) a une influence prépondérante sur la taille des feuilles et des aiguilles.

Tableau 1 : DÉFINITION DES NIVEAUX CRITIQUES, SEUILS DE CARENCE ET NIVEAU DE TOXICITÉ POUR PLUSIEURS ÉLÉMENTS POUR LES ESSENCES PRISES EN COMPTE DANS LE RENECOFOR

	Azote (g / kg)			Phosphore (g / kg)			Soufre (g / kg)	Potassium (g / kg)			Calcium (g / kg)		
	Optimum	Niveau critique	Seuil de carence	Optimum	Niveau critique	Seuil de carence	Optimum	Optimum	Niveau critique	Seuil de carence	Optimum	Niveau critique	Seuil de carence
Chêne pédonculé	24	17	12	1,8	1,3	0,9		9	6,5	4,5			
Chêne sessile	23	16	11,5	1,6	1,1	0,8		8,5	6,3	4,2			
Hêtre	24	17	12	1,8	1,3	0,9		8,5	6,3	4,2	8	6	4
Mélèze	23	16	11,5	2,2	1,5	1,1		7,5	5,2	3,7			
Douglas	18	12,5	9	1,6	1,1	0,8	1,2	6,5	4,2	3,2			
Epicéa	17	13	8	1,8	1,3	0,9	1,2	6,5	4,2	3,2	2,5	1,7	1
Pin laricio	14	10	7	1,3	0,9	0,65		5	3,5	2,5			
Pin maritime	12	8,5	7	1,2	0,85	0,6		5	3,5	2,5			
Pin sylvestre	16	11	8	1,6	1,2	0,8	1,2	5,5	3,8	2,7			
Sapin pectiné	17	13	9	1,9	1,3	0,95	1,2	6,5	4,2	3,2	3	2,1	1,5

	Magnésium (g / kg)			Na (g / kg)	Cl (g / kg)	Fe (g / kg)	Mn (g / kg)		Cu (g / kg)	Zn (g / kg)
	Optimum	Niveau critique	Seuil de carence	Niveau toxique	Niveau Toxique	Seuil de carence	Optimum	Seuil de carence	Seuil de carence	Seuil de carence
Chêne pédonculé	1,6	1,1	0,8			0,04	0,10		3-5	
Chêne sessile	1,5	1	0,75			0,04	0,10		3-5	
Hêtre	1,5	1	0,75			0,04	0,10		3-5	
Mélèze										
Douglas	1,2	0,8	0,6			0,04		0,02	2,5-4	5-10
Epicéa	1,2	0,8	0,6	0,2	3,5	0,04		0,02	2,5-4	5-10
Pin laricio							0,05			5
Pin maritime							0,05			5
Pin sylvestre	1,2	0,8	0,6			0,04		0,02	2,5-4	5-10
Sapin pectiné	1,2	0,8	0,6			0,04		0,02	2,5-4	5-10

Tableau 2 : RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS ANALYTIQUES DU PREMIER INVENTAIRE DE LA NUTRITION FOLIAIRE DANS LES PLACETTES PERMANENTES DU RENECOFOR EN 1993 - Source ONF, Département des Recherches Techniques
 Les analyses et les pesées ont été réalisées par le laboratoire d'analyses végétales de l'INRA-Bordeaux, en utilisant un programme "assurance qualité" strict.

Essence	Poids de 100 feuilles ou de 1000 aiguilles (g)		N (g / kg)		P (g / kg)		S (g / kg)		K (g / kg)		Ca (g / kg)		Mg (g / kg)		n
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
Chêne pédonculé	16,30	38,60	23,38	29,57	1,09	1,82	1,46	1,83	7,54	12,96	5,93	11,19	1,08	2,49	10
Chêne sessile	24,20	39,80	20,34	30,51	1,03	2,10	1,10	1,72	6,78	12,26	5,05	9,29	1,19	2,23	20
Hêtre	9,40	16,00	23,83	28,63	0,88	1,81	1,32	1,74	5,34	13,25	4,00	17,34	0,62	1,74	20
Mélèze d'Europe	1,19		20,58		2,67		1,41		6,76		5,54		2,32		1
Douglas	3,94	5,99	16,24	22,40	1,10	1,56	0,11	0,14	5,89	8,52	2,55	5,89	1,14	1,74	6
Epicéa commun	3,47	6,56	12,06	19,05	0,93	1,93	0,08	0,11	3,51	6,70	1,93	11,06	0,41	1,28	11
Pin laricio	39,75	44,50	10,98	12,99	0,97	1,26	0,08	0,08	5,47	5,89	2,56	5,28	1,09	1,49	2
Pin maritime	103,50	169,50	6,22	12,51	0,53	1,03	0,08	0,12	2,32	6,19	1,85	5,68	1,16	2,32	7
Pin sylvestre	10,59	27,75	11,22	23,13	1,06	1,74	0,09	0,17	5,24	8,02	1,75	4,00	0,56	1,26	14
Sapin pectiné	4,26	7,29	11,54	14,99	0,95	1,72	0,08	0,12	4,18	7,67	3,66	16,39	0,34	1,69	11

Essence	Na (g / kg)		Cl (g / kg)		Al (g / kg)		Fe (g / kg)		Mn (g / kg)		Cu (mg / kg)		Zn (mg / kg)		n
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
Chêne pédonculé	0,01	0,18	0,06	0,66	0,08	0,27	0,08	0,37	0,41	5,19	6,35	10,45	18,55	26,47	10
Chêne sessile	0,01	0,11	0,10	0,51	0,05	0,17	0,09	0,15	0,95	4,38	6,49	10,35	17,92	25,60	20
Hêtre	0,02	0,52	0,00	1,01	0,06	0,26	0,09	0,19	0,17	4,06	6,19	10,22	20,80	44,87	20
Mélèze d'Europe	0,01		0,90		0,22		0,14		0,39		5,58		22,26		1
Douglas	0,01	0,06	0,06	0,50	0,20	0,39	0,05	0,08	0,65	1,73	3,00	3,95	18,48	27,15	6
Epicéa commun	0,01	0,05	0,30	0,72	0,03	0,26	0,03	0,09	0,21	1,18	1,96	3,04	15,50	43,72	11
Pin laricio	0,04	0,15	0,14	0,22	0,51	0,80	0,06	0,14	0,33	1,05	2,09	3,53	26,46	33,76	2
Pin maritime	0,13	0,65	0,23	0,62	0,02	0,28	0,02	0,07	0,02	0,94	0,90	4,55	16,79	39,21	7
Pin sylvestre	0,01	0,64	0,14	0,92	0,19	0,44	0,04	0,25	0,18	2,02	2,51	5,94	30,58	67,66	14
Sapin pectiné	0,01	0,03	0,08	0,55	0,09	0,36	0,03	0,08	0,14	7,23	2,11	3,86	22,41	35,88	11

Tableau 3 : RÉCAPITULATIF DES PLACETTES DANS LESQUELLES LA NUTRITION FOLIAIRE EST PROBABLEMENT AU DESSOUS OU PROCHE DU NIVEAU CRITIQUE OU DU SEUIL DE CARENCE

Les valeurs correspondent au code du département où se trouvent les placettes

	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnésium	Fer	Manganèse	Cuivre
Au-dessous ou proche du niveau critique								
Chêne pédonculé	---	10, 18, 40, 77	--	---	---	---	---	---
Chêne sessile	---	03, 18, 72	01	---	---	---	---	---
Hêtre	---	02, 03, 04, 21, 29, 30, 54b, 60, 64, 76, 81, 88	02, 14, 60, 76	29, 81, 88	30, 54b, 76, 78	---	---	---
Mélèze	---	---	---	---	---	---	---	---
Douglas	---	34, 61	---	---	---	---	---	---
Epicéa	39b, 63, 71, 73, 74	08 (1992)* 39a, 39b, 71, 74 (1993)*	39b, 63, 74	87 (1992)*	08 (1993)* 39a, 74, 87 (1992)*	---	---	---
Pin laricio	---	---	---	---	---	---	---	---
Pin maritime	17 (1992)*	17, 40a, 40c, 85 (1993)*	17, 40c, 85	---	---	---	17 (1993, lavé)* 40c	---
Pin sylvestre	04	04, 44 (1992)*, 45, 63	---	---	41, 61, 67b, 76, (1993)*, 78, 88	---	---	---
Sapin pectiné	05, 09, 63, 68	05, 11 (1992)*, 25 (1992)*, 26, 39, 57, 63, 68 (1993)*	26, 57 (1992)*	---	---	---	---	---
Au-dessous ou proche du seuil de carence								
Chêne pédonculé	---	---	---	---	---	---	---	---
Chêne sessile	---	---	---	---	---	---	---	---
Hêtre	---	52, 55	---	03, 14	03, 55, 81, 88	---	---	---
Mélèze	---	---	---	---	---	---	---	---
Douglas	---	---	---	---	---	69	---	(23), 34, 61, 65, 69, 71
Epicéa	---	74 (1992)*	---	---	08 (1992)*	34, 39a, 39b, 63, 71, 73, 81, 87, 88	---	(08), 34, 39a, 39b, 63, 71, 73, 74, (81), 87, 88
Pin laricio	---	---	---	---	---	---	---	---
Pin maritime	85	40c, 72, 85 (1992)*	---	---	---	---	85 (1992 non lavé et 1993 lavé)*	17 (lavé et non lavé), 40b, 40c, 85 (lavé et non lavé)
Pin sylvestre	---	---	---	---	67a (1993)*, 76 (1992)*	63	---	41, 61, 76, (1993)*, 88, 89
Sapin pectiné	---	09, 68 (1992)*	---	---	57	07, 09, 11 (1993)*, 25, 39, 63, 68	---	05, 09, 63, 68 (1993)*

* correspond à l'année de production des aiguilles dans les placettes de niveaux 2 et 3, où les aiguilles de 92 et 93 ont été prélevées.

La connaissance de la masse foliaire est particulièrement intéressante car elle permet de relativiser les résultats des concentrations élémentaires au fil des années : pour le même peuplement des petites feuilles produites l'année n, avec une forte concentration d'un élément, peuvent contenir la même quantité de cet élément que des grandes feuilles, produites par exemple l'année n+1, avec une faible concentration de ce même élément. Dans ce cas, la mise à disposition de cet élément par l'arbre à son feuillage restera plutôt constante au niveau de la quantité totale,

même si la taille des feuilles change. Dans l'avenir, ceci peut expliquer dans l'un ou l'autre cas des phénomènes de carences transitoires.

Concernant la détermination de la masse foliaire, des problèmes ont été rencontrés sur quelques placettes de chênes pédonculés (forêts domaniales de Haudronville, CHP55, Mormal, CHP59, et de Purlans, CHP71), où on a observé des attaques de chenilles au printemps. Parfois la perforation des feuilles par les grains de plomb a également posé des problèmes au labora-

toire pour la détermination des poids. Dans ces cas, les feuilles n'avaient donc plus leur taille normale, ce qui est à prendre en compte dans la comparaison des valeurs. Néanmoins, le poids minimal observé pour les chênes pédonculés (16,3 g/100 feuilles, **tableau 2**) ne provient pas d'une telle placette, mais de la forêt communale d'Amance (CHP70), où aucun problème n'a été signalé.

L'analyse du **tableau 2** suggère que, même si les feuilles des chênes pédonculés ont une taille différente de celles des chênes

sessiles, leur poids ne semble pas être très différent. Parmi les résineux, c'est le mélèze qui a le plus faible poids (1,19 g/1000 aiguilles). Par contre, le poids le plus élevé peut être observé chez le pin maritime. Il est 2,6 à 3,8 fois plus élevé que celui du pin laricio.

Concentrations minérales

L'**azote** est l'élément influençant le plus la croissance. Il est entre autres un constituant des protéines, des acides aminés et des acides nucléiques. Les valeurs minimales indiquent que plusieurs peuplements du réseau semblent être proches des seuils de carence ou des niveaux critiques présumés, bien qu'ils n'aient pas une apparence déperissant. C'est notamment le cas pour 5 des 11 peuplements d'épicéa, pour les aiguilles de l'année 1992 sur le pin maritime en forêt de Saumonards (PM17) en Charente-Maritime, pour le pin sylvestre de la forêt communale du Fugeret (PS04) dans les Basses-Alpes, et pour 4 des 11 peuplements de sapin pectiné. Néanmoins les seuls peuplements montrant des vraies carences sont les peuplements de pin maritime en forêt domaniale de Notre-Dame-de-Monts (PM85) en Vendée et en forêt des Saumonards (Ile d'Oléron) en Charente Maritime. Ces placettes de pin maritime ont d'ailleurs été choisies à cause des problèmes de déperissement atteignant de nombreuses stations dans les forêts côtières atlantiques. Elles se trouvent à une très faible distance de la côte et subissent ainsi un apport important de sels marins par les embruns. La chimie des sols sableux est largement alcaline ($\text{pH (H}_2\text{O)} = 7,1 \text{ à } 8,8$) et leurs concentrations en azote dans l'horizon minéral (entre 0 et 40 cm de profondeur) sont très basses (0,005-0,07%).

Le **phosphore** est surtout important pour le bilan énergétique de la plante, mais est également un constituant des acides nucléiques. Il peut être considéré comme un des éléments posant le plus de problèmes, car un grand nombre de peuplements se situent au-dessous ou proches des seuils présumés. Parmi eux figurent 4 des 10 peuplements de chênes pédonculés, 3 des 20 peuplements de chênes sessiles, 14 des 20 peuplements de hêtres, 2 des 6 peuplements de douglas, 5 des 11 peuplements d'épicéas, 6 des 7 peuplements de pins maritimes, 4 des 14 peuplements de pins sylvestres, et enfin 9 des 11 peuplements de sapins pectinés. Au total, **seuls 39 des 102 peuplements inventoriés (38 %), toutes essences confondues montrent des concentrations acceptables en**

phosphore. C'est notamment le cas pour les pins laricio.

Pour le **soufre**, qui est également un constituant des acides aminés et des protéines, il n'y a pas de carences à signaler, ni d'ailleurs d'intoxication liée à des concentrations excessives de dioxydes de soufre.

Le **potassium** intervient dans des processus métaboliques (activation de la photosynthèse, constitution des macromolécules glucidiques et protéiques, divisions cellulaires, ...) (Lemee, 1978). Une nutrition correcte en potassium est observée dans tous les peuplements de chêne pédonculé, de chêne sessile (exception : forêt domaniale de Seillon, CHS01, dans l'Ain), de mélèze, de douglas, de pin laricio et de pin sylvestre. Les concentrations de potassium sont au-dessous ou proche du niveau critique dans 4 des 20 peuplements de hêtres du réseau. Les 16 autres peuplements ont une bonne alimentation en potassium. Pour les épicéas, seuls les peuplements en forêt communale des Rousses (EPC39b), dans le Jura, en forêt sectionnale de Manson (EPC63) dans le Puy-de-Dôme et en forêt domaniale de Voiron (EPC74) en Haute-Savoie ont des problèmes de nutrition. Par contre, 8 des 11 peuplements d'épicéas ont un bon niveau de nutrition en potassium. Parmi les pins maritimes, les peuplements en forêt des Saumonards (PM17), en forêt communale de Losse (PM40c), dans les Landes et en forêt domaniale de Notre-Dame-de-Monts (PM85), ont un niveau critique de nutrition en potassium.

Le **calcium** joue surtout un rôle de neutralisateur d'acides organiques produits par le métabolisme, en particulier l'acide oxalique. Cet élément a tendance à s'accumuler dans les organes âgés. Il entre notamment dans la constitution de la lamelle moyenne des parois cellulaires et participe à la constitution ou à l'activation de certaines enzymes (Lemee, 1978). Les teneurs en calcium sont, à quelques exceptions près, correctes pour toutes les essences. Les hêtraies, situées en forêt domaniale des Colettes (HET03), dans l'Allier, et en forêt domaniale de Cerisy (HET14), dans le Calvados, sont carencées et 3 autres hêtraies et la pessière du Limousin (EPC87) sont au-dessous ou proches du niveau critique (**tableau 3**).

De même, les teneurs en **magnésium**, élément qui entre dans la constitution de la

chlorophylle et joue un rôle d'activateur de plusieurs enzymes (LEMEE, 1978), sont satisfaisantes pour les peuplements de chêne sessile, de chêne pédonculé, de mélèze (un seul peuplement dans le réseau, en forêt communale de Champcella, MEL05), de sapin pectiné (à l'exception de la placette SP57 forêt domaniale d'Abreschviller, en Lorraine, fortement carencée), et de douglas. Pour les peuplements de pin laricio et pin maritime nous manquons encore d'expérience pour en juger. Par contre, 8 des 20 peuplements de hêtres, 4 des 11 peuplements d'épicéas et 7 des 14 peuplements de pins sylvestres ont une mauvaise alimentation en magnésium. Pour certains de ces peuplements nous disposons d'autres mesures nous permettant d'interpréter nos résultats :

1) les sapins pectinés en forêt domaniale d'Abreschviller (SP57), dans la Moselle, montrent une forte carence. Ce peuplement est installé sur des grès vosgiens, dont la faible richesse des sols est bien connue et a fait l'objet de recherches dans le cadre du programme DEFORPA (Déperissement des Forêts et Pollution Atmosphérique) dans cette région (Landmann *et al.*, 1987 ; Bonneau, 1991 et 1993). Les mesures des concentrations des solutions du sol à 20 et 70 cm dans le même peuplement, réalisées depuis fin 1992, confirment sa pauvreté minérale. Les concentrations en cations basiques (calcium, magnésium et potassium) sont parmi les plus basses des 17 placettes dans lesquelles les solutions sont analysées dans toute la métropole dans le cadre du sous-réseau CATAENAT (Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les Ecosystèmes Naturels Terrestres) du réseau RENECOFOR.

2) les carences magnésiennes du peuplement d'épicéas des Ardennes (EPC08) sont un phénomène connu depuis 1986. NYS (1987) conclut que deux facteurs sont à l'origine de ces carences : le premier est la pauvreté minérale des sols bruns acides. Le deuxième est l'augmentation des dépôts acidifiants (notamment azote et sulfate) par un effet-filtre plus important des épicéas par rapport aux taillis-sous-futaie de chênes qu'ils ont remplacés. Ceci augmente les processus d'acidification dans ces sols.

3) le peuplement de pins sylvestres dans la forêt de Haguenau (PS67a), dans le Bas-Rhin, installé sur un sol sableux, est carencé. Dans ce peuplement le responsable de la placette a observé un jaunissement en été 1993. Celui-ci est apparu dès l'instant

où la récolte de solutions de sol (c'est une placette de niveau 3) n'a plus été possible. Par ailleurs, les concentrations des cations basiques de ces solutions à 20 et 70 cm de profondeur sont également les plus basses de toutes les placettes de niveau 3 d'observation. Il semble donc y avoir dans ce cas une assez probable relation de cause à effet. Il faut signaler par ailleurs que les arbres de ce peuplement n'avaient plus assez d'aiguilles de l'année 1992 pour en récolter un échantillon suffisant pour l'analyse.

4) le peuplement de pin sylvestre en forêt domaniale de Brotonne (PS76), en Seine-Maritime, est également carencé. D'après les premières estimations des dépôts dans cette placette de niveau 2 pour l'année 1993, cette forêt recevrait les dépôts les plus importants en sulfate (SO_4), de l'ordre de 138 kg/ha/an. En plus d'une origine partiellement maritime, l'importance de ces dépôts semble pouvoir être imputée pour partie au transport à faible distance (environ 25 km) des émissions en soufre des raffineries du Havre. Le responsable de cette placette a signalé que pendant certaines périodes, il est possible de sentir l'odeur du soufre dans cette région. Etant donné que les dépôts de sulfate sont fortement acidifiants, ils entraînent sur des sols pauvres une augmentation de l'acidification et une perte en cations basiques par le drainage. Ceci semble être le cas dans ce peuplement à Brotonne, qui est installé sur un sol à tendance podzolique.

Bien que nous manquions encore d'expérience pour définir des seuils de nutrition pour le **sodium** et le **chlore**, il est possible d'utiliser ces deux éléments comme traceurs de l'influence des masses d'air précipitantes d'origine atlantique, provoquant des dépôts d'importance variable sur le feuillage, selon la distance de la côte. C'est ainsi que les concentrations les plus importantes en sodium et chlore parmi les 20 peuplements de hêtre du réseau peuvent être observées dans la forêt domaniale de Cerisy (HET14), dans le Calvados (distance de la mer : environ 21 km) et en forêt domaniale de Carnoët (HET29), dans le Finistère (distance de la mer : environ 8 km). De même, la placette de chêne pédonculé la plus proche de l'Atlantique, située en forêt communale de Gamarde (CHP40), dans les Landes (distance de la mer : environ 47 km) montre également les concentrations les plus importantes pour ces deux éléments. Parmi les peuplements de chênes pédonculé et

sessile du sous-réseau CATAENAT, c'est aussi le peuplement recevant le plus de dépôts en chlorure, de l'ordre de 46 kg/ha/an en 1993.

Les peuplements de pin maritime ne montrent une influence des masses d'air maritime que pour le **sodium** ; les teneurs les plus élevées sont notées dans les peuplements à proximité de la mer : en forêt domaniale de Notre-Dame-de-Monts (PM85) en Vendée et en forêt de Saumonnards (PM17) en Charente-Maritime. Leurs teneurs en sodium sont en moyenne 3,4 fois plus élevées que celles d'un peuplement de pin maritime en forêt domaniale de Bercé (PM72) dans la Sarthe (distance de la mer : environ 195 km). Ce phénomène ne se reproduit pas pour le chlore, puisque les concentrations sont comparables dans ces trois peuplements. Ce résultat est surprenant en première analyse. Les peuplements en Vendée (PM85) et Charente-Maritime (PM17) ont par contre reçu, en 1993, des dépôts de chlorure respectivement de l'ordre de 256 et 105 kg/ha/an contre 26 kg/ha/an dans le peuplement de Bercé (PM72). Pour le sodium, les valeurs sont bien plus faibles, respectivement de l'ordre de 140 (PM85), 61 (PM17) et 14,5 kg/ha/an. Les teneurs en sodium et en chlore dans le feuillage des sapins pectinés et des douglas sont les plus faibles de toutes celles mesurées dans le réseau.

Nota : la question s'est posée de savoir dans quelle mesure l'analyse foliaire est faussée par des dépôts sur la surface du feuillage dans les régions soumises à une influence directe de flux maritimes. Les résultats analytiques d'un essai de lavage des échantillons (pendant deux minutes environ dans de l'eau déminéralisée), provenant des deux placettes très proches de la mer et de la forêt de Bercé, ne nous ont malheureusement pas permis de tirer des conclusions probantes. La comparaison des concentrations entre les échantillons lavés et non lavés montre des valeurs trop variables. A l'avenir, ce test sera réalisé sur plusieurs échantillons par placette, afin de permettre une analyse statistique.

Les teneurs en **aluminium**, dont le rôle dans la plante est encore peu connu, ne peuvent pas encore être valablement interprétées à cause du manque de références sur cet élément.

Le niveau nutritionnel du **fer**, qui est surtout important comme catalyseur d'oxydo-réduction et intervient dans plusieurs

réactions enzymatiques (photosynthèse, réduction des nitrates, ..., Lemee, 1978), est correct dans tous les peuplements de chênes pédonculés et sessiles, hêtres, pins sylvestres (exception : forêt sectionnale de la Bosdonie, PS63, au Puy-de-Dôme) et de douglas (exception : forêt départementale de Brou, DOU69, dans le Rhône). Dans les sapinières, 7 des 11 peuplements sont proches de la limite de carence présumée et, dans les pessières, 9 des 11 peuplements sont dans ce cas. Mais les connaissances sur la carence en fer sont limitées et ce diagnostic peu sûr.

Les niveaux du **manganèse** sont corrects dans presque tous les peuplements du réseau. Ce n'est que pour les pins maritimes en forêt communale de Losse (PM40c) dans les Landes et en forêt domaniale de Notre-Dame-de-Monts (PM85) en Vendée, qu'on observe un niveau critique en manganèse. Le manganèse joue, comme le fer, un rôle dans les oxydo-réductions (Lemee, 1978).

Les teneurs en **cuivre** (également un oxydo-réducteur) posent problème dans tous les peuplements de douglas, toutes les pessières, 4 des 7 peuplements de pins maritimes, dans 5 des 14 peuplements de pins sylvestres et 4 des 11 peuplements de sapins, où elles sont au-dessous ou proches du seuil de carence présumé. Mais là aussi, en dehors du douglas, on connaît mal ce problème.

A l'opposé, les teneurs en **zinc**, élément important dans un certain nombre de systèmes enzymatiques et concourant à la synthèse des hormones qui régissent la croissance, sont optimales pour toutes les essences pour lesquelles un seuil de carence a pu être défini.

Conclusions

Les premiers résultats sur la nutrition foliaire semblent indiquer un grand nombre de cas dans lesquels un déséquilibre nutritif pourrait être possible. Pour les éléments et essences pour lesquels des valeurs "guide" existent (**tableau 1**), des problèmes nutritionnels n'ont été observés dans aucun peuplement que dans le cas du zinc ; par contre ils existent dans 3% des peuplements pour le manganèse, 13% des peuplements pour l'azote, 13% des peuplements pour le potassium, 14% des peuplements pour le calcium, 19% des peuplements pour le

magnésium, 21% des peuplements pour le fer, 33% des peuplements pour le cuivre, et dans 48% des peuplements pour le phosphore.

Lors de l'installation de ce réseau, on a essayé de sélectionner des peuplements représentatifs des régions dans lesquelles les placettes se situent, c'est-à-dire dans des conditions ni trop bonnes, ni trop mauvaises. De plus, les placettes ont été installées, dans la plupart des cas et autant que possible, dans des peuplements d'apparence saine. Il est donc surprenant de constater un nombre parfois élevé de problèmes nutritifs. Suite à ce constat, qui reste encore à confirmer par les analyses foliaires des années à venir, il est possible d'avancer deux hypothèses pour tenter de l'expliquer :

1) Première hypothèse : les résultats sont effectivement représentatifs de la moyenne des forêts françaises. Ceci reviendrait à dire qu'un bon nombre de peuplements vit constamment dans un stress nutritif d'importance variable. Cela aurait non seulement des inconvénients, mais aussi quelques avantages, par exemple la production de cernes plus fins chez les chênes (et donc une meilleure qualité du bois). En effet un stress nutritif ne se traduit pas toujours par une dégradation de la santé et de la vitalité des arbres, du moins lorsque l'essence est bien adaptée aux conditions stationnelles et tant qu'il n'existe pas de déséquilibre nutritionnel accentué portant sur d'autres éléments. Toutefois, elle reste fragile vis-à-vis de changements profonds du cycle nutritif interne.

2) Seconde hypothèse : les valeurs "guides" des seuils de carence, niveaux critiques et teneurs optimales ne sont pas adaptées à tous les cas que l'on peut rencontrer en France (Bonneau, 1988) et seraient en l'occurrence trop basses. Dans ce cas cette interprétation des premiers résultats analytiques est trop pessimiste et nécessite une révision des valeurs utilisées actuellement. L'expérience qui sera acquise dans ce réseau, notamment en liaison avec les analyses de sol, l'observation de l'état des cimes des arbres et les observations symptomatologiques devraient permettre cette révision.

Quelle que soit l'hypothèse privilégiée, il sera nécessaire d'attendre les résultats des analyses de sols, qui seront disponibles à la fin de l'année 1995, avant de se prononcer définitivement.

Par ailleurs un échantillonnage dans un sous-ensemble des placettes du réseau européen (16 km x 16 km), dans lequel l'échantillonnage des sols est également réalisé, serait sans doute souhaitable, afin de confirmer ou infirmer ces premiers résultats.

Nota : l'échantillonnage sur le terrain a été réalisé par les ingénieurs et techniciens des sections techniques interrégionales et du centre de coordination du réseau (département des recherches techniques), et la plupart des responsables ou suppléants des placettes (tous : Office National des Forêts). Qu'ils soient remerciés pour ce travail important qui nous permet de faire cette première synthèse.

E. ULRICH (ONF, Département des recherches techniques)
et M. BONNEAU (INRA, Equipe Cycles Biogéochimiques)

Bibliographie

- BONNEAU M., 1988 : Le diagnostic foliaire, *Revue Forestière Française*, n° spécial : 19-28.
- BONNEAU M., 1991 : Effets de la pollution atmosphérique par l'intermédiaire du sol, dans G. LANDMANN (Ed.) "*Les recherches en France sur le dépérissement des forêts*", Programme DEFORPA, 2^{ème} rapport, ENGREF, chapitre 5 : 95-109.
- BONNEAU M., 1993 : Fertilisation sur résineux adultes (*Picea abies* Karst et *Abies alba* Mill) dans les Vosges : composition foliaire en relation avec la défoliation et le jaunissement, *Ann. Sci. For.*, 50 : 159-175.
- LANDMANN G., BONNEAU M., ADRIAN M., 1987 : Le dépérissement du Sapin pectiné et de l'Epicéa commun dans le Massif vosgien est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements ?, *Revue Forestière Française*, 29, 1 : 5-11.
- LEMEE G., 1978 : Précis d'écologie végétale, Masson (Ed.), Paris, 285 p.
- NYS C., 1987 : Fonctionnement du sol d'un écosystème forestier : étude des modifications dues à la substitution d'une plantation d'Epicéa commun (*Picea abies*) à une forêt de feuillue mélangée des Ardennes, Thèse, Université de Nancy I, 207 p.

LES DÉPÔTS ATMOSPHÉRIQUES EN 1993 résultats du sous-réseau CATAENAT du réseau RENECOFOR

Le sous-réseau CATAENAT (Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les

Ecosystèmes Naturels Terrestres, cf carte du réseau RENECOFOR (Réseau National de suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers) cherche à établir des connaissances fiables sur l'impact des dépôts atmosphériques sur les écosystèmes forestiers. Opérationnel depuis le début du mois de janvier 1993, il a fonctionné en 1993 sans problèmes majeurs concernant les mesures de dépôts totaux hors couvert et des dépôts de pluviollessivats sous couvert forestier. Cette première brève présentation et interprétation, tirée du rapport de Ulrich et Lanier (1994) porte sur les résultats de ces mesures, réalisées dans les 27 placettes de ce sous-réseau.

Nous considérons ces calculs de dépôts comme une estimation. En effet, malgré le grand soin des opérateurs sur le terrain et l'utilisation de méthodes et dispositifs standardisés pour la collecte des eaux de pluies, il existe toujours un certain nombre d'incertitudes, notamment pour ce qui concerne la mesure de la pluviosité réelle, surtout en forêt (à cause de l'hétérogénéité des peuplements). Les dépôts peuvent en général varier du simple au double d'une année à l'autre (Ulrich et Williot, 1993). **On considère donc qu'il est nécessaire de les mesurer pendant au moins 5 ans, afin d'avoir une idée de la fourchette qui caractérise un site, en fonction du régime pluviométrique et des circulations atmosphériques.**

Nota : la méthodologie des relevés sur le terrain a été définie dans le manuel de référence CATAENAT (Ulrich et Lanier, 1993). La collecte des échantillons se fait chaque semaine. Les analyses chimiques sont réalisées sur un échantillon mensuel (13 périodes de 4 semaines), mélangé pour constituer un échantillon composite en fonction de la proportion de la pluviométrie hebdomadaire par rapport à la pluviométrie mensuelle.

Les Laboratoires Wolff Environnement, Service de l'Air à Evry (responsables : C. Hennequin et F. Genet) sont chargés de l'ensemble des analyses. Les méthodes d'analyses employées figurent parmi les méthodes standard dans le domaine analytique de la physico-chimie de l'eau. Les Laboratoires Wolff utilisent, entre autres, un programme assurance qualité spécialement adapté aux eaux très diluées, comme l'eau de pluie, en se basant sur des méthodes de l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis et du réseau REPQ (Réseau d'Echantillonnage des Précipitations du Québec) au Canada.