

Publication de
l'Université de Droit, d'Economie et des Sciences
d'Aix-Marseille III

ecologia mediterranea

revue d'écologie terrestre et limnique



TOME XX 1994

Fascicule 1/2

Faculté des Sciences et Techniques de Saint Jérôme, IMEP (case 461)
Avenue Escadrille Normandie-Niemen, F 13397 Marseille Cedex 20

ECOLOGIA MEDITERRANEA

Université d'Aix-Marseille III
Faculté des Sciences et Techniques de Saint Jérôme
Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléocécologie (Case 461)
Avenue escadrille Normandie-Niemen
F 13397 MARSEILLE Cedex 20
Fax : 91 28 86 68

Directeur de la publication

P. QUEZEL

Editor

Secrétaire général

H. BRISSE

Co-editor

Comité de rédaction

L. BIGOT, R. LOISEL, N. POINSOT-BALAGUER, L. TESSIER

Editorial board

Trésorier

J.-L. de BEAULIEU

Treasurer

Equipe technique

C. GABOURIAUT, C. GOEURY

Technical board

COMITE DE LECTURE

AKMAN, Y., Ankara Universiti-Fen Facultesi-Biyologie Bolumu, Ankara, Turquie.
AUSSENAC, G., INRA, CNRF, Unité de Recherches en Bioclimatologie Forestière, Champenoux, F 54280 Seichamps.
BARBAULT, R., ENS, 46 rue d'Ulm, F 75230 Paris Cedex 05.
BARBERO, M., UAM III, Faculté de Saint Jérôme, Laboratoire de Botanique et Ecologie Méditerranéenne (Case 461), Avenue escadrille Normandie-Niemen, F 13397 Marseille Cedex 13.
BIROT, Y., INRA, Département des Recherches Forestières, Avenue Vivaldi, F 84000 Avignon.
BONIN, G., UAM I, Laboratoire de Biosystématique, Faculté de Saint Jérôme, F 13397 Marseille Cedex 13.
BOTTEMA, S., Biologisch-Archaeologisch Institut, Rijksuniversiteit Groningen, Poststraat 6, NL-9712, Groningen, Pays-bas.
BOUDOURESQUE, C.-F., UAM II, Faculté des Sciences de Luminy, LBMEB, (Case 901), F 13288 Marseille Cedex 9.
BOUVAREL, P., Thibompré, F 88480 Saint Rémy.
CATARINO, F.M., Museu, Laboratorio e Jardim Botanico, Faculdade de Ciencias, rua da Escola Politecnica, P 1294 Lisboa Codex.
CHAMPEAU, M., UAM I, Faculté des Sciences Saint Charles, 3 place Victor Hugo, F 13003 Marseille Cedex.
COSTA, M., Facultad de Farmacia, Departamento de Botanica, Avenida Blasco Ibanez 13, 46010 Valencia, Espagne.
DAGET, P., Université de Montpellier II, Institut de Botanique, Laboratoire de Systématique et Botanique méditerranéennes, 163 rue Auguste Broussonet F 34000 Montpellier.
DANIN, A., The Hebrew University of Jerusalem, Department of Botany, Jerusalem, Israël 91904.
DEBUSSCHE, M., CNRS-CEPE, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Route de Mende, BP 5051, F 34033 Montpellier Cedex.
DJEBAÏ, S., Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne, INA, BP 9, Dar el-Beida, Alger, Algérie.
DODD, R.S., University of California, Forest Products Laboratory, Richmond, Berkeley, CA-94804, Etats Unis d'Amérique.
DU MERLE, P., INRA, Station de Zoologie Forestière, Avenue Vivaldi, F 84000 Avignon.
GHABBOUR, S., Institut of African Research and Studies, Department of Natural Resources, Cairo University, Giza, Egypte.
GIUDICELLI, J., UAM III, Faculté de Saint Jérôme, Laboratoire d'Ecologie Animale, Avenue escadrille Normandie-Niemen, F 13397 Marseille Cedex 13.
GONZALEZ-BERNALDEZ, F., Universita Autonomia de Madrid, Facultad de Ciencias, Catedra de Ecologia, Ciudad Universitaria de Canto Blanco, 28049 Madrid, Espagne.
LAMOTTE, M., ENS, Laboratoire de Zoologie, 46 rue d'Ulm, F 75230 Paris 05.
LEFEUVRE, J.-C., MNHN, Laboratoire de l'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés, 57 rue Cuvier, F 75231 Paris Cedex 13.

LEMEE, G., 6 Avenue Garennière, F 94260 Fresnes.
LOWE, J.J., Royal Holloway and Bedford New College, Department of Geography, Egham, Surrey TW20 0EX, Royaume Uni.
LUMARET, R., CNRS-CEPE, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Route de Mende, BP 5051, F 34033 Montpellier Cedex.
MARGARIS, N.S., University of the Aegean, Department of Environmental Studies, 17 Karadotni str., 81100 Mytilène, Grèce.
M'HIRIT, O., Direction des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols, Division de Recherches et d'Expérimentations Forestières, Charia Omar ibn El-Khattab, BP 763, Rabat (Agdal), Maroc.
MUNAUT, A.V., Université Catholique de Louvain, Laboratoire de Palynologie et Dendrochronologie, 4 Place Croix-du-Sud, B 1348 Louvain-la-Neuve.
NAHAL, I., Université d'Alep, Faculté d'Agronomie, Laboratoire de Botanique, Alep, Syrie.
OECHEL, W., San Diego State University, Colleges of Sciences, Department of Biology, San Diego, CA 92182-0057, Etats Unis d'Amérique.
OZENDA, P., Université Joseph Fourier, Laboratoires d'Ecologie Végétale, BP 53 X, F 38041 Grenoble Cedex.
PEDROTTI, F., Università degli Studi di Camerino, Dipartimento di Botanica ed Ecologia, Via Pontoni 5, I 62032 Camerino.
PIUSSI, P., Università degli Studi di Firenze, Istituto di Selvicoltura, Via S. Bonaventura 13, I 50145 Firenze.
PONS, A., UAM III, Faculté des Sciences de Saint Jérôme, Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie (Case 451), F 13397 Marseille Cedex 13.
RASMONT, P., Université de Mons, Laboratoire de Zoologie, Avenue Maistriau, B 7000 Mons.
RIOUX, J.-A., Université de Montpellier, Faculté de Médecine, Laboratoire d'Ecologie Médicale et Pathologie Parasitaire, 163 rue Auguste Broussonet, F 34000 Montpellier.
RIVAS-MARTINEZ, S., Universidad Complutense, Facultad de Farmacia, Departamento de Botanica, Madrid 3, Espagne.
ROMANE, F., CNRS-CEPE, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Route de Mende, BP 5051, F 34033 Montpellier Cedex.
RUNDEL, P.W., University of California, Laboratory of Biomedical and Environmental Sciences, 900 Veteran Avenue, Los Angeles, CA 90024-1786, Etats Unis d'Amérique.
SPECHT, R.L., The University of Queensland, Botany Department, St Lucia, Queensland 4072, Australie.
TERRADAS, J., Universitat Autonomia de Barcelona, Centre de Recerca Ecologica i Aplicacions Forestals, 08193 Bellaterra (Barcelona), Espagne.
TAYLOR, H.C., Botanical Research Unit, PO Box 471, 76000 Stellenbosch, République Sud-Africaine.
VAN DEN MAAREL, E., Växtbiologiska Institutionen, Box 559, S 75122 Uppsala 1, Suède.

ABONNEMENTS

Pour la France, les tarifs d'abonnements incluent les frais de port. Pour l'étranger, le port est à ajouter.

Abonnement 1991 (Tome XVII)	France 450 F
Abonnement 1992 (Tome XVIII)	 Etranger 500 F
Abonnement 1993 (Tome XIX)	

La collection complète, incluant les tomes XV et XVI, est facturée 1.500 FF.

Tous les fascicules d'Ecologia Mediterranea sont disponibles. Les numéros antérieurs à 1989 sont facturés forfaitairement 200 FF par année.

Les commandes doivent être adressées au Trésorier de la revue, accompagnées du paiement par chèque ou mandat libellé au nom du :

Régisseur d'avances de l'U.D.E.S.A.M.

ecologia mediterranea

revue d'écologie terrestre et limnique

Le dépérissement du Sapin du Mont Parnasse (Grèce). Le rôle des conditions climatiques et écologiques

Georges BROFAS* et Eva ECONOMIDOU**

RESUME

Pour étudier le dépérissement du sapin au Mont Parnasse par rapport aux conditions climatiques et écologiques, les facteurs climatiques disponibles ont été étudiés et les données (tels que facteurs topographiques, profondeur du sol, cortège floristique, éléments d'accroissement, taux de recouvrement du sol) de 43 placettes prises sur des surfaces avec dépérissement et de 141 placettes de l'ensemble du massif ont été exploitées.

D'après le traitement de ces données, le dépérissement du sapin apparaît les années qui se caractérisent dans la première moitié de la période de la croissance par des précipitations inférieures et des températures supérieures à la moyenne. Il est particulièrement marqué en terrains rocheux calcaires, sur sols superficiels, aux expositions S, SO, SE, aux forêts clairsemées dont la strate herbacée est composée d'espèces xérophiles et en général il caractérise des forêts de la plus basse qualité stationnelle.

MOTS-CLES : dépérissement, sapin, conditions écologiques, Parnasse, Grèce

SUMMARY

To study the decline of fir forest in Parnassos mountain in relation with climatic and ecological conditions, available climatic data of the area, as well as data concerning with the topographic factors, soil depth, herbaceous vegetation, increment data, crown density were processed from 43 trial areas presenting the decline phenomenon and from 141 trial areas in the rest of the mountain.

The analysis of the above data shows that losses of fir trees occurred when precipitation was below and temperature above the average during the first half of the growing season. The losses were severe particularly on sites with hard limestones, on shallow soils, on S, SW and SE aspects, in forests with low crown density and xerothermic herbaceous vegetation and generally on the worst forest sites.

KEY WORDS : decline, fir, ecological conditions, Parnassos, Greece

INTRODUCTION

Le phénomène de dépérissement du sapin (*Abies cephalonica*, *Abies borisii-regis*) observé en 1988, a provoqué de vives inquiétudes au niveau national à cause de son intensité et de son ampleur, le sapin constituant l'espèce forestière la plus précieuse en Grèce. Ce dépérissement concernait pratiquement toutes les montagnes occupées par le sapin, du nord ou sud.

Le phénomène n'est pas nouveau en Grèce, mais il n'avait pas, du moins ces dernières décennies l'envergure observée en 1988.

Les premières observations ont été faites par le professeur MOULOPOULOS en 1929 dans les monts Oligirtos, Mavrovounion et au col de Ghioza dans le Péloponnèse. Il note, dans ses cours de sylviculture (1967) que plus de 50 000 individus étaient morts sur pied, attribuant ce phénomène à une épidémie de l'insecte *Ips vorontzowi* Jacobs. KAILIDIS en 1964, décrit le même phénomène présent au cours des étés de 1961 et 1962 sur les versants Est du Mont Mainalon (Péloponnèse); il estime que le taux de dépérissement est de l'ordre de 1 à 5 % et par endroits, un peu plus. KAILIDIS constate une épidémie d'insectes (*Cryphalus piceae* Ratz, *Ips vorontzowi* Jacobs, *Ips curvidens* Cerm., *Ips spinidens* Ratz) attaquant l'écorce et provoquant le dépérissement du sapin, mais il suppose que

* Institut des Recherches Forestières, Terma Alkmanos-Ilissia, 115.28 Athènes (Grèce)

** Laboratoire d'Ecologie Végétale, Université de Patras, Patras, Grèce

les conditions pédologiques et climatiques défavorables en sont la cause première. Selon le même auteur, le dépérissement du sapin s'est manifesté, dans les monts Parnès et Fournas (Pinde), sous les mêmes conditions. En 1974, 1977 et 1985, le dépérissement du sapin a fait de nouveau son apparition mais à un degré moindre (KAILIDIS, 1979 ; KAILIDIS et BROFAS, 1985). Au mont Parnasse, le dépérissement du sapin a été observé pour la première fois en 1977. Il était sporadique et caractérisait la zone inférieure du sapin, entre 600 et 800 m d'altitude et surtout les sapins disséminés dans les formations arbustives à feuillage persistant, composées notamment de *Quercus coccifera*, *Juniperus oxycedrus* et *Phillyrea media*. En 1985, le phénomène s'est reproduit dans la même zone avec les mêmes caractéristiques.

A partir du mois d'août 1988 jusqu'en avril 1989 environ, le phénomène s'est de nouveau présenté, mais avec une intensité et une ampleur beaucoup plus importantes. Sur certains versants, le taux des arbres dépérissants atteignait 40 % et le dépérissement s'étendait jusqu'à 1400 m d'altitude et sporadiquement jusqu'à 1600 m environ.

Il est apparu que les arbres dépérissants étaient attaqués par les mêmes insectes de l'écorce mentionnés par KAILIDIS (1964), mais d'autres causes n'étaient pas à exclure et il a été décidé de procéder à une étude du phénomène par rapport aux conditions écologiques.

Le but de ce travail a donc été de rechercher si l'apparition du dépérissement était indépendante de ces conditions ou si elle était liée à des conditions écologiques précises.

METHODES UTILISEES

Pour l'étude du dépérissement, des observations générales sur l'ensemble des sapinières du massif du Parnasse ont été faites, afin d'avoir une vue globale de la répartition du phénomène et de repérer les surfaces sur lesquelles le taux de dépérissement dépassait 10 % et atteignait 40 %.

Ensuite, 43 placettes ont été choisies sur l'ensemble du massif dont 29 sur calcaire et 14 sur flysch. De plus, 141 placettes prises pour l'étude écologique des sapinières du Parnasse et comprenant des surfaces sans dépérissement étaient à notre disposition.

La surface de chaque placette était de l'ordre de 200 m². Dans le cas des sapins dépérissants dispersés, la surface de chaque placette avait été

déterminé de manière à ce qu'elle comprenne les quelques arbres (2 à 5) en dépérissement, seul l'espace exploité par ces arbres étant représentatif et intéressant notre étude.

La répartition des placettes s'est faite de manière à ce qu'elle puisse comprendre, outre les différentes roches mères, toutes les expositions et différentes altitudes sur lesquelles le dépérissement avait fait son apparition.

Dans chaque placette, des relevés floristiques ont été faits (BRAUN-BLANQUET, 1951) en précisant l'exposition, l'altitude, la roche mère et la profondeur du sol. En ce qui concerne la profondeur, elle a été déterminée sur 2 à 4 points suivant la dimension de la placette. Dans chaque placette, deux arbres dépérissants, les plus hauts, ont été coupés et leur hauteur, l'âge à la hauteur de 0,30 m et 1,30 m et la largeur des 5 derniers cerne mesurés.

Parallèlement, les données climatiques disponibles des stations météorologiques de la région ont été analysées en relation avec d'autres données climatiques du pays.

Dans le massif du Mont Parnasse, existent une station pluviométrique à Gravia (430 m d'altitude), une autre à Eptalofos (850 m) et une station à Arachova (900 m) qui disposait des données pluviométriques de 1972 à 1986 et des données concernant la température, de 1972 à 1988.

L'étude des données de la température et des précipitations est limitée volontairement aux mois d'avril, mai, juin et juillet. Ce choix se justifie parce que cette période est la plus critique étant donné que les besoins en eau de l'arbre sont accrus et que les mécanismes de contrôle des pertes en eau ne sont pas encore bien développés. D'ailleurs, un essai de corrélation tenté entre les précipitations annuelles et l'apparition du dépérissement, n'était pas particulièrement probant pour les deux stations pluviométriques du Parnasse.

Les sorties sur le terrain ont été faites en 1989 et complétées en 1990.

RESULTATS

1. Facteurs climatiques

Selon les données climatiques (tableau 1), les précipitations sont inférieures et les températures supérieures à la moyenne, pendant les années où apparaît le dépérissement au Mont Parnasse.

Tableau 1

Température moyenne mensuelle (T) et précipitations (P) pour la période Avril-Juillet

	GRAVIA P	EPTALOFOS P	ARACHOVA P	T	VYTINA P	T
1970		184,0				
1971	223,2	180,7				
1972	202,3	226,5	180,1	17,7		
1973	76,0	166,0	83,7	17,5		
1974	120,9	191,0				
1975	173,9	219,6				
1976	108,9	193,2	103,9	16,4		
1977	97,5*	134,9*	71,0*	18,6*		
1978	111,3	159,4	95,8	17,2	236,0	13,4
1979	175,3	245,4	89,1		302,0	13,7
1980	119,9	201,5	127,1	16,8	214,0	13,2
1981	132,2	110,6	151,8	17,1	240,0	14,1
1982	257,0	325,7	167,0	17,3	211,0	14,1
1983	102,4	245,4	157,2	17,5	182,0	14,7
1984	203,1	234,9	115,0	17,5	112,0	14,0
1985	120,9*	104,6*	65,0*	19,2*	119,0*	15,0
1986	206,1	190,9	136,5	18,5	307,0	14,4
1987	134,6	117,8		17,4	120,0	14,1
1988	48,2*	56,3*		19,3*	66,0*	15,6
1989	114,7	149,4				
M	143,6	182,4	118,7	17,7	204,0	14,1

En 1988, les précipitations ont été particulièrement faibles et se sont élevées au tiers seulement de la moyenne pour cette période de quatre mois, d'avril à juillet.

Les mêmes conditions, en ce qui concerne la température et les précipitations, caractérisent également les autres stations du pays où le dépérissement a fait son apparition, avec une prolongation de la période sèche pendant les années en question.

En 1988, alors que les précipitations ont été beaucoup moins importantes, les températures ont été beaucoup plus élevées que la moyenne pour pratiquement toutes les stations météorologiques du pays (DIAMANDIS, 1989). Sans citer de longues listes de chiffres, notons cependant que la période xérothermique était aussi la plus intense connue par le pays ces trente dernières années.

Au Mont Mainalon (Péloponnèse), caractérisé par un dépérissement intense (jusqu'à 40 % par endroits) en 1988, les températures enregistrées à la station météorologique de Vytina (Mainalon, 1033 m d'altitude) étaient les plus élevées des 11 années de son fonctionnement et les précipitations les moins importantes (le tiers, 66 mm) de la moyenne (204 mm). De plus, on doit noter que le dépérissement s'est arrêté avec le rétablissement des précipitations en 1989.

Pour renforcer nos observations, il a été fait appel au plus ancien dépérissement intense du sapin qui ait eu lieu aux monts Oligirtos, Mavro-

Tableau 2

Température moyenne mensuelle (T) et précipitations (P) pour la période Avril-Juillet

	TRIPOLI	
	P	T
1915	204,0	18,8
1916	147,7	20,9
1917	155,1	
1918	100,4	19,7
1919	260,6	17,5
1920	247,8	18,6
1921	226,5	17,6
1922	122,4	20,4
1923	240,0	19,5
1924	140,0	21,4
1925	111,0	18,6
1926	79,9	19,3
1927	152,9	20,7
1928	41,4*	20,7*
1929	73,6	19,8
1930	243,5	19,0
	159,2	19,5

vounion et au col de Ghioza, en 1929 et aux données climatiques disponibles de la plus proche station de Tripoli (tableau 2). Selon ces données, les précipitations en 1928 et 1929 étaient inférieures et les températures supérieures à la moyenne et pour 1928 (début du dépérissement), les précipitations étaient le quart de la moyenne. En même temps, une prolongation importante de la période xérothermique a été observée. Tandis que le nombre moyen (x) des jours biologiquement secs au cours de cette période était $x = 74$, pendant les années 1928 et 1929, il était respectivement $x = 115$ et $x = 109$. Selon le classement du bioclimat méditerranéen (UNESCO-FAO, 1963), le bioclimat de Tripoli est caractérisé comme méso-méditerranéen atténué ($40 < x < 75$), mais pour 1928 et 1929, il est caractérisé comme thermo-méditerranéen atténué ($100 < x < 125$).

2. Facteurs topographiques

Tandis qu'en 1977 et 1985, il était relativement facile d'établir des relations entre le dépérissement et l'altitude, en 1988, on n'a pu distinguer une très nette influence de l'altitude sur le dépérissement. En 1988, le dépérissement apparaît à partir des limites inférieures du sapin (550-600 m) jusqu'à 1400 m environ. Au-dessus de cette altitude et jusqu'à 1600 m environ, le dépérissement devient ponctuel (par arbres isolés ou par petits groupes) et caractérise certains affleurements calcaires parmi les fissures desquels pousse le sapin. Plus haut, dans la zone d'expansion du sapin, entre 1600 et 1800 m, il n'y a pas de dépérissement.

En général, le dépérissement intense se présente jusqu'à 1400 m bien que, plus haut, les conditions édaphiques soient les mêmes ou deviennent plus défavorables. Cependant, il est difficile de tirer des conclusions en ce qui concerne l'influence de l'altitude sur le dépérissement. Il paraît, qu'au moins jusqu'à 1400 m d'altitude environ, l'influence des conditions édaphiques défavorables est tellement intense qu'elle ne peut pas être compensée par l'augmentation des précipitations, de l'humidité relative de l'air et la diminution de la température avec l'altitude, créant ainsi par endroits, des conditions «extra-zonales» dans l'étage du sapin.

En ce qui concerne l'exposition et le dépérissement, la corrélation est plus nette. Toutes les surfaces avec un dépérissement intense (10-40 %), sont d'exposition S, SO et SE, à l'exception d'une située à Lycotrypo, sur le versant Nord, mais avec exposition locale plutôt méridionale. Quant au dépérissement sporadique, il apparaît sur toutes les expositions et il s'intensifie par endroits sur les affleurements calcaires.

Enfin, à part les cas où le dépérissement s'étend sur tout un versant rocheux, il est pratiquement absent dans les dépressions, au pied des versants (à l'exception des versants sans colluvionnement à leur pied) et sur les surfaces horizontales caractérisées par des sols profonds. Par contre, très souvent, en suivant les arbres dépérissants, on peut dessiner le réseau des crêtes, des sommets des versants et des affleurements calcaires.

3. Conditions géologiques et pédologiques

Le Mont Parnasse est constitué par les formations géologiques de la zone dite du «Parnasse-Ghiona». Le calcaire est la roche mère dominante, interrompue par endroits par la présence limitée du flysch (psammite et schiste) et les colluvionnements de ces deux roches mères.

Les sols, dans le Mont Parnasse, présentent un aspect dégradé suite à la forte pression exercée par l'homme et son bétail. Les sols profonds sont en général limités sur les surfaces horizontales, peu pentues et moins sur des surfaces pentues mais dont le couvert végétal n'a pas été détruit durant de longues périodes.

Le sapin, dans le Mont Parnasse, pousse sur toutes les roches mères et tous les types de sol.

Le dépérissement est apparu tant sur calcaire que sur flysch. D'une manière évidente, il est lié

à la profondeur du sol. Il se présente en général sur sols superficiels, peu profonds et accidentellement, surtout par arbres disséminés, sur sols profonds. Il est particulièrement intense sur terrain rocheux calcaire où le sapin pousse parmi les fissures du calcaire et sur les terrains érodés, du flysch (notamment schiste) où le sapin se conserve sur des lambeaux de sol, tandis que la roche mère est omni-présente. Selon PAPAMICHOS, 1985, pour les régions connaissant une longue période xérothermique, comme la Grèce et surtout ses régions sud, une profondeur minimale qui varie de 30 à 80 cm, suivant les conditions de la station et l'espèce, nous ajoutons, est nécessaire pour la survie d'une forêt haute.

3.1 Les sols sur flysch

Les sols sur flysch sont de texture Li - Sa - Al avec un pH entre 5,6 et 7,0 sur substrat psammitique et de texture Al - Li, avec un pH entre 6,6 et 7,3 sur substrat schisteux.

Le dépérissement sur flysch présente un caractère dispersé et il est moins important que sur calcaire, et cela parce que les sols profonds dans le Mont Parnasse se rencontrent surtout sur flysch. La forêt de Mariolata poussant sur psammite et sur sols profonds ne connaît pas de dépérissement. Toutefois, dans les autres forêts de sapin sur flysch, par endroits et sur de petites surfaces où les sols ont été gravement endommagés par l'érosion, le dépérissement a touché plus de la moitié des sapins disséminés (taux de recouvrement < 0,5%) poussant sur ces surfaces. Il n'y a qu'à «Blo» que le dépérissement intense (10-20 %) a touché une surface plus large (de quelques hectares).

On a réalisé 14 placettes sur flysch et on a mesuré la profondeur moyenne du sol dans chacune d'entre elles. Dans 7 placettes, la profondeur moyenne était inférieure à 30 cm tandis que dans 5, la profondeur variait entre 31 et 60 cm et dans 2, elle était supérieure à 60 cm et concernait un dépérissement dispersé. Dans la troisième catégorie, on doit noter la formation d'un horizon d'accumulation d'argile (Bt) difficilement pénétrable par les racines du sapin sur une placette.

3.2 Les sols sur calcaire

Les sols sur calcaire sont de texture Al, Al-Li ou Al-(Sa-Li) avec un pH qui varie entre 6,5 et 7,9. Le sol qui domine est la Terra-rossa.

Le dépérissement se présente sur tous les types de sol et il est plus fort sur terrain calcaire

que sur flysch. Les 9 emplacements sur lesquels le taux de dépérissement atteint 10-40 % se localisent sur terrain calcaire. Cela doit être attribué plus aux sols superficiels ou «inexistants» qu'aux propriétés du calcaire et des sols elles-mêmes. En effet, sur ces 9 emplacements, le sapin, avec un taux de recouvrement à 0,5, pousse parmi les fissures du calcaire et la roche mère affleure sur 70-90 % de la surface.

La profondeur des sols sur ces emplacements ne pouvait pas être mesurée, mais la hauteur des arbres dominants en relation avec leur âge à la hauteur de 1,30 m. montre des sols peu profonds et la plus basse fertilité stationnelle (PANAGIOTIDIS, 1965). La profondeur a pu être mesurée finalement à 15 endroits. Dans 5 d'entre eux, la profondeur moyenne était inférieure à 30 cm et dans 6, elle variait entre 31 et 60 cm, mais avec un taux de débris calcaires qui atteignait jusqu'à 60 %.

Dans 4 placettes uniquement on a rencontré des arbres dépérissants dispersés sur sols profonds (> 60 cm). Les deux placettes concernaient deux bouquets isolés de sapins poussant sur Terra-rossa et les deux autres étaient sur colluvionnement calcaire.

4. Conditions phytosociologiques

L'élaboration des relevés floristiques de 43 placettes comprenant des sapins en dépérissement et de 141 placettes de l'ensemble des sapinières du Mont Parnasse a permis de faire les constatations suivantes en ce qui concerne l'apparition du dépérissement :

a) Sur les surfaces où le taux de dépérissement du sapin est de l'ordre de 10-40 % ou plus par petites places, le tapis végétal herbacé est constitué exclusivement par des espèces xérophiles ou indifférentes (groupe A) telles que :

<i>Alyssum minutum</i>	<i>Herniaria parnassica</i>
<i>Anthemis tinctoria</i>	<i>Melica ciliata</i>
<i>Astragalus parnassi</i>	<i>Micromeria juliana</i>
<i>Bromus tectorum</i>	<i>Ononis pusilla</i>
<i>Calamintha acinos</i>	<i>Ornithopus pinnatus</i>
<i>Centaurea affinis</i>	<i>Origanum vulgare</i>
<i>Cerastium brachypetalum</i>	<i>Picnemon acarna</i>
<i>Clypeola jonthlaspi</i>	<i>Poa bulbosa</i>
<i>Convolvulus elegantissimus</i>	<i>Sanguisorba minor</i>
<i>Crucianella angustifolia</i>	<i>Teucrium chamaedrys</i>
<i>Crupina crupinastrum</i>	<i>Teucrium polium</i>
<i>Cynosurus echinatus</i>	<i>Thymus serpyllum</i>
<i>Daucus guttatus</i>	<i>Trifolium angustifolium</i>
<i>Eryngium campestre</i>	<i>Trifolium stellatum</i>
<i>Eryngium amethystinum</i>	<i>Valerianella coronata</i>
<i>Euphorbia myrsinites</i>	<i>Valerianella echinata</i>
<i>Genista parnassica</i>	<i>Xeranthemum inapertum</i>
<i>Herniaria hirsuta</i>	

b) Sur les surfaces caractérisées par des arbres dépérissants sporadiques, isolés par groupes de 2-3, à faible densité 0,1-2 %, le tapis herbacé est constitué par des espèces mésophytes (groupe B) telles que :

<i>Aremonia agrimonoides</i>	<i>Helleborus cyclophyllus</i>
<i>Brachypodium sylvaticum</i>	<i>Hieracium piloselloides</i>
<i>Calamintha clinopodium</i>	<i>Luzula forsteri</i>
<i>Crepis fraasii</i>	<i>Mycelis muralis</i>
<i>Cyclamen hederifolium</i>	<i>Myosotis silvatica</i>
<i>Fragaria vesca</i>	<i>Pteridium aquilinum</i>
<i>Galium rotundifolium</i>	<i>Veronica chamaedrys</i>
<i>Hedera helix</i>	<i>Viola silvestris</i>

c) Enfin, les surfaces dont le tapis herbacé est composé d'espèces du groupe B, avec faible ou forte présence des espèces ci-dessous, sont caractérisées par l'absence de sapins en dépérissement. Ces espèces sont :

<i>Asplenium trichomanes</i>	<i>Melica uniflora</i>
<i>Athyrium filix-femina</i>	<i>Sanicula europaea</i>
<i>Calamintha grandiflora</i>	<i>Saxifraga rotundifolia</i>
<i>Cephalanthera rubra</i>	<i>Scilla bifolia</i>
<i>Cystopteris fragilis</i>	<i>Symphytum bulbosum</i>
<i>Geum urbanum</i>	<i>Viola odorata</i>
<i>Lapsana communis</i>	

A part ces trois groupes, des combinaisons entre les groupes A et B caractérisant des situations de dépérissement intermédiaires ont été repérées. Mais nous estimons qu'il serait délicat d'entreprendre un classement du dépérissement plus minutieux en fonction de l'apparition des combinaisons de ces deux groupes. Ce classement, d'ailleurs, n'ajouterait rien à notre travail et à son objectif, il aurait plutôt un caractère théorique.

5. Classification stationnelle : Eléments d'accroissement

Pour l'évaluation de la qualité stationnelle dans les sapinières en Grèce, PANAGIOTIDIS (1965) a établi un système de 5 courbes (correspondant à 5 qualités stationnelles de I à V), en utilisant comme indices, la hauteur des arbres dominants et leur âge à la hauteur de 1,30 m (figure 1). Ce système a été reconnu valable et il est d'utilisation courante en Grèce.

Dans les 43 placettes, 86 arbres dépérissants, représentant les deux plus hauts de chaque placette, ont été coupés ; la hauteur, l'âge à 0,30 et 1,30 m et la largeur des 5 derniers cernes ont été mesurés. Les résultats de l'exploitation de ces données sont les suivants :

a) Selon la classification stationnelle de PANAGIOTIDIS (figure 1), 4 arbres caractérisent la III qualité stationnelle, 11 la IV et 71 la plus basse

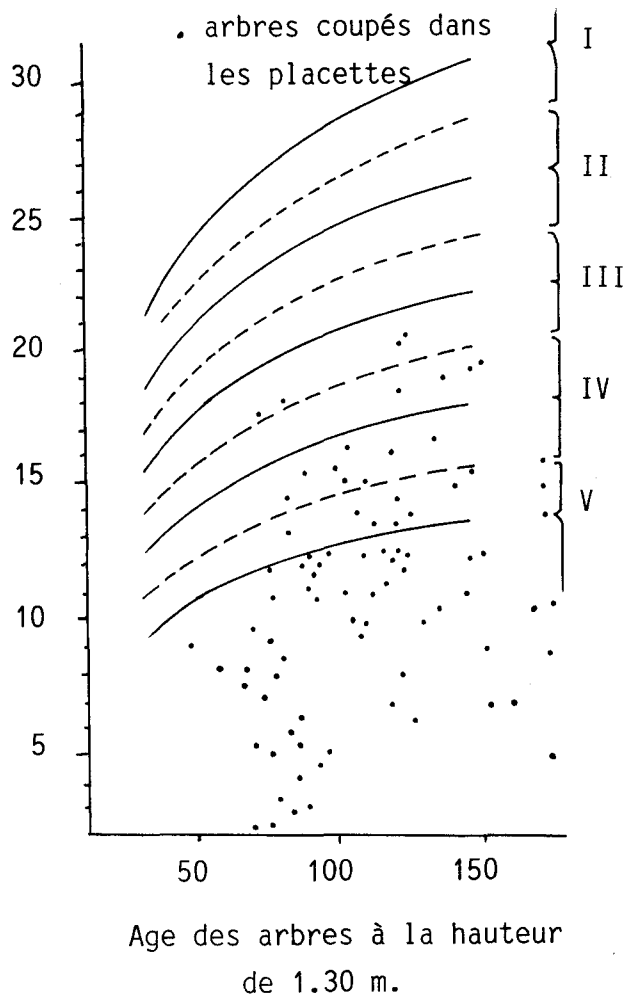


Figure 1.- Classification stationnelle des sapinières helléniques, selon PANAGIOTIDIS (1965)

qualité stationnelle (V). Il est à noter que tous les arbres provenant des surfaces avec un taux de dépérissement 10-40 % caractérisent la plus basse qualité stationnelle (V).

b) La largeur moyenne des 5 derniers cernes est de 3,4 mm et la largeur moyenne de chaque cerne est de 0,7 mm, tandis que la largeur moyenne des cernes dans les sapinières varie de 1,2 à 2,7 mm selon la classe de diamètre. Cette largeur s'observe sur les arbres qui se trouvent dans la phase de déclin de leur croissance en largeur ou des arbres qui poussent dans des conditions écologiques difficiles.

c) Le temps de passage de 0,30 m à 1,30 m de hauteur étant en moyenne de 25,5 ans, montre qu'en grande partie ces arbres étaient opprimés ou perturbés pendant une longue période de leur jeunesse (APATSIDIS, 1987).

d) La hauteur moyenne des arbres coupés est de 10,40 m et représente la plus faible hauteur pour les sapinières helléniques.

6. Observations générales

Outre les éléments et les mesures ci-dessus mentionnés, les observations suivantes ont été faites lors de nos sorties sur le terrain :

- Rarement, on a trouvé de jeunes sapins en dépérissement mais pratiquement jamais de jeunes sapins vigoureux. En général, la régénération naturelle est en très bon état, mais on doit noter que dans les régions qui connaissent un dépérissement intense, la régénération naturelle est quasiment absente.

- Aux endroits où le dépérissement est intense, les sapinières sont dégradées, très clairsemées avec un taux de recouvrement qui ne dépasse pas 0,5. Par contre, sur les surfaces où le taux de recouvrement est supérieur à 0,8, on n'observe pas de dépérissement, même quand, dans certains cas, les conditions ne sont pas favorables (p.e. sols colluviaux avec un taux de pierres de l'ordre de 50-70 %, sols peu profonds dans la zone inférieure du sapin).

- Vers les limites inférieures où le sapin, avec une présence sporadique, a étendu son aire d'expansion dans l'étage des formations arbustives à feuillage persistant (*Quercus coccifera*, *Phillyrea media*, *Juniperus oxycedrus* notamment), le taux de dépérissement du sapin est souvent important et parfois dépasse 40 %.

- Souvent, le taux de dépérissement est plus important aux lisières que sur le reste de la forêt.

CONCLUSIONS

Les observations et résultats précédents permettent de faire les constatations suivantes en ce qui concerne le dépérissement du sapin :

- Il apparaît les années qui se caractérisent, dans la première moitié de la période de croissance, par des précipitations inférieures et des températures supérieures à la moyenne. Le phénomène s'est présenté avec une ampleur et une intensité particulières, quand les précipitations locales étaient le tiers ou le quart de la moyenne (stations du Parnasse 1988, Mainalon-Vytina 1988, Tripoli 1928). Par contre, quand les précipitations, au cours de la première période de la croissance, étaient plus élevées que la moyenne, le phénomène de dépérissement n'a pas fait son apparition. On doit en plus noter que, pendant les années d'apparition du dépérissement, il y a eu une prolongation importante de la période xérothermique qui a changé les caractères du bioclimat local : le sapin a été obligé de vivre, au moins

dans la zone inférieure, sous un bioclimat qui ne se rencontre pas dans son aire d'expansion normale.

En outre, il faut remarquer, qu'en des points plus élevés en altitude, suite à la diminution de la profondeur du sol, la xéricité s'accroît et des conditions «extra-zonales» peuvent se créer, surtout pendant les années de pluviométrie déficitaire et de températures plus élevées que la moyenne.

- Le phénomène est lié d'une manière évidente à la profondeur du sol. Il est particulièrement marqué sur les sols superficiels et sur le terrain rocheux calcaire caractérisé par la chétive présence de sols, parmi les fissures. Accidentellement, on rencontre des arbres dépérissants sur sols profonds : le phénomène est alors sans gravité et sporadique, mais on doit cependant noter que :

. un horizon d'accumulation d'argile, difficilement pénétrable par les racines d'une espèce végétale, peut rendre un sol profond, superficiel ou peu profond, suivant la profondeur d'apparition de cet horizon,

. Terra-rossa se dessèche fortement pendant la période estivale et l'alimentation des plantes en eau devient de plus en plus difficile, à tel point que ces sols sont à déconseiller pour des reboisements rentables (MAVROMMATIS, 1979),

. selon LUTZ & CHANDLER (1946), cités par PAPAMICHOS (1986), l'influence favorable qu'exerce la présence des pierres dans les sols argileux, est très atténuée par des effets défavorables tels que, augmentation des températures extrêmes, diminution de la capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs et diminution du volume du sol exploitable par les racines, lorsque le taux de ces pierres dépasse 20 %,

. d'autres causes peuvent avoir contribué au dépérissement de certains arbres, par exemple, mort naturelle, accélérée par une sécheresse exceptionnelle, autres maladies. XENOPOULOS (1989), en étudiant le phénomène de dépérissement du sapin au Mont Parnasse, du point de vue phytopathologique, a attribué le dépérissement d'un nombre relativement limité d'arbres, aux champignons *Armillaria mellea* et *Heterobasidium annosum* (*Fomes annosus*) qui avaient intensivement attaqué leur système racinaire sur sols profonds.

- La strate herbacée des forêts caractérisées par un fort dépérissement est composée d'espèces xérophiles, tandis que dans les forêts dont la strate herbacée est composée d'espèces

mésophytes et méso-hygrophyles, le dépérissement est absent.

- Le dépérissement intense, de l'ordre de 10-40 %, apparaît sur les versants d'exposition sud, sud-ouest et sud-est, c'est-à-dire les versants les plus chauds et secs et en même temps les plus dégradés.

- Le taux de recouvrement du sol des forêts fortement touchées par le dépérissement est à 0,5 et, par conséquent, l'ambiance propice créée par la forêt fermée fait défaut, tandis que dans les peuplements fermés, le dépérissement est pratiquement absent.

- Le dépérissement a surtout touché des arbres opprimés ou surpâturés pendant une longue période de leur jeunesse, des arbres qui présentaient une très faible croissance en largeur (soit parce qu'ils se trouvaient dans la phase de déclin de leur croissance en largeur, soit parce qu'ils grandissaient avec des conditions écologiques défavorables), tandis que les sapins vigoureux n'étaient pas touchés

- La hauteur moyenne des arbres en dépérissement qui ont été coupés, est de 10,40 m ce qui constitue la hauteur la plus faible des sapinières helléniques

- Enfin, les arbres dépérissants qui ont été coupés (86), caractérisent en grande partie (71 sur 86), des lieux présentant la plus basse (V) qualité stationnelle, et pas du tout ceux présentant les meilleures qualités stationnelles

D'après les constatations ci-dessus énoncées, on peut affirmer que le dépérissement du sapin au Mont Parnasse, n'apparaît pas indépendamment des conditions écologiques, mais qu'au contraire, il est étroitement lié à une confluence de tout ou partie de conditions écologiques défavorables.

Selon DIAMANDIS (1989), les insectes, pour déposer leurs oeufs, choisissent et attaquent les arbres qui possèdent un potentiel hydrique bas. Ce choix se fait d'une manière indirecte par les insectes, qui sont stimulés par des réactions biochimiques se produisant dans les arbres présentant cette caractéristique (BARTOS & AMMAN, 1989). La résistance des arbres à ces attaques diffère selon les espèces.

Abies concolor par exemple, peut résister aux attaques de l'insecte *Scolytus ventralis* Lec tant que le potentiel hydrique de l'arbre ne descend pas au-dessous de -20 bars, étant donné que jusqu'à cette valeur, un fort écoulement de résine se produit, suite aux attaques des insectes, qui

décourage ceux-ci ou tue les chenilles. Par contre, les insectes s'installent dès que la chute du potentiel hydrique de l'arbre devient plus importante que -20 bars, parce qu'il y a diminution progressive de l'écoulement de résine autour des points attaqués par les insectes (FERREL, 1978).

Le processus de résistance de *Pinus ponderosa* et *Pinus coulteri* aux attaques de l'insecte *Dendroctonus brevicornis* Le Conte (DEMARS *et al.*, 1982) est identique.

Bien que le dépérissement soit un phénomène complexe en raison du nombre de facteurs qui peuvent se conjuguer, l'hypothèse la plus probable, basée sur nos observations et mesures du terrain et aux expériences analogues d'autres auteurs (AUSSENAC, 1978 ; BARTOS et AMMAN, 1989 ; DEMARS, 1982 ; DIAMANDIS, 1989 ; DURAND, 1983 ; FERRELL, 1978 ; LEVY & BECKER, 1987), pourrait être la suivante :

Suite aux précipitations minimales, aux températures élevées et à la prolongation de la période xérothermique en 1988, le sol a été progressivement asséché et l'alimentation en eau des arbres est devenue de plus en plus difficile. Une chute du potentiel hydrique des arbres s'est ensuite produite à tel point, qu'à certains endroits, elle a affaibli leur résistance et a permis aux insectes de les attaquer et de causer leur dépérissement.

Cette hypothèse, bien sûr, ne doit pas exclure qu'un certain nombre d'arbres sont morts par suite du stress hydrique (dont l'intensité et la durée étaient exceptionnelles), indépendamment des attaques des insectes et que d'autres sont morts suite aux attaques internes de leur système racinaire par *Heterobasidium annosum* et *Armillaria mellea*, ou encore pour d'autres raisons.

BIBLIOGRAPHIE

- APATSIDIS L. 1987. The influence of grazing on fir forest and on the erosion of their soils (in greek). Dassiki Erevna. Vol. 1 (VIII), 39-54
- AUSSENAC, G. 1978. La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers. Revue forestière française. Vol. 30, n° 2, 103-114
- BARTOS, D.L. et AMMAN, G.D. 1989 : Microclimate ; on Alternative to Tree Vigor as a Basis for Mountain Pine Beetle Infestations. USDA, FOR. SERV. RES. PAPER INT-400, 1-10.
- BRAUN-BLANQUET, J. 1951. Pflanzensoziologie (2ème édition). Springer edit Wien
- DEMARS, Jr., C.I. & ROETTGERING, B.H. 1982. Western pine beetle. USDA FOR. SERV. FOR. INS & DIS. LEAFLET 1, 1-8.
- DIAMANDIS, S. 1989. Climatic conditions in the fir zone during the period 1960-1988. Article presented in the session of fir-mortality in Tripolis (Greece).
- DURAND, P. *et al.*, 1983. Le dépérissement du chêne pédonculé dans les Pyrénées Atlantiques. R.F.F., 357-368.
- FERRELL, G.T. 1978. Moisture stress Threshold of Susceptibility to Fir Engraver Beetles in Dole-Six White Firs FOR. SCIENCE 24 (1978), 85-92.
- KAILIDIS, D. 1964. *Abies* of Eastern Mainalon Mountain is attacked and dying out (in greek). Dasika Chronika, Vol. 63/64, 41-54.
- KAILIDIS, D. 1979. Drying of Technical and Physical Forests in Northern Greece in the period 1977-78 (in greek). Vol. 86, 1-8.
- KAILIDIS, D. & BROFAS G. 1985. Fir decline in Parnis-mountain. A case of continued Durbreak (in greek). Agrotika Themata, Vol. 5, 31-34.
- LEVY, G. & BECKER, M. 1987. Le dépérissement du sapin dans les Vosges : rôle primordial de déficits d'alimentation en eau. Ann. Sci. For. 44 (4), 403-416.
- MAVROMMATIS, G. 1973. Soil vegetation relationship (in greek). To Dasos n° 59/60, 11-19.
- MOULOPOULOS, S. 1967. Cours de sylviculture (en grec). Université de Thessalonique. Grèce.
- PANAGIOTIDIS, N. 1965. Tannenplenterwälder in Griechenland. Verlag Paul Parey. Hamburg und Berlin (21) : 1-97.
- PAPAMICHOS, N. 1985. Forests soils (in greek). Thessaloniki.
- UNESCO-FAO, 1963. Carte bioclimatique de la zone méditerranéenne. Notice explicative O.N.U. Paris.
- XENOPOULOS, S. 1989. Epidemiology, Symptomatology and causation of the phenomenon of fir-mortality in Greece. Article presented in the session of fir-mortality in Tripolis-Greece.

Carte écologique du Massif du Sancy au 1/25 000*

P. COQUILLARD ⁽¹⁾, J. GUEUGNOT ⁽¹⁾, P. JULVE ⁽²⁾, R. MICHALET ⁽³⁾,
Y. MICHELIN ⁽⁴⁾

RESUME

Une étude phytosociologique et écologique *s.l.* des milieux -pelouses et tourbières, landes et fourrés, lisières et forêts- des étages montagnards et subalpins (de 1 000 à 1 880 m environ) du massif volcanique du Sancy (Massif Central, France) constitue le matériau de la cartographie au 1/25 000 proposée. L'analyse des matrices d'échantillonnage -plus de 1 600 relevés sigmatistes, 40 prélèvements pédologiques et 41 enquêtes agricoles- permet, au moyen des analyses de données classiques (Analyse Factorielle des Correspondances, Classifications Hiérarchiques...) d'établir un ensemble de résultats dans des domaines variés: approche des relations sols-facteurs stationnels-végétation, constitution de groupes d'espèces indicatrices des milieux, évaluation de l'impact des pratiques agricoles et anthropiques *s.l.*, identification des groupements et des relations dynamiques. L'expression cartographique des résultats repose, à l'étage montagnard sylvatique, à la fois sur la distribution, les relations dans les successions et la structure des groupements en place. Dans la zone montagnarde suprasylvatique et subalpine, les groupements sont rassemblés par types physiologiques -landes, pelouses basses, pelouses denses et hautes herbes, groupements arbustifs, complexes écologiques...- à l'intérieur desquels les facteurs stationnels prépondérants révélés par les analyses -géomorphologie, exposition, hygrophilie stationnelle- permettent de distinguer des sous-ensembles détaillés dans le commentaire.

MOTS-CLES : carte écologique, Massif du Sancy (France), matériaux volcaniques, montagnard, subalpin

ABSTRACT

A phytosociological and ecological study of the ecosystems -grasslands, peat-bogs, heathlands, shrubby vegetation, borders and forests- of the highlander and subalpine levels (from 1 000 to 1 880 m) of the volcanic Massif du Sancy (France) constitutes the main material of the ecological map. The analysis of the sampling matrixes -more than 1 600 relevés, 40 pedologic samplings, 41 agricultural investigations- allows, by means of classical data analysis (Correspondance analysis and hierarchical classifications...) to set up results in various fields : soil-stationnal factors-vegetation relations, constitution of species groups characterizing the local conditions, evaluation of the impact of human practices (agricultural and others), groupements and dynamics identifications. The mapping expression lies at the same time -at the sylvatic highlander level- in the distribution, the dynamical relations and the structure of the groupements. In the non-sylvatic highlander and subalpine zones, the groupements are gathered in physiologic types -heathlands, close-cropped lawns, dense lawns and high grasslands, shrubby groupements, ecologic complexes...- in which the preponderant local factors distinguished by the analysis -geomorphology, exposure, stationnal hygrophily- allows to exhibit some groups described in the text.

KEY WORDS : ecological map, Massif du Sancy (France), volcanic materials, highlander level, subalpine level

(*)Travaux soutenus par le Ministère de l'Environnement et le Fonds Interministériel d'Aménagement de la Montagne

(1) Laboratoire d'Ecologie végétale et Cellulaire, Faculté de Pharmacie, B.P. 38, 63001, Clermont-Ferrand CEDEX.

(2) 59, Av. J. de Groote, 59270 Bailleul.

(3) Laboratoire de Biologie Alpine, Université Joseph Fourier, B.P. 53X, 38041, Grenoble CEDEX.

(4) Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne, Montlosier, 63970 Aydat.

SITE D'ETUDE

Relief

Le Massif du Sancy forme un ensemble typique de moyenne montagne, atteignant 1 885 m d'altitude au Sancy. Une suite de sommets du Puy de Baladou (1 455 m) au Puy de Chambourguet (1 520 m), dessine une ligne dorsale nord-sud, bordée par un dispositif radiaire

de vallées profondes (figure 1). Au nord, la vallée de la Dordogne, orientée sud-nord puis est-ouest avec son affluent le ruisseau de l'Enfer alimenté par le lac du Guéry ; à l'est, le Val de Chaudefour, s'écoule vers le nord-est en direction du lac Chambon. Quelques creusements moins accentués modèlent le massif : au sud, les cirques de la Fontaine Salée et de Super-Besse et la vallée de la Couze Pavin, au nord-est, les ruisseaux de Fredet et Chadeyre.

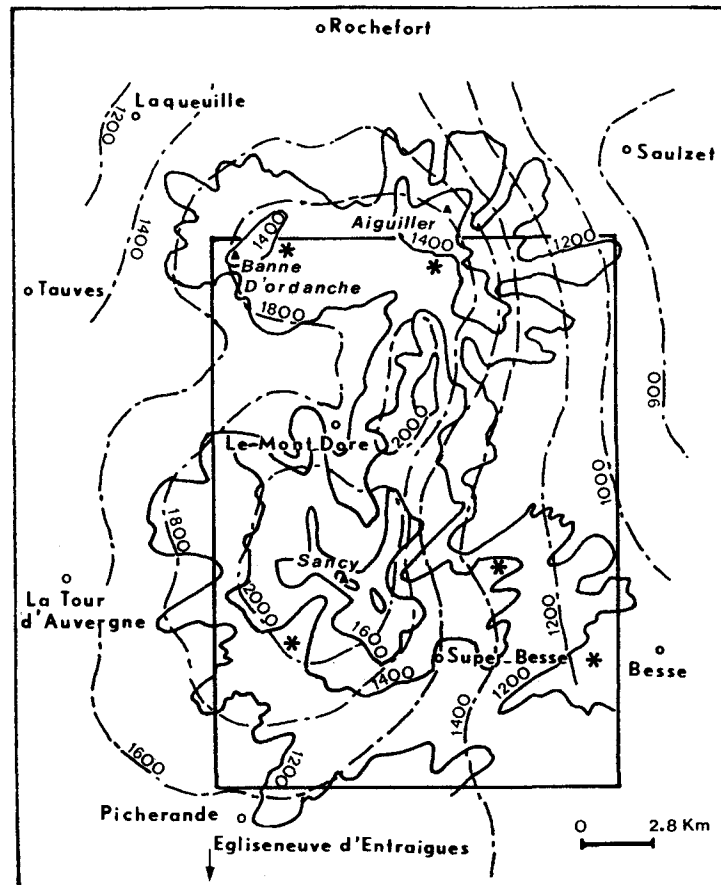


Figure 1.- Relief (en traits pleins) et pluviométrie (traits discontinus) dans les Monts Dore (*in* de MONTARD et GACHON, 1978, modifié). Situation de la zone d'étude, localisation des stations météorologiques, localisation des 5 sites d'enquêtes agricoles (*).

Al'ouest comme à l'est, le massif s'abaisse en pente douce vers les altitudes de 1 000 m environ, ponctué par des puits de faibles ampleurs (Corde, Serveix, Montchal, Pouge, Pertuyzat...). Au nord-est, le groupe de la Banne d'Ordanche, en rive droite de la Dordogne, constitue un ensemble planitaire bien individualisé à 1 400 m d'altitude.

Le passage des glaciers a profondément marqué le paysage, et plus particulièrement dans les vallées de Chaudefour et de la Dordogne, mais l'absence de cordon morainique atteste de

l'importance de l'érosion post-glaciaire... (LACASSAGNE, 1990). Par ailleurs, une morphologie en amphithéâtre émaille le paysage (revers oriental de la Montagne de la Plate, rive droite de la Dordogne...) et serait attribuable à des glissements en masse affectant les roches pyroclastiques (ponces, cendres, lapilli, scories). L'érosion actuelle exerce sa plus forte pression sur ce type de matériaux et met à jour dykes et intrusions massives (aiguilles de Chaudefour...).

Les niches de nivation ne sont plus ou bien peu actives en dessous de 1 450 m et le tapis

végétal résiste bien. Au subalpin, l'important redressement des crêtes contrecarre l'accumulation neigeuse si ce n'est dans le grand cirque surélevé de la face nord du Sancy qui constitue une énorme combe à neige.

Enfin, il faut signaler la présence, notamment dans le Val de Chaudefour, de couloirs avalancheux très actifs, où se développent certaines années des coulées de neige de puissances parfois comparables à celles des Alpes.

Climat

Les données climatiques sont malheureusement fragmentaires, et aucune station de longue date n'existe au dessus de 1 160 m (Saulzet-le-Froid). Quelques données sont disponibles pour la période 1985-1991.

L'ensemble du massif bénéficie d'un climat à forte influence océanique, c'est-à-dire à précipitations importantes et régulières au cours de l'année.

Précipitations

L'examen de la figure 2 montre que le profil pluviométrique est homogène dans tout le massif, avec un léger creux estival cependant. Les valeurs varient entre 1 300 et 1 700 mm par an (Tableau I) et l'on peut estimer à 2 500 mm au moins les précipitations aux altitudes supérieures à 1 600 m. La carte des isohyètes (figure 1) montre que si le régime hydrique est constant, il s'établit un gradient ouest-est du à un effet de foehn très marqué, en relation avec les crêtes sommitales ; c'est ainsi que l'on constate 1 733 mm de pluie au Mont-Dore (1 050 m) et 1 247 à Besse-en-Chandesse (1 060 m). Ce phénomène est d'ailleurs général à la ligne de crête du Massif Central (OZENDA, 1985 ; DOCHE, 1986 ; COQUILLARD *et al.*, 1988a). L'effet de foehn s'atténue en s'éloignant vers le nord et le sud (1 275 mm à Rochefort-Montagne, 1 535 mm à Egliseneuve-d'Entraigues).

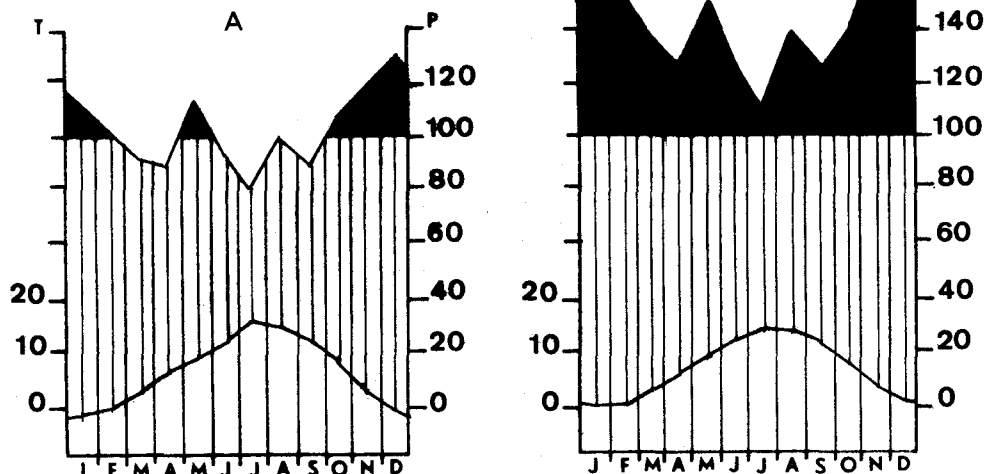


Figure 2.- Diagrammes ombrothermiques de deux stations
A. Besse-en-Chandesse (1 060 m) ; B. Le Mont-Dore (1 050 m). Données normalisées 1951-1980

Le calcul de l'indice de GAMS (Tableau II) permet d'évaluer le climat en terme de «continentalité hydrique relative» (MICHALET, 1991). Les résultats reflètent bien l'assèchement général de la façade est du massif (30 à 35° à l'ouest, 40 à 45° à l'est). Néanmoins, cet assèchement encore modéré sur les marges est de la carte (Besse-en-Chandesse) devient par contre

très important à la descente des Couzes, plus à l'est au niveau de l'étage collinéen. Par ailleurs, ce processus de continentalité hydrique affecte essentiellement les pluies d'hiver au niveau des Monts Dore, alors que plus au sud, le déficit estival plus marqué confère une teinte subméditerranéenne aux régions situées à l'est du Massif du Cantal (PACHE, 1991).

Tableau I
Altitude (Alt), Pluviométrie et nombre de
jours de neige annuels (1951-1980),
(* : 1985-1991).

Stations	Alt m	P mm	Njn*
Besse-en-Ch.	1060	1247	54
Egliseneuve-d'E.	950	1535	
La-Tour-d'A.	1000	1446	53
Le Mont-Dore	1050	1733	79
Picherande	1120	* 1580	61
Rocheftort	890	1275	53
Saulzet-le-F.	1160	1184	74
Super-Besse	1340	* 1962	60
Tauves	850	1343	53

Tableau II
Angle de GAMS calculé sur les valeurs norma-
lisées 1951-1980 et 1985-1991 (*).

Laqueuille (1100m)	38°2
La-Tour-D'Auvergne (980m)	34°6
Le Mont-Dore (1050m)	31°2
Rocheftort-Montagne (890m)	33°7
Tauves (850m)	32°3
Egliseneuve-d'Entraigue (950m)	31°8
Saint-Genès-Champespe (1020m)	34°2
Super-Besse (1340m)	34°*
Besse-en-Chandesse (1060m)	40°5
Saulzet-le-Froid (1160m)	44°3
Saint-Diéry (740m)	43°1

Aucune donnée récente concernant l'épaisseur du manteau neigeux n'est malheureusement disponible. Constatons cependant la régularité de périodes de fontes tout au long des hivers et la persistance de congères jusqu'au début de l'été, en altitude. Les chutes de neige s'étalent de novembre à avril avec quelques événements exceptionnels en mai ou octobre (Tableau III).

Tableau III
Nombre de jours de neige mensuels
(1987-1991)

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Super-Besse	11	10	9	8	3	0	0	0	0	1	8	4
Le Mont-Dore	12	12	11	12	3	0	0	0	0	1	9	10

Températures

Elles apparaissent comme faibles comparées à celles relevées dans les Alpes (FRAIN, 1986 ; JOLLY et LECOMPTE, 1988), 6.9°C au

Mont-Dore (1 060 m) et 11.4°C à St Pierre de Chartreuse (954 m). Les moyennes des minimums sont toutefois comparables (3°C environ) les maximums étant plus faibles de part une insolation moins importante. Par ailleurs, l'examen des minimums absolus (Tableau IV) montre, pour les sept dernières années, des valeurs inférieures à -15°C. Ces constats doivent toutefois être pondérés par la fréquence des alternances gel/dégel quasi journaliers en hiver. C'est ainsi que pour le mois de février 1991 à 1385 m (Chastreix-Sancy), on a observé que sur 24 jours de gel, 17 d'entre eux présentaient des valeurs positives...

Tableau IV
Quelques données sur la température
(1951-1980), (1985-1991 :*)

Stations	T°	minabs	mmin	Njg
Besse-en-Ch.	6,3	-15,6*	3,0	125*
Egliseneuve d'E.	7,0			
Le Mont-Dore	6,9	-15,4*	3,0	126*
Picherande	6,7*			
Saulzet-le-F.	7,1*	-15,1*	2,7*	135*
Super-Besse	6,3*	-15,5*	2,9*	124*
Tauves	8,6*	-16,0*	3,8*	105*

Vent

L'Auvergne est une région ventée, avec 38 jours par an en moyenne de vents forts (> 58 Km/h), les vents de 110 Km/h et plus sont exceptionnels en plaine (Limagnes), mais de fréquences sans doute plus élevées en altitude. Les directions privilégiées des vents forts sont celles du sud et de l'ouest (station de Clermont-Ferrand).

Géologie

Les Monts Dore constituent un strato-volcan couvrant 500 km², orienté nord-sud (figure 3). Son histoire, complexe, débute il y a 19 millions d'années et se termine avec l'explosion phréatomagmatique du lac Pavin vers 5 900 ans BP (PETERLONGO, 1978 ; GUENET et REILLE, 1988).

Il est constitué pour l'essentiel de produits pyroclastiques (brèches, cinérites, ponces) localement remaniés par de minces niveaux volcano-détritiques. A leur surface se sont érigés des dômes massifs de trachytes, phonolites ou rhyolites tandis que des trachyandésites et des basaltes, en coulées plus fluides, se sont intercalés, ou bien en ont couronné l'édifice ou encore en ont revêtu les flancs. Le socle hercynien, sous-bassement de l'édifice volcanique, affleure dans les vallées à la périphérie du massif.

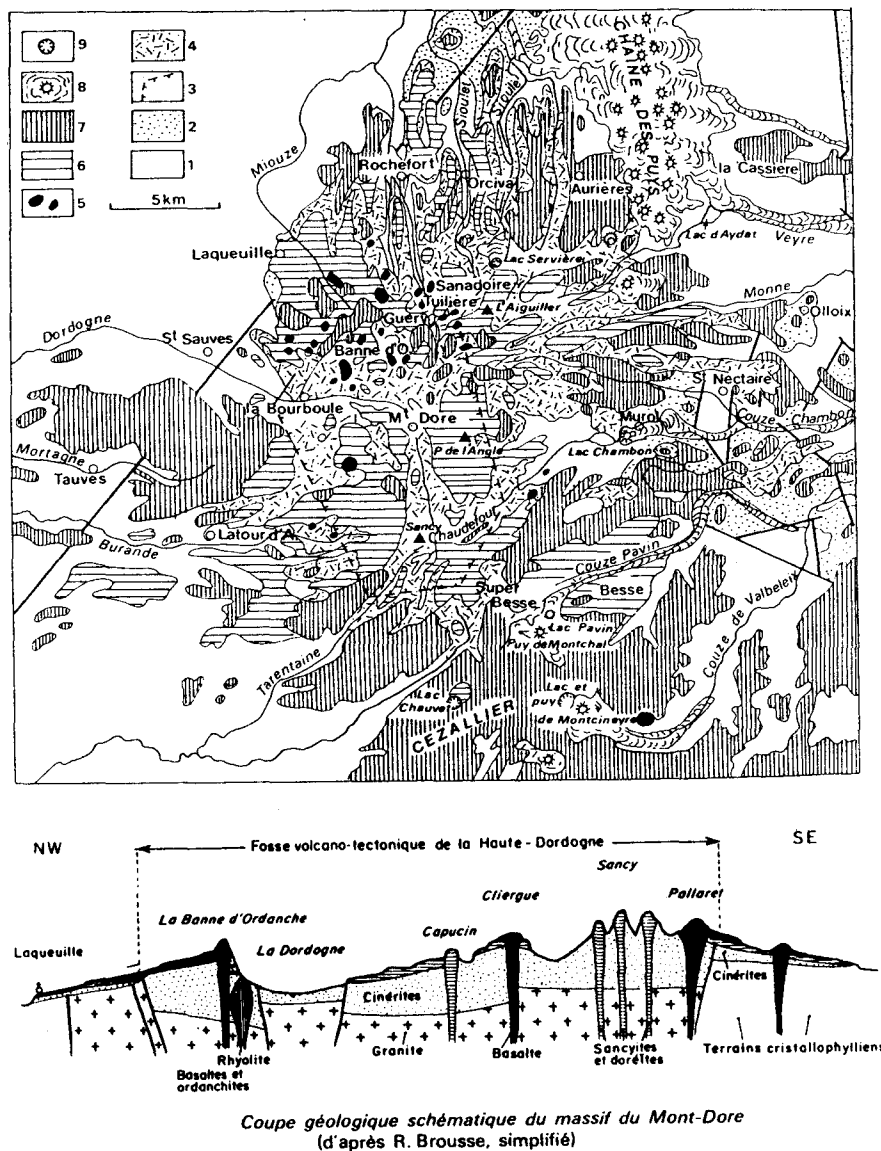


Figure 3.- Carte géologique simplifiée et coupe schématique (in PETERLONGO, 1978). 1. socle hercynien ; 2. sédiments oligocènes et miocènes ; 3. limite de la caldéra de la haute Dordogne ; 4. formations pyroclastiques ; 5. laves différenciées (phonolites, trachytes, rhyolites) ; 6. laves intermédiaires (sancyites, doréites, ordanchites, labradorites) ; 7. basaltes ; 8. volcanisme holocène (Chaîne des Puys) ; 9. maars (holocène)

Les roches ainsi mises en place peuvent être regroupées en 3 ensembles schématiques (produits pyroclastiques, intrusions, et basaltes) qui se répartissent dans la dition de la façon suivante (MENARD, 1979 ; BROUSSE et TEMPIER, 1981 ; LAVINA, 1985) :

1. Produits pyroclastiques : ponces, cinérites, scories stromboliennes : zones nord-ouest, de grande extension, Val du Mont-Dore, région de la Bourboule ; au sud-est, Val de

Chaufefour, zone du lac Pavin et de Super-Besse.

2. Intrusions en dômes :

* Rhyolites : La Gacherie, Puy de Chantauzet.

* Doréites (trachyandésite = mugéarite) : Puy de l'Angle, Puy de Clergue, Ferme de l'Angle, versant ouest des Puys de Chabanne et de Clergue, Puy Gros, socle du Paillaret, Puy de Champgourdeix, coulée de la Croix St Robert.

* Sancyites (trachyandésite = benmoréite) : Capucin, puys de Surains, Chambon, Baladou, Barbier, Gros(nord), Redon, Montagne de Bozat, Puy Gros(sud), Puy Ferrand, Sancy, Paillaret, Jumel, Roc de Cuzeau.

* Ordanchites (trachyandésite = mugéarite) : Puy de l'Aiguiller, Banne d'Ordanche.

* Phonolites (trachytes et trachyandésites = benmoréites) : Puy Corde, Banne d'Ordanche, Montagne de Bozat, Col de la Croix St Robert, Suquet de Claude.

3. Basaltes (ankaramite, basanites, hawaïtes) : Plateau occidental de la Banne

d'Ordanche, La Clé du Lac, Puy de la Croix Morand, Plateau de Durbise, Salon du Capucin, Montagne de Chambourguet, base du Puy Corde, Planèze de Courbange, Roc de Courlande, Coulee de Surains.

Eléments de pétrographie

Le tableau V montre la variabilité de ces matériaux dans leur composition chimique. On notera tout particulièrement la variation des teneurs en silicates, carbonates, oxydes de fer et magnésium, ainsi que les teneurs élevées en oxydes d'aluminium.

Tableau V

Composition chimique partielle de quelques roches des Monts Dore (en %). D'après AUTRAN *et al.*, 1979, partiel, modifié. 1 : Ponce rhyolitique ; 2 : Rhyolite ; 3 : Ponce trachytique ; 4 : Phonolite ; 5 : Sancyite ; 6 : Doréite ; 7 : Hawaïte.

	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	71,90	68,43	60,60	59,24	58,70	52,71	48,70
CaO	0,40	0,70	1,00	4,90	5,75	6,82	10,95
Al ₂ O ₃	15,30	16,74	17,80	18,20	16,05	18,23	13,25
FeOx	1,20	1,77	2,46	2,86	8,20	3,47	10,95
MgO	0,35	0,33	0,20	0,38	0,35	4,47	5,60
Na ₂ O	3,65	6,10	5,10	5,84	5,05	4,35	3,20
K ₂ O	4,35	5,15	5,30	5,15	4,38	3,50	0,95

Pédologie

Les sols développés sur roches volcaniques dans le Massif Central ont été très bien étudiés par HETIER (1975) qui s'est néanmoins intéressé essentiellement aux sols de la Chaîne des Puys et du Cantal et presque uniquement à l'étage montagnard.

Dans les Monts Dore les matériaux volcaniques basiques très altérables, type scories basaltiques sont rares contrairement à la Chaîne des Puys. En conséquence les andosols, sols emblématiques des régions volcaniques, sont ici peu répandus. Les matériaux dominants étant des laves et des projections acides, les sols associés sont des sols podzoliques et des intergrades andiques de type andopodzolique.

A l'étage subalpin les projections basiques sont totalement absentes et les coulées basaltiques très rares. De part l'acidité des matériaux et la rigueur du climat, la podzolisation devient quasi générale ; néanmoins, cette podzolisation est peu marquée morphologiquement, notamment sous pelouse où dominent les rankers crypto-

podzoliques comme dans les Vosges (CARBIENER, 1963) ou le Forez (HETIER, 1975 ; THEBAUD, 1988). De véritables sols ocres podzoliques s'observent néanmoins sous végétation ligneuse dominante mais ils sont plus abondants sous forêt à l'étage montagnard. Enfin, de part les effets de la topographie, les sols stationnels sont très abondants dans les deux étages, rankers dans les pentes fortes convexes et sols colluviaux très actifs dans les pentes concaves, sous groupements à hautes herbes.

Mis à part à l'étage montagnard sur ponces fibreuses (bois de la Charbonnière) et dans le fond des combes à neige subalpines où se développent des stagnogleys podzoliques, les sols hydromorphes sont peu répandus.

Dans le tableau VI sont donnés les résultats des analyses de caractérisation de six profils types du massif, situés sur matériaux acides trachyandésitiques à part le sol 1 sur scorie basaltique et le sol 2 sur basalte. La richesse en sables explique en grande partie l'intensité de la podzolisation, ces teneurs étant d'autant plus importantes quand les sols sont situés en position

convexe (sols 3 et surtout 4). En situation concave l'augmentation des teneurs en argiles freine la podzolisation comme c'est le cas sur roches cristallines (SOUCHIER, 1971 ; BOUDOT *et al.*, 1981) et sur roches carbonatées (MICHALET et BRUCKERT, 1986). L'importance des teneurs en fer, et surtout en aluminium et silice amorphe (extraction à l'oxalate ou à l'oxalate dithionite), corrélable à la richesse en allophanes est un critère d'andosolisation définissant les horizons Aa et Sa diagnostiques des andosols (sol 1) et à moindre degré des alu-andosols (sol 2) du Référentiel Pédologique Français (RPF, 1992) correspondant aux sols andopodzoliques (CPCS, 1967). Les quatre autres sols sont pauvres en ces éléments amorphes, l'essentiel de la fraction minérale étant sous forme cristallisée. Les sols

podzoliques (sol 4 surtout mais également sols 3, 5 et à moindre degré 2) se distinguent des sols plus actifs (sols 1 et surtout 6) par leurs C/N et teneur en aluminium échangeable élevés, leur pH très acide et l'entraînement du fer et de l'aluminium en profondeur (horizons diagnostiques BP) ; la migration du fer devient très importante sous l'effet conjugué de l'hydromorphie dans le sol 5.

Les caractères édaphiques déterminants pour la couverture végétale sont, au niveau chimique le rapport C/N et la teneur en aluminium échangeable, au niveau physique la profondeur du sol, la pierrosité et la teneur en sables (corrélés à la position topographique).

Tableau VI
Analyses de caractérisation de six profils pédologiques types

Andosol dystrique = Andosol désaturé sous hêtraie à aspérule des bois, altitude 1150 m, chaîne des Puys (HETIER, 1975)

Horizons	Profond.	Granulométrie en % de mat. sil.						Mat. org.	C	N	C/N	pH	pH	Al éch.	Elts libres en ‰*			amorphes en ‰		
RPF CPCS	en cm	Sg	Sf	Lg	Lf	A	%	%	%	%		H ₂ O	KCl	meq/100g	Fe	Al	Si	Fe	Al	Si
Aa1 A0A1	0-10	21,8	19,3	14,7	32,9	11,3	23,2	11,6	0,91	13	4,6				51,2	61,6	20			
Aa2A1(B)1	25-40	27	23,8	11,4	25,7	12,1	20	10	0,7	14	4,8				54,4	61,6	23,2			
Sa (B)2	60-80	29,3	22,8	19,6	23,6	4,6	8,8	4,4	0,28	16	5,4				52,8	57,6	30,4			

Alu-andosol typique = Sol andopodzolique sous calamagrostido-festucaie, altitude 1650 m, vallée de Chaudefour * extraction oxalate dithionite

Horizons	Profond.	Granulométrie en % de mat. sil.						Mat. org.	C	N	C/N	pH	pH	Al éch.	Elts libres en ‰**			amorphes en ‰***		
RPF CPCS	en cm	Sg	Sf	Lg	Lf	A	%	%	%	%		H ₂ O	KCl	meq/100g	Fe	Al	Si	Fe	Al	Si
Aa1 A11	0-20						47,2	23,6	1,74	14	4,5	4,1	5,5	20	24,6	2,3	13,8	21	0,9	
Aa2 A12	20-40						34,6	17,3	1,3	13	4,9	4,3	5,5	24,6	37,4	3,5	15,9	27,7	2,2	
Aa3 A13	40-70	8,5	20,7	20	35	15,8	30,4	15,2	1,09	14	5	4,5	2,8	25,7	40,6	4,3	16,1	21,8	1,4	
Sa (B)C	70-90	13,2	22,4	25,1	30,2	9,1	20,8	10,4	0,83	13	5,2	4,8	0,9	25,3	46,4	4,6	15,4	38,1	17,4	

Podzol humique = Ranker cryptopodzolique sous calluno-festucaie, altitude 1800 m, Puy de la Perdrix ** extraction Mehra-Jackson

Horizons	Profond.	Granulométrie en % de mat. sil.						Mat. org.	C	N	C/N	pH	pH	Al éch.	Elts libres en ‰**			amorphes en ‰***		
RPF CPCS	en cm	Sg	Sf	Lg	Lf	A	%	%	%	%		H ₂ O	KCl	meq/100g	Fe	Al	Si	Fe	Al	Si
Ah A1	5-20						27,6	13,8	0,96	14,4	4,7	3,8	6,9	10,4	10,4	0,6	7,5	10,1	0,5	
BPh1ABh1	20-35	27,4	26,3	20,2	16,2	10	24,4	12,2	0,79	15,4	4,9	4,1	6,3	12,2	16,2	0,4	9,1	15,6	0,6	
BPh2ABh2	35-70	33,1	26,1	16,5	20,5	3,8	16,8	8,4	0,59	14,2	6,1	4,5	5,9	12,2	23,6	1,4	9,3	18	1,5	

Podzol ocrique = Sol ocre podzolique sous lande à camarine, altitude 1730 m, Puy Ferrand *** extraction oxalate

Horizons	Profond.	Granulométrie en % de mat. sil.						Mat. org.	C	N	C/N	pH	pH	Al éch.	Elts libres en ‰**			amorphes en ‰***		
RPF CPCS	en cm	Sg	Sf	Lg	Lf	A	%	%	%	%		H ₂ O	KCl	meq/100g	Fe	Al	Si	Fe	Al	Si
Ah A1	10-15						25,6	12,8	0,62	20,6	4,3	3,6	11,2	8,3	9,6	0,6	7,2	8,8	0,7	
BPh Bh	15-30	34,2	20,2	25,3	15	5,3	14,2	7,1	0,37	19,2	4,7	4,2	5,6	10,5	19,7	0,9	8,9	23,4	1,7	
BPs Bs	30-40						5	2,5	0,16	15,6	4,8	4,3	5,3	9,5	18,5	0,8	8,6	21,3	1,5	
C C	40-60	51,1	18,5	14,7	10,1	2,6	2,6	1,3	0,09	14,4	5	4,6	1	8,7	7,1	0,7	5,8	7,2	1,2	

Podzo-réductisol stagnique = Stagnogley podzolique sous nardaaie de combe à neige, altitude 1720 m, Pan de la Grange

Horizons	Profond.	Granulométrie en % de mat. sil.						Mat. org.	C	N	C/N	pH	pH	Al éch.	Elts libres en ‰**			amorphes en ‰***		
RPF CPCS	en cm	Sg	Sf	Lg	Lf	A	%	%	%	%		H ₂ O	KCl	meq/100g	Fe	Al	Si	Fe	Al	Si
An A1	10-40						33,8	16,9	1,35	13	4,1	4	10,8	8,7	9,2	0	8,2	9,2	1,3	
BPh Bh	40-50						13,6	6,8	0,41	17	4,6	4,3	4,9	28,5	22,4	1,2	26,5	20,6	1,7	
BPG BgC	50-80						12,2	6,1	0,37	17	4,9	4,5	2,7	16,4	28,3	2,2	14,6	26,8	3,8	

Colluviosol mésosaturé humifère = Sol brun colluvial sous calamagrostidaie, altitude 1650 m, Val de Courre

Horizons	Profond.	Granulométrie en % de mat. sil.						Mat. org.	C	N	C/N	pH	pH	Al éch.	Elts libres en ‰**			amorphes en ‰***		
RPF CPCS	en cm	Sg	Sf	Lg	Lf	A	%	%	%	%		H ₂ O	KCl	meq/100g	Fe	Al	Si	Fe	Al	Si
Ah1 A11	0-25						19,2	9,6	0,8	12	5,1	4,1	1,5	11,6	5,8	1,7	7,8	6,2	0,4	
Ah2 A12	25-50	17,5	21,9	21	22	17,8	9,6	4,8	0,45	10,7	4,7	4,2	2,9	12,9	8,1	1	9	8,1	0,6	
S (B)C	50-75	18,9	24,1	27,7	21,6	7,7	4,4	2,2	0,21	10,5	5,2	4,4	2	13,7	9,5	1,5	9,4	9,5	1,4	

MATERIEL ET METHODE

Les données recueillies pour la réalisation du document sont constituées de 3 ensembles distincts :

- plus de 1 600 relevés sigmatistes répartis sur la dition, assortis des variables stationnelles correspondantes,

- 40 prélèvements pédologiques (12 pour les milieux forestiers et 14 pour les milieux herbacés/ligneux bas de l'étage montagnard, 5 pour les altitudes supérieures à 1 450 m),

- 41 enquêtes agronomiques réalisées auprès d'exploitants individuels et de coopératives.

Les traitements numériques, Analyse Factorielle des Correspondances (AFC), Classifications Hiérarchiques Ascendantes (CHA), ont permis d'analyser les données grâce aux logiciels BIOMECO, BIOPHYTO, ANAPHYTO et ADDAD (1) sur des machines de type PC/AT ainsi que DIGITAL/VAX 6000 (2). Les analyses pédologiques ont été confiées au Laboratoire d'Analyse des sols de l'INRA (Arras) pour ce qui concerne l'étage sylvatique et par les laboratoires de Biologie alpine (Grenoble) et de Dynamique des Ecosystèmes d'Altitude (Chambéry) pour les altitudes supérieures. Les enquêtes agronomiques ont été réalisées par les soins du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne.

Pour l'étage sylvatique, les variables analysées sont les suivantes :

26 variables stationnelles et pédologiques : Pente (PE), indice thermique d'exposition (Ct), altitude (Alt), roche mère (RM), recouvrement ligneux bas (RLb), profondeur de sol (Sol), % cailloux dans le profil : <5cm (PC) et >5cm (GC), humidité 105° (HU), pH, sables totaux (ST), limons totaux (LT), argiles (AR), carbone organique (Cor), azote total (NT), C/N, K+, Ca++, Mg++, Na+, somme des bases échangeables (S), capacité d'échange cationique (T), S/T, aluminium échangeable (Ale), aluminium libre/total (Al), fer libre/total (Fe).

Variables agronomiques : les enquêtes agronomiques ont été réalisées auprès des agriculteurs exploitant 5 sites sélectionnés. Un pre-

mier dépouillement des questionnaires nous a conduit à retenir 20 variables décrivant la parcelle, l'exploitation, le mode de gestion de l'estive et les projets de l'agriculteur (GUEUGNOT *et al.*, 1993).

Nous disposons des données phyto-écologiques et des données agronomiques pour 32 individus, nous avons alors retenu 15 variables agronomiques les plus pertinentes : nature du contrat, superficie et cloisonnement de la parcelle, état des bâtiments, accessibilité, distance à l'exploitation, type de production, durée et chargement de l'estive, type d'animaux estivés - vaches et/ou chevaux -, mode de conduite du pâturage, traitement des refus, fertilisation et amendement, épandage de fumier, auxquelles nous avons rajouté les dates de défrichage et d'abandon éventuels.

Afin d'évaluer l'impact des pratiques agronomiques sur la végétation, nous les avons croisées avec les variables suivantes : groupement floristique de la parcelle, % de recouvrement ligneux bas, succession du groupement, altitude, exposition, valeur pastorale du groupement - méthode de DELPECH- et classe d'agriculteur établie à partir de la typologie agronomique.

Les analyses ont été réalisées suivant deux niveaux (COQUILLARD *et al.*, 1989) :

- une analyse globale portant sur l'ensemble des relevés phytosociologiques (plus de 700), suivie d'analyses partielles (AFC et CAH), a constitué la phase d'identification des groupements et successions végétales en présence,
- des analyses écologiques (AFC) ont été effectuées à partir de deux tableaux de contingence :

1. une matrice floristique X variables de l'environnement, dont les principaux résultats ont été l'obtention d'indicateurs biologiques d'une part et la mise en évidence des principaux facteurs qui régissent l'écologie des groupements d'autre part. Les groupements forestiers et herbacés-ligneux bas ont été traités séparément,

2. une matrice variables agronomiques X variables stationnelles a permis d'évaluer l'impact de l'agronomie sur le déterminisme des groupements ainsi que la répartition des caractéristiques d'exploitation dans l'espace écologique.

(1) BIOMECO : Groupe de Biométrie CEPE/CNRS, Montpellier ; BIOPHYTO : Laboratoire d'Ecologie Végétale et Cellulaire, Clermont-Ferrand ; ANAPHYTO : Laboratoire de systématique et Ecologie Végétale, Orsay ; ADDAD : groupe ADDAD, Paris.

(2) Centre Inter-universitaire de Calcul de Clermont-Ferrand (Directeur : D.Pays).

ETAGE MONTAGNARD SYLVATIQUE (Inférieur à 1 450 m) (P. COQUILLARD, J. GUEUGNOT)

ETUDE ECOLOGIQUE

Nous n'explicitons ici, faute de place, que les deux premiers axes de chacune des analyses.

Les milieux forestiers

L'analyse des milieux forestiers repose sur une AFC (figure 4 A et B) d'un tableau de contingence de 73 modalités (26 variables) X 48 espèces, les 12 stations étudiées sont réparties sur l'ensemble du massif à des altitudes variables. Cette analyse fait apparaître les résultats suivants :

Le premier axe oppose les modalités propres aux sols de type ranker ocre à ocre podzolique (ensemble I), développés sur roches massives acides (RM4, trachytes, rhyolites...), aux sols andiques colluviaux en situation de pente (PE3) (ensemble III). En partie gauche, la matière organique et le C/N sont élevés (C/N2, NT3) ainsi que l'aluminium échangeable (Ale3). Le taux d'argile (AR3) est important, à mettre en relation avec la fraction organique (confondus sur matériaux volcaniques (BAIZE, 1988)). A l'opposé (partie droite de l'axe) la matière organique est faible (Cor1, NT1) et le C/N est bas (C/N1), la minéralisation est donc meilleure. Ces sols se caractérisent par un faible taux d'aluminium (Ale1, Al1). Il s'agit de sols filtrants (PC3, PC2, ST3), colluvionnés, de type intergrade.

Sur la partie négative de cet axe factoriel, les espèces sont des acido-oligotrophes, indifférentes à l'aluminium : *Dryopteris dilatata*, *Oxalis acetosella*, *Abies alba*, *Luzula sylvatica*, *Vaccinium myrtillus*... Sur la partie positive, il s'agit d'espèces méso à eutrophes sensibles à l'aluminium : *Epilobium duriaei*, *Lamiastrum galeobdolon s.l.*, *Scilla lilio-hyacinthus*, *Phyteuma spicatum* etc.

L'axe 2 oppose les andosols s.s. et les sols colluviaux de bas-fonds (ensemble IV) aux sols podzoliques et podzols hydromorphes (ensemble II). Les sols (partie positive) sont profonds (Sol3), de CEC (CEC2) et minéralisation (C/N2) moyennes. S'opposent sur la partie négative des sols peu profonds (Sol1), désaturés, où le rapport fer libre/fer total est élevé (Fe3) confirmant l'hydromorphie observable sur le terrain (BAIZE, 1988). Ces conditions d'exposition sont froides (Ct1). *Luzula nivea*, *Deschampsia flexuosa*, et à

moindre titre, *Galium saxatile*, *Galeopsis tetrahit*, *Digitalis purpurea*, sont électives de ces sols acides. *Melica uniflora*, *Euphorbia amygdaloides*, *Geranium robertianum*, *Ribes petraeum*, *Paris quadrifolia*, *Cardamine heptaphylla* et *Stellaria nemorum s.l.*, apparaissent comme neutroclines, eutrophes et aluminotolérantes.

Une hiérarchisation des variables par leurs contributions aux 6 premiers axes (COQUILLARD, 1991, 1993) en figure 5, fait apparaître le faible rôle joué par le type de roche mère et l'importance des variables de texture (LT, GC, ST, AR, PC), de pente, d'exposition (Ct), de profondeur de sol (Sol) et d'humidité 105° (HU).

Par ailleurs, parmi les variables les plus importantes se trouvent l'aluminium échangeable (Ale) et le fer caractérisant l'hydromorphie (Fe). Cette dernière n'est cependant pas un facteur essentiel dans la répartition car elle ne s'observe que sur de faibles surfaces (partie ouest surtout). On remarquera aussi que les variables concernant la matière organique : azote total (NT) et carbone organique (Cor), interviennent secondairement, la minéralisation joue ici un rôle très faible.

On notera enfin que l'effet de l'exposition (Ct) est déterminant par rapport à l'altitude (Alt).

Les landes et les pâtures

75 modalités (26 variables) X 82 espèces constituent la matrice d'AFC (figure 6 A et B). 14 stations représentant des milieux herbacés purs et des landes à recouvrement ligneux très différents ont fait l'objet des prélèvements.

Sur la partie négative du premier axe (ensemble I), ont fortement contribué des modalités caractérisant des sols relativement profonds (Sol2), limoneux (LT3), établis en basse altitude (Alt1), sur roche mère basique (RM1, hawaïtes, basaltes). Les pH sont élevés (pH2), les taux d'argile (AR2) et d'aluminium échangeable (Ale1) sont faibles. Enfin, la somme des bases échangeables est importante (S3). Il s'agit d'andosols profonds, en situation planitaire (PE1), caractérisés par l'eutrophie. Les espèces liées à ce type de milieux sont *Lotus corniculatus*, *Plantago lanceolata*, *Brachypodium pinnatum*, *Veronica chamaedrys*, *Helictotrichon pubescens*, *Poa pratensis*, *Lathyrus pratensis*, *Cytisus scoparius*.

Sur la partie positive (ensemble III), c'est l'oligotrophie des sols qui est objectivée : ils sont peu profonds (Sol1), pentus (PE3), établis

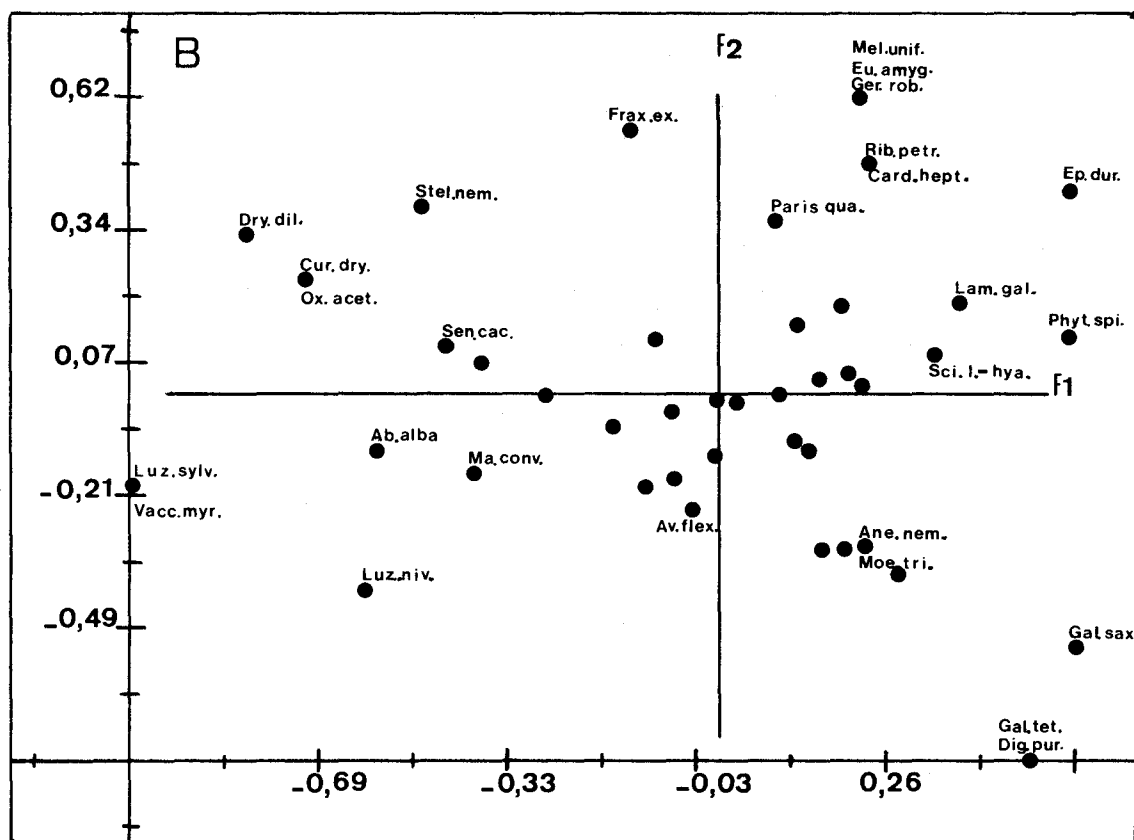
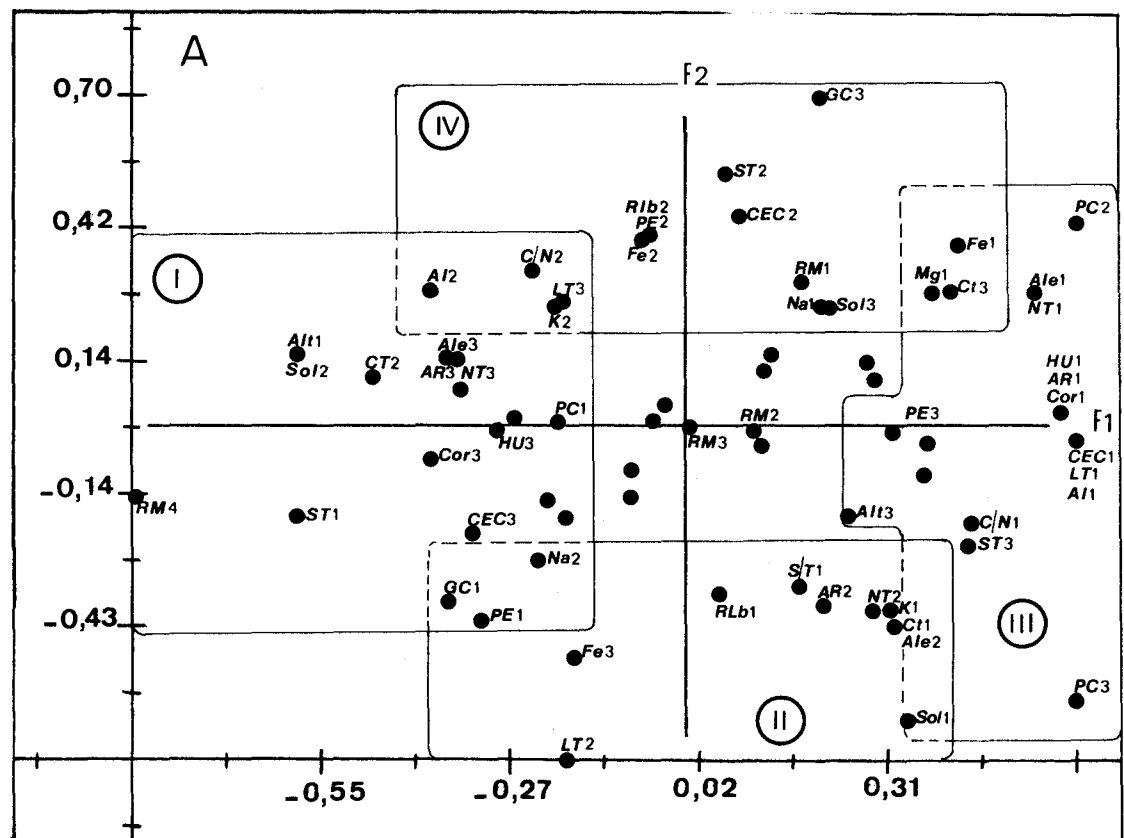


Figure 4.- Analyse écologique des forêts (plan factoriel 1-2). Seules les variables de forte contribution ($\geq$ moyenne) sont indiquées. A. Projection des modalités. B. Projection des espèces.

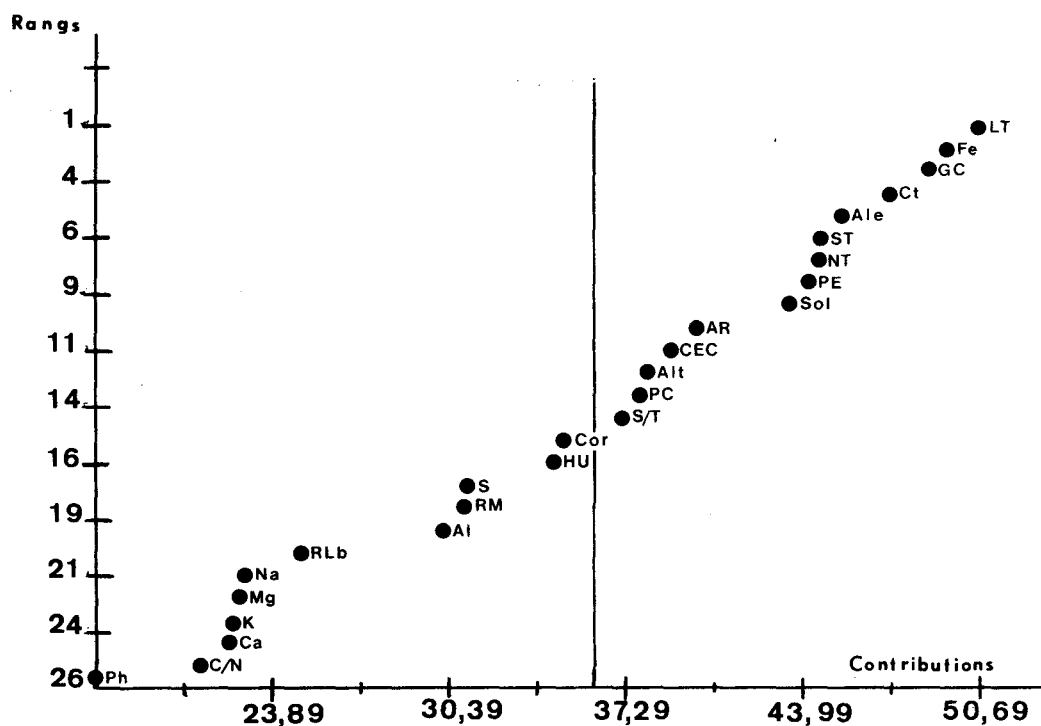


Figure 5.- Analyse écologique des forêts, hiérarchisation des variables par leurs contributions aux 6 premiers axes de l'AFC. Le trait vertical indique la moyenne des contributions.

sur roche mère acide (RM4, rankers cryptopodzoliques). On y remarque les taux élevés d'aluminium échangeable (Ale3), de carbone organique (Cor3) et d'argiles (AR3) et les valeurs moyennes des modalités relatives aux bases échangeables (S2, S/T2). Les espèces corrélées avec ces variables peuvent être qualifiées d'oligotrophes acidophiles et de tolérantes à indifférentes vis-à-vis de l'aluminium. On notera la présence des espèces édifiatrices des landes : *Cytisus purgans*, *Genista pilosa*, *Calluna vulgaris*, *Vaccinium myrtillus*, *V. uliginosum*, ainsi que *Teucrium scorodonia*, *Arnica montana*, *Polygonum bistorta*, *Solidago virgaurea*, *Veronica officinalis*, *Galium saxatile*, *Carex pilulifera*.

L'axe 2 sépare les sols des situations intermédiaires (mésotrophes) ; sur la partie négative (ensemble II), les modalités caractérisent les conditions mésophiles des sols établis sur roches basiques (RM1) ayant une bonne capacité de rétention, peu drainants, à taux de matière organique élevé (HU3, Cor3, NT3). L'aluminium échangeable y est très présent (Ale3). Les expositions sont chaudes (Ct3). Les sols qui s'y développent sont de type andique (ocres et bruns andiques). Les espèces électives de ces conditions sont mésophiles, alumino-indifférentes : *Cerastium fontanum*, *Danthonia decumbens*,

Rumex acetosella, *Luzula vulgaris*, *Potentilla aurea*, *Festuca lemanii*, *Leontodon pyrenaicus*.

Sur la partie positive (ensemble IV), sont regroupés des rankers ou des podzols, établis sur roches acides (RM3, RM4), rajeunis par l'érosion, en situation de pente (PE3), sableux (ST3), caillouteux (PC3), drainants, peu chargés en matières organiques (Cor1) et à faible CEC (CEC1). Le taux d'aluminium échangeable est moyen (Ale2). Les espèces sont de type méso-xérophiles, alumino-sensibles à alumino-tolérantes : *Omalotheca sylvatica*, *Digitalis purpurea*, *Rubus idaeus*, *Holcus mollis*, *Rumex acetosa*, ainsi que *Cytisus purgans* et *Teucrium scorodonia*.

La figure 7 (hiérarchisation des variables par leurs contributions aux 6 premiers axes) montre qu'en milieu herbacé-ligneux bas, la roche mère, ainsi que l'on devait s'y attendre, joue un rôle primordial, elle détermine directement le type de sol et les espèces qui s'y établissent. Le degré de recouvrement par les ligneux est très fortement corrélé à cette variable ainsi qu'aux caractères généraux du sol que sont la profondeur et le pourcentage de cailloux dans les profils (au moins sur les premiers axes...). Là encore la toxicité aluminique apparaît comme une variable de première importance. Les bases

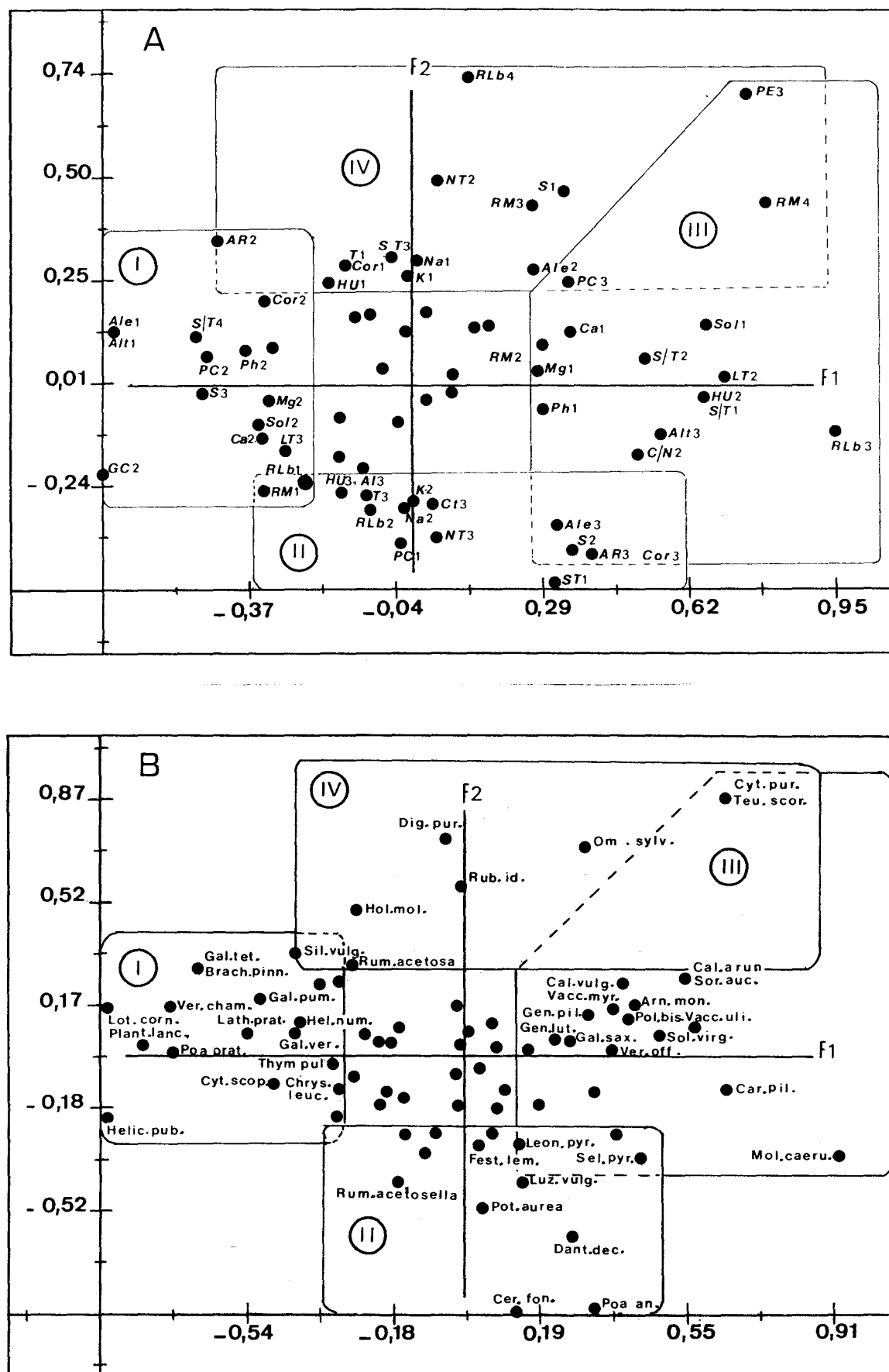


Figure 6.- Analyse écologique des landes et pâtures (in GUEUGNOT *et al.*, 1993), plan factoriel 1-2. Seules les variables de forte contribution ($\geq$ moyenne) sont indiquées. A. Projection des modalités. B. Projection des espèces.

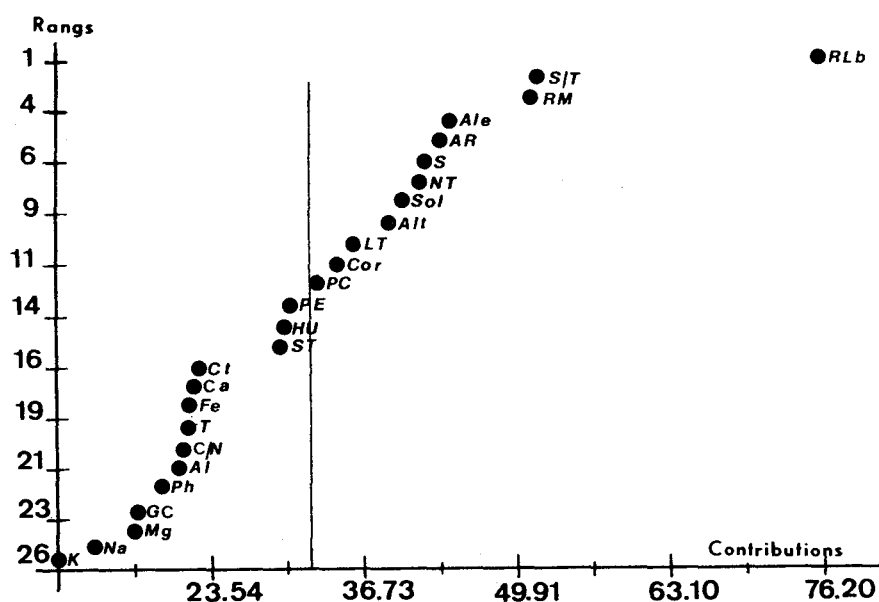


Figure 7.- Analyse écologique des landes et pâtures, hiérarchisation des variables par leurs contributions aux 6 premiers axes de l'AFC. Le trait vertical indique la moyenne des contributions.

échangeables (S/T et S) ainsi que la fraction organique (Cor et NT) constituent des variables déterminantes. Le climat s'exprime ici plus par l'altitude que par l'exposition, ce qui s'explique sans doute par l'impact de l'altitude sur les processus pédogénétiques et l'érosion/rajeunissement des sols. La pente et l'indice thermique d'exposition sont relégués à des rangs inférieurs.

Conclusion

L'étude des facteurs de l'environnement fait apparaître que d'une manière générale, les variables telles que les bases échangeables (prises individuellement), le pH, l'aluminium total, le taux de minéralisation (C/N), n'ont joué qu'un rôle de second rang dans l'analyse. Les autres variables montrent soit des constances dans leurs contributions (Ale par exemple) soit des fluctuations importantes (CEC, CT, S, etc.). La fraction organique (NT, Cor) joue un rôle intermédiaire.

En milieu forestier, les conditions morpho-stationnelles (pente et drainage) sont prépondérantes sur le type de matériau en place et notamment dans les cas de matériaux intermédiaires. Cette prépondérance s'atténue, voire disparaît, lorsque les matériaux en jeu sont proches des extrêmes d'acidité/basicité. C'est là un résultat significatif et très explicite de la réalité terrain. C'est ainsi que sur la même roche, en condition

de talweg ou d'interfluve par exemple, on peut constater la présence conjointe de groupements distincts. Ce qui se traduit au plan de la répartition, et par conséquent de la cartographie, par des intrications étroites de groupements eutrophes et mésotrophes, voire oligotrophes. L'état de division même du matériau, et par là son potentiel d'altérabilité, influe directement dans le même sens sur l'écologie stationnelle.

Le climat, dans sa composante stationnelle (indice thermique d'exposition) possède une part importante dans la logique de distribution des espèces. L'altitude montre une faiblesse relative dans l'analyse des formations sylvatiques. La toxicité aluminique, en relation directe avec les conditions stationnelles de pédogénèse, compte parmi les facteurs primordiaux.

En milieu herbacé-ligneux bas, la roche mère et la toxicité aluminique sont des facteurs majeurs, fortement corrélés avec le recouvrement ligneux. Les taux de saturation et la somme des bases échangeables ainsi que la fraction organique arrivent en second rang. L'altitude prend ici toute son importance au détriment de l'exposition, déterminante en milieux forestiers.

L'extension des analyses aux 4 premiers axes (non publiés) permet d'établir les groupes indicateurs des figures 8 et 9.

ESPECES ALUMINO-SENSIBLES (TRES A MOYENNEMENT)		ESPECES ALUMINO-TOLERANTES		ESPECES ALUMINO-INDIFFERENTES	
Geranium robertianum Melica uniflora Euphorbia amygdaloides Ribes petraeum Cardamine heptaphylla Epilobium duriaei	I	Fraxinus excelsior Paris quadrifolia	II	Dryopteris dilatata Stellaria nemorum Gymnocarpium dryopteris Oxalis acetosella Senecio cacaliaster	IV
Phyteuma spicatum Lamium galeobdolon Scilla lilio-hyacinthus	III	Viola reichenbachiana Galium odoratum Solidago virgaurea	III	Maianthemum convallaria Luzula nivea Luzula sylvatica Vaccinium myrtillus	V
Galium saxatile Galeopsis tetrahit Digitalis purpurea	V	Hieracium murorum Deschampsia flexuosa Anemone nemorosa Veronica officinalis Poa chaixii Ajuga reptans	V	Dryopteris carthusiana Abies alba	VI
C/N ≤ 4.5 Argiles ≤ 11.8 % Al échange. ≤ 1.3 méq/100g.		Athyrium filix-femina Doronicum austriacum Sambucus racemosa Sorbus aucuparia	VI	5.9 < C/N ≤ 10.9 % 16.2 % < Argiles ≤ 31 % 2.7 < Al échange. ≤ 5.2 méq/ 100g	
		4.5 < C/N ≤ 5.9 % 11.8 % < Argiles ≤ 16.2 % 1.3 < Al échange. ≤ 2.7 méq/ 100g			
I : Espèces eutrophes II : Espèces méso à eutrophes III: Espèces mésotrophes					
IV : Espèces méso à oligotrophes V : Espèces oligotrophes VI : Espèces de large amplitude trophique					
ESPECES THERMOPHILES			ESPECES MESOPHILES		
Hieracium murorum Solidago virgaurea Poa nemoralis Doronicum austriacum Deschampsia flexuosa Calamagrostis arundinacea Luzula nivea Phyteuma spicatum			Miliun effusum Ajuga reptans Veronica officinalis Poa chaixii Anemone nemorosa Acer platanoides Moehringia trinervia Polygonatum verticillatum Stellaria nemorum		

Figure 8.- Groupes d'espèces indicatrices de conditions écologiques en milieux forestiers

REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE

Le type de représentation retenu pour l'étage sylvaire repose sur les aspects dynamiques et syntaxonomiques de la végétation. Nous avons donc représenté les successions en présence en individualisant, autant que faire se peut, chacun des groupements qui les composent.

La description des groupements n'étant pas l'objet du présent article, nous ne développerons pas ou très peu d'argutie syntaxonomique, cet

aspect devant être traité dans des communications ultérieures. Toutefois, à chaque fois que cela est possible, nous indiquons le groupement ou le niveau syntaxonomique auquel nous pensons raisonnablement pouvoir rattacher les individus décrits.

Enfin, diverses indications afférentes à la structure des groupements notamment dans les landes, ainsi que les faciès forestiers font, lorsqu'ils ont pu être notés, l'objet de figurés particuliers.

ESPECES EUTROPHES,
ALUMINO-SENSIBLES,
NEUTROCLINES DE BASSES
ALTITUDES

Silene vulgaris Brachypodium pinnatum Galeopsis tetrahit Galium pumilum Veronica chamaedrys	I
Helianthem. nummularium Galium verum Lotus corniculatus Plantago lanceolata Poa pratensis Centaurea nigra	II
Thymus pulegioides Leucanthemum vulgare Cytisus scoparius Avenula pubescens	III

I : Espèces méso-xérophiles

II : Espèces intermédiaires

III : Espèces mésophiles

$5 < \text{pH} \leq 5,4$

$133 < \text{Argiles} \leq 195 \text{ g/kg}$

$\text{Al. éch.} \leq 2,95 \text{ méq/100g}$

$1,15 < \text{S. des b. éch.} \leq 2,95 \text{ méq/100g}$

$66 < \text{C. org.} \leq 118,7 \text{ g/Kg}$

ESPECES MESOTROPHES MESO-
ACIDOPHILES

Digitalis purpurea Omalotheca sylvatica Rubus idaeus Holcus mollis Rumex acetosa	I
Poa chaixii Hypericum maculatum Rhinanthus minor Nardus stricta Festuca nigrescens	II
Jasione perennis Serratula tinctoria Anthoxanthum odoratum Leontodon pyrenaicus Festuca lemanii Stachys officinalis Luzula vulgaris Rumex acetosella Potentilla aurea Danthonia decumbens Cerastium fontanum Poa annua	III

I : Espèces méso-xérophiles,
alumino-sensibles à tolé-
rantes.

II : Espèces mésophiles
alumino-tolérantes

III : Espèces mésophiles
alumino-indifférentes

ESPECES OLIGOTROPHES
ALUMINO-TOLERANTES A IN-
DIFFERENTES, ACIDOPHILES,
D'ALTITUDE

Teucrium scorodonia Cytisus purgans Calamagrostis arundinacea Sorbus aucuparia Calluna vulgaris Vaccinium myrtillus Arnica montana Polygonum bistorta Vaccinium uliginosum Genista pilosa Galium saxatile Solidago virgaurea Luzula multiflora Veronica officinalis Gentiana lutea Carex pilulifera Molinia caerulea Selinum pyrenaicum
--

$\text{pH} \leq 5$

$195 < \text{Argiles} \leq 353 \text{ g/kg}$

$3,6 < \text{Al. éch.} \leq 14 \text{ méq/100g}$

$0,64 < \text{S. des b. éch.} \leq 1,15 \text{ méq/100g}$

$119 < \text{C. org.} \leq 199 \text{ g/Kg}$

ESPECES SENSIBLES A LA
FERMETURE LIGNEUSE INDI-
CATRICES DE PATURAGE
EQUILIBRE

Anemone nemorosa Campanula recta Hieracium pilosella Omalotheca sylvatica Thesium alpinum Arnica montana Veronica officinalis Chamaespartium sagittale Centaurea nigra Stellaria graminea Thymus pulegioides
--

*en altitude
et stations
mésophiles*

ESPECES INDICATRICES DE
SOUS-PATURAGE ET DE DY-
NAMIQUE DE FERMETURE

Potentilla erecta Meum athamanticum Gentiana lutea Vaccinium uliginosum Festuca nigrescens Rubus idaeus Solidago virgaurea Potentilla aurea Calamagrostis arundinacea Sorbus aucuparia

*autres
situations*

Veronica chamaedrys Galeopsis tetrahit Avenula pubescens Brachypodium pinnatum Rumex acetosa Campanula rotundifolia
--

Figure 9.- Groupes d'espèces indicatrices de conditions écologiques en milieux non forestiers (landes, fourrés et pâtures)

Les milieux forestiers

L'analyse factorielle des 399 relevés forestiers montre que cet ensemble se scinde de la manière suivante :

- les forêts mésotrophes à eutrophes : hêtraies pures, parfois infiltrées de sapins,
- les milieux hygroclines : suintements forestiers et dynamiques forestières sur mégaphorbiaies,
- les forêts mésotrophes à oligotrophes : hêtraies pures et hêtraies sapinières,
- un petit groupe d'individus appartenant à des hêtraies de basse altitude : hêtraies thermophiles,
- quelques individus issus de chênaies-hêtraies localement infiltrées de *Pinus sylvestris*,
- un lot de pinèdes.

Les affinités floristiques et écologiques entre certains de ces groupements nous conduisent à considérer les 4 ensembles que sont les hêtraies méso à eutrophes relevant de l'*Asperulo-Fagenion*, les hêtraies et hêtraies-sapinières méso-oligotrophes du *Luzulo-Fagenion* Lhom et Tüxen 1959, les chênaies-hêtraies du *Quercion robori-petraeae* (Malcuit 1929) Br-BI. 1931 et le groupement transitoire des pinèdes.

Les hêtraies mésotrophes à eutrophes

Elles sont largement représentées dans l'ensemble du massif, des altitudes moyennes (1 150 m au Bois de Domais, voire 1 000 m en exposition froide : route de La Bourboule au Mont-Dore) à 1 400 m et localement 1 450 m (Val de la Fontaine salée, cirque de Chaudefour).

Il s'agit de hêtraies à scille lys-jacinthe dont les espèces les plus électives sont les suivantes : *Polygonatum multiflorum*, *Carex sylvatica*, *Mycelis muralis*, *Pulmonaria affinis*, *Actaea spicata*, *Stellaria nemorum* s.l., *Scilla lilio-hyacinthus*, *Lamiasium galeobdolon* s.l., *Milium effusum*, *Galium odoratum*. La scille, bien qu'exclusive ou presque de ce groupement, présente dans un grand nombre d'individus une fréquence faible voire nulle. *Abies alba* peut infiltrer et même dominer ces groupements, y compris les plus eutrophes, dans la partie ouest de la zone étudiée (Cascades de la Vernière et du Plat à barbe).

L'optimum de développement de ces hêtraies se réalise sur substratum «pauvre en silice» (basaltes s.l., hawaïtes et matériaux volcano-sédimentaires). Elles affectionnent les sols profonds de type andique (andosols et sols intergrades) de bonne capacité de rétention.

L'humus y est de type mull-modér. Les pH sont toujours inférieurs à 5. Les pentes varient de quelques degrés à 35° et plus. Nous distinguons les 3 groupements suivants :

1. La hêtraie à scille lys-jacinthe (*Scillo-Fagetum* Lemée 1956 nom inv.)

La hêtraie à scille lys-jacinthe du Massif Central est traditionnellement rattachée à l'alliance du *Scillo-Fagenion* Oberd 1957 (CUSSET, 1964). Toutefois, ainsi que l'indique F. BILLY (1988), «il semble imprudent d'allonger davantage la liste des caractéristiques» au delà de la scille et de *Euphorbia hyberna*. Par ailleurs, considérant que cette dernière n'apparaît pas comme strictement forestière car présentant son optimum de développement dans les groupements lisiérés des landes à Ericacées aux alentours de 1 400 m, et qu'elle offre une forte fréquence dans tous les groupements des forêts méso-oligotrophes (exception faite des hêtraies sapinières dont elle est chassée par la compétition photique), il nous paraît fondé de considérer la hêtraie à scille lys-jacinthe comme une avancée atlantique de l'*Asperulo-Fagenion* dont toutes les caractéristiques sont présentes ici.

L'analyse écologique et la prospection montrent qu'elle se développe au mieux dans des stations caractérisées par des sols bien drainés, en situations colluviales de moyennes à fortes pentes (12° à 38°). La présence d'espèces alumino-sensibles à indifférentes (figure 8) indique que ce groupement réagit moyennement à cet élément. Il s'agit de futaies hautes (8 à 12 m), le recouvrement ligneux bas est faible à nul de même que le recouvrement herbacé qui présente la particularité de s'étendre en plages discontinues laissant nues de vastes surfaces de litière.

Ce type de forêt présente 2 faciès principaux :

- le faciès à *Stellaria nemorum* et *Scilla lilio-hyacinthus* (Bois de Domais, Val de Chaudefour...), occupe des pentes douces, accompagné exceptionnellement par *Lysimachia nemorum*. C'est un faciès peu répandu qui constitue l'aile méso-hygrophile du groupement.

- le faciès à scille lys-jacinthe (Val de Chaudefour) où cette espèce prend une extension remarquable. Les sols toujours de type colluviaux, bien drainés, en pente forte (jusqu'à 35°) présentent des profils à forts pourcentages de cailloux.

La fougère femelle (*Athyrium filix-femina*), bien que répandue dans tous types de hêtraies de la région, montre très localement une plus forte extension, souvent accompagnée de la fougère mâle (*Dryopteris filix-mas*). Ce développement de fougères s'observe le plus fréquemment en limite supérieure du groupement, à la faveur de l'ouverture de la couverture arborée et de l'enrochement des sols de très fortes pentes (Bois de Domais, Bois de la Biche, Val de Chaudefour, Lac Pavin).

L'utilisation ancienne a laissé de nombreuses traces dans ces forêts qui font encore actuellement l'objet d'une exploitation importante (Bois de Domais), voire d'une éradication par substitution de conifères (secteur de la Banne d'Ordanche, Montagne de Chambourguet).

2. La hêtraie à scille lys-jacinthe eutrophe

Outre la liste d'espèces caractéristiques des hêtraies à scille, un lot important d'espèces vient enrichir ce groupement : *Hordelymus europaeus*, *Urtica dioica*, *Bromus racemosus*, *Mercurialis perennis*, *Acer platanoides*, *Euphorbia amygdaloides*, *Melica uniflora*, *Ribes petraeum*, *R. alpinum*, *Geranium robertianum*, *Cardamine heptaphylla*, les deux dernières représentant leur plus forte constance dans ces forêts.

Largement répandu (Bois de Domais, Bois de la Masse, Route de la Bourboule au Mont-Dore, Roc du Sanglier, Bois de Pierre Fourchade, Bois des Tailladis...), ce groupement affectionne les bas-fonds, zones d'accumulation de bas de pente et zones planitaires au sol profond et frais (andosols). La présence, parmi les espèces ci-dessus, d'un lot d'alumino-sensibles (figure 8) montre qu'un faible taux d'aluminium échangeable caractérise ce milieu. Le lien étroit entre la morphologie stationnelle et ce groupement fait qu'on le trouve préférentiellement aux altitudes inférieures des hêtraies à scille. Le recouvrement arbustif y prend un développement accusé en raison de l'affinité de *Ribes petraeum* pour ces conditions écologiques. La couverture herbacée est toujours étendue (de 25 % à 80 %).

On y dénombre 2 faciès, l'un à *Stellaria nemorum* en milieu méso-hygrophile, l'autre à scille lys-jacinthe dans les situations intermédiaires de colluvionnement (cette dernière requérant, ainsi qu'il a déjà été exposé, des conditions de drainage suffisantes).

Ce groupement est en réalité composé de 3 sous-ensembles soit les 2 suivants en outre du groupement type :

- les suintements sous-forestiers, groupement de type fontinal déjà décrit par BOCK et PRELLI (1975) dans le Val de Chaudefour. Un lot important d'espèces le caractérise, *Saxifraga stellaris* subsp. *alpigena*, *Rumex alpinus*, *Anthriscus sylvestris*, *Impatiens noli-tangere*, *Chrysosplenium oppositifolium*, *Ranunculus repens*, *Veronica montana*. Ce groupement, très local, est peu répandu, mais il est probable que la représentation cartographique l'ait sous-estimé. Du lot des espèces des hêtraies eutrophes s.l. ne subsistent que *Geranium robertianum* et *Cardamine heptaphylla*.

- les hêtraies eutrophes thermophiles. Ce groupement, également peu répandu, se localise en basse altitude (Bois de la Masse, Bois de Pierre Fourchade) et/ou exposition chaude. Le tapis herbacé, toujours important, s'enrichit des espèces différentielles suivantes : *Hordelymus europaeus*, *Bromus racemosus*, *Mercurialis perennis*, *Euphorbia amygdaloides*, *Melica uniflora*, cette dernière constitue un excellent indicateur en raison de son électivité presque exclusive pour ce type de hêtraies.

3. Les hêtraies sur mégaphorbiaies

Ce groupement, peu fréquent, se développe à la faveur de résurgences intraforestières (Val de la Fontaine Salée, Fontaine de Montadoux) et très localement par la pénétration de mégaphorbiaies suprasylvatiques sous le couvert arboré, le long des talweg, (Val de Chaudefour) (BOCK et PRELLI, 1975). Il semble pouvoir être rattaché au précédent, la quasi totalité des espèces de la hêtraie à scille type étant réunies ici. Il se singularise cependant par l'apparition de différentielles hygroclines largement présentes dans les groupements de lisières et les mégaphorbiaies qui en fait un proche parent de l'*Aceri-Fagetum* Bartsh 1940 du Forez (THEBAUD, 1988) et des hêtraies sommitales vosgiennes (CARBIENER, 1969 ; RAMEAU, com. verb.) : *Cicerbita alpina*, *C. plumieri*, *Angelica sylvestris*, *Ranunculus aconitifolius*, *Rumex arifolius*, *Epilobium duriaei*, *Lysimachia nemorum*, on note également la disparition de *Scilla lilio-hyacinthus*, *Mycelis muralis*, *Milium effusum*. Les Ptéridophytes y présentent une exubérance significative. Enfin, *Saxifraga rotundifolia* et *Geranium sylvaticum* transgressent à partir des lisières.

Les hêtraies et hêtraies sapinières méso-oligo-trophes

Le fond floristique de ces groupements est constitué d'un lot de grande constance d'espèces du *Luzulo-Fagenion* : *Blechnum spicant*,

Galium saxatile, *Carex caryophylla*, *Luzula sylvatica*, *L. nivea*, *Hieracium* gr. *murorum*, *Vaccinium myrtillus*, *Deschampsia flexuosa*. Le tapis herbacé est caractérisé par un grand nombre d'espèces alumino-tolérantes à indifférentes, oligotrophes et souvent thermo-héliophiles.

Les roches les plus acides (trachytes, rhyolites, ponces fibreuses et projections trachytiques) sont le substrat d'élection de ces forêts ; toutefois, le modelé stationnel joue à nouveau un rôle primordial.

Sur laves intermédiaires, les faibles épaisseurs de sols et les processus pédogénétiques (rankers, cryptopodzols s.l.) favorisent le développement de ces groupements au détriment des hêtraies précédentes de type méso à eutrophes reléguées alors aux stations de mi à bas de pente et talweg.

Lorsqu'elles occupent les stations sommitales, ces forêts présentent localement une couverture arborée qui tend à s'éclaircir, aux troncs tortueux et peu élevés (6 à 8 m), favorisant la pénétration d'espèces héliophiles. Dans la partie ouest, elles s'infilrent localement de sapin qui peut alors concurrencer le hêtre jusqu'à 30 à 40 % de l'occupation de l'espace. La couverture herbacée est en général importante (60 à 80 %). Les Chamaephytes ne sont représentés ici presque exclusivement que par *Vaccinium myrtillus*.

L'analyse a permis de cartographier 3 groupements

1. La hêtraie à canche et myrtille (*Deschampsio-Fagetum* Lemée 1959 nom inv.)

Le fond floristique commun aux hêtraies et hêtraies sapinières méso-oligotrophes constitue l'ensemble caractéristique de ces forêts qui occupent largement la surface de l'étude, dans toute l'ampleur de l'étage sylvestre. On peut cependant distinguer plusieurs faciès déterminés par les conditions stationnelles :

- en conditions méso-xérophiles de basse altitude ou de pente bien drainée et d'exposition chaude (groupe de la Banne d'Ordanche, rive gauche du Val de Chaudefour), ces forêts caractérisées par l'ouverture de la strate arborée présentent un tapis herbacé nettement dominé par la canche flexueuse mais enrichi d'un cortège non négligeable d'espèces thermo-héliophiles : *Galium saxatile*, *Carex pilulifera*, *Hieracium lachenalii*, *Teucrium scorodonia*, *Campanula recta*, *Calamagrostis arundinacea*, *Epilobium angustifolium*, *Lathyrus montanus*. *Luzula nivea* montre dans ces conditions son optimum de développement.

- en conditions mésophiles, la myrtille, toujours présente mais discrète dans le faciès précédent, prend une importance notable. C'est le cas dans les forêts d'ubac de basse altitude, stationnellement en transition avec les groupements plus eutrophes d'interfluves (Bois du Bac à Montaleix et très localement en rive gauche de Chaudefour).

- en altitude, sur sols enrochés et rajeunis (rankers s.l.), le tapis herbacé est dominé quasi exclusivement par *Luzula sylvatica* qui peut réaliser 60 % et plus du recouvrement, les espèces thermo-héliophiles étant alors en nette régression (lac Pavin, rives droite et gauche de Chaudefour). Ce groupement semble cantonné à la partie est du massif.

2. la hêtraie thermophile à canche et myrtille

Ce groupement, très peu représenté dans le massif même, s'étend sans doute plus largement au sud (région de Vaucoux). Il affectionne les altitudes inférieures à 1 000 m et les expositions favorables. Il se singularise par un lot de différentielles hélio-thermophiles : *Senecio nemorensis* subsp. *fuschii*, *Equisetum hyemale*, *Luzula forsteri*, *Campanula trachelium*, *Festuca heterophylla*, *Pteridium aquilinum*, *Epipactis helleborine*. Il se développe sur sols intergrades marqués par la brunification (sols ocreux s.l.). Corrélativement, des espèces plus mésophiles, *Blechnum spicant*, *Luzula sylvatica*, *Vaccinium myrtillus*, *Calamagrostis arundinacea* se raréfient voire disparaissent pour certaines d'entre elles.

3. Les hêtraies sapinières (*Abieti-Fagetum* Oberd. 1938)

Incontestablement, les hêtraies sapinières étudiées sont à rattacher aux hêtraies méso-oligotrophes. Toutefois, l'apparition, toujours fugace, dans le cortège floristique d'espèces telles que *Stellaria nemorum* s.l., *Lamium galeobdolon* s.l., *Oxalis acetosella*, *Doronicum austriacum* ainsi que *Sambucus racemosa* montre que nous sommes en présence de l'aile eutrophe et mésophile de celles-ci. *Orthilia secunda* n'est pas absente de ces milieux mais nous est apparue comme rare et marginale, se cantonnant aux lisières de ces formations.

Cette hêtraie sapinière s.s. n'occupe qu'une faible surface de notre étude, exclusivement à l'ouest (Bois de la Reine, Forêt de l'Haspara, flanc nord de la Montagne de Bozat, et en intrusions stationnelles avec les hêtraies à canche et myrtille ou les hêtraies eutrophes en rive gauche de la vallée de la Dordogne). C'est sur

ponces fibreuses qu'elle s'exprime le mieux, au Bois de la Reine et sous la Montagne de Bozat, en présence d'hydromorphie fréquente dans cette zone.

D'une manière générale, le sapin semble inféodé à la partie ouest du massif et plus précisément la partie centre-ouest de la zone. Sa présence attestée sans discontinuité depuis l'Atlantique (de BEAULIEU *et al.*, 1988) où il prend de concert avec le hêtre une grande extension, fait penser que sa répartition actuelle est conforme à l'hygrométrie atmosphérique et à la pluviométrie élevée du revers ouest du massif. Cependant, il n'est pas impossible, que sa répartition initiale ait été plus large, la régression générale des forêts ayant coïncidé avec le début des impacts anthropiques (QUEZEL et RIOUX, 1953 ; de BEAULIEU *et al.*, 1988), «les bois étant devenus fort rares en Auvergne» (VIGOUROUX) au XVII^e siècle. Son éradication de la partie est du massif par une action humaine majeure n'est donc pas une hypothèse pouvant être raisonnablement écartée.

Les espèces différentielles des hêtraies sapinières sont les suivantes : *Carex ovalis*, *Ilex aquifolium*, *Luzula pilosa*, *Rubus hirtus*, *Dryopteris carthusiana*, *Dryopteris dilatata*, *Abies alba*. Les deux premières espèces jouent toutefois un rôle modeste.

Festuca altissima prend localement une importance particulière soulignant le caractère plus eutrophe de certaines stations.

Le couvert forestier est dense (>80 %), le sapin y est majoritaire à très majoritaire et les espèces héliophiles en sont éliminées (*Hieracium lachenalii*, *Teucrium scorodonia*, *Campanula recta*, *Epilobium angustifolium*, *Lathyrus montanus*, *Calamagrostis arundinacea*) ainsi que les espèces transgressives des lisières et forêts plus ouvertes telles que *Euphorbia hyberna*, *Poa chaixii*, *Carex caryophylla*.

Ces formations font l'objet d'une exploitation intense, et parfois d'une substitution par l'épicéa.

Les chênaies-hêtraies

C'est un groupement cantonné à la partie orientale de la zone étudiée, en basse altitude, et plus particulièrement au substrat granitique (environs de Chambon sur Lac, rive gauche de la Couze de Chaudfour). Les expositions sont thermophiles et les pentes fortes. Les sols peuvent être profonds et sont toujours marqués par le processus de brunification (sols ocreux *s.l.* à bruns acides).

Le couvert arboré est constitué de *Quercus petraea* et de *Fagus sylvatica*, ce dernier étant minoritaire. Les arbustes sont représentés par *Corylus avellana*, *Sorbus aria*, *Cytisus scoparius*, *Lonicera periclymenum*, *Vaccinium myrtillus*, *Genista pilosa*. La couverture herbacée est peu abondante (10 à 30 %), *Hieracium gr. murorum*, *Teucrium scorodonia*, *Deschampsia flexuosa*, *Brachypodium pinnatum* et *Poa nemoralis* sont les plus constantes. *Solidago virgaurea*, *Prenanthes purpurea*, *Dianthus monspessulanus*, *Viola reichenbachiana* ne sont pas rares.

Ce groupement est comparable aux chênaies-hêtraies acidophiles appartenant au *Quercion robori-petraeae* décrites par BILLY (1988). *Fraxinus excelsior* (cantonné aux fortes pentes) et *Pinus sylvestris* sont abondants dans cette formation. Le pin sylvestre est ici en régression et témoigne du dynamisme de ce type de forêt sur les pinèdes de substitution (cf. ci-dessous) qui, à cette altitude, paraissent constituer le passage obligé de la dynamique forestière (COQUILLARD *et al.*, 1985 ; BILLY, 1988).

Les pinèdes de substitution

Ce groupement transitoire, établi sur basalte, couvre une surface assez importante à Leyrenoux entre 1 100 et 1 230 m. Il est, lui aussi, exclusif de la partie nord orientale de la dition. A l'heure actuelle, il s'étend au dépens de landes à *Cytisus scoparius* et ne semble pas avoir atteint son optimum de développement. De ce fait, il est encore très infiltré d'espèces des groupements arbustifs. Les espèces suivantes permettent cependant de le décrire, les arbustes sont surtout représentés par *Cytisus scoparius*, *Vaccinium myrtillus*, *Sorbus aucuparia* et *S. aria* ; *Lonicera periclymenum* est quelquefois présent. La strate herbacée est dominée par *Deschampsia flexuosa*, *Hieracium gr. murorum*, *Brachypodium pinnatum*, *Rubus idaeus* ; *Holcus mollis*, *Teucrium scorodonia*, *Galium saxatile*, *Silene nutans* sont fréquents mais peu abondants. Enfin, quelques espèces des *Prunetalia spinosae* Tüxen 1952, *Crataegus monogyna*, *Prunus spinosa*, *Rosa canina* et divers *Rubus*, figurent sous le couvert mais en faible abondance.

Les formations préforestières

Les groupements arbustifs/arborés de cicatrization forestière et de conquête sont, exception faite des franges supérieures, finalement rares. En effet, les zones forestières bordées par les pâtures et prairies n'ont que peu d'espace à conquérir. Par ailleurs, il n'est pas rare de constater que les pâtures pénètrent largement sous le couvert forestier, les animaux venant y chercher

de l'ombrage (Val de la Fontaine Salée par exemple). Si les zones de friches sont parfois vastes, leur faible connectivité avec les formations arborescentes bloque toute dynamique significative.

Leur lot commun d'espèces est un ensemble hétérogène d'espèces de lisières, mégaphorbiaies et relictuelles des landes : *Centaurea montana*, *Dactylis glomerata* subsp. *glomerata*, *Laserpitium latifolium*, *Veratrum album*, *Knautia arvernensis*, *Galium mollugo* subsp. *elatum*, *Potentilla erecta*, *Alchemilla xanthochlora*, *Linaria repens*, *Silene vulgaris* subsp. *vulgaris*, ainsi que *Saxifraga rotundifolia* et *Geranium sylvaticum*. *Cytisus scoparius* et *C. purgans* s'y joignent plus rarement. Le lys martagon montre de fortes affinités pour ces milieux.

Le couvert arboré est constitué essentiellement par *Sorbus aria*, *Betula pendula*, ainsi qu'en zone méso-hygrophile *B. pubescens* et *B. pubescens x pendula* (Val de Chaudefour). *Rubus idaeus*, *Sorbus aucuparia* et *Conopodium majus* présentent ici des fréquences plus élevées que dans les forêts terminales.

Trois groupements se distinguent aisément :

- en basse altitude (Puy de l'Angle, Roc de Sautet, rive gauche de la Couze Surains), l'essentiel du couvert arboré est constitué de *Corylus avellana* et en moindre importance de *Betula pendula* et *Sorbus aria*, en formation assez ouverte (60 % de recouvrement) et peu élevée (2 à 4 m). *Poa chaixii*, *Deschampsia flexuosa* surtout, auxquelles s'ajoutent *Holcus mollis* et *Polygonatum verticillatum* élaborent l'essentiel du tapis herbacé couvrant 60 % des stations. Les différentielles sont *Stachys officinalis*, *Clinopodium vulgare*, *Veronica chamaedrys*, *Cirsium erisithales*, *Geum urbanum*, *Fragaria vesca*, *Anthoxanthum odoratum*. Il convient de mentionner la fréquence de méso-hygrophiles telles que *Cicerbita plumieri*, *Angelica sylvestris*, *Rumex arifolius*.

- en altitude moyenne et situation méso-xérophile, nombre d'espèces proviennent des landes et des pâtures : *Arnica montana*, *Rumex acetosa*, *Achillea millefolium*, *Meum athamanticum*, *Centaurea montana*, *Astrantia major*, *Platanthera bifolia*, constituent le lot de différentielles. *Prunus padus* se développe localement (Val de Chaudefour) en milieu enroché. *Calamagrostis arundinacea* forme l'essentiel (jusqu'à 75 % et plus) du couvert herbacé accompagné de *Luzula sylvatica*. La strate arborée, peu fournie (70 %) et de hauteur faible (3 à 5 m) est dominée par *Sorbus aria*, *S. aucuparia*,

Betula pendula. Les arbustes sont représentés essentiellement par *Vaccinium myrtillus* ; *Rubus idaeus* est abondant. L'extension et la persistance du groupement semble actuellement mis en cause localement par le pâturage des équidés et des ovins en position sommitale (Val de Chaudefour, Plaine des Moutons).

- en altitude et situation méso-hygrophile se développent le plus généralement les franges et les conquêtes forestières s.l. qui s'étendent préférentiellement au dépens des milieux humides. Les différentielles sont les suivantes : *Luzula desvauxii*, *Polygonum bistorta*, *Aconitum vulpina*, *Athyrium distentifolium*, *Streptopus amplexifolius*, *Peucedanum ostruthium*, *Rosa pendulina*. S'y ajoutent un lot important d'espèces communes aux stades préforestiers hygrophiles de basse altitude et aux hêtraies développées sur mégaphorbiaies : *Cicerbita alpina*, *C. plumieri*, *Angelica sylvestris*, *Ranunculus aconitifolius*, *Rumex arifolius*, *Epilobium duriaei*. *Euphorbia hyberna* et *Adenostyles alliariae* montrent ici leurs plus fortes fréquences sur l'ensemble des formations forestières et préforestières.

Le couvert arboré, toujours peu étendu (10 à 20 %), de hauteur modeste (3 à 4 m), est constitué essentiellement par des sorbiers, accompagnés de *Betula pendula*, *B. pubescens* et quelquefois *Fagus sylvatica*. Les arbustes forment une strate plus basse (1,5 à 2,5 m) et plus étendue (20 à 30 %) où l'on retrouve surtout les sorbiers avec *Rosa pendulina*, *Lonicera nigra*, *Vaccinium myrtillus* et *Daphne mezereum*. *Calamagrostis arundinacea* est encore présent dans un couvert herbacé très fourni (70 à 100 %) et luxuriant constitué par les espèces hygrophiles auxquelles se joignent *Rubus idaeus*, *Paris quadrifolia*, *Polygonatum verticillatum*, *Solidago virgaurea* s.l., *Doronicum austriacum*, *Epilobium angustifolium*, *Allium victorale*... *Dryopteris filix-mas* et *Athyrium filix-femina* y prennent souvent un développement important.

Les formations de dégradation et groupements spécialisés

Les ravins avalancheux

Quelques ravins avalancheux traversent les formations forestières du Val de Chaudefour. La faible fréquence de coulées puissantes permet cependant à des arbres couchés et tortueux de s'y maintenir. *Acer platanoides* et *Fagus sylvatica* dominent les sorbiers. De nombreuses espèces des hêtraies méso à eutrophes forment le tapis végétal accompagnées d'espèces hygrophiles à

méso-hygrophiles : *Adenostyles alliariae*, *Luzula desvauxii*, *Cicerbita alpina*, *Doronicum austriacum* ainsi que *Streptopus amplexifolius* et *Campanula latifolia* (BOCK et PRELLI, 1975 ; BILLY, 1988).

Les clairières et les coupes

L'effet du clairièrage forestier sur la végétation varie fortement en fonction de l'isolement du site.

En effet, dans les clairières intraforestières c'est à un développement intense des espèces du cortège forestier habituel que l'on assiste plus qu'à une modification profonde du groupement. *Sambucus racemosa* occupe l'espace arbustif. Les Ptéridophytes, *Rubus idaeus*, *Prenanthes purpurea* et diverses héliophiles habituellement plus discrètes se développent en troupes : *Solidago virgaurea*, *Holcus mollis*, *Euphorbia hyberna*, *Carex pilulifera*, *Luzula nivea*, *Galium saxatile* dans les hêtraies du **Luzulo-Fagenion**, *Corydalis claviculata* dans les hêtraies sapinières du **Luzulo-Fagenion**, *Cicerbita plumieri*, *Adenostyles alliariae*, *Geranium robertianum*, *Stellaria nemorum* s.l., *Epilobium montanum* pour les hêtraies de l'**Asperulo-Fagenion**.

Les coupes de grandes extensions modifient profondément la flore avec le développement d'*Epilobium angustifolium*, l'importance prise par *Digitalis purpurea*, et l'apparition de *Juncus effusus*, *Carex ovalis*, et *Agrostis capillaris*.

Enfin, les coupes à blanc de pessières aboutissent à des groupements très denses d'*Epilobium angustifolium* accompagné souvent de *Cicerbita plumieri*, *Agrostis capillaris*, *Senecio cacaliaster*, *Holcus mollis*, *Galeopsis tetrahit*, *Carex pallescens*, *Rubus idaeus*.

Landes et fourrés

Les formations ligneuses basses occupent de très vastes surfaces, notamment en altitude et dans toutes les zones difficiles d'accès qui ont été abandonnées prioritairement (revers ouest et est du Puy de l'Angle, face sud du Puy de la Croix Morand, face nord du Puy Gros, Montagne de Chambourguet, Plaine des moutons...). L'analyse floristique (177 relevés) révèle l'existence de 6 groupements (COQUILLARD, 1993) :

1 - les fourrés à *Cytisus scoparius* présentant 2 groupements distincts de basse et «haute altitude»,

2 - les fourrés à *Cytisus purgans*,

3 - les landes à Ericacées, qui se scindent en 4 ensembles : le groupement type comportant ou non des indicatrices de boisement, le groupement alticole type et le groupement alticole méso-hygrophile.

Les groupements de basses altitudes : **Veronico chamaedri-Cytisetum scoparii**

Ils sont constitués de fourrés de *Cytisus scoparius*, cantonnés au dessous de 1 200 m environ. Ils ont parfois de grandes extensions (Montagne de Pouly). Leur emprise s'effectue préférentiellement sur les zones anciennement cultivées, aux sols profonds de type andique, riches en nutriments, développés sur roches basiques ou peu acides (basaltes s.l., trachyandésites), caractérisés par de faibles taux d'aluminium échangeable. Les recouvrements arbustifs sont importants (75 % et plus), d'une hauteur supérieure à 1,5 m. La compétition photique élimine la plupart des herbacées. Les espèces suivantes sont communes à ces formations et constituent la combinaison caractéristique du groupement type : *Galium mollugo* subsp. *elatum*, *Rosa canina*, *Clinopodium vulgare*, *Cruciata laevipes*, *Trifolium pratense*, *Cirsium eriophorum*, *Helianthemum nummularium* s.l., *Plantago lanceolata*, *Dactylis glomerata* subsp. *glomerata*, *Brachypodium pinnatum*, *Veronica chamaedrys*, *Cytisus scoparius*.

Au dessous de 1 100 m, et sans doute en liaison avec un pâturage relictuel, malgré la densité des peuplements, sur des parcelles d'accès aisé, apparaît un lot d'espèces transgressives des pelouses et prairies à caractère héliothermophile : *Campanula glomerata*, *Carex muricata* subsp. *pairaei*, *Cynosurus cristatus*, *Holcus lanatus*, *Phleum pratense* subsp. *pratense*, *Hypochoeris radicata*, *Malva moschata*, *Scabiosa columbaria*, *Galium mollugo* subsp. *erectum*, *Cerastium arvense* subsp. *arvense*, *Euphorbia cyparissias*, *Trisetum flavescens*, *Cirsium arvense*, *Briza media*. Cet ensemble peut constituer la sous-association **Euphorbietosum cyparissi** du groupement type.

Ces «landes» selon les auteurs, se rattachent soit aux **Calluno-Ulicetalia** Br.-Bl et Tüxen 1943 (alliance du **Sarothamnion scopariae** Tüxen 1945 (BILLY, 1988)), soit aux **Quercus-Fagetea** Br.-Bl et Viegler 1937 (sous ordre des **Rubus-Prunetalia spinosae**, alliance du **Cytision scoparii** (RAMEAU, 1989)). Au regard de la répartition altitudinale et des successions en jeu d'une part et de la grande présence des espèces des **Quercus-Fagetea** d'autre part, nous inclinons pour cette dernière conception.

Les groupements de 1 200 à 1 450 m

A partir de 1 200 m d'altitude environ, apparaissent dans la strate herbacée un lot d'espèces communes aux fourrés et landes, que l'on qualifiera, relativement à l'étage sylvatique, d'alticoles ; il s'agit, par ordre de fréquences croissantes de *Jasione laevis*, *Calamagrostis arundinacea*, *Solidago virgaurea*, *Gentiana lutea*, *Galium saxatile*, *Vaccinium myrtillus* et *Calluna vulgaris*, *Gentiana lutea* et *Galium saxatile* débordant quelque peu dans le groupement précédent, mais avec de très faibles abondances.

1. Les fourrés à *Cytisus purgans* : *Teucrium scorodoniae*-*Cytisetum purgantis*.

Cette formation est au contact de la précédente, avec laquelle elle entre en concurrence, c'est alors l'orientation et les caractères du sol qui constituent les facteurs décisifs (versant oriental du Col de la Croix Morand, Montagne de Pouly, face sud des puys de l'Angle et de Surains...). En effet, l'étude écologique montre le caractère nettement plus rustique des formations à genêt purgatif qui affectionne les fortes pentes ensoleillées, aux sols peu profonds et enrochés (rankers *s.l.*). Il monte en altitude en formations denses jusqu'à 1 500 m et localement 1 600 m (Puy de l'Angle, cirque de Super-Besse, rive droite du Val de la Fontaine Salée). Le groupement est indifférent à l'aluminium et se développe au mieux sur les laves massives acides (trachytes *s.l.*).

Il possède en commun avec les fourrés de genêts à balais les trois espèces suivantes : *Digitalis purpurea*, *Galeopsis tetrahit*, *Silene vulgaris* subsp. *vulgaris*, qui apparaissent comme préférantes des genistaies.

Le groupement est remarquablement homogène, la densité des peuplements réduisant la strate herbacée. Les espèces qui le caractérisent au mieux sont *Orobancha rapum-genistae*, *Teucrium scorodonia*, *Omalotheca sylvatica*.

Au point de vue syntaxonomique, peu d'auteurs se sont prononcés sur le rattachement de ces formations dans le Massif Central. Il est clair cependant qu'elles doivent être rapprochées des fourrés de genêt à balais (BILLY, 1988, les rattache toutes deux au *Sarothamnion*), et nous les considérons donc comme partie intégrante du *Cytisium scoparii*.

2. Les landes à Ericacées

Ces landes, très étendues à partir de 1 200 m sont en concurrence avec les fourrés à

Cytisus purgans. Le déterminisme de ces formations repose sur les conditions stationnelles. Il s'agit de stations aux sols marqués par l'oligotrophie et l'acidité. L'aluminium échangeable est élevé, le taux de saturation faible. Les sols peuvent avoir de faibles profondeurs sans toutefois être marqués par l'enrochement qu'affectionnent les landes à *Cytisus purgans*. Les roches sont acides (ponces trachytiques, trachyandésites et trachytes) et les sols présentent fréquemment des indices de podzolisation. Par ailleurs, certaines callunaies se développent sur les sols oligotrophes de fin d'évolution de tourbières, les histisols (Montagne de Chambourguet, Puy de Chantauzet).

La surface occupée par ces formations est remarquable à l'étage sylvatique et se prolonge vers les altitudes supérieures (Plaine des Moutons, Montagne de Chambourguet, Banne d'Ordanche, Mont Redon, Puy Gros).

Un lot important d'espèces de ces landes relèvent des *Nardo-Callunetea* Preisg. 1949 et syntaxons subordonnés (*Vaccinio-Genistetalia* Schub. 1960 et *Genistion* Boch. 1943) : *Potentilla aurea*, *Lathyrus montanus*, *Alchemilla alpina glomerata*, *Juniperus communis*, *Luzula multiflora* subsp. *multiflora*, *Serratula tinctoria*, *Genista pilosa*, *Arnica montana*. S'y ajoutent des espèces différentielles plus mésophiles et/ou alticoles : *Genista tinctoria*, *Laserpitium latifolium*, *Hieracium lachenalii*, *Crepis conyzifolia*, *Festuca paniculata*, *Sanguisorba officinalis*, *Campanula recta*, *Thesium alpinum*, *Pulsatilla alpina s.l.*, *Anemone nemorosa*, *Dianthus sylvaticus*.

Les édifiatrices des landes (*Vaccinium myrtillus*, *V. uliginosum*, *Calluna vulgaris*) constituent des faciès sans que cela s'accompagne effectivement d'une modification de composition floristique.

Nous distinguons 2 associations des landes à Ericacées à l'étage montagnard.

- Le *Carici piluliferae-Callunetum vulgaris* qui s'étage jusque vers 1 400 m est caractérisé par un ensemble d'espèces oligotrophes et acidiphiles : *Molinia caerulea*, *Danthonia decumbens*, *Hieracium laevigatum*, *Gentiana pneumonanthe*, *Senecio adonidifolius*, *Juniperus communis*, *Carex pilulifera*, *Selinum pyrenaicum*, *Nardus stricta* dont l'essentiel appartient à l'ensemble des *Nardo-Callunetea* (et syntaxons subordonnés).

C'est un groupement fermé, dominé par la fausse bruyère ou la myrtille ; *Juniperus*

communis subsp. *nana* peut participer à la structure de la lande à partir de 1 400 m, s'étaguant entre 1 200 et 1 500 m environ. *Vaccinium uliginosum* forme des faciès remarquables dans les stations les plus mésophiles.

Deux sous-ensembles doivent être distingués à l'intérieur de ce groupement, le premier est constitué d'individus comportant des indicatrices de la dynamique forestière avec prédominance de *Sorbus aucuparia* et *S. aria*. Le second ensemble est exempt de toute espèce de ce type soulignant le blocage spatio-temporel d'une partie de cette formation. Ce phénomène, décrit de longue date dans le Massif Central (BAUDIERE, 1972, 1973 ; DOCHE, 1986 ; COQUILLARD *et al.*, 1988b), est très certainement à mettre en relation d'une part avec l'éloignement des semenciers, le dynamisme ne pouvant s'instaurer qu'ultérieurement au fur et à mesure de l'extension des lisières et franges supérieures et d'autre part avec des phénomènes d'écotoxicité propres aux landes à *Calluna vulgaris* (BARCLAY-ESTRUP et GIMINGHAM, 1969 ; ROBINSON, 1972 ; SALAS et VIETIEZ, 1975 ; GIMINGHAM, 1978 ; MILES, 1981 ; COQUILLARD *et al.*, 1988b ; COQUILLARD et GUEUGNOT, 1991). Ainsi, parmi toutes les landes et fourrés étudiés, seules les landes à Ericacées dominées par la fausse bruyère semblent être sujettes à un blocage d'une telle intensité.

- *L'Euphorbia hybernae-Vaccinietum myrtilli*. Dans le groupement type, la callune n'est pas absente mais tend à se laisser dominer par *Vaccinium myrtillus* voire *V. uliginosum*. Cette association, plus alticole que la précédente, s'installe au contact des formations boisées d'altitude (1 400 à 1 500 m) à la faveur de la sénescence de la callune et forme un groupement de type lisière ainsi que le montrent des espèces telles que *Euphorbia hyberna*, *Astrantia major*, *Luzula sylvatica* conjointement à quelques forestières : *Lilium martagon*, *Prenanthes purpurea*, *Polygonatum verticillatum*, *Daphne mezereum*, *Paris quadrifolia* a également été relevée dans ce groupement.

La présence d'espèces d'affinités subalpines des *Betulo-Adenostyletea* Br.-Bl et Tüxen 1943 (*Senecio cacaliaster*, *Doronicum austriacum*, *Geranium sylvaticum*...) souligne la mésophilie et l'eutrophie plus marquées des milieux. De fait, les espèces oligotrophes du *Carici piluliferae-Callunetum vulgaris* ont disparu et ce groupement, peu à pas pâturé, constitue l'aile mésotrophe des landes à Ericacées.

Un lot important d'espèces de ce groupement sont susceptibles de transgresser dans le *Teucrio scorodoniae-Cytisetum purganti*, en

effet, les fourrés à cytise, de grandes ampleurs altitudinales, viennent concurrencer les groupements d'Ericacées sur milieux squelettiques et convergent à ces altitudes vers une dynamique préforestière commune.

Les indicatrices de boisement peuvent prendre dans ce groupement une importance notoire en particulier *Betula pubescens* et *B. pendula*.

En milieux méso-hygrophiles, les espèces des *Adenostyletalia* et *Adenostylion* enrichissent ces landes permettant de définir une sous-association *Luzuletosum desvauxii* où l'on trouve *Rumex arifolius*, *Cicerbita alpina*, *Aconitum napellus*, *A. vulparia*, *Rosapendulina*, *Adenostyles alliariae*, *Phyteuma spicatum*, *Ranunculus aconitifolius*, *Luzula desvauxii*, *Peucedanum ostruthium*, *Trollius europaeus* qui viennent compléter une liste d'espèces déjà fort riche. Ce qui confirme bien nos propos sur les milieux forestiers et préforestiers, signalant que la dynamique s'accomplit au mieux au dépens des groupements de type mégaphorbiaies. La haute présence des bouleaux et sorbiers vient ici conforter cette idée.

Ce groupement est rare cependant et ne peut s'établir qu'à la faveur de conditions stationnelles tout à fait particulières de talwegs humides et de résurgences sur laves massives.

Prairies et pâtures

L'analyse des 133 relevés de formations herbacées a permis d'individualiser 8 groupements (COQUILLARD, 1993) :

- de 1 000 à 1 270 m : les formations du *Cynosurion cristati* Tüxen 1947 avec 3 groupements,

- de 1 270 à 1 450 m : les formations du *Violion caninae* où 3 groupements peuvent être décrits,

- de 1 200 à 1 500 m, dans des conditions stationnelles particulières, des ourlets mésophiles à *Calamagrostis arundinacea* et *Astrantia major* avec 2 groupements.

Si les différentielles sont facilement discernables, il apparaît que des ensembles non négligeables d'espèces transgressent largement, notamment du *Violion* vers le *Cynosurion* témoignant d'une grande amplitude écologique vis à vis de l'altitude pour ces espèces, qui présentent cependant des affinités strictes pour les groupements qu'elles affectionnent. Ces larges transgressions des espèces montrent en tout état de cause, que le référentiel phytosociologique de ces formations nécessite un réexamen approfondi.

Les pelouses du *Cynosurion* (1 000 à 1 270 m)

La base commune aux 3 groupements de basses altitudes, rattachés au *Cynosurion*, comprend, *Rumex acetosa*, *Ranunculus acris* subsp. *acris*, *Poa pratensis*, *Alchemilla flabellata*, *Cerastium arvense* subsp. *arvense*, *Phleum pratense* s.l., *Cynosurus cristatus*, *Taraxacum* gr. *officinale*, *Alchemilla xanthochlora*, *Cirsium palustre*, *Avenula pubescens*, *Trisetum flavescens*, *Plantago lanceolata*, *Dactylis glomerata* subsp. *glomerata*.

Cet ensemble d'espèces caractérise le groupement type, le *Plantago lanceolatae-Cynosuretum cristati*, qui occupe les altitudes de 1 100 à 1 200 m. Il se développe sur roches préférentiellement basiques, sur des pentes faibles à moyennes et des sols profonds, la toxicité aluminique est faible, la somme des bases échangeables élevée.

Ces pelouses du *Cynosurion* ont pour caractéristique de subir une charge pastorale équilibrée et de se situer dans des zones d'accès aisé.

Les deux autres groupements sont définis ainsi :

1. Le groupement de très basse altitude (1 000 à 1 100 m), se différencie par, *Primula veris* subsp. *veris*, *Hypericum perforatum*, *Senecio jacobaea*, *Trifolium campestre*, *Cruciata laevipes*, *Lolium perenne*, *Sanguisorba minor*, *Malva moschata*, *Vicia cracca*, *Hypochoeris radicata*, *Cirsium eriophorum*, *Tragopogon pratensis* s.l., *Holcus lanatus*, *Leontodon hispidus* subsp. *hispidus*, en provenance des prairies de fauche, avec une dominance fréquente de *Trisetum flavescens*. Cet ensemble forme la combinaison différentielle *Malvaetosum moschati* du *Plantago lanceolatae-Cynosuretum cristati*.

2. De 1 200 à 1 270 m environ, il s'établit une variante alticole du *Plantago-Cynosuretum*. Les espèces précédentes disparaissent au profit de *Potentilla tabernaemontani*, *Coeloglossum viride*, *Ajuga reptans*, *Alchemilla hybrida*, *Trifolium alpinum*, *Thymus praecox* subsp. *polytrichus*. La triseté devient rare et le groupement est alors dominé par *Agrostis capillaris*, *Trifolium repens*, *Thymus pulegioides*, *Festuca nigrescens*. Le nard, absent des deux groupements précédents, peut prendre un développement important pour les individus sur lesquels s'exercent les plus fortes pressions de pâture.

Notons les larges transgressions plus affirmées des espèces des *Nardo-Callunetea* : *Jasione laevis*, *Viola lutea*, *Meum athamanticum*,

Galium saxatile dans la variante alticole, *Stachys officinalis* et *Dianthus sylvaticus* transgressant dans la totalité du *Plantago-Cynosuretum*.

De même, on remarque la haute fréquence des espèces des *Festuco-Brometea* : *Agrostis capillaris*, *Festuca nigrescens*, *Stellaria graminea*, *Festuca lemanii*, ainsi que dans l'ensemble des groupements de pâture.

Les pelouses du *Violion* (1 270 à 1 450 m)

A ces altitudes se répartissent trois groupements caractérisés par l'oligotrophie, l'acidité et des taux d'aluminium échangeable élevés. Ils se développent sur tout type de roches, les conditions stationnelles pouvant nuancer le caractère physico-chimique des matériaux.

Les espèces suivantes y sont régulièrement présentes : *Danthonia decumbens*, *Succisa pratensis*, *Carex pilulifera*, *Polygala vulgaris*, *Genista tinctoria*, *Luzula multiflora* s.l., *Hypericum maculatum* mais sont susceptibles de transgresser vers le *Cynosurion*. Toutefois ces espèces apparaissent comme presque exclusives de ces trois groupements et constituent la combinaison caractéristique de ces pelouses.

Cette combinaison caractéristique, entièrement constituée d'espèces du *Violion*, nous permet de rattacher cet ensemble aux *Nardo-Callunetea*. La très forte présence des espèces de cette classe (*Polygala serpyllifolia*, *Veronica officinalis*, *Potentilla aurea*, *Luzula campestris*...) nous conforte dans ce choix.

Nous rassemblons ces trois groupements en une seule association : le *Polygalo vulgaris-Nardetum strictae*, sans doute équivalente au *Nardeto-Festucetum* et au *Nardeto-Leontodon pyrenaici* (B. de LACHAPPELLE, 1961).

1. Les nardaies de 1 270 à 1 350 m

Deux groupements, sans doute équivalents au *Nardeto-Festucetum rubrae* B. de Lachapelle, 1960, occupent l'espace, très fortement dominés par *Nardus stricta*, *Festuca nigrescens* et *F. rubra* subsp. *rubra*, *F. lemanii* pouvant très localement participer au tapis herbacé. On remarque l'importance prise par *Chamaespartium sagittale*, *Briza media*, *Hieracium pilosella* s.l., *Thymus pulegioides*, *Cerastium fontanum* subsp. *triviale*, *Lotus corniculatus*, *Trifolium pratense*, *Rhinanthus minor*, *Gentiana lutea*, *Jasione laevis*, ainsi que l'apparition d'édificatrices des landes, *Calluna vulgaris*, *Vaccinium myrtillus*, *Genista pilosa*, absentes des formations du *Cynosurion*. C'est la charge pastorale qui induit 2 groupements à l'intérieur de cette association :

- le groupement de surpâturage se développe à une altitude moyenne de 1 350 m (Val de la Fontaine Salée...). Il se caractérise essentiellement par la disparition de *Rumex acetosella*, *Leucanthemum vulgare*, *Veronica chamaedrys*, *Briza media*, *Thymus pulegioides*, *Hieracium pilosella* s.l., *Trifolium pratense*, *Lotus corniculatus*, toutes espèces d'altitudes inférieures à 1 350 m et par la raréfaction d'espèces sensibles à la charge pastorale : *Chamaespartium sagittale*, *Centaurea nigra*, *Silene vulgaris* subsp. *vulgaris*, *Conopodium majus*, *Campanula rotundifolia*, *Avenula pratense*, *Lathyrus montanus*, *Helianthemum nummularium* s.l., *Lathyrus pratensis*. Très largement répandu, ce groupement constitue le type du *Polygalo vulgaris-Nardetum strictae*.

- Une variante mésophile se présentant comme le groupement de pâturage équilibré est située aux altitudes équivalentes (1 327 m) et bénéficie sans doute d'un suivi agronomique méthodique. Les différentielles sont : *Euphorbia hyberna*, *Deschampsia cespitosa*, *Carex ovalis*, *Omalotheca sylvatica*. C'est dans ce groupement que *Chamaespartium sagittale* présente sa plus forte abondance accompagné de *Hypericum maculatum*, *Festuca lemanii*, *F. rubra* subsp. *rubra*. Les espèces éliminées par le surpâturage réapparaissent ici.

2. Les nardaies de 1 350 à 1 450 m

Décrit par B. de LACHAPELLE sous le nom de *Nardeto-Leontodon pyrenaici* des *Arrhenatheretalia* puis par BILLY (1988) le rattachant au *Nardion* subalpin, ce groupement que nous considérons comme la sous-association *Pulsatilletosum alpinae* du *Polygalo vulgaris-Nardetum strictae* se caractérise à nos yeux par trois modifications importantes vis à vis des groupements inférieurs à 1 350 m.

- apparition d'espèces alticoles *Euphrasia minima*, *Pulsatilla alpina*, *Gentiana pneumonanthe*, *Anemone nemorosa*, *Thesium alpinum*,

- disparition définitive d'un grand nombre d'espèces affines des altitudes inférieures à 1 400 m : *Vicia sepium*, *Rumex acetosella*, *Leucanthemum vulgare*, *Veronica chamaedrys*, *Briza media*, *Thymus pulegioides*, *Hieracium pilosella* s.l., *Trifolium repens*, *Cerastium fontanum* subsp. *triviale*, *Lotus corniculatus*, *Trifolium pratense*, *Ranunculus nemorosus* subsp. *nemorosus*, ainsi que diverses espèces sensibles à la pâture, *Chamaespartium sagittale*, *Centaurea nigra*, *Silene vulgaris* subsp. *vulgaris*, *Conopodium majus*, *Campanula rotundifolia*, *Avenula pratense*, *Lathyrus pratensis*,

Helianthemum nummularium s.l., nombre d'entre elles appartiennent aux *Nardo-Callunetea*,

- apparition d'espèces communes aux li-sières à *Calamagrostis* et *Brachypodium* : *Solidago virgaurea*, *Hieracium laevigatum*, *Arnica montana*, *Serratula tinctoria*.

Au point de vue physionomique, le nard domine totalement ce groupement secondé par *Festuca lemanii* ; *Gentiana lutea* y est particulièrement abondante et *Carex caryophyllea* montre une plus grande constance dans ce groupement que précédemment.

Les ourlets mésophiles à *Calamagrostis arundinacea* et *Astrantia major*

Les prairies à calamagrostide sont assez rares à l'étage montagnard, à l'exception du Creux des Boeufs (col de la Croix St Robert). L'analyse révèle deux groupements, au moins, d'écologie stationnelle très particulière. Il s'agit dans la majorité des cas d'éboulis fixés de pieds de falaise (fronts de coulées, rebords éboulés de dômes trachytiques...), délimitant un espace ouvert et luxuriant, entre la limite de la forêt et la falaise. Le sol est très enroché mais non xérique, la couverture végétale et les blocs superficiels limitant l'évapotranspiration estivale. La présence de blocs en superficie et dans l'épaisseur de l'horizon meuble induit une grande hétérogénéité édaphique. Il s'ensuit la juxtaposition d'espèces acidophiles et/ou xérophiles (*Teucrium scorodonia*, *Senecio adonidifolius*, *Festuca paniculata*, *Calamagrostis arundinacea*...) et de neutro-mésophiles à méso-hygrophiles (*Brachypodium pinnatum*, *Dianthus monspessulanus*, *Cicerbita plumieri*, *Geranium sylvaticum*, *Lilium martagon*...)

Nous rattachons très provisoirement ces ourlets au *Senecio daronici-Calamagrostietum arundinaceae* (CARBIENER, 1969), alliance du *Calamagrostion* Luquet 1926.

Les ourlets à calamagrostide se développent de 1 200 à 1 450 m à l'étage sylva-tique. Leur composition floristique commune montre un lot d'espèces appartenant aux ourlets forestiers enrichi en espèces des *Adenostyletalia*, ce qui suggère la présence d'une forte humidité dans ces milieux. *Calamagrostis arundinacea* domine la composition dans tous les cas et les espèces suivantes constituent le lot commun : *Athyrium filix-femina*, *Luzula sylvatica*, *Teucrium scorodonia*, *Trollius europaeus*, *Cicerbita plumieri*, *Viola reichenbachiana*, *Vicia orobus*, *Phyteuma spicatum*, *Centaurea montana*, *Astrantia major*, *Polygonatum verticillatum*, *Geranium sylvaticum*, *Lilium martagon*, *Linaria*

repens, *Campanula glomerata*, *Senecio adonidifolius*, *Rubus idaeus*. Les arbustes sont représentés par *Sambucus racemosa*, *Sorbus aucuparia*, *S. aria* et parfois *Corylus avellana* qui restent chétifs.

Les 2 groupements sont déterminés par leurs potentialités évolutives :

- le *Senecio doronici-Calamagrostietum arundinaceae* sous ass. *Festucetosum paniculatae* s'individualise par les différentielles suivantes : *Cotoneaster integerrimus*, *Dianthus monspessulanus*, *Galium mollugo* subsp. *elatum*, *Hieracium prenanthoides*, *Laserpitium latifolium* et *Festuca paniculata*. Ce groupement est répandu en toutes altitudes et particulièrement en exposition thermophile (Val de la Fontaine salée, Puy Gros, Banne d'Ordanche, Puy Baladou, Chastreix-Sancy, Puy de Chambourguet).

A basse altitude ou lorsque l'exposition le permet, *Brachypodium pinnatum* (très vraisemblablement *B. pinnatum* subsp. *rupestre* majoritaire) domine au sein de la variante thermophile au détriment de *Festuca paniculata* subsp. *paniculata*, tandis que les alticoles se raréfient (*Hieracium prenanthoides*, *Thalictrum minus* s.l., *Laserpitium latifolium*, *Vicia orobus*, *Astrantia major*...). *Crepis conyzifolia* et *Senecio adonidifolius* en sont les deux autres différentielles (Chambon des Neiges, Puy Chambon, Creux des Boeufs, Puy de Chambourguet). A l'exception du site du Creux des Boeufs, ce groupement n'occupe jamais de grandes surfaces mais se limite à une bande étroite de quelques mètres au plus.

Dans les autres situations, c'est une variante mésophile qui prend pied, avec disparition du brachypode. *Cirsium erisithales* peut prendre localement une place importante avec *Senecio doronicum*, *Rosa pendulina* et *Sanguisorba officinalis*...

- la sous-association *Senecietosum cacaliasteri* est rare (Puy de Pertuyzat, cirque de la Biche, Montagne de la Plate) et se développe dans des conditions identiques à la précédente mais dont l'exposition et la proximité forestière viennent tempérer l'aspect thermo-héliophile. C'est ainsi que l'ensemble des différentielles de la sous-association *Festucetosum* disparaissent au profit d'espèces d'affinité forestière marquée : *Gymnocarpium dryopteris*, *Angelica sylvestris*, *Valeriana officinalis* s.l., *Pulmonaria affinis*, *Fragaria vesca*, *Epilobium duriaei*, *Paris quadrifolia*, *Euphorbia dulcis*, *Dryopteris filix-mas*, *Mercurialis perennis*, *Senecio cacaliaster*, *Knautia dipsacifolia*. Ce groupe-

ment présente très certainement les plus fortes potentialités forestières et constitue, avec les véritables mégaphorbiaies, l'une des possibilités d'évolution rapide.

Les prairies de fauche

Les prairies de fauche occupent actuellement des surfaces encore importantes, elles se répartissent en deux alliances : l'*Arrhenatherion elatioris*, pour les plus riches et le *Cynosurion cristati* (LEMEE, 1951 ; BILLY, 1988).

La première alliance occupe les zones planitaires les mieux fertilisées par l'action du bétail, que l'on fait pâturer sur le regain, et qui bénéficient d'épandages de lisiers. *Holcus mollis* et *Arrhenatherum elatius* dominent largement avec *Dactylis glomerata*, *Anthoxanthum odoratum*, *Knautia arvernensis*, *Festuca rubra* subsp. *rubra*, *Trisetum flavescens*, *Lathyrus pratensis*, *Ranunculus acris* subsp. *acris*. Sont très constantes : *Taraxacum* gr. *officinale*, *Cynosurus cristatus*, *Heracleum sphondylium*, *Trifolium pratense*, *T. repens*, *Crepis biennis*, *Alopecurus pratensis*, *Avenula pubescens*, *Centaurea nigra*...

Les prairies à crételle sont en général plus éloignées des exploitations et villages, et la surcharge des sites par le passé, a certainement contribué à l'appauvrissement des sols. Leur qualité fourragère est donc plus faible. Les groupements sont dominés par *Anthoxanthum odoratum* et *Cynosurus cristatus*, à moindre titre par *Rhinanthus minor*. *Ranunculus nemorosus* est une bonne constante ainsi que *Lolium perenne*. Bon nombre d'espèces présentes dans l'*Arrhenatherion elatioris* se retrouvent ici.

Les fougères

Les fougères à *Pteridium aquilinum* concurrencent les fourrés à *Cytisus scoparius* en basse altitude (entrée du Val de Chaudefour, Voissière et jusqu'à 1 250 m sous la Banne d'Ordanche). Admises par bon nombre d'auteurs comme étant liées au processus de décarbonatation, on se perd en conjecture, dans cette région quant au déterminisme exact de ces formations très envahissantes et inexpugnables par les méthodes courantes.

Leur cortège floristique rappelle par sa composition, avec cependant un appauvrissement quantitatif, celui des fourrés de *Cytisus scoparius*. On retrouve, en effet, avec une grande constance des caractéristiques du *Veronico chamaedri-*

Cytisetum scoparii (*Dactylis glomerata* subsp. *glomerata*, *Plantago lanceolata*, *Clinopodium vulgare*, *Cruciata laevipes*, *Veronica chamaedrys*...) et de la sous association ***Euphorbietosum cyparissi*** (*Carex muricata*, *Holcus lanatus*, *Scabiosa columbaria*...), associées à des compagnes (*Agrostis capillaris*, *Conopodium majus*, *Galeopsis tetrahit*, *Rumex acetosella*, *Silene vulgaris* subsp. *vulgaris*...).

Les ripisylves

Elles n'occupent qu'une faible superficie, le long de la Dordogne, du ruisseau de l'Enfer et également le long des Couzes Surain et Chambon ainsi que de la Trentaine.

La strate arborée est dominée par *Alnus glutinosa*, *Fraxinus excelsior* et *Salix caprea*,

viennent s'y ajouter le hêtre et des sorbiers (*S. aria*, *S. aucuparia*) et en plus basse altitude *Corylus avellana*. Le sous-bois est formé le plus souvent par une mégaphorbiaie dense.

Conclusion

La comparaison des figures 10A et 10B montre que si le déterminisme du groupement forestier est très clairement lié à la morphologie stationnelle, il n'en va pas de même pour les éléments herbacés et ligneux bas correspondants. Quelques constatations peuvent être dégagées :

- les pelouses et prairies initiales peuvent, individuellement, être à la base de plusieurs groupements ligneux vis-à-vis des stades ultérieurs. La morphologie stationnelle revêt une

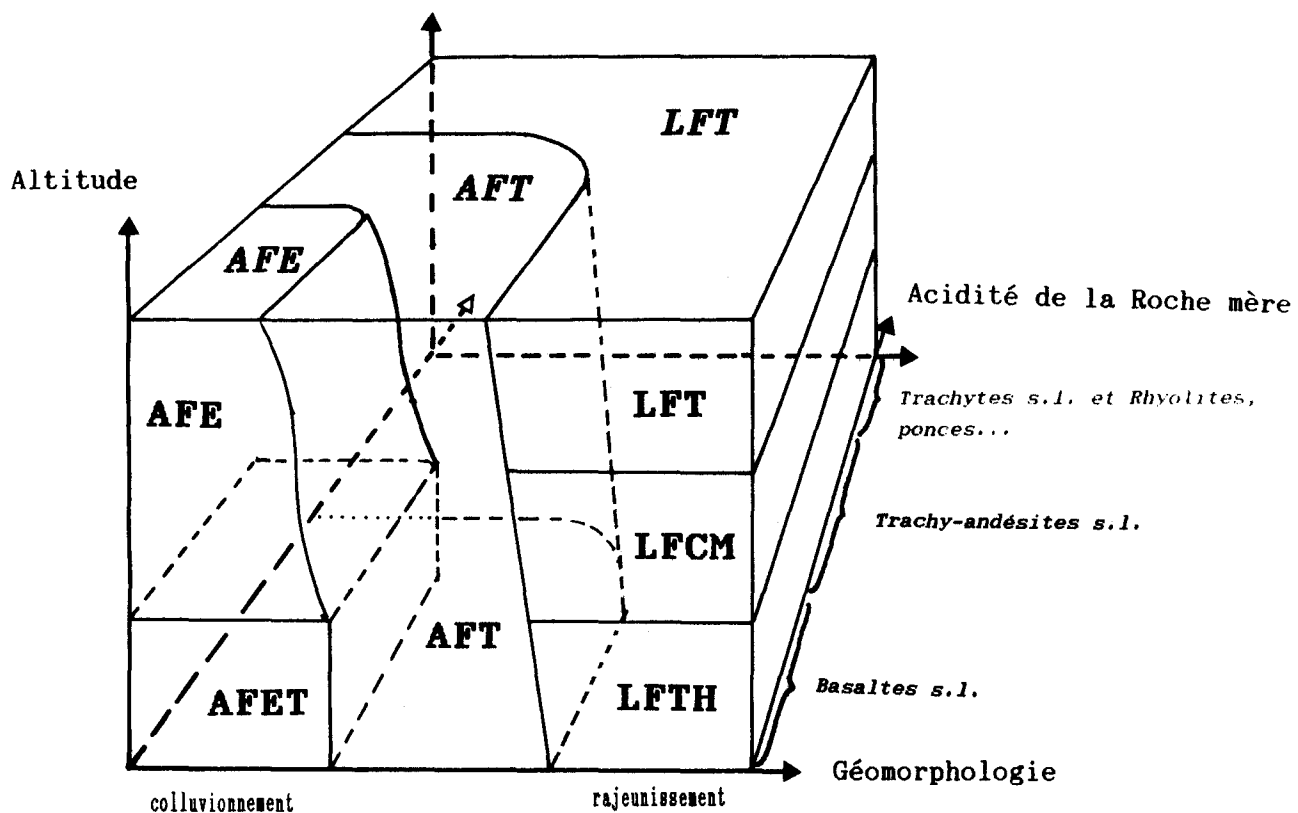


Figure 10A.- Dynamisme de la végétation à l'étage montagnard. Bloc diagramme des stades terminaux des principales successions des hêtraies du Massif du Sancy dans l'espace roche-mère, altitude, géomorphologie

- AFT : groupement type de l'*Asperulo-Fagenion* (*Scillo-Fagetum*)
- AFE : groupement eutrophe de l'*Asperulo-Fagenion*
- AFET : groupement eutrophe et thermophile de l'*Asperulo-Fagenion*
- LFT : groupement type du *Luzulo-Fagenion* (*Luzulo-Fagetum*)
- LFCM : groupement de moyenne altitude du *Luzulo-Fagenion*
- LFTH : groupement thermophile du *Luzulo-Fagenion*

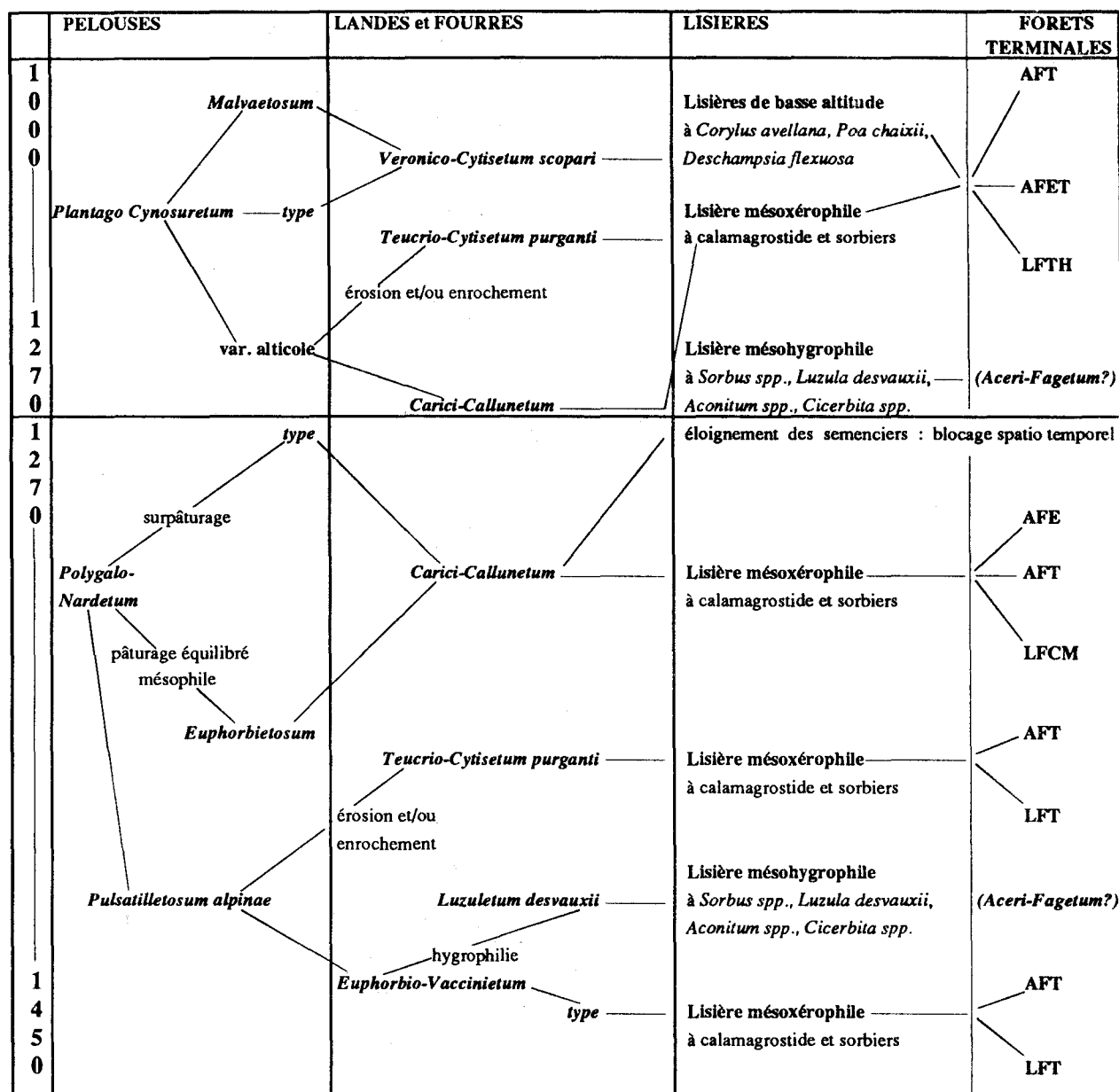


Figure 10B.- Dynamisme de la végétation à l'étage montagnard. Les successions.

AFT : groupement type de l'*Asperulo-Fagenion* (*Scillo-Fagetum*)
 AFE : groupement eutrophe de l'*Asperulo-Fagenion*
 AFET : groupement eutrophe et thermophile de l'*Asperulo-Fagenion*
 LFT : groupement type du *Luzulo-Fagenion* (*Luzulo-Fagetum*)
 LFCM : groupement de moyenne altitude du *Luzulo-Fagenion*
 LFTH : groupement thermophile du *Luzulo-Fagenion*

importance accrue en s'élevant dans les échelles des successions.

- les stades initiaux apparaissent comme mieux déterminés par les éléments climatiques régis par l'altitude.

Enfin, les lisières à *Calamagrostis arundinacea*, au déterminisme édaphique tout à fait particulier, occupent de très faibles surfaces du secteur étudié.

IMPACT DES PRATIQUES AGRICOLES (P. COQUILLARD, J. GUEUGNOT, Y. MICHELIN)

Une typologie des agriculteurs du Massif du Sancy (JOUGLA, 1991 ; COQUILLARD, 1993) a été établie grâce à une AFC, suivie d'une CAH et d'une partition des centres mobiles, portant sur 41 individus pour lesquels 20 variables agronomiques ont été retenues. 5 sites d'étude (Puy de Baladou, Serveix, Val des Fontaines salées, Montagne de la Plate, Puy May) ont été sélectionnés pour leur activité agricole développée et la mise en évidence de caractères marqués après l'approche écologique. Les utilisateurs des landes et herbages peuvent se répartir en 4 classes principales :

- Classe 1. Un ensemble d'utilisateurs pour lesquels l'estivage n'est pas motivé par des considérations strictement agro-économiques, ce sont des agriculteurs souhaitant abandonner l'estive à court terme ou des non-agriculteurs qui, par le jeu des héritages, utilisent l'estive comme source de revenus d'appoint, avec pour conséquence une gestion de type extensif (estive de longue durée, mauvais entretien des parcelles...).

- Classe 2. Un système pastoral collectif regroupant des troupeaux allaitants, souvent en provenance d'exploitations éloignées du massif et pâturent sans contrainte de vastes parcelles d'altitude, de bonne accessibilité, correctement entretenues et équipées mais souvent fortement chargées.

- Classe 3. Un système spécialisé dans la production laitière utilisant des parcelles à bon potentiel, proches de l'exploitation, bien entretenues et bien gérées (estivage de courte durée, pâturage tournant) mais aussi des territoires éloignés et à faible potentiel faisant l'objet d'une remise en valeur intensive par de jeunes exploitants récemment installés.

- Classe 4. Un système traditionnel extensif, témoin en voie de disparition d'un mode d'exploitation agnaire ancien, avec des troupeaux mixtes (vaches laitières et allaitantes) en libre pâture sur des parcelles petites, proches des exploitations et mal gérées.

Les objectifs et les stratégies de ces 4 classes d'exploitants impliquent donc la mise en oeuvre de techniques diverses. L'analyse des résultats d'une AFC d'un tableau de contingence variables agronomiques (17 disjonctées en 59 modalités) X variables phytoécologiques (7 disjonctées en 32 modalités) a permis d'évaluer l'impact de ces pratiques sur le déterminisme des

landes et des pâtures (GUEUGNOT *et al.*, 1993). Nous en reprenons ici les résultats essentiels.

Le facteur prépondérant -axe 1 de l'AFC- réside dans le gradient d'intensification inversement proportionnel à l'altitude. C'est surtout la classe 1 (non agriculteurs) qui exploite les landes à faibles valeurs pastorales du *Carici-Callunetum*. Ces landes sont exploitées au moindre coût et à la base de multiples productions (vaches allaitantes, double troupeau, chevaux...). A basse altitude, l'intensification domine par l'effort des jeunes agriculteurs -classe 3- pour un élevage laitier exigeant sur des pelouses du *Plantago-Cynosuretum*.

Le deuxième facteur -axe 2-, oppose des coopératives qui, sur des territoires éloignés et bien équipés exploitent les pelouses du *Violion*, parfois avec un net surpâturage (*Polygalo-Nardetum* surpâturé), pour la production de viande, à la production extensive des non agriculteurs (classe 1) sur des estives mal desservies, mal exposées, déjà bien envahies par les landes denses du *Carici-Callunetum*. Ce facteur exprime donc les nuances du mode de gestion extensif.

Le troisième facteur exprime le degré d'effort consenti par les agriculteurs pour l'exploitation de l'herbe. En effet, les estives à fort potentiel du *Cynosurion* de basses altitudes sans fauche ni traitement des refus, non équipées et faiblement chargées par des troupeaux mixtes, sont exploitées de manière traditionnelle (exploitants de la classe 1), s'opposent aux anciennes landes et fourrés du *Teucro-Cytisetum*, divisés en parcelles de tailles moyennes, à faible potentiel (faibles valeurs pastorales et médiocres expositions), mal desservies mais en cours de remise en valeur -défrichage, traitement des refus, bons bâtiments. Cette rationalisation de la conduite du troupeau permet un chargement fort, malgré les handicaps naturels, par les exploitants laitiers intensifs (classe 3).

Le quatrième facteur sépare les vastes estives éloignées de l'exploitation même, colonisées par les espèces du *Cynosurion* (*Plantago-Cynosuretum* de 1 000 à 1 200 m), à fortes valeurs pastorales mais mal équipées, peu entretenues et faiblement chargées -ce qui laisse présager le passage à la friche à *Cytisus scoparius*- des estives, de tailles respectables elles aussi et à fortes valeurs, mais dont l'influence d'une pression pastorale de longue durée contient le développement des fourrés de genêts. Ces deux types d'exploitations sont menées, respectivement, par les classes 1 et 4 d'agriculteurs.

Ainsi parmi les 4 groupes d'utilisateurs mis en évidence, seul le système traditionnel (classe 4) maintient une pression équilibrée et constante ne permettant pas de déceler d'évolution significative de la végétation sur les territoires gérés. Cependant l'avenir de ces derniers dépendra du repreneur et de ses motivations.

Les trois autres groupes induisent par leurs modes de gestion des modifications au sein des écosystèmes. C'est ainsi que deux dynamiques opposées se côtoient, parfois sur un même territoire. Certains agriculteurs cherchent à améliorer la productivité de leurs parcelles en associant travaux, fertilisation et fauche et tendent à homogénéiser la végétation vers des faciès prairiaux (pelouses du *Cynosurion* ou du *Violion* selon l'altitude). D'autres exercent une pression inadaptée sur des groupements dont la valeur pastorale tend à se dégrader :

- si le chargement global est trop faible pour contenir la reconquête ligneuse, les pâturages sont envahis par les genêts (*Veronica chamaedri-Cytisetum scoparii*, *Teucrium scorodoniae-Cytisetum purgantis*) ou la lande à Ericacées (*Carici piluliferae-Callunetum vulgaris*).

- s'il est trop élevé, le milieu s'appauvrit induisant l'installation d'une lande pauvre ou d'une nardaie (*Polygalo vulgaris-Nardetum strictae*).

- enfin le chargement global peut être correct mais inégalement réparti sur la parcelle qui présente alors des faciès surpâturés et d'autres sous pâturés voire abandonnés.

On voit donc qu'à la différence des variables de l'environnement, celles liées aux pratiques agricoles sont fluctuantes dans le temps (à court et moyen terme) car dépendantes des décisions de l'agriculteur ; celui-ci tient compte des caractéristiques du milieu naturel mais l'enquête a bien mis en évidence qu'en fonction de contraintes spécifiques (capacités techniques, financières, perspectives d'avenir...) il valorise plus ou moins les potentialités des parcelles dont il a l'usage ; c'est ainsi que le système laitier, à priori exigeant, est amené parfois à utiliser, faute de mieux, des territoires pauvres ou dégradés qu'il tente de valoriser avec beaucoup d'efforts alors que d'autres éleveurs laissent se dégrader des estives de bonne qualité par manque d'animaux ou devant des perspectives d'avenir peu favorables.

ETAGE SUBALPIN (R. MICHALET, T. PHILIPPE collaborateur)

INTRODUCTION

L'asylvatisme des sommets du Massif central (et des Vosges) a longtemps troublé les écologues étant donné l'importance de la couverture arborescente à ces altitudes dans les Alpes et les Pyrénées. De nombreux auteurs considèrent qu'il existe une limite naturelle pour l'extension des essences montagnardes, le hêtre et le sapin, 1 500 m environ dans le Massif Central (BRAUN, 1915 ; LUQUET, 1926 ; BRAUN-BLANQUET, 1926 ; UEHLINGER, 1926 ; QUEZEL et RIOUX, 1953), 1 300 m dans les Vosges (CARBIENER, 1966). Plus récemment, THEBAUD (1988) propose pour le Massif Central, une subdivision de l'étage subalpin en deux niveaux, l'inférieur (< 1 650 m) étant seul sylvatique de par la présence d'arbustes (*Salix lapponum*, *S. bicolor*, *Sorbus aucuparia*, *S. aria* et *S. chamaemespilus*). Quel qu'en soit son niveau, l'asylvatisme s'expliquerait (CARBIENER, 1966) par effet de crête du à des vents très violents s'appliquant sur des sommets isolés, dans une ambiance océanique nébuleuse et peu lumineuse. Pour JOLLY et LECOMPTE (1988), cet asylvatisme serait d'origine anthropique, le sapin pouvant occuper, selon eux, les sommets du Cantal.

Il est clair que l'ensemble de ces présomptions ne sont que des hypothèses, en l'absence de preuves tangibles de part et d'autre, ces preuves pouvant d'ailleurs peut-être être apportées un jour par la pédo-anthracologie. Par contre nous pensons pouvoir insister sur les faits suivants :

- le climat, très océanique peu lumineux et donc caractérisé par de faibles maximums de températures journalières, est favorable à un abaissement naturel de la limite supérieure de la forêt, comme c'est le cas dans les Alpes externes où cette limite est de 300 m inférieure à celle des Alpes internes (OZENDA, 1985).

- les seules essences en présence, le hêtre et le sapin, sont également limitées naturellement au montagnard dans les Alpes externes, le sapin s'élevant seul à plus de 1 900 m dans les Alpes et Pyrénées internes seulement. Le sapin paraît même complètement éliminé des montagnes hyperocéaniques telles que l'extrémité occidentale des Pyrénées (DEVAU, 1987).

- d'autres essences, absentes du massif, pourraient néanmoins coloniser ces stations comme c'est le cas dans des situations

bioclimatiques équivalentes, c'est-à-dire très océaniques. C'est le cas du pin à crochet dans le Jura (BEGUIN, 1970 ; MICHALET, 1982) et les Pyrénées externes (GRUBER, 1980) mais également de l'épicéa et du pin cembro dans les Alpes externes, le mélèze étant lui exclu des situations océaniques.

Nous reprendrons la subdivision de l'étage proposée par THEBAUD (1988), l'altitude de 1 650 m environ correspondant bien à la disparition des arbustes mais également à une baisse nette des potentialités dynamiques des groupements (disparition des espèces affines des lisières), de par l'augmentation de l'emprise neigeuse. Nous verrons également, à travers les résultats, que c'est à ce niveau qu'apparaissent les espèces et groupements alpins (*Salicion herbaceae* Br.-Bl. (21) in Br.-Bl. et Jenny 1926 et *Festucion airoidis* Br.-Bl. 1948). L'étage subalpin inférieur possède, en conséquence, les conditions écologiques favorables à l'existence d'une couverture sylvatique. Par contre, en l'attente de données pédo-anthracologiques, nous pensons que l'asylvatisme naturel des zones sommitales ne doit pas être exclu pour motif d'absence chorologique d'espèces adaptées.

LES ANALYSES FACTORIELLES

Trois analyses successives ont permis de mettre en évidence, pour l'ensemble de la partie subalpine, une soixantaine de syntaxons répartis dans une trentaine d'associations végétales. L'objectif de cette notice n'étant pas de faire une description phytosociologique précise de la végétation du massif, nous nous limiterons ici à une présentation des différentes alliances en présence afin de mieux percevoir le positionnement écologique des unités cartographiées.

L'analyse 1, globale

Cette première analyse, non représentée ici et portant sur 690 relevés met clairement en évidence trois facteurs écologiques très discriminants à cet étage, le niveau trophique du sol (axe 1), la dynamique végétale concrétisée par le degré de recouvrement des groupements (axe 2) et l'humidité édaphique (axe 3). Une vingtaine de syntaxons extrêmes (230 relevés) sont ainsi clairement individualisés de part et d'autre de l'axe 2 :

- quatre groupements très fermés de fin de cycle dynamique, les fourrés xérophiles à *Cytisus purgans* d'exposition sud et est, les saulaies hautes de *Salix lapponum* affines des vallons

pentus hydromorphes faiblement tourbeux, les callunaies hygrophiles à molinie colonisant quelques barres rocheuses plates et les saulaies rases de *Salix lapponum* des fonds de vastes combes à neige.

- une quinzaine de groupements initiaux ou de dégradation caractérisés par leur faible recouvrement. Ces groupements ouverts ont été traités séparément dans la troisième analyse.

L'analyse 2, analyse globale des groupements fermés

Les groupements dits fermés, analysés ici, sont caractérisés par une couverture végétale supérieure à environ 70%, quel qu'en soit la nature, ligneuse ou herbacée. L'axe 1 est comme précédemment l'expression du niveau trophique du sol isolant (figure 11), dans la partie négative l'ensemble des groupements acidiphiles peu productifs, les landes des *Calluno vulgaris-Vaccinietea myrtilli* (Br.-Bl. 1939) De Foucault 1990 et les pelouses acides à nard (*Nardion strictae* Br.-Bl. in Br.-Bl. et Jenny 1926) ou à *Agrostis rupestris* (*Salicion herbaceae* Br.-Bl. (21) in Br.-Bl. et Jenny 1926), dans la partie positive l'ensemble des groupements très productifs à hautes herbes des *Cicerbito alpinae-Aconitetea napelli* Hadac et Klika 1944, les pelouses à *Festuca paniculata* (*Festucion eskiae* Br.-Bl. 1948) occupant, quant à elles, une position intermédiaire. L'axe 2 exprime le bilan hydrique des groupements avec, au pôle positif les groupements d'adret et de pentes convexes (*Festucion eskiae*), au pôle négatif les groupements d'ubac et de pentes concaves, c'est-à-dire les agrostidaies (*Salicion herbaceae*) des combes à neige et les mégaphorbiaies (*Adenostylin alliariae* Br.-Bl. 1925) des vallons ruisselants peu enneigés de basses altitudes (< 1 700 m).

Le plan factoriel 1-2 est ainsi très explicatif pour les groupements à hautes herbes, les trois alliances des *Cicerbito alpinae-Aconitetea napelli* s'individualisant très nettement, avec les mégaphorbiaies du *Cicerbito alpinae-Adenostyletum alliariae* (Beger 22) Br.-Bl. 1950 (*Adenostylin alliariae*) au pôle de l'hygrophilie et de la richesse trophique, les calamagrostidaies (*Calamagrostidion arundinaceae* (Luquet 26) Oberdorfer 1957) plus mésophiles et en position trophique modérée, les luzulaies à *Luzula desvauxii*, plus acidoclines et en position hydrique modérée. Le *Calamagrostidion arundinaceae* distingué ici ne correspond qu'à la frange la plus hygrophile (relevés riches en espèces des *Cicerbito alpinae-Aconitetea napelli*) du *Senecio daronici-Calamagrostietum arundinaceae*

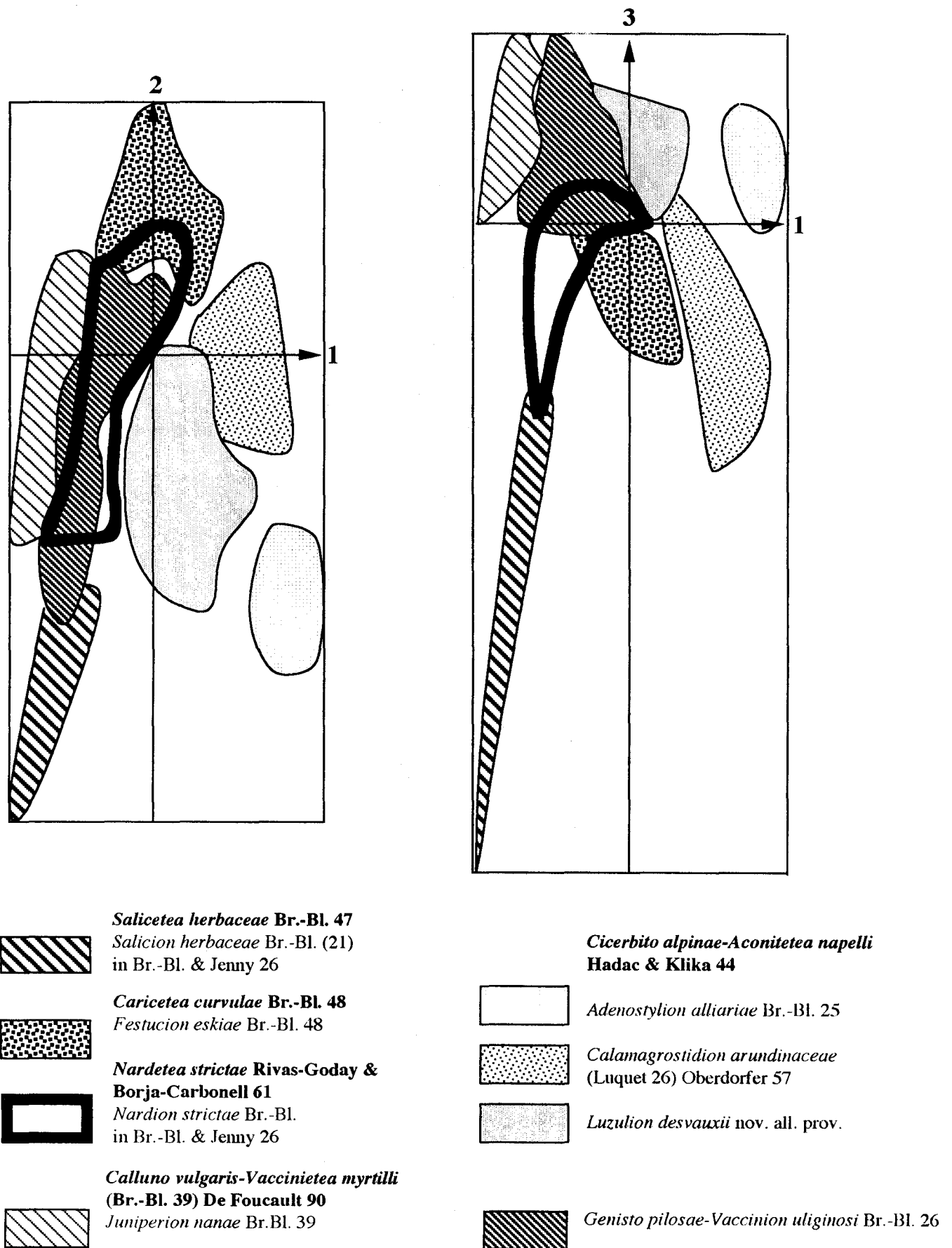


Figure 11.- Analyse factorielle des groupements fermés (analyse 2), plans factoriels 1-2 et 1-3, projection des relevés

(Luquet, 1926) Carbiener 1969. Nous proposons, par ailleurs (MICHALET et PHILIPPE, 1993), de séparer les luzulaies colonisant les vallons ruisselants des combes à neige dans une alliance propre le *Luzulion desvauxii* nov. all. prov., de par l'originalité de leur position écologique et de leur structure physiognomique (groupements denses mais de moyenne hauteur) à mi-chemin entre les mégaphorbiaies et les pelouses acides du *Salicion herbaceae*.

Pour la partie acidiphile, le seul nuage bien individualisé sur ce plan factoriel correspond aux pelouses rases à *Agrostis rupestris*, colonisant les buttes convexes des combes à neige de haute altitude (> 1 650 m) et relevant du *Salicion herbaceae*. *Salix herbacea* étant absent des combes à neige et seulement présent (rare) dans la lande à *Empetrum hermaphroditum*, aucun groupement du *Salicion herbaceae* n'avait été décrit jusqu'alors en Auvergne. Dans les Pyrénées BRAUN-BLANQUET (1948) décrit par contre le *Gnaphalieta supini-Sedetum candollei*, association (sans *Salix herbacea*) la moins chionophile des combes à neige, jouxtant des groupements à *Salix herbacea* plus chionophiles. Les agrostidaies du Sancy occupent une place écologique équivalente, les groupements les plus chionophiles des combes relevant en Auvergne du *Nardion strictae*. En effet sur matériau volcanique les fonds de combes à neige très enneigés sont colonisés par des sols profonds de texture fine favorables au nard et impropres au *Salix herbacea*, préférant des sols initiaux caillouteux.

Les groupements du *Festucion eskiae* distingués dans cette analyse correspondent à la frange mésophile et acidocline du *Senecio doronici-Calamagrostietum arundinacea*, la seule association auvergnate classiquement affine de cette alliance, le *Leucanthemo delarbrei-Festucetum paniculatae* Br.-Bl. 1926, étant analysée plus loin au sein des groupements ouverts.

L'axe 3 illustrant le degré de couverture ligneuse des groupements (inversement corrélé à la couverture neigeuse), il s'avère très explicatif pour la partie acidiphile du plan 1-3 où l'on peut distinguer la séparation des landes et des pelouses acides à nard, ces groupements étant fortement intriqués sur le plan 1-2. Concernant les pelouses acides, le *Nardion strictae* distingué dans cette analyse intègre deux nardaies précédemment décrites en Auvergne, le *Plantagini alpinae-Nardetum strictae* Luquet 1926, nardaie mésohygrophile des fonds de combes à neige et le *Nardetum strictae-Festucetum rubrae* (Luquet 26) Cusset et De Lachapelle 1961, nardaie mésophile du subalpin inférieur. Au sein de cette

alliance nous distinguons également une pelouse à nard et *Agrostis rupestris*, proche de l'*Avenulo versicoloris-Nardetum strictae* Oberdorfer (50) 1957 des Alpes du Nord et colonisant les sommets plats, ainsi qu'une pelouse à nard et *Festuca paniculata* affine des versants est enneigés et proche du *Ranunculo pyrenaei-Festucetum eskiae* Nègre 1974 des Pyrénées. Ces deux pelouses de l'étage subalpin supérieur sont cartographiées par BOCK et PRELLI (1975) sous l'appellation de groupement acidiphile du *Nardion strictae*.

Concernant les landes, deux alliances des *Calluno vulgaris-Vaccinieta myrtilli* s'individualisent sur ce plan, le *Juniperion nanae* Br.-Bl. 1939 (*Empetretalia hermaphroditi* Schubert 1960) au pôle négatif de l'axe 1 pour les callunaies appauvries des crêtes déneigées et le *Genisto pilosae-Vaccinion uliginosi* Br.-Bl. 1926 (*Vaccinio myrtilli-Genistetalia pilosae* Schubert 1960) pour les vacciniaies. La callunaie xérophile distinguée ici au sein du *Juniperion nanae* se différencie des callunaies montagnardes (*Festuco filiformi-Callunetum vulgaris* Michalet et al, 1988) par la présence des espèces des *Caricetea curvulae*; le groupement est relativement proche du *Pulsatillo vernalis-Genistetum pilosae* Quézel et Rioux 1954 du Cantal.

L'ensemble des vacciniaies du *Genisto pilosae-Vaccinion uliginosi* a jusqu'alors été intégré au sein du *Gentiano luteae-Vaccinietum uliginosi* Br.-Bl. 1939 em. Quézel et Rioux 1950 par CUSSET et de LACHAPELLE (1961) et BOCK et PRELLI (1975). En fait, à côté de ce groupement de base colonisant le subalpin supérieur d'ubac on peut distinguer, à plus basse altitude et toujours dans des pentes convexes, une vacciniaie ouverte, proche du *Galio saxatili-Vaccinietum myrtilli* Michalet et al 1988 de l'étage montagnard de la Chaîne des Puys et dans des stations plus humides et moins acides, dans l'ensemble de l'étage, une lande herbeuse proche du *Luzulo desvauxii-Vaccinietum myrtilli* Carbiener 1966 des Vosges.

L'analyse 3, analyse des groupements ouverts

L'axe 1 étant un axe trophique et l'axe 2 un axe d'ouverture de la végétation, le plan 1-2 (figure 12) permet une bonne individualisation, d'une part aux pôles positif de l'axe 1 (niveau trophique faible) et négatif de l'axe 2 (fermeture importante, relativement à l'analyse) des landes à camarine relevant de l'*Empetro hermaphroditi-Vaccinietum uliginosi* Br.-Bl. in Br.-Bl. et Jenny 1926 (*Loiseleurio procumbentis-Vaccinion uliginosi* Br.-Bl. 1926) localisées sur des barres

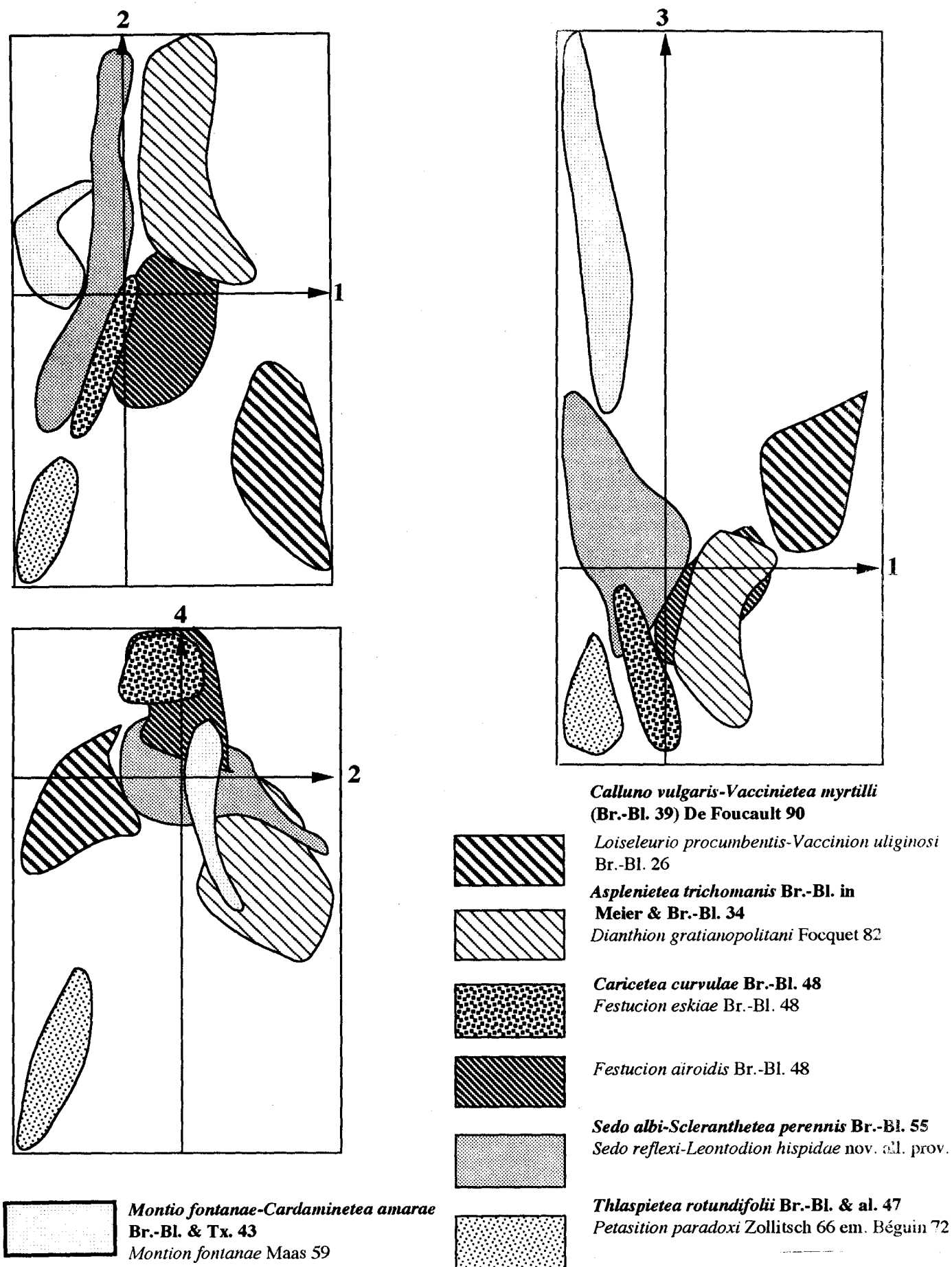


Figure 12.- Analyse factorielle des groupements ouverts (analyse 3), plans factoriels 1-2, 1-3 et 2-4, projection des relevés.

rocheuses à l'ubac du subalpin supérieur, d'autre part au pôle négatif de l'axe 1 d'un groupement assez dense et eutrophe colonisant des éboulis d'exposition sud-est alimentés par des flux hydrochimiques. Ce dernier groupement, dominé par *Sedum telephium*, *Rumex scutatus*, *Leontodon hispidus*, proche de l'*Anthyllido vulnerari-Leontodontetum hyoseroidis* (Fabijanowski 50) Zoller 1951 des Alpes, relèverait du *Petasition paradoxii* Zollitsch 1966 em. Beguin 1972 (*Thlaspietea rotundifolii* Br.-Bl. et al 1947). Au pôle positif de l'axe 2, s'isolent les groupements les plus ouverts et notamment, dans la partie positive de l'axe 1 en situation trophique peu favorable, les syntaxons de falaise relevant du *Dianthion gratianopolitani* Focquet 1982. Parmi ces groupements des *Asplenietea trichomanis* Br.-Bl. in Meier et Br.-Bl. 1934, on retrouve l'association cantalienne, le *Saxifragetum lamottei* Quézel et Rioux 1954 dans les versants nord et, dans les versants sud une association à *Helictotrichon sedenense* et *Seseli libanotis*, non différenciée de l'association précédente par Quézel et Rioux (1954) dans le Cantal.

Toujours au pôle positif de l'axe 2 mais en situation trophique plus favorable, s'individualise une pelouse pionnière très originale, dominée par *Poa violacea*, *P. alpina* et *Festuca airoides*, colonisant des éboulis cendreaux très fins en exposition ouest. Ce syntaxon, ainsi que trois autres plus en retrait sur l'axe 2 car plus fermés relèvent du *Sedo reflexi-Leontodion hispidae* nov. all. prov., intégrant les pelouses pionnières des *Sedo albi-Sclerenthetalia perennis* Br.-Bl. 1955 du subalpin sur roches volcaniques (MICHALET et PHILIPPE, 1993). L'ensemble de ces pelouses mésotrophes, caractérisées par leur richesse en diverses légumineuses (*Trifolium nivale*, *T. badium*, *T. pallescens*, *Lotus corniculatus*, *Anthyllis vulneraria*), *Poa alpina* et *Leontodon hispidus*, ont des affinités avec les pâtures du *Poion alpinae* Oberdorfer 1950 bien que le déterminisme de leur ouverture ne soit pas du tout anthropique. Elles sont également fortement infiltrées d'espèces affines du *Festucion airoidis* Br.-Bl. 1948 (*Androsace carnea*, *Luzula spicata*, *Festuca airoides*...), mais l'importance des espèces des situations trophiques favorables les éloignent de ces groupements acidiphiles ouverts des *Caricetea curvulae* (présentés plus loin) comme en témoigne leur place dans l'analyse factorielle (figure 12).

L'axe 3 illustrant le bilan hydrique, le plan 1-3 isole très nettement au pôle positif de l'axe 3 une pelouse pionnière hygrophile dominée par *Trifolium spadiceum* et *T. nivale* colonisant les suintements froids, au contact des groupements d'ubac du *Calamagrostidion arundinaceae* à la faveur d'arrachements ; ce groupement, rele-

vant du *Montion fontanae* Maas 1959, est moins hygrophile que l'*Epilobio alsinifolii-Montietum fontanae* (Br.-Bl. 26) De Foucault 1988, autre association fontinale décrite en Auvergne mais franchement localisée au bord de sources froides.

L'axe 4 est très intéressant car il oppose (partie positive) des groupements ouverts par la sénescence et l'érosion à de réels groupements pionniers développés sur des sols initiaux. Ainsi sur le plan 2-4, s'individualisent en haut de l'axe 4, d'une part une pelouse franchement acidiphile du *Festucion airoidis*, dominée par *Festuca airoides*, *Agrostis rupestris*, *Androsace carnea*, *Luzula spicata*, localisée au subalpin supérieur d'ubac sur des crêtes convexes piétinées par le passage des marcheurs et d'autre part une pelouse xérique acidiphile à *Festuca paniculata* localisée en exposition sud à sud-est dans des stations également convexes mais piétinées plutôt par des troupeaux. Nous avons intégré cette pelouse ouverte au sein du *Leucanthemo delarbrei-Festucetum paniculatae*, seule festucaie décrite dans le Cantal. Dans le Massif du Sancy cette pelouse semble résulter de l'érosion par le passage, dans des pentes fortes convexes, des festucaies plus fermées décrites précédemment dans l'analyse 2 ; la pelouse du *Festucion airoidis* est quant à elle plutôt générée par le piétinement des callunaies xéro-acidiphiles du *Juniperion nanae* ou des nardaies sommitales à *Agrostis rupestris* le long des sentiers.

LES UNITES CARTOGRAPHIQUES

Méthodologie

Les analyses précédentes ont montré l'extrême diversité de la végétation subalpine avec une organisation des groupements en mosaïque rendant illusoire toute tentative cartographique ayant pour finalité une représentation individuelle des divers syntaxons mis en évidence. En conséquence, nous avons opté pour une représentation d'unités écologiques paysagères basée sur les facteurs les plus discriminants à cet étage, à savoir par ordre d'importance, la topographie (degré et forme de la pente), l'exposition et l'altitude. En effet, les résultats précédents ont montré que la topographie conditionnait les flux hydrochimiques et par là même le niveau trophique (axe 1 de toutes les analyses) et le bilan hydrique (axe 2 de l'analyse 2 et axe 3 des analyses 1 et 3) des sols, l'exposition et l'altitude accentuant ou modérant ces flux. Le degré d'enneigement qui apparaît également comme étant un facteur essentiel de la biodiversité notamment pour les groupements acidiphiles (axe 3 de l'ana-

lyse 2), est bien sûr très dépendant des ces trois premiers facteurs. Enfin le degré d'ouverture des groupements (axe 2 des analyses 1 et 3) est conditionné en premier lieu par la topographie.

Si la délimitation d'unités topographiques est relativement aisée, il n'en est pas de même pour des unités basées sur des variables très progressives comme l'exposition et l'altitude. Pour l'altitude nous avons, après THEBAUD (1988) subdivisé l'étage en deux niveaux (voir introduction), subalpin inférieur et supérieur avec une transition autour de 1 650 m. Cette limite est bien sûr fictive et ce d'autant plus que les groupements sont peu corrélés à cette variable comme c'est le cas des nardaies. Le problème de l'exposition est encore plus épineux, dans la mesure où les écologues ont la fâcheuse habitude de simplifier son découpage en adret et ubac, l'exposition ouest étant classiquement regroupée au sein de l'adret avec le sud. Nous souscrivons à ce découpage d'un point de vue thermique, de par les durées d'insolation conditionnant également la couverture neigeuse, l'optimum écologique de la combe à neige se situant au nord-est et non pas au nord. Par contre, concernant l'humidité relative de l'air et en conséquence le bilan hydrique des sols par le biais de l'évapotranspiration, l'ouest nous paraît certainement relever de l'ubac. En effet, des espèces fondamentales au niveau de la structure paysagère et réputées électives des adrets comme *Festuca paniculata* et *Cytisus purgans*, sont rares en exposition ouest alors qu'elles abondent à l'est et sont encore présentes au nord-est. Cette opposition hydrique entre l'est et l'ouest est sans doute dépendante de la provenance des dépressions, occidentale dans le cas du Massif du Sancy. En conséquence, comme nous l'avons fait précédemment, nous réserverons les appellations d'ubac et d'adret aux oppositions thermiques (et nivales), les oppositions hydriques étant clarifiées dans le texte.

Chaque unité est dénommée écologiquement mais également physionomiquement par le groupement dominant l'unité paysagère. Nous distinguons ainsi des landes typiques, des landes herbeuses, des pelouses rases, des pelouses typiques, des pelouses denses, des mégaphorbiaies et des groupements arbustifs.

Trois unités complexes caractérisées par leur structure interne très mosaïquée, ont une simple appellation écologique, à savoir les combes à neige, les falaises nord et les falaises sud.

Lorsque les surfaces concernées se sont avérées suffisamment importantes, nous avons différencié au sein de certaines unités des cartouches réservés aux groupements pionniers et de

dégradation, en différenciant l'érosion naturelle liée à la pente excessive de l'érosion anthropique liée à la fréquentation des skieurs, voire des marcheurs. Dans le cas de surfaces trop restreintes, les groupements pionniers et de dégradation sont simplement cités dans le texte.

Pour chaque unité nous présentons une description physionomique (plantes dominantes), syntaxonomique (alliance et/ou association si elle est déjà décrite), écologique ainsi qu'une liste très restreinte des espèces remarquables (stations rares à très rares sur le massif).

Les landes

Les quatre espèces édifiatrices de landes basses présentes sur le massif ont chacune leurs propres exigences écologiques. Schématiquement *Vaccinium uliginosum* et surtout *Empetrum hermaphroditum* sont avant tout psychrophiles, dominant en ubac et supportant très bien un faible enneigement ; elles sont par contre absentes sur les sols frais et actifs (riches en azote minéral). *Vaccinium myrtillus*, plus exigeante thermiquement, est rare sur les crêtes et dans les versants ouest déneigés et supporte le mieux l'enneigement prolongé, s'aventurant jusqu'au fond des combes à neige ; elle est également très présente en exposition sud-est, infiltrant les pelouses à *Festuca paniculata* et supporte par ailleurs mieux les sols frais et actifs en compagnie de *Calamagrostis arundinacea*. *Calluna vulgaris* est l'espèce des conditions extrêmes, supportant les conditions les plus xériques (croupes convexes du sud-ouest au sud-est) en compagnie de *Juniperus nana* et *Genista pilosa*, les crêtes froides et déneigées avec *Vaccinium uliginosum*, les sols hydromorphes avec la molinie et *Scirpus cespitosus*. Elle est par contre rigoureusement éliminée des sols frais très actifs et des stations enneigées. Il faut citer également la présence rarissime de *Vaccinium vitis-idaea*, que nous avons découvert dans une unique station à l'ouest du massif.

1. Les landes mésophiles et acidiphiles à *Vaccinium uliginosum* et/ou *Empetrum hermaphroditum* des pentes convexes du subalpin supérieur d'ubac.

Cette unité est largement dominée par une lande fermée mixte à *Vaccinium uliginosum*, *V. myrtillus* et secondairement *Calluna vulgaris*, occupant l'ensemble des pentes convexes de l'ubac du subalpin supérieur ; cette lande relève d'une sous-association mésophile à *Phyteuma hemisphaericum* du *Gentiano luteae-Vaccinietum uliginosi*. Plus rarement, sur des

barres rocheuses colonisées par des sols très acides légèrement tourbeux, la vacciniaie est remplacée par une lande à camarine plus rase et plus ouverte, l'*Empetro hermaphroditi-Vaccinietum uliginosi*. Sur les hauts de versant les plus convexes (peu enneigés) c'est une callunaie, du *Juniperion nanae*, à *Vaccinium uliginosum* et peu de *V. myrtillus*, très pauvre, plus rase et souvent plus ouverte, qui remplace la vacciniaie plus mésophile.

Ces trois landes sont caractérisées par une faible couverture herbacée dominée par des espèces franchement subalpines, *Pulsatilla alpina*, *Phyteuma hemisphaericum*, *Avenula versicolor* et *Ligusticum mutellina* (peu abondante mais différentielle du subalpin supérieur). La callunaie héberge *Agrostis rupestris* et le rare *Carex vaginata* (Puy Ferrand) ; la lande à camarine est infiltrée d'espèces des milieux ouverts, *Festuca airoides*, *Cerastium alpinum*, *Lycopodium selago* et les très rares *Diphysium alpinum* et *Salix herbacea* (Puy Ferrand).

Le long des sentiers, sur les crêtes, notamment entre le Puy Ferrand et le col de la Cabanne, le piétinement de la callunaie inhibe le développement des ligneux pour induire un groupement ouvert, de dégradation mais typiquement alpin relevant du *Festucion airoidis* et hébergeant *Alchemilla alpina*, *Euphrasia minima*, *Sesamoides pygmaea*, *Luzula spicata*, *Androsace carnea*, le rare *Jasione crispa* subsp. *arvernensis* et le très rare *Carex curvula*.

2. Les landes mésophiles et acidiphiles à *Vaccinium uliginosum* des pentes convexes du subalpin inférieur d'ubac

Cette unité particulièrement développée sur le Plateau de Durbise comprend une seule lande mixte à *Vaccinium uliginosum* et *V. myrtillus*, se différenciant de celles de l'unité précédente par l'absence des espèces d'altitude, la présence de *Melampyrum pratense*, *Dianthus sylvaticus*, *Maianthemum convallaria*, *Polygonum bistorta*, *Potentilla erecta* et la pénétration des espèces de la nardaie, *Nardus stricta*, *Selinum pyrenaicum*, *Luzula erecta*, *Carex caryophylla*, *Agrostis capillaris*, *Festuca rubra* s.l. et surtout *Galium saxatile*. Quelques espèces forestières infiltrent également la lande, *Sorbus aucuparia* et *Anemone nemorosa*. La coexistence de ces dernières avec les espèces de la nardaie s'explique par la structure de la lande, globalement fermée mais entaillée par d'étroites bandes créées par le passage des moutons. En effet, les pentes plus douces du subalpin inférieur sont largement pâturées et les landes et les nardaies y sont étroitement intriquées en mosaïque en fonction de la topographie et de la pression pastorale.

Etant donnée l'altitude favorable à une reprise de la dynamique et l'abandon du pâturage, les landes sont envahies par les espèces forestières ; néanmoins étant encore traversées et entaillées par les moutons, les espèces de la nardaie s'y installent. C'est là une caractéristique structurale dépendante du pâturage extensif, que l'on observe également dans les landes de l'étage montagnard de la Chaîne des Puys (MICHALET *et al.*, 1988).

3. Les landes herbeuses méso-hygrophiles et acidoclines à *Vaccinium myrtillus* et luzules (*L. desvauxii* et *L. sylvatica*) des pentes faiblement concaves d'ubac

Ces landes très denses et riches en graminées mésophiles (*Festuca rubra* s.l. et *Poa chaixii*) se développent dans l'ensemble de l'étage subalpin sur des sols moins acides et nettement plus frais à la faveur d'apports hydrochimiques, soit en situation topographique légèrement concave, soit en situation plus convexe sous un amont rocheux. Ces stations sont bien sûr plus abondantes à topographie égale en exposition nord-ouest, la plus humide. Ces landes sont plus pauvres en *Vaccinium uliginosum* et *Calluna vulgaris* y est généralement absent. On peut distinguer au sein de cette unité deux sous-types altitudinaux :

- au subalpin supérieur, la lande, particulièrement bien développée sur les pentes nord-ouest du Puy Gros, relève d'une sous-association méso-hygrophile à *Luzula desvauxii* du *Gentiano luteae-Vaccinietum uliginosi* ; elle est largement infiltrée par les espèces alticoles, notamment *Melampyrum sylvaticum*, *Avenula versicolor* et surtout *Ligusticum mutellina* (très abondante) mais également par des espèces de la luzulaie, *Luzula desvauxii*, *Geum montanum* et même *Adenostyles alliariae*. Localement sur des barres rocheuses suitantes, colonisées par des sols franchement tourbeux, le groupement est remplacé par une lande à camarine et *Salix bicolor*. De par la durée de l'enneigement à cet étage aucune dynamique forestière n'y est décelable actuellement.

- au subalpin inférieur, la lande, relevant d'une association à *Calamagrostis arundinacea* et *Vaccinium myrtillus*, se différencie de la précédente par l'absence des espèces alticoles et surtout par l'abondance des espèces de lisières affines du *Calamagrostidion arundinaceae*, *Calamagrostis arundinacea*, *Geranium sylvaticum*, *Ranunculus platanifolius*, *Lathyrus montanus*, *Euphorbia hyberna*, *Allium victorale* et surtout *Luzula sylvatica*. Les potentialités dynamiques de ce groupement semblent importantes comme l'indiquent la présence de jeunes sorbiers des oiseleurs, ainsi que d'autres espèces

forestières. Cette lande occupe une grande partie des basses altitudes d'exposition nord du cirque du Sancy.

4. Les landes xéro-acidiphiles à *Calluna vulgaris* et *Genista pilosa* des pentes convexes deneigées (versants ouest et crêtes d'adret)

Ces landes du *Juniperion nanae*, très pauvres et dominées par *Calluna vulgaris* et *Genista pilosa* se développent dans l'ensemble de l'étage dans les stations deneigées très précocement. C'est le cas dans les versants droits à convexes exposés à l'ouest et au sud-ouest, essentiellement au subalpin inférieur et surtout dans la partie septentrionale du massif (Puy de la Tache), ou sur des crêtes très convexes à l'adret du subalpin supérieur, en compagnie du genévrier nain (Puy Gros et Puy de Sancy). Dans ces deux situations xériques et acides, ces landes remplacent les pelouses à *Festuca paniculata*, cette fétuque ne pouvant coloniser, d'une part les sols trop enrochés (contrairement à *Festuca acuminata* dans les Alpes), d'autre part les versants ouest hygrométriquement très humides. Nous avons également inclu dans cette unité cartographique une callunaie peu répandue, assez semblable physionomiquement (mis à part l'absence de *Genista pilosa*) mais à déterminisme fort différent ; ce groupement très pauvre floristiquement, se développe sur tourbes acides asséchées, colonisant des barres rocheuses plates au subalpin inférieur, essentiellement dans le cirque de Super-Besse. Le groupement relevant du *Scirpo cespitosi-Callunetum vulgaris*, association décrite par THEBAUD (1988) dans le Forez sur des replats rabotés des Hautes-Chaumes se différencie par la présence de *Molinia caerulea* et *Scirpus cespitosus*.

Les pelouses basses et acides

Ces groupements herbacés de faibles hauteur et productivité sont généralement dominés par *Nardus stricta*, à laquelle s'ajoutent, *Deschampsia flexuosa*, *Agrostis capillaris*, *Leontodon pyrenaicus*, *Galium saxatile* et en situations mésophiles *Festuca rubra s.l.*, en situations plus xérophiles *Festuca lemanii*. Néanmoins ces pelouses, toujours développées dans des stations de pente douce sur sols tassés acides, sont très uniformisées par la pression pastorale, qui tamponne les facteurs physico-chimiques les déterminant.

1. Les pelouses rases mésophiles et acidiphiles à *Nardus stricta*, *Agrostis rupestris* et *Festuca rubra s.l.* des sommets plats du subalpin supérieur

Ces pelouses franchement mésophiles colonisant les replats sommitaux et pentes très douces d'ubac du subalpin supérieur (Puy Ferrand et Puy de la Perdrix), situations toujours bien enneigées, sont assez proches floristiquement des nardaies de combes à neige (*Plantagini alpinae-Nardetum strictae* Luquet 1926). Néanmoins, elles s'en différencient par la pénétration de quelques espèces plus xéro-acidiphiles et préférantes du *Festucion airoidis*, *Agrostis rupestris*, *Euphrasia minima*, *Avenula versicolor*, *Calluna vulgaris* et par l'absence des méso-hygrophiles.

2. Les pelouses rases mésophiles acidiphiles à *Nardus stricta* et *Festuca rubra s.l.* des pentes douces d'ubac du subalpin inférieur

Ces pelouses, très appauvries par le pâturage extensif et relevant d'une sous-association à *Selinum pyrenaicum* du *Nardeto strictae-Festucetum rubrae*, sont intriquées en mosaïque avec la lande précédemment décrite en 2. (Plateau de Durbise). De par la pression pastorale, elles sont proches floristiquement des nardaies d'adret du même étage (voir plus loin), s'en différenciant notamment par la présence de *Selinum pyrenaicum*.

3. Les pelouses mésophiles acidiphiles à *Nardus stricta* et *Festuca paniculata* des pentes douces d'adret du subalpin supérieur

Ces pelouses, relevant d'une sous-association à *Festuca paniculata* du *Nardeto strictae-Festucetum rubrae*, globalement rases mais piquetées de *Festuca paniculata*, sont à leur optimum en exposition sud-est à sud où elles remplacent dans les pentes douces les pelouses plus denses du *Festucion eskiae*. Elles se différencient des nardaies d'ubac précédemment décrites par la pénétration discrète des espèces du *Festucion eskiae* (faces sud des puys de la Perdrix et du Ferrand), outre *Festuca paniculata*, *Campanula recta*, *Senecio doronicum* et *Crepis conyzifolia*. L'unité déborde légèrement en exposition sud-ouest (entre le Puy de Clergie et la Tour carrée) où devenant plus mésophile et moins chionophile, elle tend vers une pelouse à *Festuca rubra s.l.* et *Pedicularis foliosa* décrite plus loin en 2, dans les pelouses hautes. De par le meilleur bilan hydrique du groupement, le pâturage y devient plus intensif, les bovins remplacent les ovins et le nard tend à disparaître ainsi que *Festuca paniculata*.

4. Les pelouses méso-xérophiles acidiphiles à *Nardus stricta* et *Festuca lemanii* des pentes douces d'adret du subalpin inférieur.

Ces nardaies, particulièrement abondantes sur la Plaine des Moutons et au sud du Puy de Paillaret, du Puy Gros et du Mont Redon, sont très appauvries par le pâturage ovin extensif ; elles sont très proches floristiquement des nardaies de l'ubac du même étage mais s'en différencient néanmoins par la présence d'espèces thermophiles et xérophiles à méso-xérophiles, *Festuca lemanii* (très abondante), *Achillea millefolium*, *Thymus gr. serpyllum*, *Thesium alpinum*, *Senecio adonidifolius*, *Jasione perennis* et *Genista pilosa* qui tend à envahir la nardaie avec *Calluna vulgaris*.

Les pelouses hautes et les groupements à hautes herbes

Ces formations herbacées peuvent être regroupées non seulement par leur structure physiologique mais également par certaines exigences écologiques communes, essentiellement des sols profonds et bien aérés, non carbonatés mais d'un niveau trophique suffisant. De par la forte altérabilité des roches volcaniques, les potentialités climatiques de la zone et la raideur des versants, ces formations sont particulièrement abondantes sur le Massif du Sancy lui donnant ainsi une de ses plus grandes originalités paysagères et écologiques. En effet, dans le Cantal ces formations sont moins répandues, le climat y étant plus sec, surtout à l'est et les pentes plus douces. C'est le cas également dans le Forez, massif cristallin à versants peu pentus où les sols sont moins profonds, plus sableux et surtout plus acides.

Deux espèces fondamentales structurent les groupements, *Festuca paniculata* et *Calamagrostis arundinacea*, auxquelles il faut rajouter secondairement, *Cicerbita plumieri*, *C. alpina*, *Ranunculus platanifolius* et *Rumex alpinus* dans certaines stations. Les aires écologiques de ces deux premières espèces se recouvrent largement dans un continuum physiologique qui a amené quelques auteurs à ranger des groupements écologiquement et dynamiquement très différents au sein d'une même association, le *Senecio doronici-Calamagrostietum arundinaceae*. Si ces deux espèces se mélangent dans des stations intermédiaires, on peut néanmoins préciser leurs propres exigences écologiques.

- *Festuca paniculata*, présente dans l'ensemble de l'étage subalpin et même au sommet du montagnard, est une espèce affectionnant les sols profonds et aérés et les atmosphères sèches, sa xérophilie n'étant qu'atmosphérique. Elle fuit donc les sols enrochés ou très pierreux et les

expositions nord-ouest et ouest. Elle est rare au nord et au sud-ouest, son optimum se situant au sud-est et à l'est. Elle n'est donc pas thermophile et peut être considérée comme indifférente à l'enneigement. Elle supporte bien l'acidité mais aussi les sols très actifs. Elle est par ailleurs éliminée des groupements très hygrophiles, type mégaphorbiaie.

- *Calamagrostis arundinacea*, présente en toute exposition, est donc relativement indifférente à la température et au degré d'humidité de l'air. Par contre, ne supportant par un enneigement important, elle est peu répandue à l'étage subalpin supérieur où elle est remplacée par *Luzula desvauxii*. C'est une espèce mésophile à méso-hygrophile, plus exigeante en eau que la fétuque. Elle est donc absente des sols secs mais également peu répandue dans les groupements les plus hygrophiles. Elle semble un peu plus exigeante que la fétuque au niveau trophique qui colonisera seule les stations méso-xérophiles acidiphiles exposées au sud et à l'est. Inversement *Calamagrostis arundinacea* est seule dans les stations méso-hygrophiles exposées à l'ouest et au nord-ouest.

1. Les pelouses méso-xérophiles et acidiphiles à *Festuca paniculata* des pentes convexes d'exposition sud et est

Ces pelouses relativement denses, sont présentes dans l'ensemble de l'étage, abondantes sur les puys Gros, de Paillaret, de l'Angle et de Monne. Elles relèvent toutes d'une association à *Festuca paniculata* et *Arnica montana* du *Festucion eskiae* (MICHALET et PHILIPPE, 1993), sont dominées par *Festuca paniculata*, à laquelle s'ajoutent *Festuca lemanii*, *Serratula tinctoria*, *Senecio doronicum*, *Campanula recta*, *Crepis conyzifolia*, *Potentilla erecta*, *Meum athamanticum*, *Centaurea nigra*, *Gentiana lutea*, *Arnica montana*, *Leontodon pyrenaicus* et *Vaccinium myrtillus* très abondante à l'est et au sud-est. Au subalpin inférieur le groupement, plus xérophile, est nettement infiltré de *Calluna vulgaris*, *Genista pilosa* et secondairement *Achillea millefolium* et *Gentiana pneumonanthe*. Au subalpin supérieur, du fait de l'enneigement plus important, le groupement est plus ouvert et se différencie par la présence de *Trifolium alpinum*, *Omalotheca norvegica*, *Jasione perennis* et *Thlaspi alpestre*. D'autre part dans l'ensemble de l'étage une transition s'effectue aisément avec l'unité suivante, en situation légèrement plus mésophile à la faveur d'un faible changement topographique ou simplement en exposition sud-ouest (puys Gros et de Paillaret) ; les espèces acidiphiles persistent mais se mélangent à quelques différentielles plus mésophiles encore peu abondantes, *Calamagrostis*

arundinacea, *Euphorbia hyberna*, *Astrantia major*, *Geranium sylvaticum*, *Trollius europaeus*, *Lilium martago* et *Laserpitium latifolium*. L'érosion de ces groupements, dépendant essentiellement de la fréquentation animale en situation de pente forte sous les crêtes, entraîne l'ouverture de la pelouse et la pénétration de *Silene rupestris*, *Linaria repens*, *Sesamoides pygmaea*, *Jasione perennis*, *Senecio adonidifolius*, *Thymus serpyllum*, *Biscutella lamottei* et *Chamaespartium sagittale* au sein du ***Leucanthemo delarbrei-Festucetum paniculatae***.

2. Les pelouses denses mésophiles à méso-hygrophiles et acidoclines à *Calamagrostis arundinacea* et *Festuca paniculata* des pentes concaves d'adret

Cette unité est la plus diversifiée du massif, couvrant les pentes fortes concaves de l'ensemble de l'étage subalpin de l'ouest à l'est en passant par le sud. Ces pelouses, très riches floristiquement, sont physionomiquement structurées par, outre les deux graminées, *Euphorbia hyberna*, *Astrantia major*, *Geranium sylvaticum*, *Lilium martago*, *Laserpitium latifolium*, *Senecio doronicum*, *Centaurea montana*, *Hieracium prenanthoides*, *Campanula glomerata*, *Silene vulgaris*, *Phyteuma spicatum*.

A l'étage subalpin inférieur les pelouses sont très denses, les potentialités dynamiques étant, dans cette situation écologique, optimales pour l'ensemble de la partie subalpine ; on distingue à ce niveau deux groupements : plutôt au sud et à l'ouest et sur sols très profonds non pierreux, se développe une association à *Calamagrostis arundinacea* et *Cirsium erisithales* franchement méso-hygrophile et relevant du ***Calamagrostidion arundinaceae***, plutôt à l'est et au sud-est et sur sols plus secs et pierreux (sous falaise), s'installe une autre association à *Festuca paniculata* et *Vicia orobus* relevant du ***Festucion eskiae***. Le premier groupement, bien représenté dans le cirque de la Fontaine Salée, franchement eutrophe et à physionomie de mégaphorbiaie est riche en espèces prairiales et/ou méso-hygrophiles, *Heracleum sphondylium*, *Lathyrus pratensis*, *Silene dioica*, *Dactylis glomerata*, *Arrhenatherum elatius*, *Poa nemoralis*, *Epilobium alpestre*, *Trisetum flavescens*, *Peucedanum ostruthium*, *Cirsium erisithales*, *Knautia sylvatica*, *Aconitum vulparia* et *Rumex arifolius*. Le second, très abondant dans le cirque de Chaudefour, plus mésophile et acidocline, moins thermophile se différencie par la rareté des prairiales et la présence d'espèces affines des lisières acidoclines ainsi que de quelques psychrophiles, *Vicia orobus*, *Stellaria holostea*, *Pimpinella major*, *Galium mollugo*, *Convallaria*

majalis, *Polygonatum verticillatum*, *Allium victorale*, *Ranunculus platanifolius*, *Cicerbita plumieri* et *Bupleurum longifolium*. Dans ces pentes fortes l'érosion naturelle fréquente entraîne un rajeunissement des sols et l'apparition, soit de groupements pionniers mésophiles relevant du ***Sedo reflexi-Leontodion hispidae*** et dominés par *Leontodon hispidus* et *Luzula desvauxii* soit de groupements d'éboulis relevant du ***Petasition paradoxi***.

Au subalpin supérieur les potentialités dynamiques étant fortement réduites par l'enneigement, les pelouses sont moins denses et du fait de l'affaiblissement des apports à proximité des crêtes, plus acidiphiles. Les pelouses, très mésophiles et plus enneigées, sont fortement infiltrées par les espèces du ***Luzulion desvauxii*** et des prairiales basses, *Pedicularis foliosa*, *Ranunculus nemorosus*, *Trollius europaeus*, *Avenula pubescens*, *Festuca rubra s.l.*, *Alchemilla xanthochlora*, *Meum athamanticum*, *Pulsatilla alpina* subsp. *apiifolia*. A l'est et au sud (Val de Courre et cirque de la Fontaine Salée), où *Festuca paniculata* est bien présente, se développe une association à *Festuca paniculata* et *Pedicularis foliosa*, relevant du ***Festucion eskiae*** ; à l'ouest et au sud-ouest (Puy de Cacadoigne et Roc de Cuzeau) où *Festuca paniculata* est rare, une association du ***Nardion strictae***, dominée par *Festuca rubra s.l.*, remplace le précédent groupement dans la même situation topographique, toujours avec *Pedicularis foliosa*. Dans les deux groupements *Calamagrostis arundinacea* reste discret. L'ouverture des pelouses, engendrée par l'érosion naturelle ou la fréquentation, permet la pénétration d'héliophiles mésophiles à méso-xérophiles, *Seseli libanotis*, *Leontodon hispidus*, *Thymus gr. serpyllum*, *Trifolium nivale*, *Gentiana campestris* et *Botrychium lunaria*, au sein de groupements du ***Sedo reflexi-Leontodion hispidae***, où *Avenula pubescens* est très abondante.

3. Les pelouses denses méso-hygrophiles acidoclines à *Calamagrostis arundinacea* des pentes concaves du subalpin inférieur d'ubac

Ces groupements de hautes herbes méso-hygrophiles d'ubac sont essentiellement localisés à l'étage subalpin inférieur ; ils débordent légèrement au subalpin supérieur dans les versants des combes à neige, sous la forme d'autres groupements plus chionophiles, de plus faible hauteur, que nous avons inclus dans l'unité complexe des combes à neige. Le groupement caractérisant l'unité, est une association à *Calamagrostis arundinacea* et *Luzula sylvatica*, dominée physionomiquement par *Calamagrostis arundinacea*, *Euphorbia hyberna*, *Polygonum bistorta*, *Rumex arifolius*, *Geranium sylvaticum*,

Ranunculus platanifolius, *Festuca rubra* s.l., *Allium victorialis*, *Lathyrus montanus*, *Adenostyles alliariae*, *Rosa pendulina* et *Luzula sylvatica*. En exposition ouest et nord-ouest (Val de Courre), la pelouse est plus hygrophile et s'enrichit en *Aconitum napellus*, *Sanguisorba major*, *Alchemilla xanthochlora*, l'adénostyle devenant plus abondant. Inversement en exposition est et nord-est (Vallée de Chaudefour), les mésophiles sont plus abondantes, *Silene vulgaris*, *Laserpitium latifolium* et *Senecio doronicum*. Dans les zones érodées suintantes, très abondantes au sein de cette unité (Val d'Enfer et Vallée de Chaudefour), s'installe une association du **Montion fontanae** Maas 59, dominée par *Trifolium spadiceum* et *T. nivale*, hébergeant des espèces peu répandues sur le massif, *Sedum villosum*, *Parnassia palustris*, *Pinguicula vulgaris*, *Epilobium alsinifolium*, *Sedum hirsutum* et *Sagina saginoides*.

4. Les mégaphorbiaies des vallons concaves sous falaises du subalpin inférieur.

Ces formations à hautes herbes hygrophiles et à sol très actif se développent toujours dans des situations d'apports hydrochimiques importants, dans des vallons concaves ruisselants sous des falaises ou à la base de grands versants sur éboulis (Vallée de Chaudefour, cirques du Sancy et de la Fontaine Salée). Elles n'existent qu'au subalpin inférieur mais se prolongent dans l'étage montagnard et ce en toutes expositions, bien que plus abondantes de l'ouest au nord-est en passant par le nord. Le groupement, le **Cicerbito alpinae-Adenostyletum alliariae**, est assez homogène floristiquement avec *Adenostyles alliariae*, *Cicerbita alpina*, *Chaerophyllum villarsii*, *Silene dioica*, *Dactylis glomerata*, *Epilobium alpestre*, *Alchemilla xanthochlora*, *Rumex arifolius*, *Peucedanum ostruthium*, *Luzula desvauxii* ; néanmoins on peut distinguer une sous-association moins hygrophile localisée dans les versants est, dominée très nettement par *Rumex alpinus*, à laquelle s'ajoute l'abondance de *Ranunculus platanifolius* et dans les versants ouest, une sous-association franchement hygrophile, se différenciant par la présence de *Saxifraga rotundifolia*, *Primula elatior* et *Aconitum napellus*.

Les saulaies hygrophiles acidoclines à *Salix lapponum* des vallons de pente

Ces formations arbustives très denses rattachant les formations à aulne vert des Alpes humides se développent dans des vallons ruisselants de pente sur des sols moins actifs (faiblement tourbeux) que les mégaphorbiaies, situées toujours en position d'apport. *Salix*

lapponum domine toujours le groupement en compagnie de *Salix bicolor*. La flore herbacée, relativement pauvre est essentiellement composée d'hygrophiles du **Luzulion desvauxii** ainsi que de *Pyrola rotundifolia* et *Orthilia secunda*. Ces saulaies sont très abondantes dans le cirque de la Fontaine Salée.

Les combes à neige

Elles sont essentiellement développées en exposition nord-est à l'étage subalpin supérieur, intégrant plusieurs groupements herbacés très différents phytosociologiquement et ayant chacun une place écologique bien précise au sein de ce complexe chionophile :

- dans le fond plat des combes peu pentues, sur sol acide hydromorphe (stagnogley podzolique), une nardaie hygrophile, le **Plantagini alpinae-Nardetum strictae** se différenciant de la nardaie mésophile et acidophile par la présence de *Veratrum album*, *Narcissus pseudonarcissus* et *Viola palustris*.

- dans la partie centrale des combes à neige de pentes, une pelouse rase mais continue à *Agrostis rupestris*, relevant d'une association à *Agrostis rupestris* et *Plantago alpina* du **Salicion herbaceae**. Localement sur des buttes convexes, sur sol peu évolué de type ranker très superficiel et peu organique, la pelouse s'écorche pour héberger le rare *Omalotheca supina* et également *Saxifraga stellaris* et *Euphrasia minima*.

- dans les étroits couloirs d'éboulis ruisselants, une pelouse très dense mais de faible hauteur très nettement dominée par *Luzula desvauxii* et secondairement *Veratrum album*. Ce groupement acidocline hygrophile du **Luzulion desvauxii** héberge *Ligusticum mutellina*, *Geum montanum* et *Potentilla aurea*.

- dans les versants plus convexes, une pelouse dense à aspect prairial, acidocline et dominée par *Ranunculus nemorosus*, *Geranium sylvaticum*, *Trollius europaeus*, *Ligusticum mutellina*, *Festuca rubra* s.l., *Geum montanum*, *Knautia godetti*, *Alchemilla xanthochlora* et *Pedicularis foliosa* ; cette association caractérisée par *Trollius europaeus* et *Ranunculus nemorosus* relève également du **Luzulion desvauxii**.

Dans les combes à neige très pentues, comme au cirque de Chaudefour, l'érosion importante élimine les groupements stables et seuls persistent les couloirs à *Luzula desvauxii*, ainsi que quelques pelouses pionnières chionophiles

dominées par *Agrostis rupestris*, *Lotus corniculatus*, *Leontodon hispidus*, *Hieracium lactucella* relevant du *Sedo reflexi-Leontodion hispidae*. Dans la vaste combe à neige du Sancy, l'érosion très importante générée par la fréquentation des skieurs et des marcheurs entraîne l'ouverture des pelouses à *Agrostis rupestris* ou à *Nardus stricta* et la pénétration d'espèces pionnières acidiphiles et plus méso-xérophiles, *Sesamoides pygmaea*, *Luzula spicata*, *Alchemilla alpina* et *Silene rupestris*, favorisant l'installation d'une agrostidaie de dégradation proche de la pelouse du *Festucion airoidis* décrite plus haut.

Les falaises d'ubac

Ces stations sont colonisées par le *Saxifragetum lamottei*, relevant du *Dianthion gratianopolitani*. On peut distinguer dans cet ensemble un groupement principal, affectonnant les falaises un peu suintantes, hébergeant *Saxifraga bryoides*, *S. stellaris*, les rares *Sedum alpestre* et *Arabis alpina* et un groupement plus rare développé sur des corniches plus sèches et surtout plus acides, hébergeant *Lycopodium selago*, *Euphrasia minima*, *Luzula spicata*, *Gentiana verna*, *Saxifraga continentalis*, *Soldanella alpina*, les rares *Jasione crispa* subsp. *arvernensis*, *Saxifraga moschata* subsp. *lamottei*, *Polygonum viviparum*, et les très rares *Dryas octopetala* et surtout *Silene ciliata* (une seule station, sous le sommet du Puy de Cacadoigne). Les espèces communes aux deux groupements (et également aux falaises d'adret) sont *Festuca airoides*, *Androsace carnea*, *Valeriana tripteris*, *Phyteuma hemisphaericum*, *Saxifraga paniculata*, *Dianthus gratianopolitanus*, *Cerastium alpinum*, *Minuartia verna* et *Poa nemoralis* var. *glauca*.

Les falaises d'adret

Le groupement saxicole dominant cette unité est une association à *Seseli libanotis* et *Helictotrichon sedenense*, se présentant comme une pelouse de corniche, très ouverte et dominée par *Helictotrichon sedenense* et *Festuca airoides*. Les espèces caractéristiques de ces falaises d'adret sont *Seseli libanotis*, *Trifolium pallescens*, *Jasione perennis*, *Scabiosa columbaria*, *Festuca lemanii*, *Thymus gr. serpyllum* et les rares *Veronica fruticulosa*, *Sempervivum arachnoideum* et *Erigeron alpinus*.

Nous avons intégré également dans cette unité cartographique une pelouse pionnière très ouverte peu répandue et colonisant des falaises

de cendres très érodées uniquement localisées en exposition ouest dans le ravin des Crebasses. Cette association très originale à *Poa violacea* et *Festuca airoides*, relevant du *Sedo reflexi-Leontodion hispidae*, comprend en mélange, des espèces abondantes dans les groupements saxicoles, *Dianthus gratianopolitanus*, *Cerastium alpinum*, *Minuartia verna*, *Festuca airoides*, *Trifolium pallescens*, *Luzula spicata* et des espèces du *Sedo reflexi-Leontodion hispidae*, *Leontodon hispidus*, *Trifolium nivale*, *Trifolium badium*, *Jasione perennis*, *Biscutella lamottei*, *Linaria repens* ; mais il est surtout caractérisé par la présence et l'abondance de *Poa alpina*, du rare *Poa violacea*, et d'*Anthyllis vulneraria*, *Pedicularis comosa* et *Scabiosa columbaria*.

LES TOURBIÈRES (P. JULVE)

La tourbe se crée dans les lieux où le bilan hydrique résultant des précipitations, ruissellements, infiltrations et évapotranspirations est positif, au moins à certaines périodes de l'année et reste équilibré en moyenne annuelle. Le facteur température n'intervient surtout que par ses excès : une température trop élevée favorise la minéralisation de la matière organique, alors qu'une température trop faible réduit substantiellement la production de biomasse. Ceci explique que les plus grandes surfaces tourbeuses soient réalisées sous trois types de climats : dans les zones boréales, dans les zones océaniques, et à l'étage montagnard de toutes les montagnes. Dans le Massif du Sancy et ses alentours, on trouvera donc les plus grandes surfaces de tourbières entre 800 et 1 450 mètres d'altitude, soit aux étages collinéen supérieur (= submontagnard) et montagnard.

En fonction des modes d'accumulation de l'eau on peut distinguer à l'échelle mondiale quatre grands types de tourbières :

- les tourbières topogènes prennent naissance à partir de l'accumulation d'eau dans une dépression (lac, étang, mare...).
- les tourbières soligènes sont issues du ruissellement continu de l'eau, le long d'une pente, à partir de sources ou de la fonte des neiges.
- les tourbières limnogènes se créent dans les zones alluviales des rivières, en arrière du bourrelet d'alluvionnement.
- les tourbières ombrogènes sont indépendantes de la topographie et se développent en conséquence d'une pluviométrie très élevée et

régulière, ou dans une ambiance à hygrométrie élevée et permanente.

Seuls les deux premiers types sont bien représentés dans le Massif du Sancy, les tourbières soligènes étant les plus fréquentes par suite de la pente de la plupart des parties du massif. Elles sont quasi exclusives à l'étage subalpin, et encore dominantes à l'étage montagnard. Sur les plateaux du Cézallier et de l'Artense, plus au sud, de nombreux lacs de surcreusements glaciaires ont permis le développement d'importantes surfaces de tourbières topogènes.

Il convient de ne pas confondre mode de création d'une tourbière et mode de nutrition de certains stades dynamiques. En effet la plupart des tourbières initiales à mode d'alimentation géotrophe (= minérotrophe) peuvent se développer dynamiquement, après accumulation de tourbe, en un stade ombrotrophe constitué fréquemment par des buttes ponctuelles seulement alimentées par l'eau de pluie, dispersées dans une végétation spatiale encore en contact avec le substrat minéral.

La nature des roches mères du substrat (plus ou moins riches en bases), l'influence du pâturage (piétinement, eutrophisation) et les apports latéraux par ruissellement sont également des facteurs écologiques susceptibles d'influencer localement les tourbières et de se répercuter sur la flore typique les caractérisant.

Peu de travaux récents portant sur la région Auvergne sont disponibles au sujet des tourbières, exception faite de rapports et travaux à diffusion très restreinte. Quant aux tourbières des zones sommitales sur matériaux volcaniques, il semble bien qu'elles n'aient pas fait l'objet de publication d'importance jusqu'à ce jour... Le lecteur intéressé pourra se reporter aux publications suivantes : BRAUN-BLANQUET et DENIS, 1926 ; LUQUET, 1926 ; CHASSAGNE et DENIS, 1927 ; BATISSE, 1930 ; LEMEE, 1940, 1945 ; JULVE, 1983 ; BILLY, 1988 ; THEBAUD, 1988.

L'ETAGE MONTAGNARD

Dans le Massif du Sancy, cet étage se cantonne globalement aux altitudes inférieures à 1 450 m. On rencontre à ce niveau des tourbières soligènes, sur les pentes non boisées généralement plus ou moins pâturées de manière extensive, et des tourbières topogènes, prenant naissance à partir des petits étangs et lacs qui se créent dans des dépressions d'origines diverses, parfois même de création humaine.

Les tourbières topogènes

Dans l'eau des étangs peu profonds (de l'ordre d'un ou quelques mètres), existe généralement une végétation aquatique dont la dégradation entraîne partiellement l'accumulation d'une vase de fond plus ou moins organique (gyttja), que l'on peut considérer comme un stade précurseur non encore tourbeux à proprement parler. Cette végétation comprend généralement *Potamogeton natans*, *P. polygonifolius*, parfois quelques nénuphars.

Les bords d'étangs vaseux, montrent un groupement à *Alisma natans*, *Menyanthes trifoliata*, *Juncus bulbosus* et *Glyceria fluitans*. Quand les conditions propres à la création de tourbe sont réunies, ces bords d'étangs sont colonisés par des tremblants tourbeux dominés par de grandes laïches : *Carex rostrata* et *C. lasiocarpa* (*Cicuto virosae*-*Caricetum rostratae*, *Caricetum diandro-lasiocarpae*), ce dernier est remplacé par *Carex vesicaria* dans les lieux eutrophisés comme au lac Estivadoux (*Caricetum rostrato-vesicariae*). Parfois, des eaux semblant moins organiques montrent des peuplements d'*Equisetum fluviatile*, pauvres en espèces (*Potentillo palustris*-*Equisetum fluviatilis*).

Plus en arrière, en zonation vers les prairies environnantes, on observe généralement en auréole deux ceintures parallèles constituées la première par un bas-marais rattachable au *Carici curtae*-*Agrostietum caninae*, bas-marais acidocline sur sols engorgés, de répartition planitiaire à montagnarde (avec *Carex curta*, *C. nigra*, *Viola palustris*, *Agrostis canina*, *Juncus filiformis*, *Molinia caerulea*, *Dactylorhiza maculata*...), la seconde par une pelouse acidophile méso-hygrophile montagnarde, à *Nardus stricta*, *Festuca nigrescens*, *Agrostis capillaris*, *Potentilla erecta*, *Gentiana pneumonanthe*, *Selinum pyrenaicum*, *Carex ovalis*... On passe ensuite aux pelouses plus ou moins mésophiles et prairies, non marquées par la présence de tourbe.

Une mise en pâturage du *Carici curtae*-*Agrostietum caninae* le transforme en un groupement de bas-marais dégradé à *Ranunculus flammula*, *Veronica scutellata*, *Carex demissa*, *Juncus effusus*...

Concernant les végétations muscinales associées, les zones à grandes laïches fournissent un lacs de rhizomes et tiges sur lesquels s'implante un radeau de sphaignes plus ou moins développé, nullement indispensable et d'ailleurs pas toujours présent. Il s'agit généralement de

Sphagnum fallax, parfois de *S. angustifolium*. Bas-marais et pelouses méso-hygrophiles sont aussi parfois accompagnés en mosaïque (complexe phytocœnotique), par un groupement muscinal à *Drepanocladus exannulatus*, *Polytrichum commune*, *Sphagnum fallax*, *S. subsecundum*, *Aulacomnium palustre*...

Sur chacun de ces groupements muscinaux, l'évolution dynamique conduit à la création de buttes tourbeuses d'alimentation hydrique ombrotrophe, formées d'abord par *Sphagnum papillosum*, *S. rubellum* et *S. magellanicum* (*Sphagnetum rubello-magellanicum*) puis dans un stade postérieur essentiellement par *Sphagnum capillifolium*, accompagné de *Polytrichum strictum*, *Aulacomnium palustre*, *Pleurozium schreberi*, *Pohlia sphagnicola*, *Cephalozia connivens* (*Polytrichum stricti-Sphagnetum capillifolii*).

Dans le Massif du Sancy, ces deux types de buttes à sphaignes «portent» un groupement phanérogamique à *Eriophorum vaginatum*, *Scirpus cespitosus* subsp. *cespitosus*, *Molinia caerulea*, *Calluna vulgaris*, *Vaccinium uliginosum*... (*Eriophoro vaginati-Scirpetum cespitosi*).

Sur le Cézallier, l'association phanérogamique associée au *Sphagnetum rubello-magellanicum* est différente, avec *Andromeda polifolia*, *Vaccinium oxycoccos*, *V. microcarpum*, *Carex pauciflora*, *Eriophorum vaginatum*, *Calluna vulgaris*, *Drosera rotundifolia*. L'*Eriophoro vaginati-Scirpetum cespitosi* s'y cantonne au stade plus évolué à *Sphagnum capillifolium*.

Les fosses de tourbages, assez rares dans le Massif du Sancy, mais plus courantes sur les plateaux du sud, se recolonisent par un groupement à *Sphagnum cuspidatum* et *Drepanocladus fluitans* (*Drepanoclado fluitantis-Sphagnetum cuspidati*). Le groupement associé à *Carex limosa* et *Scheuchzeria palustris* est toujours fragmentaire dans le massif, contrairement à ce qui se passe sur le Cézallier, la même observation étant valable pour le groupement vicariant à *Rhynchospora alba* de l'Artense.

Les tourbières soligènes

Elles prennent naissance à partir de l'eau ruisselant sur une pente, provenant d'une source accompagnée d'écoulements diffus.

Au niveau même de la source on rencontre souvent un groupement végétal de substrats non

tourbeux avec *Montia fontana*, *Sagina saginoides*, *Saxifraga stellaris*, *Sedum villosum*, *Epilobium alsinifolium*, *Stellaria alsine*, *Caltha palustris* subsp. *minor*, *Poa annua* var. *aquatica*, *Myosotis lamottiana*..., mosaïqué avec un groupement muscinal à *Philonotis fontana*, *Anisothecium squarrosum* et *Bryum schleicheri*.

Autour et en contrebas se développe dans les zones d'écoulements, fauchées ou pâturées de manière extensive, un bas-marais prairial sur sols paratourbeux à eau circulante (le substrat est donc mieux oxygéné que dans le cas du *Carici curtae-Agrostietum caninae*), qui se rapporte au *Selino pyrenaei-Juncetum acutiflori* (avec *Juncus acutiflorus*, *Selinum pyrenaeum*, *Potentilla palustris*, *Galium uliginosum*, *Succisa pratensis*, *Myosotis lamottiana*, *Viola palustris*, *Carum verticillatum*...).

Un pâturage plus intensif fait évoluer le *Selino pyrenaei-Juncetum acutiflori* vers un groupement à *Juncus effusus*, *Trifolium spadiceum*, *Carex panicea*, *Deschampsia cespitosa*, *Carex ovalis*, *C. disticha*, *Ranunculus repens*, *Epilobium palustre*, *Mentha arvensis*, *Myosotis nemorosa*..., riche d'une trentaine d'espèces et proche de l'*Epilobio palustris-Juncetum effusi*.

Ces zones de bas-marais prairiaux, lorsqu'elles ne sont plus exploitées, peuvent se boiser d'abord par un groupement arbustif de un à deux mètres de hauteur à *Salix cinerea*, *S. aurita* et *S. lapponum*, puis par une végétation ligneuse plus élevée à *Salix pentandra*, *Betula pendula*, *B. pubescens* subsp. *carpatica* et leur hybride. De beaux exemples de ces formations arbustives sont visibles en particulier dans les vallées au sud de Super-Besse.

A l'intérieur ou à la périphérie de ces zones, les endroits subissant un assèchement naturel ou un drainage technologique voient généralement se développer une moliniaie (*Selino pyrenaei-Molinietum caeruleae*), généralement assez pauvre en espèces (une quinzaine, contre une trentaine pour le *Selino pyrenaei-Juncetum acutiflori*).

Localement, dans les endroits occupés par des bas-marais plus ou moins prairiaux (*Carici curtae-Agrostietum caninae* et *Selino pyrenaei-Juncetum acutiflori*) la dynamique tourbeuse peut se poursuivre avec augmentation de l'épaisseur de tourbe et apparition de groupements muscinaux ombrotrophes à *Sphagnum papillosum* et *S. magellanicum*, les végétations phanérogamiques associées (à *Eriophorum vaginatum*, *Vaccinium oxycoccos*, *Scirpus*

cespitosus subsp. *cespitosus*) conservant toujours quelques espèces minérotrophes (*Carex nigra*, *Eriophorum angustifolium*, *Molinia caerulea*) témoins des apports latéraux liés à la nature soligène du milieu.

Le stade terminal à *Sphagnum capillifolium* est rarement atteint comparativement aux tourbières topogènes. Un assèchement naturel ou provoqué -parfois un incendie- de ces derniers stades peut conduire à une véritable lande tourbeuse dominée par *Calluna vulgaris* et *Scirpus cespitosus* subsp. *cespitosus*, associée à une communauté muscinale à *Sphagnum compactum*, *Dicranum bergeri*, *Leucobryum glaucum*, *Pleurozium schreberi*, *Dicranum majus*. Un seul exemple de cette évolution a été observé sur les pentes du Massif du Sancy, le phénomène étant plus fréquent dans les tourbières topogènes des plateaux du Cézallier et de l'Artense.

Très localement dans les Monts Dore, comme au col de la Croix-Morand, au pied du Puy May ou dans quelques endroits de la vallée de la Fontaine Salée par exemple, on rencontre des résurgences alcalines. Un développement tourbeux particulier, de nature soligène mais alcaline, à la différence de la situation la plus fréquente exposée ci-dessus, peut y être observé :

Un complexe de chenaux et buttes est occupé par un bas-marais mélangeant des espèces neutroclines telles *Juncus anceps*, *J. alpinus*, *Swertia perennis*, *Dactylorhiza traunsteineri*, *Polygala amara*, des intermédiaires telles *Carex panicea*, *Eriophorum gracile*, *Parnassia palustris*, *Pinguicula vulgaris*, *Pedicularis palustris* et des acidophiles telles *Drosera rotundifolia*, *Carex pulicaris*, *Agrostis canina*, *Carex echinata*, *Viola palustris*...

Ce groupement occupe aussi bien les chenaux que les buttes, mais il s'assemble en complexe avec des groupements bryophytiques différents dans les deux cas. En effet les chenaux (à pH 6,0 à 6,5) sont occupés par un groupement muscinal neutrocline à *Campylium stellatum*, *Homalothecium nitens*, *Aneura pinguis*, *Drepanocladus cf. intermedius*, *Sphagnum gr. auriculatum*, *Scorpidium scorpioides*, *Bryum pseudotriquetrum*, *Riccardia multifida*, *Calliergonella cuspidata*, alors que les buttes (à pH 4,5 à 5,0) sont dominées par *Sphagnum cf. warnstorffii* accompagnée de *S. teres*, *Aulacomnium palustre*, *Philonotis fontana*, *Climacium dendroides*, *Calliergonella cuspidata*. On trouve aussi parfois même des buttes à *Sphagnum papillosum* et *S. fallax* (à pH 4,0 à 4,5), voire des buttes à *Sphagnum magellanicum* et des stades à *S. capillifolium*.

Dans ces situations, la dynamique tourbeuse est donc alcaline à l'origine et converge vers la série acide classique au fur et à mesure de la croissance de la tourbe, qui affranchit progressivement les végétaux des conditions du substrat originel pour ne plus les faire dépendre que des apports par la pluie.

Ajoutons que les zones perturbées ou piétinées du bas-marais montrent un groupement à *Carex demissa*, *C. panicea*, *Juncus anceps*, *J. bulbosus*, *Parnassia palustris*, *Pinguicula vulgaris*..., vicariant écologique des groupements à *Ranunculus flammula* et à *Juncus effusus* décrits précédemment.

Un boisement par les groupements arbustifs déjà cités est également possible pour ce complexe alcalin.

L'ETAGE SUBALPIN

Dans le Massif du Sancy, cet étage commence vers 1 450 m et atteint plus ou moins les sommets vers 1 886 m au Puy de Sancy. Certains groupements végétaux culminaux évoquent par la présence de certaines espèces la possibilité d'un étage pseudo-alpin. De toute manière l'étage est asylvatique dans les Monts Dore. Les tourbières sont assez rares et de superficie faible à ce niveau, ce qui est la conséquence des pentes assez fortes qui sont réalisées.

Les tourbières topogènes

Un seul exemple est rapportable à ce type, pour cet étage. Il s'agit du «lac» du Puy Paillaret situé à 1 580 m d'altitude.

Le «lac» est apparemment temporairement asséché et pâturé épisodiquement. Il est rempli d'une végétation de bas-marais subalpin rapportable au *Junco filiformis*-*Caricetum nigrae*, vicariant altitudinal du *Carici curtae*-*Agrostietum caninae* précédent mais plus pauvre en espèces, et avec disparition des «européennes» telles *Potentilla erecta*, *Dactylorhiza maculata*, *Agrostis canina*... Assez souvent, un groupement muscinal à *Drepanocladus exannulatus*, *Calliergon stramineum*, *Sphagnum subsecundum* est associé en phytocoenose complexe.

Dans cette végétation peuvent se développer des buttes à sphaignes turfigènes comprenant *Sphagnum magellanicum*, *S. fuscum*, *S. capillifolium*, *Polytrichum strictum*. Ces buttes qui peuvent atteindre 50 cm de hauteur «portent»

une végétation phanérogame très pauvre à *Eriophorum vaginatum*, *Andromeda polifolia*, *Carex pauciflora* (mais sans *Vaccinium oxycoccus* !), incluant toujours quelques espèces minérotrophes telles *Carex nigra*, *C. echinata*..., ce qui témoigne de l'importance des apports latéraux par ruissellement, dans les stades ombrotrophes de cette altitude. *Scirpus cespitosus* subsp. *cespitosus* se cantonne plutôt dans les bas-marais à l'étage subalpin, alors qu'il est un hôte régulier des hauts-marais à l'étage montagnard.

Quelques rares chenaux à *Carex rostrata* illustrent la végétation pionnière qui devait exister dans cette tourbière topogène, tout autant que les cicatrises de chenaux profonds.

On rencontre aussi localement un groupement à microhépatiques (*Kurzia pauciflora*, *Mylium anomala*, *Odontoschisma sphagni*...) se développant sur la tourbe dénudée, et qui existe également à l'étage montagnard.

Les tourbières soligènes

Les rares sources présentent une végétation vicariante de celle de l'étage montagnard (avec *Epilobium nutans*, *E. alsinifolium*, *Saxifraga stellaris*, *Stellaria alsine*, *Caltha palustris* subsp. *minor*, *Deschampsia alpina*...), avec toutefois ici une meilleure représentation de la végétation muscinale (*Philonotis fontana*, *Anisothecium squarrosum*, *Bryum schleicheri*, *Philonotis seriata*, *Scapania undulata*, *Drepanocladus cf. fluitans*). La fonte des neiges (des congères peuvent persister jusqu'en août !) et les pluies abondantes peuvent néanmoins permettre le développement de petites mais fréquentes tourbières de pentes qui se signalent dans le paysage par les couleurs argentées des buissons de saules des lappons. Elles apparaissent dans les zones de ruissellement ou en aval des zones de sources.

Le stade initial de la tourbière de pente de l'étage subalpin est constitué d'un complexe phytocœnotique comportant trois unités :

- un bas-marais (*Junco filiformis-
Caricetum nigrae*),
- un groupement bryophytique à *Sphagnum teres*, *S. papillosum*, *Drepanocladus exannulatus*, *Calliergon stramineum*...
- un buisson bas (environ 50 cm de hauteur), à *Salix lapponum*, *S. bicolor*.

Si l'apport d'eau est constant et important, aucune évolution ne semble possible. Dans le cas

contraire et sur des surfaces plus grandes, ce qui est une situation rare, on peut observer l'évolution vers un stade ombrotrophe avec des buttes à *Sphagnum magellanicum*, *S. angustifolium* et *S. papillosum* (exceptionnellement le stade à *Sphagnum capillifolium* est atteint).

Aux expositions nord d'altitude au moins égale à 1 800 m, par exemple sur la face nord du Puy Ferrand, se rencontrent des groupements végétaux à nombreuses espèces typiques de l'étage alpin. On peut considérer qu'il s'agit de fragments inclus dans un étage de type pseudo-alpin (c'est-à-dire un niveau subalpin supérieur dépourvu d'arbres et d'arbustes par suite de l'effet de crête).

Dans ces conditions, un développement de buttes à *Sphagnum capillifolium* a été observé directement sur une lande à *Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium uliginosum* cf. subsp. *microphyllum*, *V. myrtillus*, *Calluna vulgaris*, *Diphysastrum alpinum*, *Lycopodium selago* (*Empetro hermaphroditi-Vaccinietum uliginosi* subsp. *microphylli*).

BIBLIOGRAPHIE

- AUTRAN A. et coll., 1979. Massif Central, étude géologique. Rev. Sc. Nat. Auvergne, 45 (1, 2, 3, 4).
- BAIZED., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. Editions INRA, 172 p.
- BARCLAY-ESTRUP P. et GIMINGHAM C.H., 1969. The description and interpretation of cyclical processes in a heath community. I. Vegetational change in relation to *Calluna* cycle. J. Ecol. 57, 737-758.
- BATISSE M., 1930. Végétation et évolution de quelques tourbières montdorienne. Suppl. Bull. Hist. Nat. Auvergne, 16, 1-23.
- BAUDIERE A., 1972. Contribution à l'étude de la végétation des landes des Monts de l'Espinouze (Cévennes occidentales). Bull. Soc. Bot. Fr., 119, 65-109.
- BAUDIERE A., 1973. Les callunaies des Monts de l'Espinouze (Cévennes occidentales) et leurs relations avec les groupements sylvaux. II Coll. Intern. Phytosoc., La végétation des landes occidentales. Lille, Ed. J. Cramer, 97-126.
- BEAULIEU de J.L., PONS A. et REILLE M., 1988. Histoire de la flore et de la végétation du

- Massif Central (France) depuis la fin de la dernière glaciation. C. Micropal., 3 (4), 5-36.
- BEGUIN C., 1970. Contribution à l'étude phytosociologique et écologique du Haut-Jura. Thèse Fac. Sci. Université Neuchâtel, 190 p., une carte couleur.
- BILLY F., 1988. La végétation de la Basse Auvergne. Bull. Soc. Bot. Centre-Ouest, Nlle Sér., N° spécial 9.
- BOCK C. et PRELLI R., 1975. Notice explicative de la carte des groupements végétaux du cirque de Chaudesfour (Monts Dore). Arvernia Biologica, Bot, Nouvelle série, 1-26.
- BOUDOT J.P., BRUCKERT S. et SOUCHIER B., 1981. Végétation et sols-climax sur les grauwackes de la série du Markstein (Hautes-Vosges). Ann. Sci. Forest., 38, 87-106.
- BRAUN J., 1915. Les Cévennes méridionales (Massif de l'Aigoual). Thèse Sciences. Université de Montpellier, 208 p.
- BRAUN-BLANQUET J., 1926. Le «climax complexe» des landes alpines (Genisteto-Vaccinon) du Cantal. Etudes phytosociologiques en Auvergne. Arvernia (2), 29-48.
- BRAUN-BLANQUET J., 1948. La végétation alpine des Pyrénées orientales. Mont. Est. Pir. y Inst. Edaf. Ecol. y Fis. Veg., 1-306.
- BRAUN-BLANQUET J., DENIS M., 1926. L'évolution de la végétation au lac des Esclauzes (Monts-Dore). Arvernia, 2, 53-56.
- BROUSSE R. et TEMPIER P., 1981. Carte géologique de la France au 1/50 000, feuille de Bourg-Lastic. Ministère de l'Industrie, Service géologique National.
- CARBIENER R., 1963. Remarques sur un type de sol encore peu étudié : le ranker cryptopodzolique de l'étage subalpin des massifs hercyniens français. C. R. Acad. Sc. Paris, 256, 977-979.
- CARBIENER R., 1966. La végétation des Hautes-Vosges dans ses rapports avec les climats locaux, les sols et la géomorphologie ; comparaison à la végétation subalpine d'autres massifs montagneux à climat «allochtone» d'Europe occidentale. Thèse Fac. Sc. Orsay, 109 p.
- CARBIENER R., 1969. Subalpine primare Hochgrasprärien in herzynschen Gebirgsraum Europas mit besonderer Berücksichtigung der Vogesen und des Massif Central. Mitt. flor.-soz. Arbeitsgem. N.F., 14, 322-345.
- CHASSAGNE M., DENIS M., 1927. Principales séries dynamiques observées dans la végétation turfo-lacustre des Monts-Dore. Bull. Soc. Hist. Nat. Auvergne, 12, 24-33.
- COQUILLARD P., 1993. Dynamisme des systèmes agro-pastoraux de l'étage montagnard des massifs du Sancy et des Puys : variations biologiques et fonctionnelles ; exemple d'application au modèle à *Calluna vulgaris* (L.) Hull. Thèse Doctorat Etat ès Sciences. Université Aix-Marseille, 266 p.
- COQUILLARD P. et GUEUGNOT J., 1991. Regressive dynamic and denudation processes of vegetation on volcanoes in the «Chaîne des Puys» (French Massif Central) : assay of interpretation. Vegetatio, 93, 131-141.
- COQUILLARD P., GUEUGNOT J. et MICHALET R., 1988a. Landes et herbages des édifices volcaniques de la Chaîne des Puys (Massif Central français) II. Ecologie et pastoralisme., XVIème Coll. Intern. Phytosoc., Phyto-sociologie et pastoralisme, Lille, 665-680.
- COQUILLARD P., GUEUGNOT J. et MICHALET R., 1988b. Un paysage en danger : la Chaîne volcanique des Puys (Massif Central français). Syntaxonomie et déterminisme des zones dénudées. XVIIème Coll. Intern. Phytosoc., Phytosociologie et paysages, Versailles, 365-387.
- COQUILLARD P., GUEUGNOT J. et MICHELIN Y., 1989. Carte écologique du Massif du Sancy au 1/25000 ème. Proposition méthodologique. Exemple du domaine sylvatique de l'étage montagnard. L'écologie en France. Des recherches aux applications : vers de nouvelles perspectives. V Coll. national AFIE, Société d'Ecologie, 327-336.
- COQUILLARD P., GUILLOT J. et GUEUGNOT J., 1985. A propos de la dynamique des hêtraies de basse altitude sur le rebord oriental du plateau de la Chaîne des Puys. Exemple du bassin versant du Lac d'Aydat (Puy de Dôme). Rev. Sc. Nat. d'Auvergne, 51, 9-23.
- C.P.C.S., 1967. Classification française des sols. Doc. INRA, 96 p.
- CUSSET G., 1964. Les forêts des versants sud des Monts Dore. Esquisse phytosociologique. Ann. Sciences Forest., XXI(1), 87-165.

- CUSSET G. et de LACHAPELLE B., 1961. Etudes botaniques dans les Monts Dore, 1ère partie. Rev. Sc. Nat. d'Auvergne, 27 (1, 2, 3, 4).
- CUSSET G. et de LACHAPELLE B., 1962. Etudes botaniques dans les Monts Dore. 2ème partie. Rev. Sc. Nat. d'Auvergne, 28, 13-81.
- DAGET P., 1968. Etude du climat local en région de moyenne montagne à l'aide des données météorologiques classiques : application au nord-est de la Margeride. Thèse Doctorat Spécialité, Université de Montpellier.
- DEBUSSCHE M., 1978. Etude, à moyenne échelle, de la dynamique de la végétation du versant nord-ouest du Mont-Aigoual entre 1948 et 1972 et analyse des successions qu'offre le genêt purgatif (*Cytisus purgans*) dans le même secteur écologique. Thèse Doctorat Ingénieur, Université de Montpellier.
- DEVAU B., 1987. La transition bioclimatique et phytogéographique de l'Alpin à l'Oro-atlantique. Les hauts massifs des Pyrénées occidentales. Thèse 3ème cycle Université Scientifique, Technologique et Médicale, Grenoble 1, 73 p.
- DOCHE B., 1986. Déterminisme et expression cartographique des successions végétales : exemple de l'Aubrac montagnard (Massif central français). Thèse de Doctorat ès Sciences, Université Scientifique, Technologique et Médicale, Grenoble 1, 251 p.
- FOUCAULT de B., 1990. Essai sur une ordination synsystématique des landes continentales à boréo-alpines. Doc. Phytosoc. N.S. XII, 152-174.
- FRAIN M., LOISEAU P. et MERLE G., 1986. Dix ans d'observations sur le reverdissement d'une piste de ski dans le Massif Central. I et II, Rasen-Turf-Gazon, 1, 15-24 ; 2, 43-49.
- GIMINGHAM C., 1978. *Calluna* and its associated species : some aspects of co-existence in communities. Vegetatio, 36 (3), 179-186.
- GRUBER M., 1980. Etages et séries de végétation de la chaîne pyrénéenne. Ecologia Mediterranea, 5, 147-171.
- GUENET P. et REILLE M., 1988. Analyse pollinique du lac-tourbière de Chambédaze (Massif Central, France) et datation de l'explosion des plus jeunes volcans d'Auvergne. Bull. Ass. Fr. Quatern., 4, 175-194.
- GUEUGNOT J., COQUILLARD P., MICHELIN Y. et JOUGLA P., 1993. Agro-écologie des landes et herbages de l'étage montagnard du Massif du Sancy (Massif central, France). Bull. Ecol, 24 (2/3), 151-166.
- HETIER J.-M., 1975. Formation et évolution des andosols en climat tempéré. Thèse Doctorat ès Sciences, Nancy, 194 p.
- JOLLY M.C. et LECOMPTE M., 1988. L'origine de l'asylvatisme de haute altitude en Auvergne, une question controversée : exemple du Cantal. Doc. Cartogr. écol., XXXI, 49-60.
- JOUGLA P., 1991. Estives dans les Monts Dore : étude de l'activité agricole. Rapport Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers et Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne. 50 p.
- JULVE P., 1983. Les groupements de prairies humides et de bas marais : étude régionale et essai de synthèse à l'échelle de l'Europe occidentale. Thèse 3ème cycle, Université de Paris-Sud, Orsay, 1983.
- LACASSAGNE F., 1990. Géomorpho-dynamiques actuelles à l'étage montagnard supérieur des Monts-Dore. Mémoire de maîtrise, Université de Clermont II, Département de Géographie, 121 p.
- LAVINA P., 1985. Le volcan du Sancy et le «massif adventif» (Massif des Monts Dore - Massif central français). Etudes volcanologiques et structurales. Thèse 3ème Cycle, Clermont-Ferrand.
- LEMEE G., 1940. Monographie phyto-géographique d'un lac d'Auvergne, le lac d'Estivadoux (Monts-Dore). Bull. Soc. Bot. Fr., 87, 103-111.
- LEMEE G., 1945. Morphologie et végétation actuelle des tourbières d'Auvergne. Rev. Sc. Nat. Auvergne 11 (3-4), 59-70.
- LEMEE G., 1951. Carte des groupements végétaux de la France : Clermont-Ferrand S.-O. Ed. CNRS.
- LEMEE G. et CARBIENER R., 1956. La végétation et les sols des volcans de la Chaîne des Puys. Bull. Soc. Bot. Fr. 103, 82ème sess. extr., 7-29.
- LOISEAU P., MONTARD de F.X. and RICOU G., 1990. Grasslands in uplands areas : the Massif Central (France). Managed grasslands,

- Breymeyer A. Ed. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, 71-97.
- LUQUET A., 1926. Essai sur la géographie botanique de l'Auvergne. Les associations végétales du Massif des Monts-Dore. Thèse, St-Dizier, 226 p.
- MENARD J.-J., 1979. Contribution à l'étude pétrogénétique des nappes de ponces du massif volcanique du Mont-Dore (Massif central français). Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Université Paris-Sud, Orsay.
- MICHALET R., 1982. Influence du climat général sur l'évolution des sols à l'étage subalpin du Jura. Thèse 3^{ème} cycle, Université. Nancy I, 103 p. + annexes.
- MICHALET R., 1991. Une approche synthétique biopédoclimatique des montagnes méditerranéennes : exemple du Maroc septentrional. Thèse Université Joseph Fourier, Grenoble I, 273 p.
- MICHALET R. et BRUCKERT S., 1986. La podzolisation sur calcaire à l'étage subalpin du Jura. *Science du Sol*, 24 (4), 363-376.
- MICHALET R., COQUILLARD P. et GUEUGNOT J., 1988. Landes et herbages des édifices volcaniques de la Chaîne des Puys (Massif central français). I. Synsystème. XVI^{ème} Coll. Intern. Phytosoc., Phytosociologie et Pastoralisme, Paris, 645-663.
- MICHALET R. et PHILIPPE T., 1993. Les associations végétales de l'étage subalpin des Monts Dore (en préparation).
- MILES J., 1981. Problems in heathlands and grasslands dynamics. *Vegetatio*, 46, 61-74.
- MONTARD de F. et GACHON L., 1978. Contribution à l'étude de l'écologie et de la productivité des pâturages d'altitude des Monts Dore. I Application de l'Analyse Factorielle des Correspondances. *Ann. Agron.*, 29 (3), 277-230.
- NEGRE R., 1974. Nouvelle contribution à l'étude des gispétières pyrénéennes. *Bol. Soc. Broteriana XLVIII*, 209-251.
- OBERDORFER E., 1978. *Suddeutsche Pflanzengesellschaften*. Teil I, II. Fischer G. Ed., Stuttgart.
- OZENDA P., 1985. La végétation de la chaîne alpine dans l'espace montagnard européen. Masson Ed., 330 p.
- PACHE G., 1991. Aridité et continentalité, facteurs explicatifs de la répartition des végétaux. DEA Géographie, Ecologie et Aménagement des Montagnes, Grenoble I, 61 p., une carte couleur.
- PETERLONGO J.-M., 1978. Massif Central (Limousin, Auvergne, Velay). Guides géologiques régionaux, Masson Ed., 2^e édition, Paris, 123 p.
- QUEZEL P. et RIOUX J.A., 1953. Les limites de la végétation forestière dans le Cantal. *Ann. école Sup. Agron.*, 1, 90-93.
- QUEZEL P. et RIOUX J.A., 1954. L'étage subalpin dans le Cantal (Massif Central de France). *Vegetatio*, 4, 345-378.
- RAMEAU J.C., MANSION D. et DUME G., 1989. Flore forestière française, guide écologique illustré. 1. plaines et collines. Institut pour le Développement Forestier, 1785 p.
- R.P.F., 1992. Référentiel Pédologique des principaux Sols d'Europe. Ed. INRA, 222 p.
- ROBINSON R.K., 1972. The production by roots of *Calluna vulgaris* of a factor inhibitory to growth of some mycorrhizal fungi. *J. Ecol.*, G.B., 60 (1), 219-224.
- SALAS M.C., VIETIEZ E., 1975. Inhibidores de germinacion en Ericaceas. *Anal. Inst. Bot. Cavanilles* 32 (2), 619-631.
- SOUCHIER B., 1971. Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). Thèse Doctorat Etat Université Nancy I, 134 p.
- THEBAUD G., 1988. Le Haut-Forez et ses milieux naturels. Apport de l'analyse phytosociologique pour la connaissance écologique et géographique d'une moyenne montagne cristalline subatlantique. Thèse Doctorat ès Sciences Naturelles, Université Blaise Pascal, 330 p.
- UEHLINGER A., 1926. Observations sur la limite supérieure des arbres et de la forêt dans le Cantal et les Monts-Dore. études phytosociologiques en Auvergne. *Arvernica*, 2, 14-23.
- VIGOUROUX C., Les forêts du Mont-Dore et de l'Artense au XVII^e siècle. *Revue d'Auvergne*. Tome (70) 119-146.

Modern agricultural practices and eutrophication in Pagassitikos Gulf, Greece

N. FRILIGOS*, C. GIOURGA**, M. KARYDIS** and N. S. MARGARIS**

SUMMARY

It seems possible that changes in drainage basins and the fertilizers used in modern agriculture are the causal factors for the observed eutrophication and algal blooms of Pagassitikos Gulf, Greece.

KEYWORDS : eutrophication, nutrients, Pagassitikos

RESUME

L'eutrophisation et le bloom d'algues qui sont observés dans le golfe de Pagassitikos, en Grèce, ont probablement pour origine les changements du drainage qui sont produits dans les bassins environnants, ainsi que l'utilisation des fertilisants chimiques par l'agriculture moderne.

MOTS-CLES : eutrophisation, éléments nutritifs, Pagassitikos

INTRODUCTION

Despite the fact that sewage discharged in Volos Bay (Greece) is estimated at more than 16.000 kg/day (domestic 78%, industrial 22%, ΔHKEMB., 1987) it is rather difficult to state that these are the factors responsible for the eutrophication observed in Pagassitikos Gulf. Further to pure scientific interest in describing the present situation in the Gulf serious economic, social and environmental conflicts also stressed the need for a serious answer in order to proceed as quickly as possible towards a rational management both from local and national institutions.

Bearing also in mind the great changes that occurred during the last 25 years both to the watersheds of Pagassitikos as well as in modern agricultural practices developed we considered it of some interest to analyse the contribution of the runoff of the fertilizers used.

If we take, also, into consideration that with the transfer of waters for irrigation from the Acheloos River to Thessaly and the great change which will be held in the watersheds of Pagassitikos we realize the need for data of this kind because the present situation in Pagassitikos is very critical. For example in 1983 a serious planktonic bloom disturbed not only the environmental but also the economic situation reducing both fishing and touristic curtailing activities (MARGARIS, 1987 ; PALEOKOSTAS, 1987).

Having the above in mind we considered it of interest to proceed along two basic lines :

- Changes which occurred during the last two decades in the watersheds of Pagassitikos and new agricultural practices developed.

- Point (sewage, industrial) versus non-point (fertilizers runoff) pollution in Pagassitikos Gulf.

These lines will help us to understand the situation better and to help Local and Natural authorities to decide in a positive way because the «popularistic» approach followed by the

* National Center for Marine Research, Agios Kosmas
Athens, Greece

** Department of the Environment, University of the Aegean
Mytilini, Greece

«paraecological» movements in Volos, according to which the responsibilities for all problems must be directed only towards industrial causes, are constantly confusing the needed actions to be taken.

AGRICULTURE AND THE WATERSHEDS OF PAGASSITIKOS GULF

Great changes have occurred within the drainage area of Pagassitikos Gulf during the last 25 years. Up to the year 1966 there were about 1,200 km² but with the drainage of Karlas Lake this area has been multiplied almost by two and today it reaches the value of 2,250 km² (figure 1).

In parallel with the above mechanization of agriculture dramatic changes in the efficiency

of production as well as in the input of energy, water and fertilizers followed. The cultivation of maize, for example, in the «old» watershed increased by a factor of fourteen and from 200 ha in 1971 it reached 2820 ha 15 years later. This concerns the production efficiency, as from 2.7 tons/ha it reached values higher than 12.3 tons/ha.

Relating to the «new» watersheds the increased use of irrigation permitted the cultivation of plants such as cotton and maize. Table 1 contains data dealing with the input of fertilizers in Pagassitikos watersheds. This data was collected by comparing the invoices of the Agricultural Associations with the existing values in the Agricultural Bank of Greece, Volos and Larissa branches. According to the collected

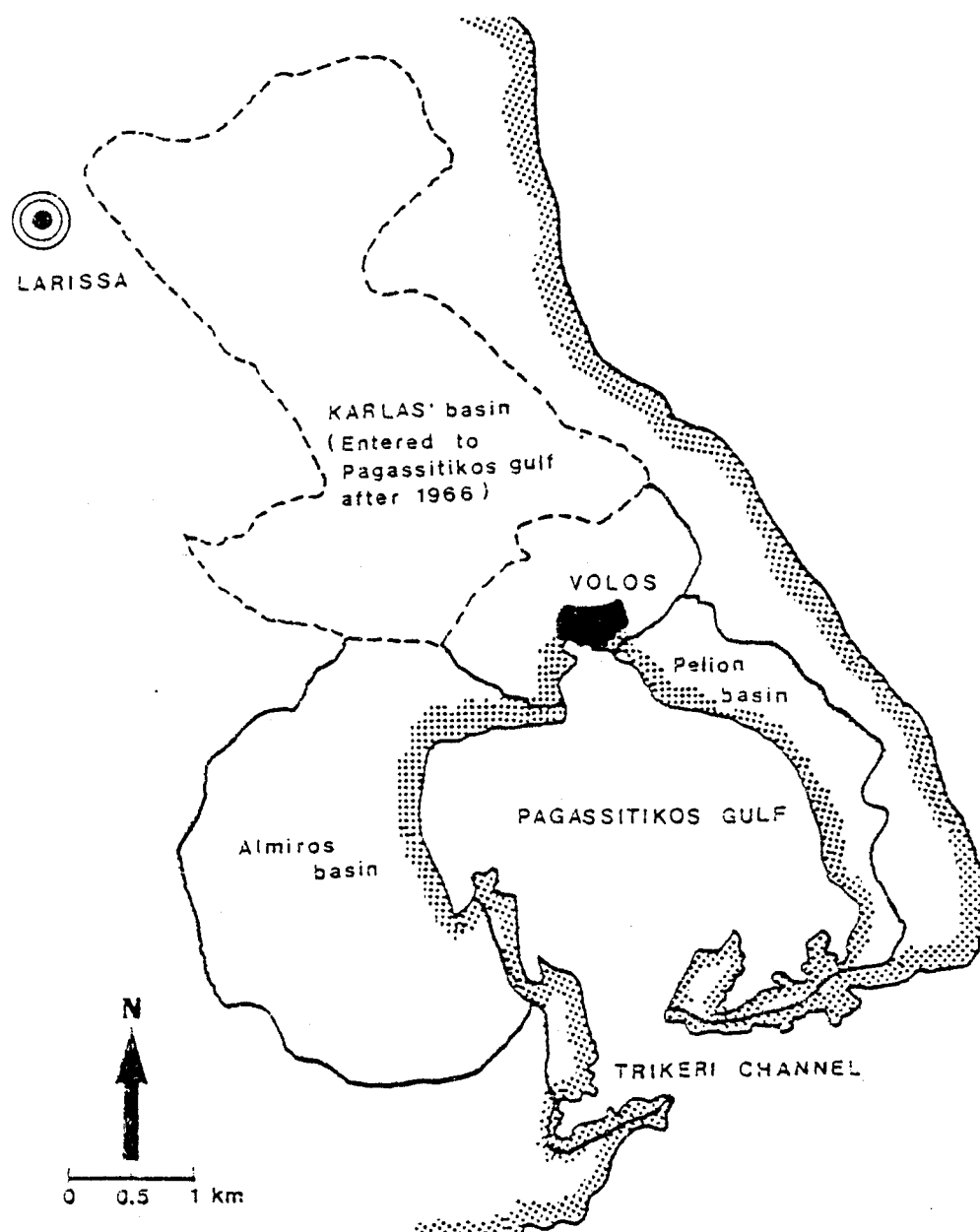


Figure 1.- Watersheds of Pagassitikos Gulf before and after the drainage of Karla's lake

Table 1

Annual use of nitrogenous and complex fertilizers (tons) in the drainage basins of Volos, Almiros and Karla (figure1). An amount of another 3.600 tons used in the Pelion basin must be added

FERTILIZER TYPE	«old»	«new» (KARLAS)	TOTAL
Nitrogenous	17097	45700	62797
Complex(N-P-K)	20425	60400	80825
TOTAL	37522	106100	143622

information each year an amount of about 150,000 tons is used and of course the runoff must have an influence on the biological situation of the Gulf.

Here we must stress the point that although the «new» watersheds are almost equal to the area in comparison to the «old» ones (about 1000 km² each) the use of fertilizers in the Karlas watershed is much higher. In the nitrogenous for example only 27% of the fertilizers are used in the «old» watershed and the same is true for the complex ones (N-P-K) to the value of 25%. According to this data we realize that the «new» watershed which entered Pagassitikos Gulf transfers three times more fertilizers in comparison to the old one.

Of course the local authorities in Volos are constantly in search of a better management (KOLIOU-MITSIOU, 1991) but, according to our opinion, the contribution of agriculture to the eutrophication of Pagassitikos is almost ignored mainly due to the wrong reaction of the public voters.

POINT (SEWAGE, INDUSTRIAL) VERSUS TONON-POINT (FERTILIZERS RUNOFF) POLLUTION

Having all the above in mind and taking into consideration the work conducted by the National Center for Marine Research we decided (the University of the Aegean group) to proceed towards a collaboration with this institute in order to compare our findings regarding the eutrophication of Pagassitikos and also reconsidering their own primary data.

Methodology

The data set used for the eutrophication assessment of the Gulf was collected during six cruises carried out by the National Center for Marine Research (NCMR) between August 1975 and December 1976 and once in August 1983 when a planktonic bloom happened. Stations used are shown in figure 2. Measurements of temperature, salinity, phosphates, nitrates, nitrite and ammonia were carried out. The methods used were, for nitrite, nitrate and silicate that of ARMSTRONG *et al.* (1967), for phosphate, that of MURPHY and RILEY (1962) as automated by HAGER *et al.* (1968) and for ammonium, that of KOROLEFF (1970) as automated by SLAWYK and MACISAAC (1972). Details of the sampling and analytical procedures have been given elsewhere (FRILIGOS, 1987).

Experimental Approach

The area under study has been divided into two sections, the coastal system (10.000 x 10⁶ m³) and the central part of the Gulf. This division was based on T-S diagrams (GABRIELIDES & THEOCHARIS, 1978). The central area would again be subdivided into the surface zone 0-50 m and the bottom zone (50-100 m). The volume of the surface layer of the control system was estimated at about 16.500 x 10⁶ m³ whereas the volume of the bottom layer was about 9.500 x 10⁶ m³. Integrated mean values were taken for the whole column of the coastal area for the surface layer of the central system as well as for the bottom layer of the coastal system. The means are shown in Tables 2, 3, 4 with the background nutrient from the Aegean Sea for comparison. Mean concentrations for the various depths, areas and cruises shown in Tables 2, 3, 4 were multiplied by the appropriate volumes to estimate the amount of total nutrients held in dissolved form by the three systems of the Gulf. Comparisons among the groups of nutrients were carried out with the paired t-test.

Results

Phosphate values of the coastal area did not differ much compared to the phosphate concentrations in the top systems of the central area (Tables 2, 3). However mean phosphate concentrations were lower in the coastal area (0.104 µg-at/l) compared to the bottom layer of the central system (0.140 µg-at/l). Almost identical ammonia mean values were found in all three systems between 0.924 and 0.960 µg-at N/l, the lowest value being the one in the coastal area near the

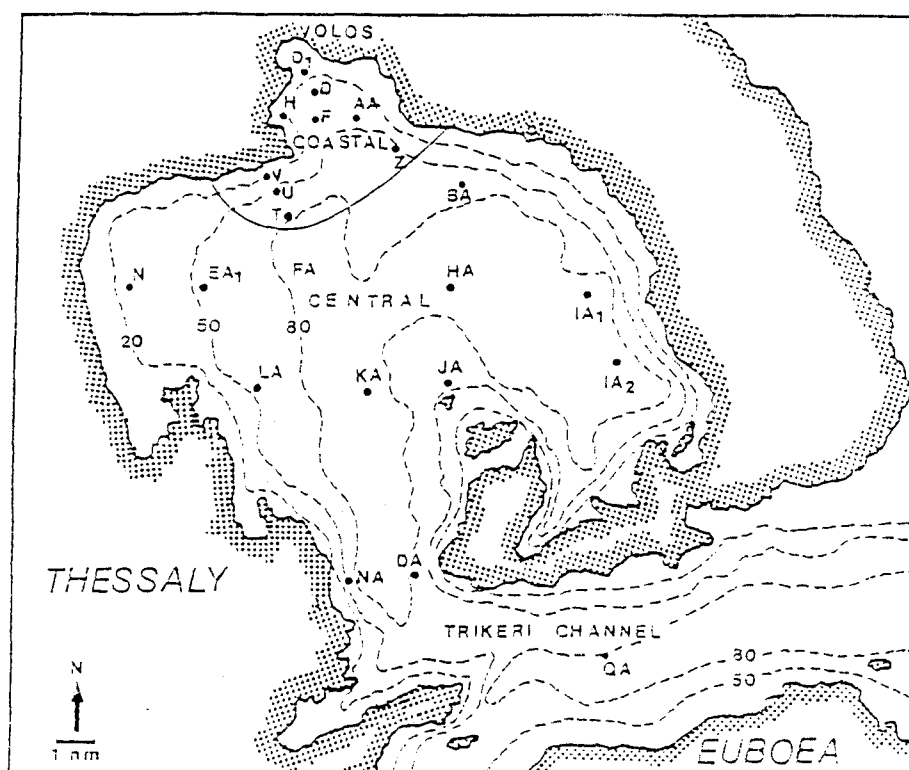


Figure 2.- Location of stations in Pagassitikos Gulf

city of Volos. On the contrary, nitrite and nitrate values showed remarkably low concentrations in the vicinity of the city of Volos compared to the values estimated for the central area of the Pagassitikos Gulf. The mean nitrate value in the coastal zone ($0.775 \mu\text{g-at N/l}$) was half the mean value measured in the lower layer of the central system ($1.685 \mu\text{g-at N/l}$). Summing up the results of Tables 2, 3, 4 it is obvious that there are uniform distributions of phosphate and ammonia, whereas the highest concentrations of nitrite and nitrate were observed in the central area of the Gulf.

Since the total amount of nutrient in each subdivision of the Gulf may be a good estimate of the overall nutrient load received by urban, industrial and agricultural activities, the total amount of nutrients in each part of the Gulf were calculated by multiplying the integral values by the volume of each subdivision. The general trend observed among the three systems showed a high nutrient load for the surface system (0-50 m) of the central part of the Gulf which is the area of the Gulf that does not include the dispersion fields of the Volos effluents. The phosphate load showed its highest value in the top layer of the central part of the Gulf ($1.865 \text{ g-at} \times 10^6$) as compared to the values 1.242 and $1.332 \text{ g-at} \times 10^6$ of the coastal twice as much as the ammonia load estimated in the coastal area affected by the city

Table 2

Mean integral nutrient values ($\mu\text{g-at/l}$) from the coastal area

Cruise (Month, Year)	Phosphate	Ammonia	Nitrite	Nitrate
08, 1975	0.09	0.89	0.11	0.96
11, 1975	0.14	1.06	0.15	0.36
02, 1976	0.11	0.60	0.26	1.05
05, 1976	0.10	0.82	0.15	0.85
08, 1976	0.19	1.16	0.07	0.97
12, 1976	0.11	1.72	0.19	0.66
08, 1983	0.08	0.22	0.05	0.17
Mean	0.104	0.971	0.205	0.775
S.D.	0.022	0.553	0.219	0.850
Background	0.12	0.36	0.16	0.42

of Volos ($9.242 \text{ g-at} \times 10^6$) and the bottom layer of the central part ($9.124 \text{ g-at} \times 10^6$). Nitrite load showed a mean value of $1.428 \text{ g-at} \times 10^6$ in the area affected by the urban and industrial effluents of Volos (coastal area) and a value $3.395 \text{ g-at} \times 10^6$ in the top layer of the central part of Pagassitikos Gulf. Nitrate showed a progressive increase in the nutrient load the lowest value having been observed in the Volos area ($7.171 \text{ g-$

Table 3

Mean integral nutrient values ($\mu\text{g-at/l}$) in the central area (0-50m)

Cruise (Month,Year)	Phosphate	Ammonia	Nitrite	Nitrate
08, 1975	0.06	0.92	0.05	0.94
11, 1975	0.11	0.84	0.16	0.42
02, 1976	0.11	0.73	0.16	0.87
05, 1976	0.10	0.71	0.68	1.37
08, 1976	0.12	0.73	0.07	0.57
12, 1976	0.13	2.18	0.24	0.77
08, 1983	0.10	0.49	0.06	0.35
Mean		0.1040.942		0.205
0.755				
S.D.		0.0220.553		0.219
0.350				
Background		0.120.36		0.160.42

Table 4

Mean integral nutrient values ($\mu\text{g-at/l}$) in the central area (50-100m)

Cruise (Month,Year)	Phosphate	Ammonia	Nitrite	Nitrate
08, 1975	0.07	0.89	0.14	1.43
11, 1975	0.20	0.83	0.12	2.03
02, 1976	0.11	0.83	0.17	2.10
05, 1976	0.12	0.75	0.75	1.78
08, 1976	0.21	0.93	0.22	1.74
12, 1976	0.14	2.18	0.26	1.06
08, 1983	0.13	0.31	0.07	1.66
Mean	0.140	0.960	0.247	1.685
S.D.	0.049	0.576	0.230	0.355
Background	0.12	0.36	0.16	0.42

(7.171 $\text{g-at} \times 10^6$) and the highest value in the lower zone of the central part of the Gulf.

The differences observed were statistically evaluated by using the t-test (Table 5). Among the nutrient concentrations (mean integral values) significant differences among the means at 0.05 level were observed between the phosphate of the Volos area and the lower part of the coastal zone. Also the difference of nitrate concentrations in the lower central part of the Gulf was significantly different from both the nitrate concentrations of the coastal area and the top layer of

Table 5

Testing the difference (paired t-test) between nutrient variables (mean integral values) in the areas:

a) coastal area of Volos (System V),
b) top layer of the central part of the Gulf (system T) and
c) bottom layer of the central part of the Gulf (system B).
The asterisk denotes significant differences at 0.05 level

	V-PO ₄	T-PO ₄	B-PO ₄	V-NH ₄	T-NH ₄	B-NH ₄
T-PO ₄	1.046			T-NH ₄	0.482	
B-PO ₄	2.197	2.471*		B-NH ₄	0.378	0.352
	V-NO ₂	T-NO ₂	B-NO ₂	V-NO ₃	T-NO ₃	B-NO ₃
T-NO ₂	0.784			T-NO ₃	0.353	
B-NO ₂	1.202			B-NO ₃	5.337*	4.726*

critical t- value : 2.447 (0.05 level).

the central part. In other words both nutrients phosphate and nitrate showed to differ as far as their concentrations are concerned between the lower part of the central area and the area in the vicinity of the Volos effluents, the highest value having been observed in the central part for both systems.

Table 6

Testing the difference (paired t-test) between nutrient loads in the areas :

a) coastal area of Volos (System V),
b) top layer of the central part of the Gulf (system T) and
c) bottom layer of the central part of the Gulf (system B).
The asterisk denotes significant differences at 0.05 level

	V-PO ₄	T-PO ₄	B-PO ₄	V-NH ₄	T-NH ₄	B-NH ₄
T-PO ₄	3.637*			T-NH ₄	3.301*	
B-PO ₄	1.112	3.992*		B-NH ₄	0.134	4.802*
	V-NO ₂	T-NO ₂	B-NO ₂	V-NO ₃	T-NO ₃	B-NO ₃
T-NO ₂	1.486			T-NO ₃	3.171*	
B-NO ₂	1.115	1.732		B-NO ₃	5.003*	1.348

critical t- value : 2.447 (0.05 level)

The nutrient situation becomes clear if total nutrient loads are compared (Table 6). Phosphate, nitrate and ammonia showed the same pattern, that is their load in the Volos area was significantly lower compared to the phosphate and ammonia load of the surface layer of the central part of the Gulf.

Pollution observed is non-point

The purpose of the present study was to investigate the impact of non-point pollution caused by the runoff fertilizers in Pagassitikos Gulf. It is expected that the main difference between point (industrial, sewage) and non-point (fertilizers runoff) pollution would lie on the heterogeneity of the nutrient distributions. It is well established that sewage pollution tends to develop a dispersion field characterized by strong environmental gradients (FRILIGOS, 1982 ; KARYDIS *et al.*, 1983). It was therefore realized that the best strategy used to discriminate between the point and non-point nutrient impact was to subdivide the system into two areas; the area affected by the Volos effluents that is the dispersion field and the remaining area of the Gulf. The definition of the dispersion field was based on criteria related to the density characteristics of the waters (GABRIELIDES & THEOCHARIS, 1978). However the remaining area had to be subdivided into two layers: the top layer system and the bottom layer system since it has been confirmed that the stratification of the system at a depth of 50m is very likely to persist over the years (FRILIGOS, 1988).

As a consequence the comparative areas were three :

- the coastal area of the city of Volos,
- the top layer (0-50m) of the central part of the Gulf and
- the bottom layer (50-100m) of the central part of the Gulf.

The seasonal and vertical distribution did not follow a clear pattern (Tables 2, 3, 4). Only nitrate values increased with depth. Nutrient distribution in the Pagassitikos Gulf results mainly from circulatory processes and seasonal variations of the biological activities (FRILIGOS, 1987). Runoff provides some nitrate and nitrite. The high nutrient values found in winter may be due to the nutrient rich water supply from runoff (FRILIGOS, 1988). Generally one can say that the quality of the water lies between mesotrophic and eutrophic and it is a function of different nutrient sources as well as biological activities. The most striking feature of the data presented is that all four nutrients studied showed more or less a uniform distribution and the total load was

a little higher in the central area. This is a strong indication that the non-point pollution sources are at least as important as the nutrient loads released in the area of Volos.

The lack of a nutrient dispersion field suggests that the loading of the Gulf is not unidirectional and that the central part of Pagassitikos cannot therefore function as an extensive system for nutrient assimilation. In addition, considerable amounts of high nutrient loads of the bottom layer can surface if desruption of the two layer systems occurs. Complete turnover of the water column has already been reported in winter (1976) by THEOCHARIS & LASKARATOS (1985). That water mixing resulted in a water type formation. If similar mixing takes place during the summer season it is possibly due to wind driven circulation. If strong winds prevail during the summer it is obvious that the nutrient enrichment in combination with high water temperature could result in an uncontrollable phytoplankton bloom.

CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS FOR FUTURE ACTIONS

During the last decades the fertilizers used in the Pagassitikos Gulf increased dramatically due to the increase of the catchment area as well as the great changes that followed the mechanization of agriculture.

The Gulf of Pagassitikos can be divided into the coastal area of the city of Volos and the central part of the Gulf. This discrimination is based on different physical characteristics of the two areas and it is well defined.

Nutrient distributions have neither shown any accumulation in the coastal area of Volos nor any environmental gradient accounting for the dispersion.

The uniform, more or less, nutrient distribution in the Gulf is a strong indication of the importance of the non-point pollution which is related to the run-off of the fertilizers.

The fact that the central area of the Gulf is the receiving body not only of sewage effluent but also of the fertilizers, directly received after rainfalls, limits the assimilation capacity of the system and renders it prone to phytoplankton blooms during the summer time, due to the combination of high nutrient loads as well as to high temperature.

Although in the Volos area almost all the blame for the situation in the Pagassitikos area was focused on the industrial pollution sources coming either from Volos or from the Larissa area it seems that the solution to the problem will be found in the proposed construction of a dam in the area where the Lake of Karla used to be.

The new lake will react in a beneficial way both towards environmental as well as towards economic resources because over the last few years many conflicts have occurred in Thessaly because of the shortage of irrigation water.

Further to the above this dam will enable the redevelopment of the famous wetland of the past and will enrich the water resources lying in the deeper soil levels.

REFERENCES

- ARMSTRONG F. A. G., STEARNS C. R., STRICKLAND J. D. H., 1967. The measurement of upwelling and subsequent biological processes by means of the Technicon Autoanalyser and associated equipment, *Deep-Sea Res.*, 14, 381-389.
- ΔHKEMB., 1987. Proc. Symp. «Pollution of Pagassitikos Gulf». Volos, Greece (In Greek).
- HAGER S. W., GORDON L. I., PARK P. K., 1968. A practical manual for the use of the Technicon Autoanalyser in seawater nutrient analysis. Final report to Bureau of Commercial Fisheries, Contract 14-17-0001-1759, Oregon State Univ., Dep. Oceanogr., No. 68-33, 31 p.
- FRILIGOS, N., 1982. Enrichment of inorganic nutrients in the inner Saronic Gulf. *Mar. Poll. Bull.* 13 : 154-158.
- FRILIGOS, N., 1987. Eutrophication assessment in Greek coastal waters. *Tox. Env. Chem.* 15 : 185-196.
- FRILIGOS, N. (1988). Nutrient environment and circulation of water masses in the Pagassitikos Gulf (Aegean Sea). *Oceanol. Acta* : 111-122
- GABRIELIDES, G. P. & THEOCHARIS, A. C., 1978. Physical and chemical characteristics of Pagassitikos Gulf, Greece. *Thalassographica* 2 : 135-154.
- KARYDIS, M., IGNATIADES, L. and MOSCHOPOULOU, N., 1983. An Index associated with nutrient eutrophication in the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 16 : 339-344.
- KOLIOU-MITSIOU, A., 1991. Recognition, valuation and confrontation of Pagassitikos Gulf pollution sources. In : Proc. II Cont. on Environmental Science and Technology (T. Lekkas, Ed.). Molivos- Greece. (in Greek with english summary) 544-551.
- KOROLEFF, F., 1970. Revised version of «Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue» *Inter. Cons. Explor. Sea*, CM 1969/C9, ICES Information on Techniques and Methods for sea water analysis, Interlab Rep., 3, 19-22.
- MARGARIS, N. S., 1987. Use of fertilizers in Pelion Mt and the phenomenon of plankton in Pagassitikos Gulf. In : ΔHKEMB (1987) (in Greek), 46-49.
- MURPHY J., RILEY J. P., 1962. A modified single solution method for phosphate in natural waters, *Anal. Chim. Acta*, 27, 31-36.
- PALEOKOSTAS, T., 1987. Eutrophication and planktonic blooms in Pagassitikos Gulf. in : ΔHKEMB (1987) (in Greek.), 98-100.
- SLAWYK G., MACISAAC J. J., 1972. Comparison of two automated ammonium methods in a region of coastal upwelling, *Deep-Sea Res.*, 19, 521-524.
- THEOCHARIS, A. & LASKARATOS, L., 1985. Water type formation and spreading in Pagassitikos Gulf (NW Aegean Sea). *Rapp. Comm. Inter. Mer. Medit.* 29 : 37-38.

Influence des conditions stationnelles sur la production de l'Alfa, (*Stipa tenacissima* L.)

D. NEDJRAOUI* et J. TOUFFET**

RESUME

L'étude comparée de la répartition de la phytomasse et de la production d'Alfa (*Stipa tenacissima* L.) de 1987 à 1989 dans trois stations situées selon un gradient climatique montre des différences importantes.

Dans la station la plus aride, la phytomasse aérienne et la production sont moins élevées. Cependant, le rapport production primaire sur pluviosité, deux fois plus important, témoigne d'une meilleure efficacité de la pluviosité sur la production.

MOTS CLES : *Stipa tenacissima* L., phytomasse, production primaire, zones arides, contraintes hydriques

SUMMARY

The phytomass and production of Alfa (*Stipa tenacissima* L.) are studied in three experimental stations located along a climatic gradient, during three years (1987-1989).

Important differences are appeared by the results.

In the more arid station, aerial phytomass and production are low. But the quotient, primary production by pluviosity, twice as important, prove a best rainfall efficiency for the production.

KEYWORDS : *Stipa tenacissima* L., phytomass, primary production, arid zones, stress hydric

INTRODUCTION

L'Alfa (*Stipa tenacissima* L.) est une espèce qui présente une grande amplitude écologique. En Algérie, elle se développe depuis l'étage bioclimatique semi-aride jusqu'à l'étage saharien entre 100 et 400 mm de pluviosité annuelle (DJEBAÏLI, 1978 ; LE HOUEROU *et al.*, 1979). L'Alfa colonise des milieux édaphiques homogènes ordonnés selon les bioclimats (POUGET, 1980). Elle se présente sur des sols à croûte calcaire et s'accommode peu des sols argileux et mal drainés (ACHOUR, 1983).

Cette espèce qui présente également un grand intérêt socio-économique subit une

surexploitation intense qui contribue à sa régression dans la steppe. Afin de sauvegarder et de régénérer les nappes alfatières, une meilleure connaissance du fonctionnement de ces écosystèmes est nécessaire. C'est pourquoi nous avons entre autre étudié la production de l'Alfa en fonction des caractères stationnels et notamment en fonction de la pluviosité.

LES STATIONS EXPERIMENTALES

La production de l'Alfa a été étudiée dans trois stations expérimentales localisées le long d'un gradient à aridité croissante sur la figure 1.

- La station d'El Hassasna est localisée dans la région de Saïda, à une altitude de 1280 mètres dans l'étage bioclimatique semi-aride supérieur à hiver frais (NEDJRAOUI et DJELLOULI, 1987).

* Laboratoire d'Ecologie - U.R.B.T. Université Houari Boumediene
2, rue Didouche Mourad, B. P. 812 - ALGER GARE

** Laboratoire d'Ecologie Végétale, UA CNRS 0696
Complexe scientifique de Beaulieu - 35042 RENNES CEDEX

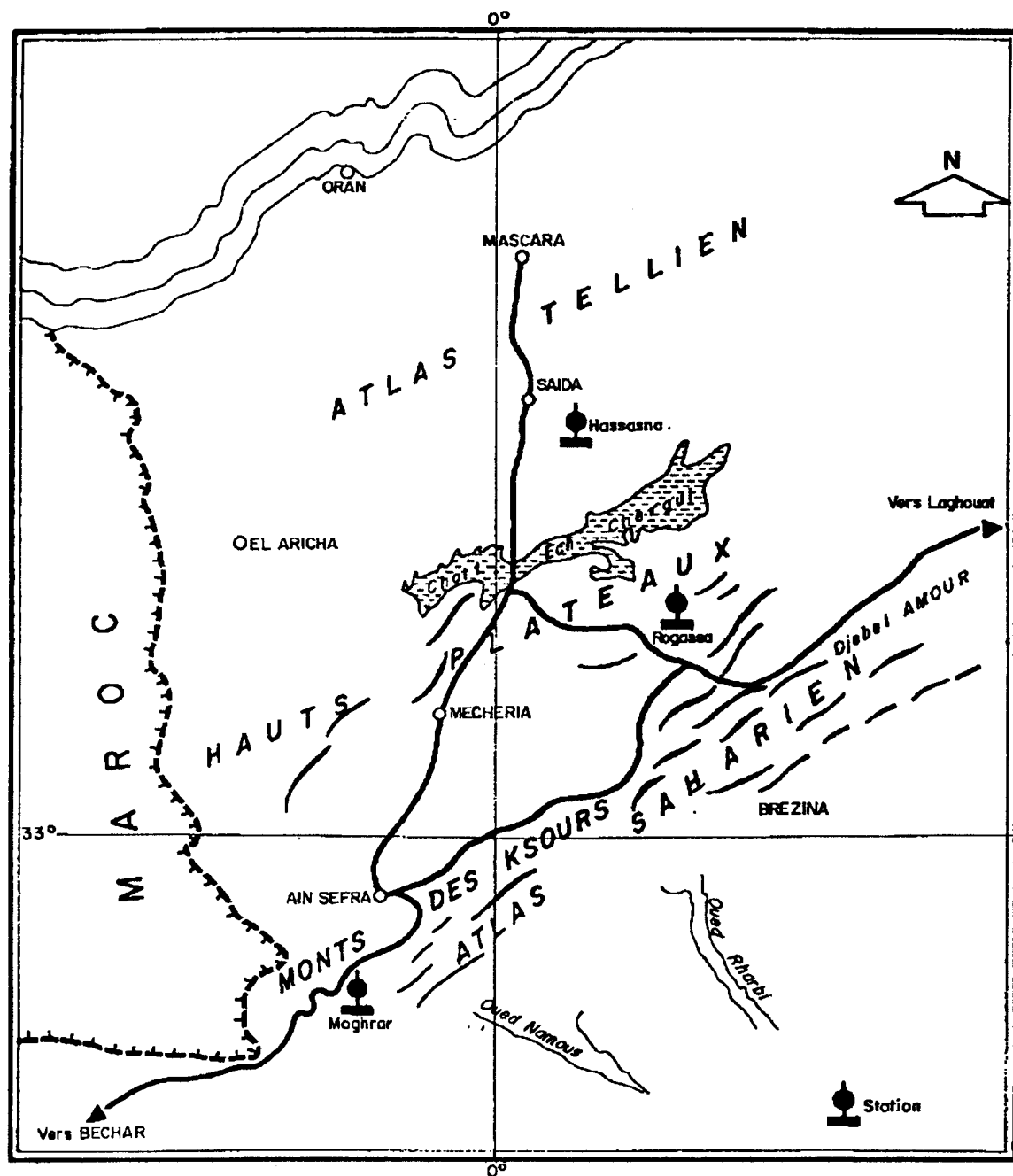


Figure 1.- Situation géographique des stations expérimentales

Cette station correspond à un matorral moyen clair à *Quercus ilex* et *Stipa tenacissima* reposant sur des sols bruns calcaires peu évolués de texture limono-argileuse en surface et plus sableuse en profondeur.

- La station de Rogassa est située au Nord-Ouest d'El Bayadh à une altitude de 1090 mètres, dans l'étage bioclimatique semi-aride inférieur à hiver froid. La station représente un faciès pur à Alfa, et les sols sont du type brun calcaire à croûte, à texture sablo-limoneuse.

- La station de Moghrar, localisée dans la région Sud de Ain Sefra, représente la limite

bioclimatique Sud où l'on peut encore rencontrer l'Alfa, c'est-à-dire l'étage saharien à hiver frais. La végétation est constituée par une formation steppique ouverte où *Arthrophytum scoparium* est l'espèce dominante.

L'Alfa occupe les zones ensablées et les creux se trouvant entre les blocs gréseux de la roche mère. La texture des sols peu évolués de la station est essentiellement sableuse.

Ces trois stations qui ont été mises en défens depuis plus de dix ans, diffèrent aussi bien par leurs caractères climatiques et édaphiques que par leur composition floristique et se prêtent,

Tableau 1
Caractéristiques climatiques et bioclimatiques des stations
(moyenne sur 12 ans de 1977 à 1989)

STATIONS	Pmm	M°C	m°C	M- m°C	INDICE XEROTH	REGIMES SAISONNIERS	Q2
EL HASSASNA	500	33,5	1,5	32,0	120	HPAE	53,7
ROGASSA	300	33,4	-0,9	32,3	200	AHPE	30,6
MOGHRAR	150	38,0	0,0	38,0	300	APHE	13,5

Tableau 2
Caractéristiques physicochimiques des sols des trois stations
a) Caractéristiques physiques et humidité du sol

STATIONS	Profond	A %	L %	S %	pH H ₂ O	pF 4,2	pF 3	pF 2,5	RU (mm)
EL HASSASNA	0-60	25,32	32,69	38,20	8,50	18,41	20,12	24,26	52,65
ROGASSA	0-30	11,60	15,30	71,50	7,72	15,53	18,16	20,20	21,60
MOGHRAR	0-50	7,50	7,50	85,20	7,86	4,65	5,15	5,80	10,35

R.U. : réserve maximum d'eau utile

b) Matières organiques en g/100 g

STATIONS	MO	C	N	C/N
EL HASSASNA	2,80	1,62	0,098	16,55
ROGASSA	2,43	1,41	0,080	17,62
MOGHRAR	0,77	0,45	0,070	6,42

c) Matières minérales en meq/100 g

STATIONS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	T	CaCO ₃ %
EL HASSASNA	32,50	5,33	0,88	2,04	21,50	17,30
ROGASSA	27,66	2,00	0,87	0,36	9,50	14,00
MOGHRAR	14,00	1,04	0,35	0,48	7,00	7,56

Tableau 3
Fréquences relatives des différents éléments dans les trois stations

Stations	Litières %	Sables %	Eléments grossiers %	Pellicules de glaçage %	Alfa %	Autres espèces %
EL HASSASNA	15,41	00	16,03	8,83	38,80	30,60
Ecart-type	9,1		3,8	3,9	6,9	6,9
ROGASSA	26,07	00	6,77	21,13	42,84	13,48
Ecart-type	6,6		2,0	4,9	4,8	7,7
MOGHRAR	11,30	33,50	20,20	00	20,06	15,00
Ecart-type	5,8	10,03	3,5		7,3	6,5

de ce fait, à des études visant à démontrer le comportement de l'Alfa dans des conditions écologiques différentes.

Les caractéristiques écologiques des trois stations sont reportées dans les tableaux 1, 2 et 3.

METHODE D'ETUDE DE LA PHYTO- MASSE ET DE LA PRODUCTION DE L'ALFA

La phytomasse aérienne représente l'expression quantitative de la végétation à un instant donné. La méthode utilisée consiste à couper l'Alfa au ras du sol sur une surface de 10m² qui a été retenue comme aire minimale d'échantillonnage après une série de mesures effectuées dans chaque station sur des surfaces différentes (NEDJRAOUI, 1990). Tout le matériel végétal est recueilli intégralement. Les différentes parties de la touffe sont séparées en 3 lots bien distincts :

1. les feuilles mortes encore attachées à la souche qui constituent la nécromasse,
2. les parties sèches qui comprennent les gaines enveloppant les feuilles, les feuilles les plus âgées qui sont entièrement jaunes ainsi que les hampes florales lorsqu'elles existent,
3. les feuilles vertes qui sont d'âge différent ont été rassemblées en un seul lot.

La phytomasse racinaire a été mesurée en prélevant l'ensemble de la masse racinaire de l'Alfa sur une même surface.

Des mesures répétées de phytomasse ont été effectuées dans chaque station durant les trois années 1987, 1988 et 1989 (une mesure tous les deux mois et deux mesures supplémentaires pen-

dant les périodes de croissance au printemps et en automne, ce qui fait 8 mesures par an dans chaque station entre les 15 et 20 des mois de janvier, mars, avril, mai, juin, septembre, octobre, décembre). Elles nous ont permis d'évaluer la production primaire de l'Alfa, qui se définit comme l'augmentation de la phytomasse au cours d'un temps donné (une année en général). Pour les espèces pérennes comme l'Alfa, la production primaire correspondra à la différence entre le maximum et le minimum de phytomasse verte observée durant l'année considérée.

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Etude comparative de la phytomasse de l'Alfa dans les trois stations

Les deux premières stations sont caractérisées par une forte phytomasse globale de l'Alfa (tableau 4). Cependant, la plus grande proportion de cette phytomasse est due aux parties mortes de la plante qui représentent la nécromasse, elle est égale à 78,6 % de la phytomasse totale dans la station d'El Hassasna et 83,5 % dans la station de Rogassa (tableau 5). Pour cette dernière station, les résultats concordent avec ceux obtenus par AÏDOUD (1983) qui trouve pour un plus grand nombre de mesures (200 parcelles de 16m² chacune) une proportion de nécromasse de 86 % et une biomasse de feuilles vertes de 14 % de la phytomasse totale. Les parties sèches, englobant les feuilles jaunes, les gaines et les hampes florales restent négligeables par rapport à la phytomasse globale notamment dans la station steppique. Par ailleurs, la biomasse de feuilles vertes est faible mais elle reste souvent supérieure pour l'Alfa des versants (11,5 % à El Hassasna) par rapport à celui des glacis (10,9% à Rogassa).

Tableau 4
Phytomasse aérienne de l'Alfa

STATIONS	Phytomasse totale kg MS/ha	Phytomasse des parties vertes kg MS/ha	Phytomasse des parties sèches kg MS/ha	Nécromasse kg MS/ha
EL HASSASNA	10550	1219	1030	8300
Ecart-type	1121	233	340	1400
ROGASSA	10350	1138	558	8650
Ecart-type	2200	144	161	1360
MOGHRAR	1655	709	315	631
Ecart-type	355	190	84	142

Tableau 5
Rapports des phytomasses des différents compartiments de l'Alfa
à la phytomasse totale

STATIONS	Phytomasse totale kg MS/ha	Phytomasse des parties vertes %	Phytomasse des parties sèches %	Nécromasse %
EL HASSASNA	10550	11,5	9,7	78,6
ROGASSA	10350	10,9	5,4	83,6
MOGHRAR	1655	42,8	19,0	38,4

Les résultats obtenus sont tout à fait différents pour l'Alfa des zones présahariennes (station de Moghrar). Les valeurs relativement faibles de la phytomasse de l'Alfa dans cette station ont été constatées par plusieurs auteurs travaillant dans des zones similaires, c'est-à-dire les régions présahariennes : LE HOUEROU *et al.* (1979) dans le Hodna trouve une phytomasse de l'Alfa de 1500 kg/MS/ha pour une tranche de pluviosité comprise entre 150 et 200 mm. FLORET et PONTANIER (1982) en Tunisie présaharienne donnent une valeur de 2200 kg/MS/ha. AIDOUH *et al.* (1982) ont estimé que la phytomasse de l'Alfa dans le Sud Oranais (lorsque la pluviosité est inférieure à 200 mm) est comprise entre 500 et 2200 kg/MS/ha.

Lorsqu'on considère la participation des différentes parties de l'Alfa à la phytomasse totale, on constate que dans cette station la proportion des feuilles vertes est nettement plus élevée que dans les deux autres stations ; il en est de même pour la partie sèche (42,8 % de feuilles vertes et 19 % de parties sèches). Ce genre de résultats a été retrouvé dans toutes les mesures effectuées dans cette station au cours des années d'études.

Ce phénomène incrimine principalement la faible nécromasse produite par l'Alfa dans cette station (38,4 % de la phytomasse totale). Ceci s'explique par le fait qu'une partie de la nécromasse est exportée par transport éolien, les vents étant très forts dans ces régions. MELZI (1986) estime que la nécromasse de l'Alfa, peu importante, entraînant une production plus faible de l'espèce, est une forme d'adaptation de l'Alfa à des conditions écologiques très difficiles. Cependant, les différentes mesures (mesures biométriques, corrélations avec la phytomasse, NEDJRAOUI, 1990) ont montré que l'Alfa des régions présahariennes présente une production plus importante de feuilles vertes que l'Alfa de versant et l'Alfa de glacis. Ce fait est généralement attribué au mode d'installation de l'Alfa dans ces régions. Cette espèce se niche dans les fissures de roche ou sur des ensablements récents, lui permettant de conserver plus d'humidité malgré les aléas climatiques.

Dans le tableau 6, sont reportées les valeurs de phytomasse aérienne et racinaire ainsi que le rapport R calculé entre ces 2 paramètres.

Tableau 6
Phytomasse aérienne et racinaire de l'Alfa dans les trois stations

STATIONS	Phytom. aérienne kg MS/ha	Litière kg MS/ha	Parties vertes kg MS/ha	Parties jaunes kg MS/ha	Phytom. racine kg MS/ha	Phytom. totale kg MS/ha	R = PR PA
EL HASSASNA	12012	10104	1339	569	3300	15312	0,27
ROGASSA	8040	6540	897	605	2020	10060	0,25
MOGHRAR	3525	1575	1720	230	2245	5770	0,63

Le rapport calculé PR/PA entre la phytomasse aérienne (PA) et la phytomasse racinaire (PR) est inférieur à l'unité dans le cas des 3 stations, ce qui revient à dire que la phytomasse aérienne est supérieure à la phytomasse souterraine, ainsi que l'a démontré AIDOU (1983) qui trouve un rapport $R = 0,16$ pour l'Alfa de la station de Rogassa. Il faut cependant noter que ce rapport qui a une valeur équivalente pour les deux premières stations (0,27 et 0,25) est beaucoup plus élevé dans le cas de la station présaharienne (0,63).

Le pourcentage de phytomasse attribué aux différents organes dépend de l'allocation des ressources vitales disponibles. Lorsque les conditions écologiques deviennent limitantes, notamment dans le cas d'un déficit hydrique important, le schéma d'allocation des ressources vers la biomasse aérienne peut être modifié au profit d'un développement plus important de la biomasse racinaire, permettant à la plante de survivre en utilisant l'eau disponible dans les couches les plus profondes du sol et d'éviter ainsi les contraintes hydriques.

Tableau 7
Production primaire et efficacité de la pluviosité (RUE) pour la production de l'Alfa

STATIONS	Année	Pluviosité mm	Production kg MS/ha/an	RUE kg MS/ha/mm
EL HASSASNA	1987	448	737	1,60
	1988	317	540	1,70
	1989	412	753	1,82
	Valeurs moyennes		676 ± 118	1,70
ROGASSA	1987	223	387	1,73
	1988	207	436	2,10
	1989	250	650	2,60
	Valeurs moyennes		490 ± 139	2,14
MOGHRAR	1987	98	399	4,07
	1988	136	473	3,47
	1989	158	366	2,30
	Valeurs moyennes		412 ± 54	3,28

2. Evaluation de la production primaire

Les valeurs de production annuelle calculées pour les trois années d'étude sont reportées dans le tableau 7.

A l'intérieur d'une même station, la production de l'Alfa varie d'une année à l'autre ; ces variations correspondent en général à celles de la pluviosité, la production la plus forte est observée dans la station d'El Hassasna (676 ± 118 kg/MS/ha/an) et la plus faible correspond à celle de la station de Moghrar 412 ± 54 kg/MS/ha/an. La figure 2 illustre les variations de la production de l'Alfa en fonction de la pluviosité annuelle. La

relation entre les deux paramètres est linéaire ($R = 0,86$) et ce, dans la gamme de pluviosité étudiée. Cependant, ces valeurs sont relatives car l'efficacité de l'eau diffère également d'une station à l'autre. Ceci nous a amené à considérer le rapport de la production primaire à la pluviosité qui est le «Rain Use Efficiency» (R.U.E.) (LE HOUEROU, 1984 et 1988). Ce paramètre exprimé en kg MS/ha/mm de pluie est actuellement de plus en plus utilisé pour établir des modèles de fonctionnement des écosystèmes des régions arides (AIDOU, 1989). Les valeurs obtenues pour ce rapport sont reportées dans le tableau 7 et leurs variations en fonction de la pluviosité annuelle sont représentées sur la figure 3.

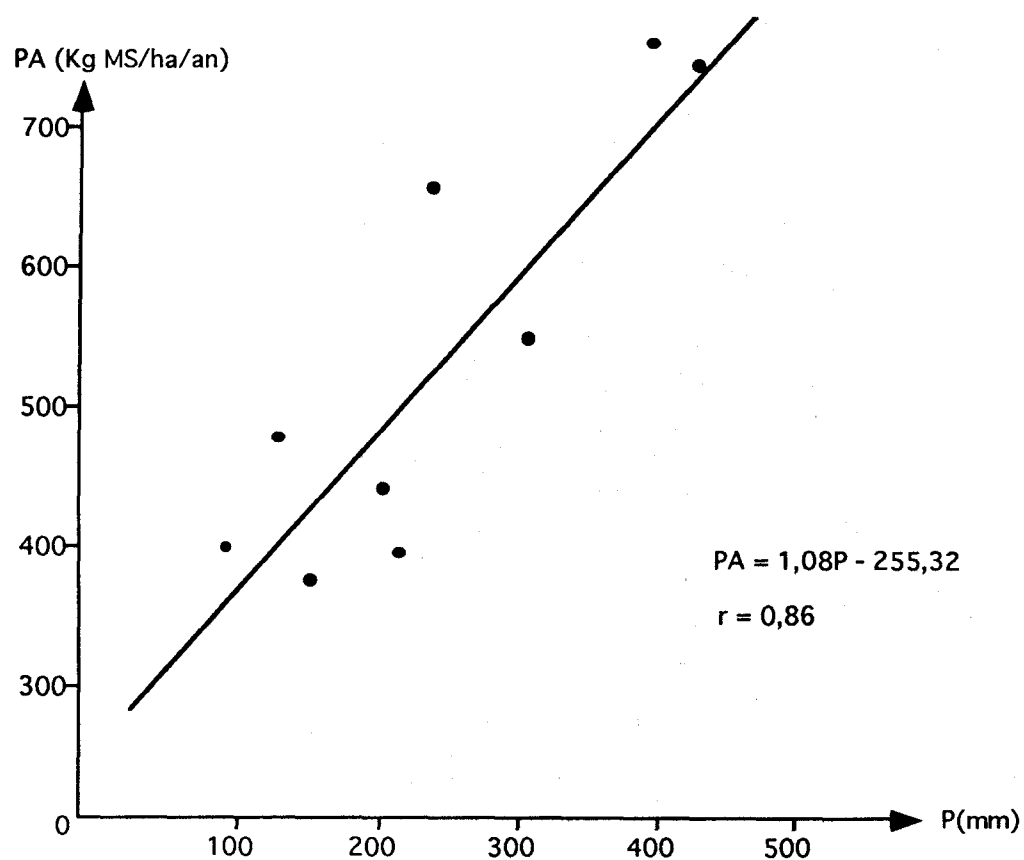


Figure 2.- Relation entre la productivité annuelle de l'Alfa et de la pluviosité annuelle

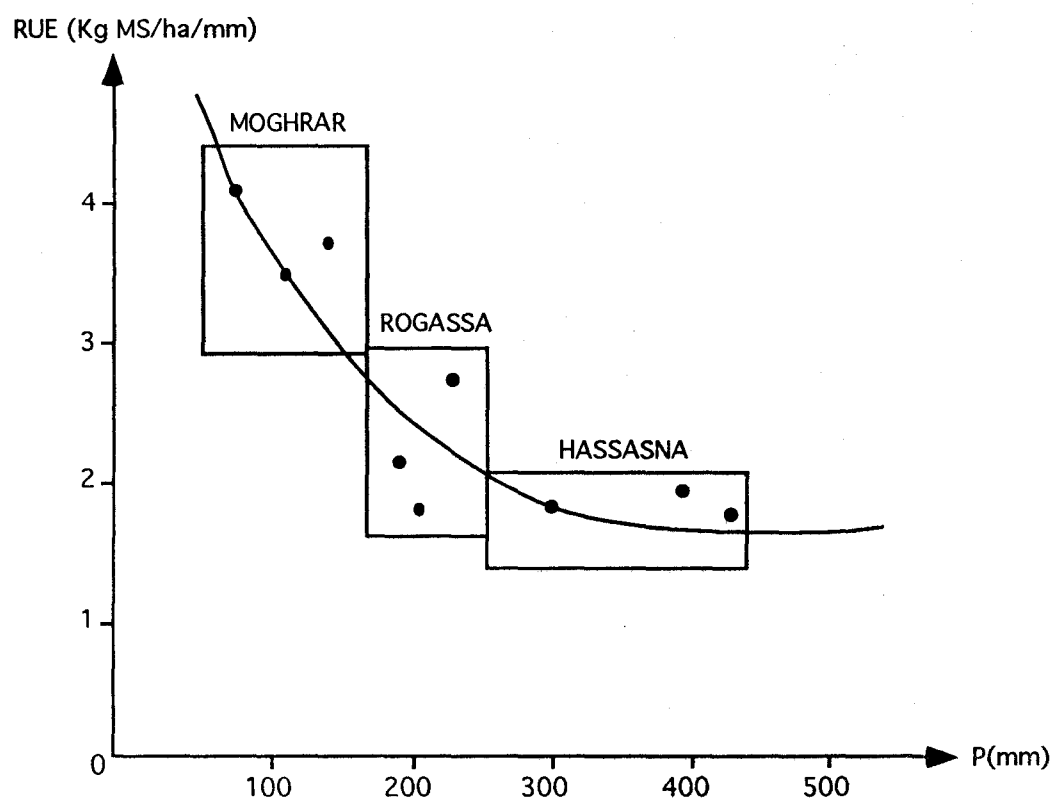


Figure 3.- Relation entre l'efficience de la pluviosité sur la production de l'Alfa et la pluviosité annuelle

Les résultats montrent que d'une manière générale la relation entre l'efficacité et la pluviosité est décroissante. L'efficacité de l'eau sur la production de l'Alfa augmente lorsque la pluviosité annuelle dans les stations diminue. Ces résultats semblent a priori en contradiction avec ceux obtenus par LE HOUEROU (1988) et par AIDOU (1989). Les courbes (RUE/P) présentées par ces deux auteurs sont inversées par rapport à celles que nous avons obtenues, bien que la valeur moyenne du RUE calculée pour les 3 stations (2,37) soit très proche de celle obtenue par AIDOU (1989) pour la station de Rogassa (2,2).

Pour ces deux auteurs, l'efficacité de l'eau croît avec la pluviosité. Cette affirmation est basée sur une échelle de perception différente. LE HOUEROU (1988) a pris en considération un très grand nombre de données de mesures (1500 mesures) relatives à des communautés différentes. Il trouve ainsi une efficacité de 4,0 pour l'ensemble des régions arides du globe.

Nos résultats concernent le comportement d'une seule espèce soumise à des conditions écologiques extrêmes.

L'adaptation de l'Alfa dans les régions présahariennes se traduit par une meilleure utilisation et par là-même une plus grande rentabilité de l'eau que reçoit cette espèce. Ceci est rendu possible grâce à un enracinement plus profond permettant à l'Alfa de puiser l'eau dans les couches les plus profondes, et également grâce à son installation sur les placages sableux où l'eau emmagasinée est plus disponible pour la plante. Une plus forte pluviosité, tout en augmentant la production, comme dans le cas de la station d'El Hassasna est sous-utilisée et l'efficacité reste faible et relativement constante.

CONCLUSION

L'influence des contraintes hydriques sur le comportement de l'Alfa se traduit par une diminution de la phytomasse aérienne en faveur d'un développement plus important du système racinaire. Bien que la production soit moins importante dans la station la plus aride, l'efficacité de la pluviosité pour la production primaire est plus élevée, reflétant ainsi une adaptation de l'Alfa à des conditions hydriques limitantes.

Cette étude fait partie d'un travail plus global concernant les mécanismes physiologiques, les modifications morphologiques et anatomiques et la consommation en bioéléments de l'Alfa dans les trois stations (NEDJRAOUI, 1990).

L'ensemble des résultats obtenus, nous a permis de supposer que dans les régions présahariennes, il existe un écotype particulier parfaitement adapté à une contrainte hydrique sévère. Une étude génétique pouvant confirmer cette hypothèse est envisagée.

BIBLIOGRAPHIE

- ACHOUR H., 1983 - Etude phytoécologique des formations à Alfa (*Stipa tenacissima* L.) du Sud oranais. Wilaya de Saida. *Thèse 3ème cycle*. Univ. Sci. Technol. H. Boumediène, Alger, 216 p. + ann.
- AIDOU A., 1983 - Contribution à l'étude des écosystèmes du Sud oranais. *Thèse 3ème cycle*. Univ. Sci. Technol. H. Boumediène, Alger, 253 p. + ann.
- AIDOU A., 1989 - Contribution à l'étude des écosystèmes steppiques pâturés des hautes plaines algéro-oranaises. Fonctionnement, évaluation et évolution des ressources végétales. *Thèse Doct.* Univ. Sci. Technol. H. Boumediène, 240 p.
- AIDOU A., NEDJRAOUI D., DJEBAILI S., POISSONET J., 1982 - Evaluation des ressources pastorales dans les Hautes Plaines steppiques du Sud oranais : productivité et valeurs pastorales des parcours. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, 69 (3-4), 47-58.
- DJEBAILI S., 1978 - Recherches phytoécologiques et phytosociologiques sur la végétation des hautes plaines steppiques et de l'Atlas saharien algériens. *Thèse Doct.* Univ. Sci. Technol. Languedoc, Montpellier, 229 p. + ann.
- FLORET C., PONTANIER R., 1982 - L'aridité en Tunisie présaharienne : climat, sol, végétation et aménagement. *Thèse Doct.* Univ. Sci. Technol. Languedoc, Montpellier, 580 p.
- LE HOUEROU H. N., 1984 - Rain Use Efficiency : an unifying concept in arid land ecology. *J. Arid Environ.*, 7, 213-247.
- LE HOUEROU H. N., 1988 - Interannual variability of rainfall and its ecological and managerial consequences of natural vegetation, crops and livestock in : time scales and water stress. DI CASTRI *et al.* ed. I.U.B.B., Paris, 323-326.
- LE HOUEROU H. N., CLAUDIN J., POUGET M., 1979 - Etude bioclimatique des steppes algériennes. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, 68, 3-4, 33-74.

- MELZI S., 1986 - Approche phytoécologique du processus de la désertification dans un secteur présaharien : Messaad - Djelfa. *Thèse magister*. Univ. Sci. Technol. H. Boumediène, Alger, 133 p.
- NEDJRAOUI D., 1990 - Adaptation de l'Alfa (*Stipa tenacissima* L.) aux conditions stationnelles. Contribution à l'étude du fonctionnement de l'écosystème steppique. *Thèse Doct.*. Univ. Sci. Technol. H. Boumediène, Alger, 240 p.
- NEDJRAOUI D., DJELLOULI Y., 1987 - Conditions climatiques et adaptation à la sécheresse de *Stipa tenacissima* L. dans l'Ouest algérien. Comm. Coll. Résistance des plantes à la salinité et à la sécheresse. Le Caire, 13 p.
- POUGET M., 1980 - Les relations sol-végétation dans les steppes Sud-algéroises. Doc. ORSTOM, Paris. *Thèse Doct.*. Univ. Aix-Marseille, 1979, 555 p.
-

Tolérance aux stress thermiques des feuilles et aire de répartition de *Quercus ilex*

Louis TRABAUD* et Maurice METHY*

Résumé

La résistance thermique des feuilles de *Quercus ilex* L. (Chêne vert), arbre abondant dans la moitié occidentale du Bassin méditerranéen, a été étudiée, en relation avec leur âge, par la méthode de l'induction de la fluorescence de la chlorophylle.

A -20 °C, le système photosynthétique n'est pas détruit pour une durée d'exposition inférieure à 2 heures. Une exposition à +50 °C durant 30 minutes n'altère pas ses capacités. Passé le premier mois, les jeunes feuilles ont acquis une sclérification qui leur permet de présenter une résistance au stress thermique comparable à celle des vieilles feuilles.

Cette étude, tenant compte des extrêmes de températures dans lesquelles *Q. ilex* peut vivre, permet de comprendre et de préciser son aire de répartition.

MOTS-CLEFS : aire de répartition, chaleur, fluorescence de la chlorophylle, froid, *Quercus ilex*, stress thermiques

Summary

Thermal stress tolerance of leaves and growing area of *Quercus ilex*. Thermal resistance of leaves of *Quercus ilex* L. (holm oak), a tree abundant in the western part of the Mediterranean Basin, has been studied in relation to the age of leaves by means of the method of chlorophyll fluorescence induction kinetics.

The photosynthetic system is not destroyed when the duration of the exposure time is less than 2 hours for a temperature of -20 °C. The apparatus still works when exposed during 30 minutes at +50 °C. After sclerification at 1-month old, the thermal resistance of young leaves is similar to that observed for older ones. Knowing the range of extreme temperatures allows to characterize the area in which *Q. ilex* can grow.

KEY-WORDS : chlorophyll fluorescence, cold, growing area, heat, *Quercus ilex*, thermal stresses

INTRODUCTION

Le Chêne vert (*Quercus ilex* L.) est un arbre sclérophylle abondant sur le pourtour du Bassin méditerranéen occidental où il couvre des superficies considérables (WALTER, 1968 ; HUETZ DE LEMPS, 1970 ; QUEZEL, 1976). Dans la partie orientale du Bassin, il est encore abondant en Grèce continentale et dans les îles de la mer Egée. Il est présent en Turquie mais de façon plus

sporadique. Partant du niveau de la mer, son amplitude de répartition altitudinale peut atteindre 1000 m environ en Europe, et peut s'élever jusqu'à près de 2400 m dans l'Atlas nord-africain. Dans les forêts qu'il constitue, comme dans les maquis où il est disséminé, le chêne vert occupe plusieurs variantes thermiques du climat méditerranéen (QUEZEL, 1976), montrant ainsi une certaine plasticité eu égard aux températures.

Or, la température est une variable écologique essentielle qui détermine, pour une large part, la distribution spatiale des végétaux, et peut conditionner leur productivité. La plupart du

* C.N.R.S., Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive,
1919 Route de Mende, B.P. 5051,
34033 Montpellier CEDEX 01, France

temps, la distribution spatiale de l'espèce *Q. ilex* dans la région méditerranéenne est donnée en fonction du coefficient pluviothermique Q (EMBERGER, 1955) et aussi de la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (m). En ce qui concerne cette température, *Q. ilex* occupe une aire de répartition comprise entre $+7^{\circ}\text{C}$ et -3°C (QUEZEL, 1976). Toutefois, il est relativement difficile de trouver dans la littérature la température maximale moyenne du mois le plus chaud M (d'ailleurs incluse dans les calculs du coefficient pluviothermique).

A partir des données météorologiques recueillies dans les stations situées dans l'aire réelle de répartition de *Q. ilex*, il est possible de mettre en évidence la présence de cette espèce dans des régions correspondant à des températures moyennes minimales de $+10^{\circ}\text{C}$ à -3°C et des températures moyennes maximales comprises entre $+22^{\circ}\text{C}$ et $+37^{\circ}\text{C}$.

L'objet du présent travail est de préciser :

- la résistance des feuilles de *Q. ilex* à des températures extrêmes,
- les conditions limites de températures dans lesquelles cette espèce peut vivre et assurer sa fonction chlorophyllienne.

Les températures moyennes, maximales comme minimales, peuvent permettre de caractériser l'aire de répartition de *Q. ilex*, mais elles ne donnent pas les conditions extrêmes réelles

(maximas ou minimas extrêmes ou «absolus» selon l'appellation en usage à l'Organisation Météorologique Mondiale) dans lesquelles peut vivre cette espèce. Nous avons donc été amenés à étudier l'impact sur le système photosynthétique de températures voisines des extrêmes afin de mieux connaître les limites climatiques de *Q. ilex*, connaissant l'effet que les températures exercent sur l'activité photosynthétique (BERRY et BJÖRKMAN, 1980 ; MAHAN *et al.*, 1987).

MATERIEL ET METHODES

Durant la dernière décennie la technique d'induction de la fluorescence de la chlorophylle a été abondamment utilisée en vue de la caractérisation de l'état de l'appareil photosynthétique en relation avec les conditions de stress (LICHTENTHALER et RINDERLE, 1988).

Schématiquement, pour un végétal photosynthétiquement actif, adapté à l'obscurité durant 20 à 30 minutes puis éclairé, la cinétique d'induction de la fluorescence de la chlorophylle présente successivement (Figure 1) les stades classiques suivants (nomenclature de LAVOREL et ETIENNE, 1977) : O, fluorescence initiale, I, inflexion, D, dépression, P, pic atteint en quelques secondes (OIDP = «phase rapide») puis décroissance vers un niveau final T via un état quasi stationnaire S et un maximum secondaire M (PSMT = «phase lente»).

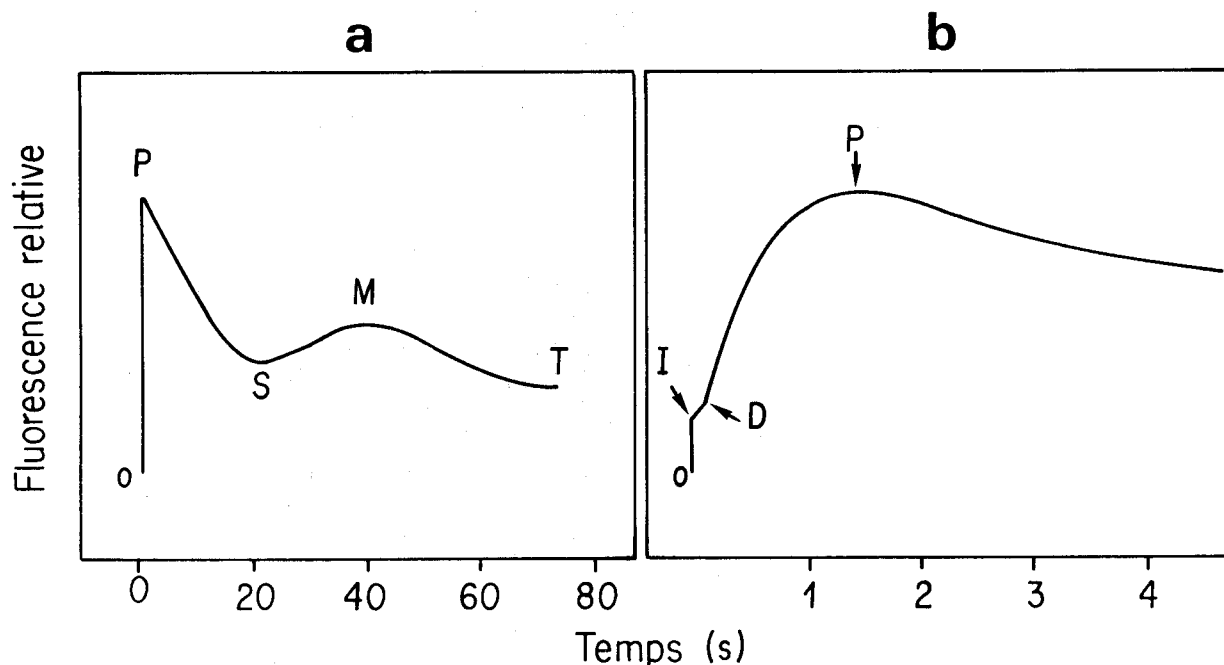


Figure 1.- Exemple de la courbe d'induction de la fluorescence de la chlorophylle d'une feuille verte. a) phase lente de la décroissance ; b) phase rapide d'augmentation

L'expérimentation a porté sur deux types de feuilles : les unes âgées de plus de 4 mois (appelées dans ce qui suit «vieilles feuilles»), les autres âgées de moins de 4 mois (appelées ultérieurement «jeunes feuilles»).

La caractérisation des conditions de stress a été réalisée de manière différente suivant le type de résistance étudié :

- Pour la résistance au froid, reprenant les travaux de SMILLIE et HETHERINGTON (1983), la vitesse maximale FR de l'accroissement de la fluorescence de la chlorophylle, mesurable par la pente au point D, a été considérée. Cet indice, affecté par tout impact sur le métabolisme photosynthétique, se prête bien à l'étude de la tolérance au stress. Les expériences ont été réalisées, à Montpellier, du 18 au 20 janvier 1988 (pour les vieilles feuilles) et les 16 et 18 mai 1988 (pour les jeunes feuilles) : ces deux périodes présentant des risques de froid dommageables pour l'un ou l'autre type. Des branches de 50 cm de longueur environ ont été prélevées au sud-est d'un arbre situé à moins de 100 m du laboratoire et représentatif d'une population spontanée dépassant 50 ans d'âge. Ces branches ont été placées dans une enceinte cryogène thermostatée. Les essais ont reposé sur des combinaisons de températures et de durées d'exposition, dont les conditions ont été précisées dans METHY et TRABAUD (1990). L'analyse a été effectuée sur la face adaxiale de feuilles témoins et de feuilles traitées ($n = 12-30$ pour les vieilles feuilles, $n = 6-9$ pour les jeunes feuilles), disposées sur un support thermostaté. L'appareillage fluoro-métrique utilisé, constitué d'une lampe à halogène sous alimentation stabilisée et d'un système de filtrage, a été décrit en détail dans METHY et SALAGER (1989) et permettait l'acquisition et l'analyse des signaux rapides relatifs à la phase ODP.

- Pour la résistance à la chaleur, c'est au contraire la phase lente (PSMT) des cinétiques qui a été utilisée. En effet, parmi les indices utilisables pour ce type de stress, le rapport de décroissance de la fluorescence ($R_{fd} = (P - T)/T$), peut être considéré comme un indice de vitalité et constituer un bon indicateur de l'activité photosynthétique potentielle des feuilles (LICHTENTHALER et RINDERLE, 1988). En particulier, des valeurs comprises entre 0,1 et 0,9 indiqueraient des dommages irréversibles (LICHTENTHALER, 1988). L'expérimentation s'est déroulée entre octobre 1990 et septembre 1991 à partir du même arbre de la population précédente (pour éviter toute différence d'ordre génétique), en prélevant des branches sur la même exposition que précédemment. L'exposition à la chaleur a été réalisée en disposant les

échantillons dans des boîtes en aluminium, elles-mêmes placées, pendant des durées variables, dans une enceinte thermostatée ; les températures et les durées d'exposition sont explicitées dans TRABAUD et METHY (1992). La fluorescence émanant des faces adaxiales de feuilles témoins ($n = 10-12$) et de feuille traitées ($n = 5-6$) a été induite par un faisceau mono-chromatique (632.8 nm) en provenance d'un laser He-Ne de 5mW (Polytec PL 750). Ce dispositif, décrit en détail dans TRABAUD et METHY (1992), permettait, à l'aide d'un filtrage optique approprié, la mesure et l'enregistrement du rapport de décroissance dans les régions spectrales voisines de 730 et 690 nm. Seules seront présentées ici les données relatives à la région 730 nm, les deux domaines de longueur d'onde conduisant aux mêmes types de résultats.

RESULTATS

Echantillons témoins

Le rapport de décroissance a été utilisé pour étudier, en l'absence de traitement thermique, l'évolution saisonnière de l'activité photosynthétique potentielle de *Q. ilex*. Cette activité se poursuit tout au long de l'année (Figure 2). Toutefois, le rapport de décroissance de la fluorescence des feuilles âgées de plus de 3 mois (vieilles feuilles) n'est pas constant. Cet indice présente ses valeurs les plus élevées en automne (3,24 en septembre), puis décroît pendant la période hivernale (point le plus bas en janvier : 1,79). Par la suite, il croît pour atteindre, à la fin du printemps et au début de l'été (mai et juin : 2,85), des valeurs semblables à celles de l'automne. Au cours du plein été (fin juillet), les valeurs ont, à nouveau, baissé. C'est au cours des saisons considérées comme les plus défavorables aux végétaux (hiver et été) que les valeurs de cet indice sont les plus faibles. Est-ce dû aux conditions climatiques plus rigoureuses : fortes chaleurs et manque d'eau pour l'été, températures froides et relatif déficit hydrique en hiver, caractéristiques du climat méditerranéen?

De fortes valeurs de R_{fd730} ont été enregistrées (Figure 2) pour les jeunes feuilles de l'année (âgées de moins de 3 mois), dès leur apparition au printemps (mai : 3,14), suivies d'une légère décroissance en juillet au cœur de l'été. Toutefois, cette décroissance n'est pas aussi accentuée que pour les vieilles feuilles. Pendant la période au cours de laquelle les réponses des deux types de feuilles ont été observées parallèlement, les valeurs de l'indice R_{fd730} ont toujours été supérieures chez les jeunes feuilles.

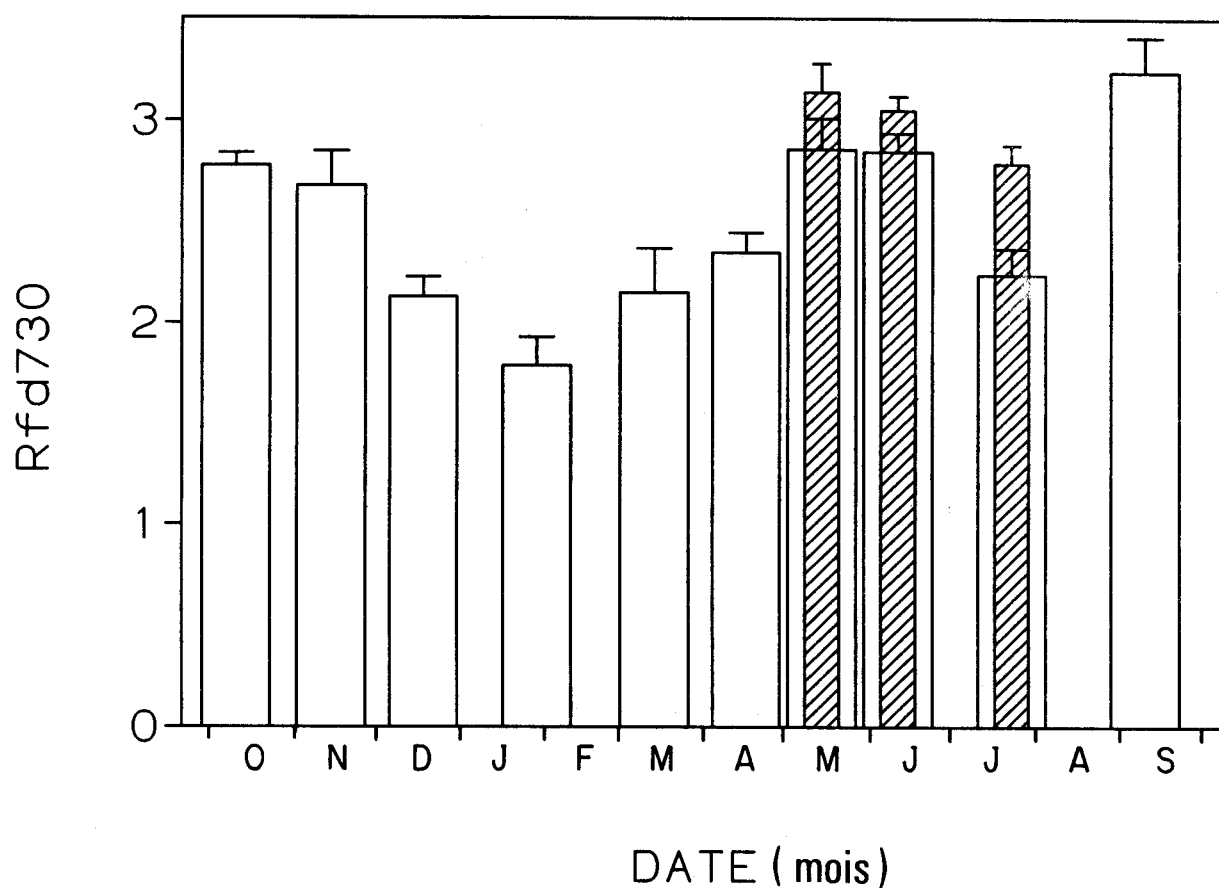


Figure 2.- Variation saisonnière du rapport de décroissance de la fluorescence Rfd730 pour les jeunes feuilles (rectangles hachurés) et les vieilles feuilles (rectangles blancs) de *Q. ilex*. Les lignes verticales indiquent l'erreur standard (n = 10-12).

EFFETS DE LA CHALEUR

La tendance de l'évolution annuelle des valeurs de l'indice de vitalité pour les vieilles feuilles soumises à une température de +50 °C pendant 30 mn fut semblable à celle des feuilles non traitées (Figure 3). Toutefois, des valeurs moins élevées ont été observées, les plus faibles correspondant au mois de décembre (0,96). En été et en automne, les valeurs furent pratiquement constantes (voisines de 2).

La température de +50 °C a eu une forte action sur le système photosynthétique des jeunes feuilles peu après leur apparition au mois de mai (Rfd = 0,34 ; Figure 3). Au cours des deux autres mois, après acquisition de leur sclérification, le rapport de décroissance, plus stable, traduisit une réduction moins importante de l'activité photosynthétique potentielle.

Pour les vieilles feuilles, la réduction de l'indice de vitalité est particulièrement forte en hiver (55 % en décembre) puis au début du printemps (47 % en avril), alors que la résistance la meilleure a été constatée en été (5 % de réduction en juillet) : c'est précisément au cours de cette période que de telles températures peuvent survenir. L'appareil chlorophyllien de *Q. ilex* est apte à leur résister.

Cette résistance est aussi importante pendant les mois d'été (14 % et 20 % de réduction en juin et juillet respectivement) pour les jeunes feuilles, après sclérification du limbe. Tandis qu'immédiatement après leur apparition (mai), leur appareil photosynthétique est détruit avec 90 % de réduction. Ainsi, l'espèce *Q. ilex* (ou plus exactement son système photosynthétique) est donc bien adaptée aux conditions thermiques de la Méditerranée puisque sa résistance aux fortes températures est située pendant les mois d'été, les plus chauds.

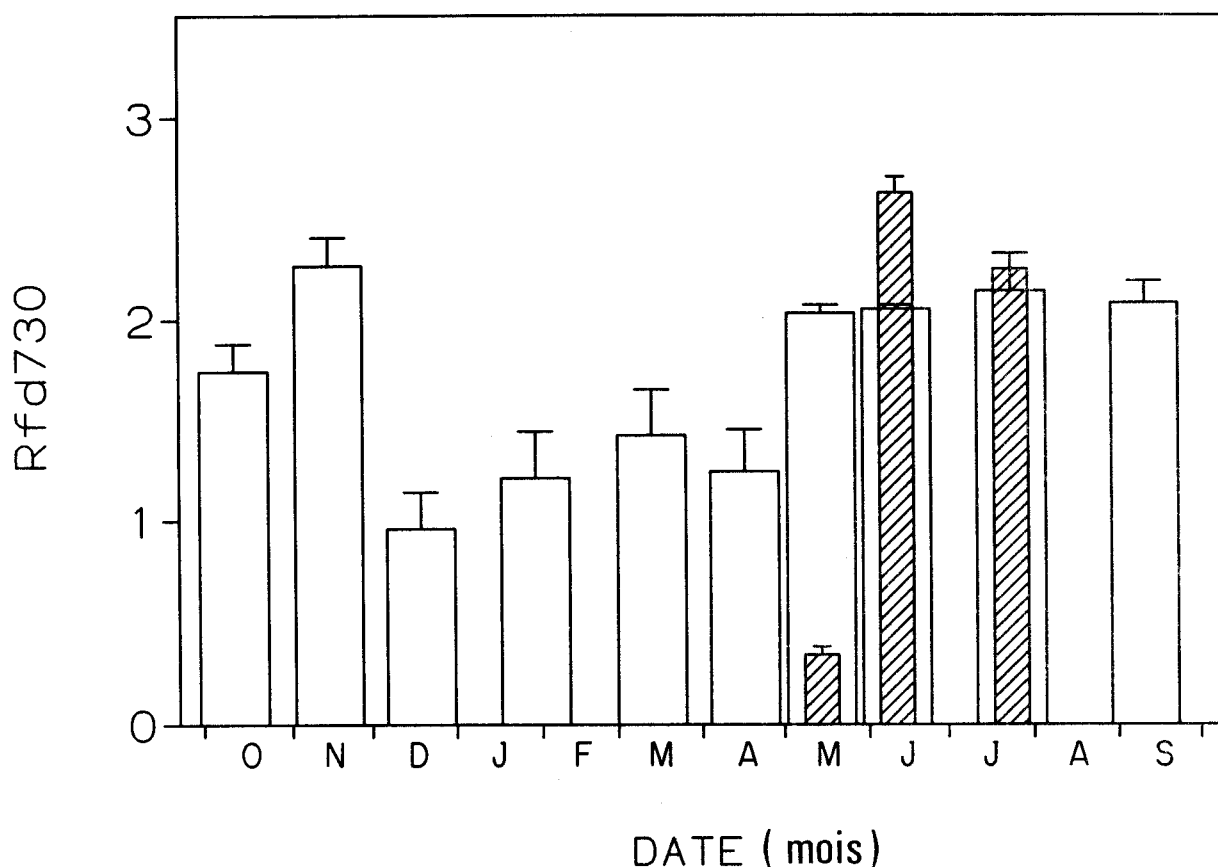


Figure 3.- Variation saisonnière du rapport de décroissance de la fluorescence Rfd730 pour les jeunes feuilles (rectangles hachurés) et les vieilles feuilles (rectangles blancs) de *Q. ilex*, après un traitement thermique de 30 minutes à 50 °C. Les lignes verticales indiquent l'erreur standard (n = 5-6)

Effets du froid

Pour des feuilles âgées d'un an, la vitesse de fluorescence variable semble peu affectée par plusieurs heures d'exposition à -5 °C comme à -10 °C (Tableau 1). En revanche, à -15 °C, et plus particulièrement à -20 °C, il y a une réduction très rapide de la réponse du système chlorophyllien : l'indice obtenu est très voisin de, ou inférieur à, 1 à partir de 2 heures d'exposition à -15 °C et dès 1 heure d'exposition à -20 °C.

Les dommages peuvent se poursuivre au-delà de la période d'exposition et être irréversibles comme il ressort de mesures effectuées sur des feuilles exposées durant 3 h à -15 °C, puis placées durant 2 h à la température ambiante (3 répétitions). Un repos de 5 h après une exposition de 2 h à -20 °C (2 répétitions) aboutit aux mêmes résultats : le système chlorophyllien ne récupère pas ses capacités assimilatrices.

Les feuilles âgées d'un mois sont plus sensibles. Elles présentent seulement une résistance à des températures de -5 °C jusqu'à une demi heure. Au delà de cette durée et de cette température, la destruction de l'appareil photosynthétique semble irrémédiable (Tableau 1).

DISCUSSION

Les paramètres utilisés pour l'analyse de la fluorescence de la chlorophylle sont difficiles à corréler avec des réactions biochimiques ou photochimiques de la photosynthèse ou une mesure plus directe de la capacité photosynthétique. En particulier, le paramètre Rfd ne permet pas une différenciation des atténuations («quenching») d'origines photochimique et non-photochimique comme la méthode pulsée développée par SCHREIBER et BILGER (1987). Le type d'analyse mise en oeuvre, qui implique un appareillage peu coûteux, par

Tableau 1

Effets du froid et de sa durée sur la vitesse de fluorescence variable ramenée à sa valeur de référence ; les valeurs entre parenthèses représentent l'erreur standard de la moyenne ($n = 12-30$ pour les vieilles feuilles, $n = 6-9$ pour les jeunes feuilles)

Durées d'exposition	Températures			
	-5 °C	-10 °C	-15 °C	-20 °C
Feuilles de 1 an				
15 min.	1,58 (0,08)	1,87 (0,04)	1,67 (0,25)	1,28 (0,04)
30 min.	1,67 (0,07)	1,97 (0,03)	1,42 (0,05)	1,34 (0,12)
1 h.	1,74 (0,12)	1,65 (0,08)	1,28 (0,08)	0,86 (0,30)
2 h.	1,87 (0,06)	1,72 (0,11)	1,06 (0,20)	1,03 (0,09)
3 h.		1,87 (0,03)	1,35 (0,10)	
5 h.	1,90 (0,08)		0,78 (0,21)	
7 h.	1,83 (0,05)			
Feuilles de 1 mois				
15 min.	1,94 (0,26)	0		
30 min	1,40 (0,20)	0		
1 h.	0			

ailleurs largement employé (LICHTENTHALER et RINDERLE, 1988) est cependant utilisable avec succès à l'occasion de criblages rapides comme l'ont montré OURCIVAL *et al.* (1992) pour l'indice de vitalité.

La tolérance à un stress dépend beaucoup de la présence de contraintes additionnelles (fort éclaircissement, déficit hydrique). L'un des objets de la présente étude était de caractériser l'effet intrinsèque d'un stress thermique. Il est évident que de nombreux facteurs mésologiques déterminent l'aire de distribution de *Q. ilex* et les potentialités de survie de l'espèce à l'intérieur de cette aire.

Les valeurs du Rfd des feuilles témoins ont été les plus basses pendant les périodes considérées comme défavorables à la croissance de la végétation : l'hiver et l'été qui sont des moments soit de sécheresse soit de contraintes thermiques extrêmes (froides ou chaudes) bien connus en climat méditerranéen. En été, une résistance à des températures faiblement élevées (+50 °C) semble apparaître, puisque les valeurs de l'indice Rfd des vieilles feuilles soumises à une telle température restent pratiquement constantes depuis le mois de mai jusqu'au mois de septembre ; ceci n'est pas le cas lorsque les feuilles n'ont subi aucun traitement, puisqu'il y a une baisse de ces valeurs au mois de juillet.

A +50 °C, l'appareil photosynthétique des vieilles feuilles de *Q. ilex* n'est pas encore détruit

irréremédiablement comme l'attestent les valeurs supérieures à 1 trouvées pour Rfd. Cette température est seulement létale pour les jeunes feuilles du mois de mai. A partir du moment où les feuilles commencent à se sclérifier, avec la formation d'une couche protectrice, la résistance à la température apparaît.

La résistance à la chaleur (indiquées par les fortes valeurs du Rfd et les faibles pourcentages de diminution) des feuilles au cours de l'été (quel que soit leur âge) pourrait indiquer l'existence d'une certaine adaptation de l'espèce à des températures élevées (voisines de +50 °C).

L'appareil chlorophyllien de *Q. ilex* présente tout au long de l'année une certaine capacité photosynthétique pour des températures temporaires de +50 °C, sauf lorsque les feuilles sont nouvelles et non encore sclérifiées. Il peut donc supporter des accroissements brefs, momentanés, de la température ambiante. Lors des mois les plus froids, le système chlorophyllien des feuilles âgées de *Q. ilex* peut supporter une température de -15 °C pendant 5 heures, et -20 °C pendant une demi-heure lors de la présence du risque d'apparition de ces températures.

Ces résultats permettent de préciser l'amplitude de l'aire de répartition de *Q. ilex* (celle-ci résultant bien évidemment de la conjugaison de plusieurs facteurs écologiques, climatiques et édaphiques). Apparemment (LARCHER, 1981 ; METHY et TRABAUD, 1990), la destruction de

l'appareil chlorophyllien limiterait pour une part l'extension de l'espèce. Si l'appareil est détruit, l'espèce ou, plus exactement, les individus composant l'espèce doivent produire de nouvelles feuilles à partir des réserves accumulées dans les organes, ce qui les pénalise et les empêche de coloniser des sites potentiellement accessibles si les conditions écologiques le permettaient.

Compte tenu des résultats expérimentaux, il apparaît que la seule connaissance des moyennes minimales du mois le plus froid et maximales du mois le plus chaud, ne permet pas de caractériser l'aire exacte de répartition d'une espèce. Des dommages irréversibles peuvent être causés en l'espace de quelques minutes par des températures extrêmement basses ou élevées. Il devient donc nécessaire de connaître ces températures (tout autant minimales que maximales) qui surviennent dans le périmètre de l'aire occupé par l'espèce.

Dans la figure 4, et sur le tableau en annexe, sont portées les couples de températures minimales et maximales absolues enregistrées par des stations météorologiques des pays du

pourtour du Bassin méditerranéen, situées dans les lieux où vit *Q. ilex*. Cette espèce peut croître dans des lieux où les températures maximales peuvent atteindre pratiquement +50°C, et où les températures minimales descendent jusqu'à -24°C. Ces températures ont été rencontrées le plus fréquemment en Espagne. Bien que voisines des conditions extrêmes dans lesquelles peut vivre *Q. ilex*, ces valeurs ne représentent pas les températures extrêmes dans lesquelles sont placés des individus de l'espèce, car la plupart des stations météorologiques sont implantées proches des agglomérations ou des aéroports et, bien souvent, loin des fonds de vallées ou des versants de montagnes sur lesquels croît *Q. ilex* et présentant, probablement, des conditions encore plus rigoureuses de froid et/ou de chaleur.

En conclusion, la résistance de son appareil photosynthétique permet à *Q. ilex* de supporter des températures pouvant aller de -20°C à +50°C. Avec une amplitude thermique de l'ordre de 70°C, *Q. ilex* paraît donc capable de coloniser un vaste territoire autour de la Méditerranée.

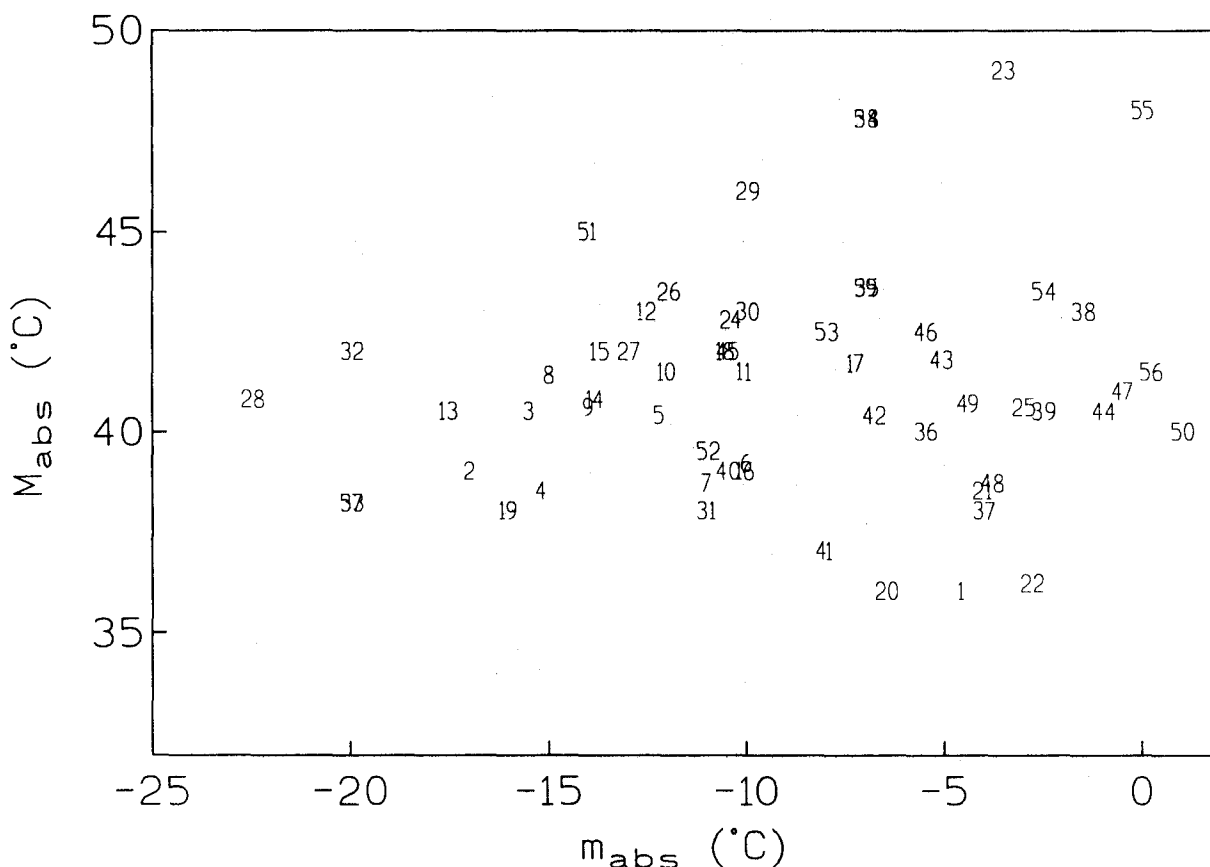


Figure 4.- Valeurs extrêmes de températures minimales (m_{abs}) et maximales (M_{abs}) relevées dans l'aire d'extension de *Q. ilex*

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Madame EL HINY de l'Organisation Météorologique Mondiale (Genève) qui leur a aimablement communiqué une partie des données climatiques utilisées dans le présent travail. C'est grâce aux informations fournies par des collègues des Universités de Léon et Albacete (Espagne) que les valeurs des températures les plus extrêmes ont pu être obtenues.

BIBLIOGRAPHIE

- BERRY, J. & BJÖRKMAN, O. (1980). Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Ann. Rev. Plant Phys.*, 31, 491-543.
- EMBERGER, L. (1955). Une classification biogéographique des climats. *Recueil Travaux Laboratoires Botanique, Géologique et Zoologique*, Faculté des Sciences de Montpellier 7, 3-43.
- HUET de LEMPS, A. (1970). *La végétation de la Terre*. Masson, Paris.
- LARCHER, W. (1981). Low temperature effects on mediterranean sclerophylls : an unconventional viewpoint. In : *Components of Productivity of Mediterranean Climate Regions: Basic and Applied aspects*. (Margaris NS and Mooney HA, eds) W. Junk, The Hague, 259-266.
- LAVOREL, J. & ETIENNE, A.L. (1977). *In vivo* chlorophyll fluorescence. In : *Topics in Photosynthesis*, (Barber J., ed.). Elsevier, Amsterdam, 203-268.
- LICHTENTHALER, H.K. (1988). *In vivo* chlorophyll fluorescence as a tool for stress detection in plants. In : *Application of chlorophyll fluorescence* (Lichtenthaler HK, ed.). Kluwer Academic Publishers, Norwell, 129-142.
- LICHTENTHALER, H.K. & RINDERLE, U. (1988). The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants. *CRC Crit. Rev. Analyt. Chem.* (suppl. 1) 19., 29-85.
- MAHAN, J.R., BURKE, J.J. & ORZECZ, K.A. (1987). The «thermal kinetic window» as an indicator of optimum plant temperature. *Plant Physiol.* 83 (Suppl.) 87.
- METHY, M. & SALAGER, J.L. (1989). A microcomputer based fast data acquisition system for *in vivo* measurements of stress effects in crop plants by chlorophyll fluorescence induction. *Comput. Electron. Agric.*, 4, 121-128.
- METHY, M. & TRABAUD, L. (1990). Caractérisation de la résistance au froid de deux espèces sclérophylles méditerranéennes par la fluorescence de la chlorophylle. *Ann. Sci. For.*, 47, 141-148.
- OURCIVAL, J.M., METHY, M. & BURGESS, R. (1992). Mise en évidence par la fluorescence de la chlorophylle de la variabilité génotypique de la réponse à une contrainte hydrique chez le trèfle blanc (*Trifolium repens* L.) et l'ivraie vivace (*Lolium perenne* L.). *Can. J. Bot.*, 70, 1556-1562.
- QUEZEL, P. (1976). Les forêts du pourtour méditerranéen. In : *Forêts et maquis méditerranéens : écologie, conservation et aménagement*. Note Technique MAB 2. Les presses de l'UNESCO. Paris. 9-33.
- SCHREIBER, U. & BILGER, W. (1987). Rapid assessment of stress effects on plant leaves by chlorophyll fluorescence measurements. In : *Plant Response to Stress* (Tenhunen JD et al., eds.). NATO-ASI, Ser. g. 15, Springer, Berlin, 27-53.
- SMILLIE, R.M. & HETHERINGTON, S.E. (1983). Stress tolerance and stress-induced injury in crop plants measured by chlorophyll fluorescence *in vivo*. *Plant Physiol.* 72, 1043-1050.
- TRABAUD, L. & METHY, M. (1992). Effets de températures sub-létales sur l'appareil photosynthétique du chêne vert (*Quercus ilex* L.). *Ann. Sci. For.*, 49, 637-649.
- WALTER, H. (1968). *Die Vegetation der Erde in öko-physiologischer Betrachtung. Band II : Die gemässigten und arktischen Zonen*. Fischer Verlag, Stuttgart.

Tableau annexe

Liste des stations météorologiques utilisées. Leurs numéros correspondent à ceux de la figure 4

Noms des stations	numéros	Min.abs	Max.abs
Nice	1	-4,5	36,0
Marseille	2	-17,0	39,0
Nantes	3	-15,5	40,5
Bordeaux	4	-15,2	38,5
La Rochelle	5	-12,2	40,4
Cap Béar	6	-10,0	39,2
Perpignan	7	-11,0	38,7
Montpellier	8	-15,0	41,4
Nîmes	9	-14,0	40,6
St Raphaël	10	-12,0	41,5
Millas	11	-10,0	41,5
Ganges	12	-12,5	43,0
St Martin-de-Londres	13	-17,5	40,5
Sumène	14	-13,8	40,8
Le Vigan	15	-13,7	42,0
Madrid	16	-10,0	39,0
Valencia	17	-7,2	41,7
Zaragoza	18	-10,7	42,0
Soria	19	-16,0	38,0
Barcelona	20	-6,5	36,0
Palma de Mallorca	21	-4,0	38,5
Mahon	22	-2,8	36,2
Sevilla	23	-3,5	49,0
Granada	24	-10,4	42,8
Malaga	25	-3,0	40,6
Villarobledo	26	-12,0	43,5
Yeste	27	-13,0	42,0
Albacete	28	-22,5	40,8
Arguellite	29	-10,0	46,0
Molinicos	30	-10,0	43,0
Riopar	31	-11,0	38,0
Paterna	32	-20,0	42,0
Salamanca	33	-20,0	38,2
Marchena	34	-7,0	47,8
Badajoz	35	-7,0	43,6
Roma	36	-5,5	40,0
Napoli	37	-4,0	38,0
Palermo	38	-1,5	43,0
Messina	39	-2,5	40,5
Firenze	40	-10,5	39,0
Genova	41	-8,0	37,0
Genna Silana	42	-6,8	40,4
Montes	43	-5,1	41,8
Lisboa	44	-1,0	40,5
Thessaloniki	45	-10,5	42,0
Athenai	46	-5,5	42,5
Heraklion	47	-0,5	41,0
Samos	48	-3,8	38,7
Kerkira	49	-4,4	40,7
Zakynthos	50	1,0	40,0
Larissa	51	-14,0	45,0
Istanbul	52	-11,0	39,5
Izmir	53	-8,0	42,5
Casablanca	54	-2,5	43,5
Rabat	55	0,0	48,0
Alger	56	0,2	41,5

XIIème Colloque des Diatomistes de Langue Française

Le XIIème Colloque des Diatomistes de Langue Française, organisé par le Laboratoire d'Ecologie des Eaux Continentales Méditerranéennes, s'est tenu du 5 au 10 avril 1993, à la Faculté des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme (Université Aix-Marseille III). Il a accueilli 43 congressistes représentant 7 pays (la Belgique, l'Autriche, la Suisse, l'Espagne, le Malawi et la France).

Quatorze communications et huit posters ont été présentés sur des thèmes aussi variés que la systématique, l'hydrobiologie, l'océanographie, la paléoécologie. Trois tables rondes ont permis de nombreux échanges scientifiques, sur les problèmes d'échantillonnage dans les eaux courantes et les indices diatomiques (table ronde animée par J. PRYGIEL de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie), sur les Diatomées et la Biodiversité (Dr M.R. PLANTE-CUNY, du Centre d'Océanologie de Marseille, URA 41), sur les perspectives de collaboration scientifique avec l'Association des Diatomistes de Langue allemande (Dr E. ROTT, Institut für Botanik de l'Université d'Innsbruck, Autriche). Une conférence publique sur les lacs et leurs peuplements d'algues a été donnée par le Pr R. LE COHU à la Maison Régionale de l'Eau de Barjols.

Cette manifestation scientifique a pu être réalisée grâce au soutien financier de l'Université Aix-Marseille III, la Ville de Marseille, le Conseil Général des Bouches du Rhône, l'A.R.P.E., le Conseil Général du Var, la Mairie de Barjols et la Société Leica.

Résultats préliminaires des études paléoécologiques et paléoclimatiques du sondage Colletière C" (lac de Paladru, France)

Preliminary results of the paleologic and paleoclimatic studies of sediment core Colletière C " (Paladru lake, France)

Jean Luc BOREL*, Jacques Léopold BROCHIER** et Jean Claude DRUART***

RESUME

Des recherches interdisciplinaires visant à la reconstitution de l'environnement littoral et conjugant les analyses diatomiques, palynologiques et sédimentaires, ont permis de reconnaître les fluctuations successives du niveau du lac de Paladru (Isère, France) durant le premier millénaire de notre ère et de reconstituer une évolution limnologique et climatique. Des concordances significatives ont pu ainsi être mises en évidence.

MOTS CLES : lac de Paladru, Colletière, station littorale médiévale, paléolimnologie, paléoécologie, paléoclimatologie, diatomées, pollens, sédiments

ABSTRACT

An interdisciplinary study, based on the analysis of diatoms, pollen and the sediment and aimed at the reconstitution of the littoral environment, has recognized several fluctuations of the lake level during the first millenium A.D. and reconstructed the lake's lacustrine and climatic evolution. Some significant correspondences between the different analysis have been shown.

KEY-WORDS : Paladru lake, Colletière, medieval lake-side dwelling, palaeolimnology, sediment, palaeoecology, palaeoclimatology, sediment, pollen, diatoms

INTRODUCTION

L'objectif des recherches paléoécologiques engagées sur le site médiéval immergé de Charavines-Colletière est de retracer l'évolution de l'environnement littoral avant, pendant (DRUART, 1990) et après l'occupation humaine de ce site au cours de la première moitié du XIème siècle de notre ère. Ces études, conduites dans

une approche interdisciplinaire, ont permis, à partir d'un échantillonnage serré, et ce, suivant un pas de temps très court, de reconstituer les changements limnologiques et climatologiques majeurs.

Les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus sur la carotte C" (80 cm) (figure 1), prélevée à la lisière occidentale du site archéologique, situé côté lac (figure 2). Trois datations, une archéologique et deux au radiocarbone, placent la séquence de craie lacustre entre les 8ème et 11ème siècle de notre ère. L'analyse qualitative et quantitative des frustules de

* Centre de Biologie Alpine, Université Joseph Fourier, B.P. 53, F-38041 Grenoble Cedex

** C.A.P., C.R.A. du C.N.R.S., Valence

*** Institut de Limnologie, Station d'Hydrobiologie Lacustre, I.N.R.A., B.P. 511, F-74203 Thonon Cedex

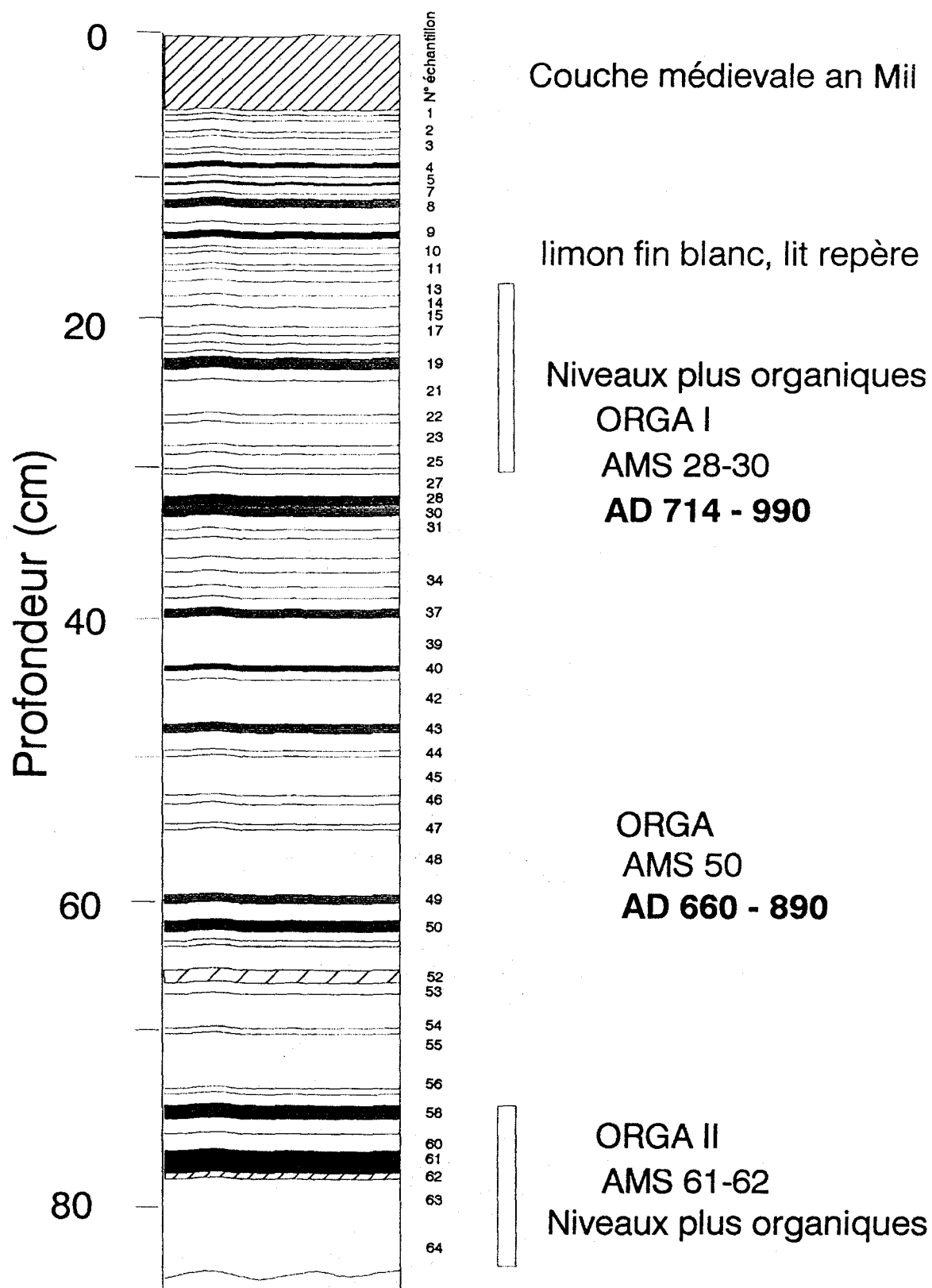


Figure 1.- Coupe du sondage C''

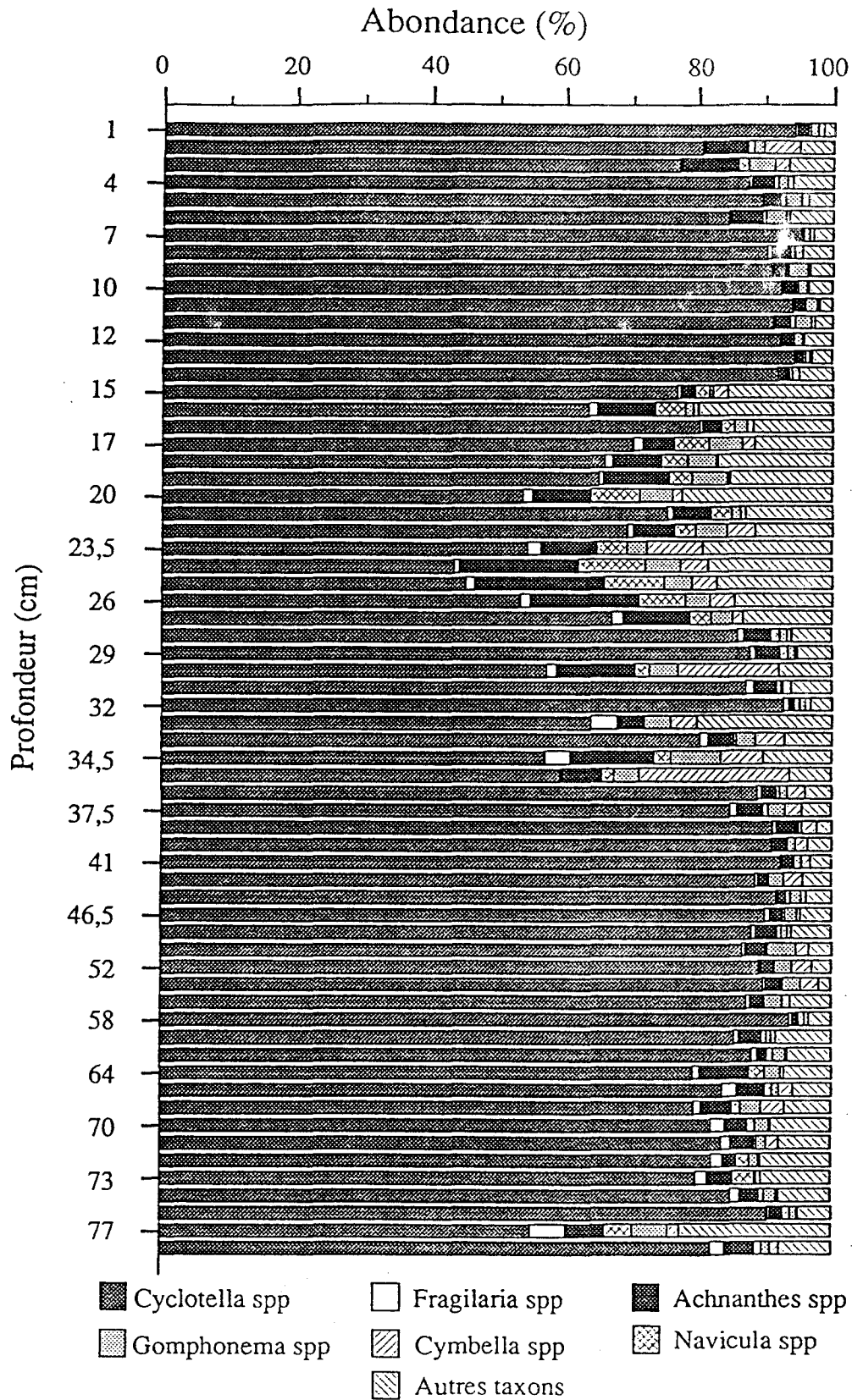


Figure 3.- Variation de l'abondance des espèces de diatomées en % du peuplement total dans la carotte C'' de Colletière-Charavines

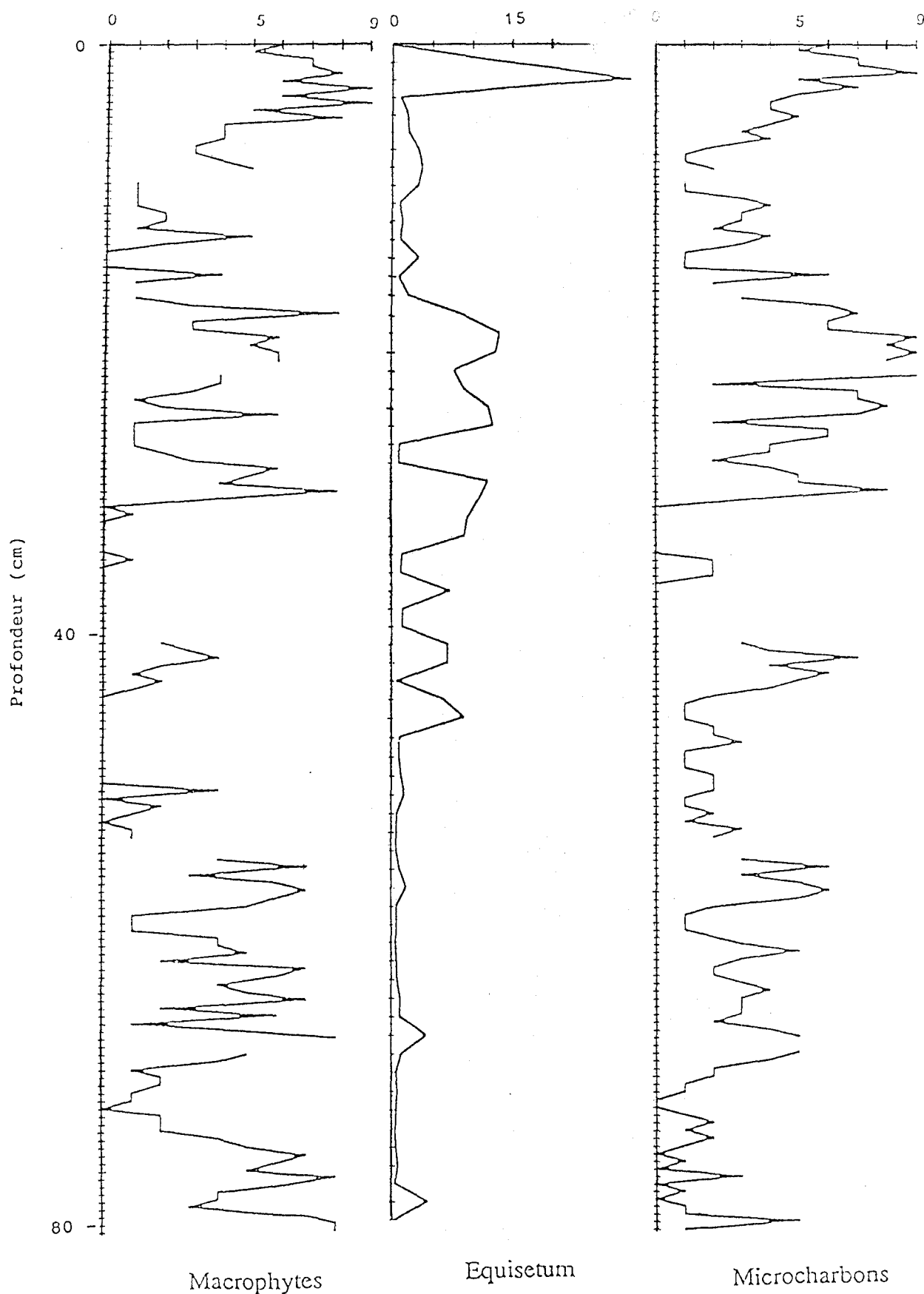


Figure 4.- Variation de l'abondance exprimée en pourcentage, des restes de macrophytes, des microcharbons et d'*Equisetum fluvatile*

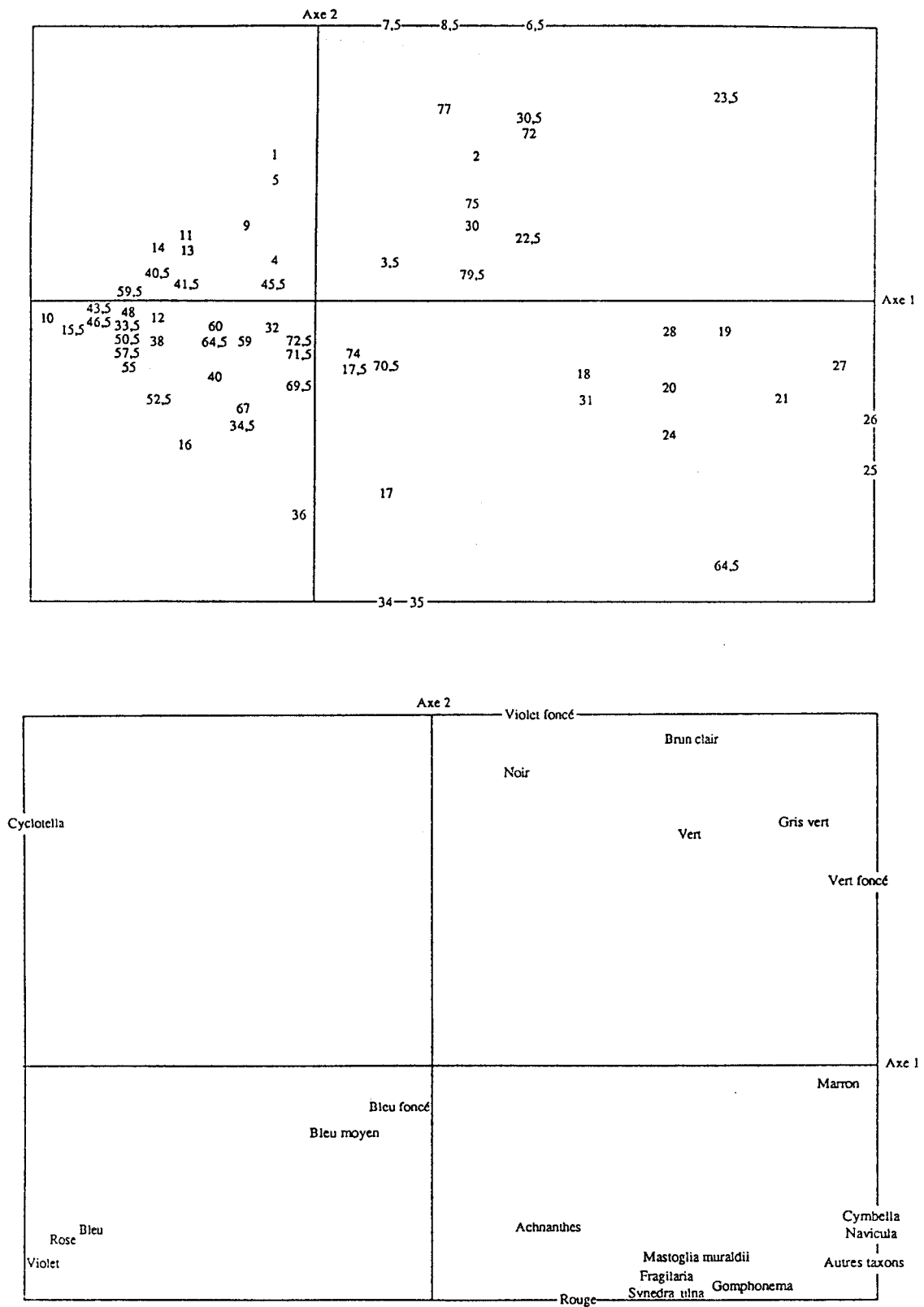


Figure 5.- Analyse factorielle des correspondances à partir des 65 prélèvements du sondage C'', des différentes espèces de diatomées et les couleurs obtenues par analyse d'image de la carotte à l'ordinateur

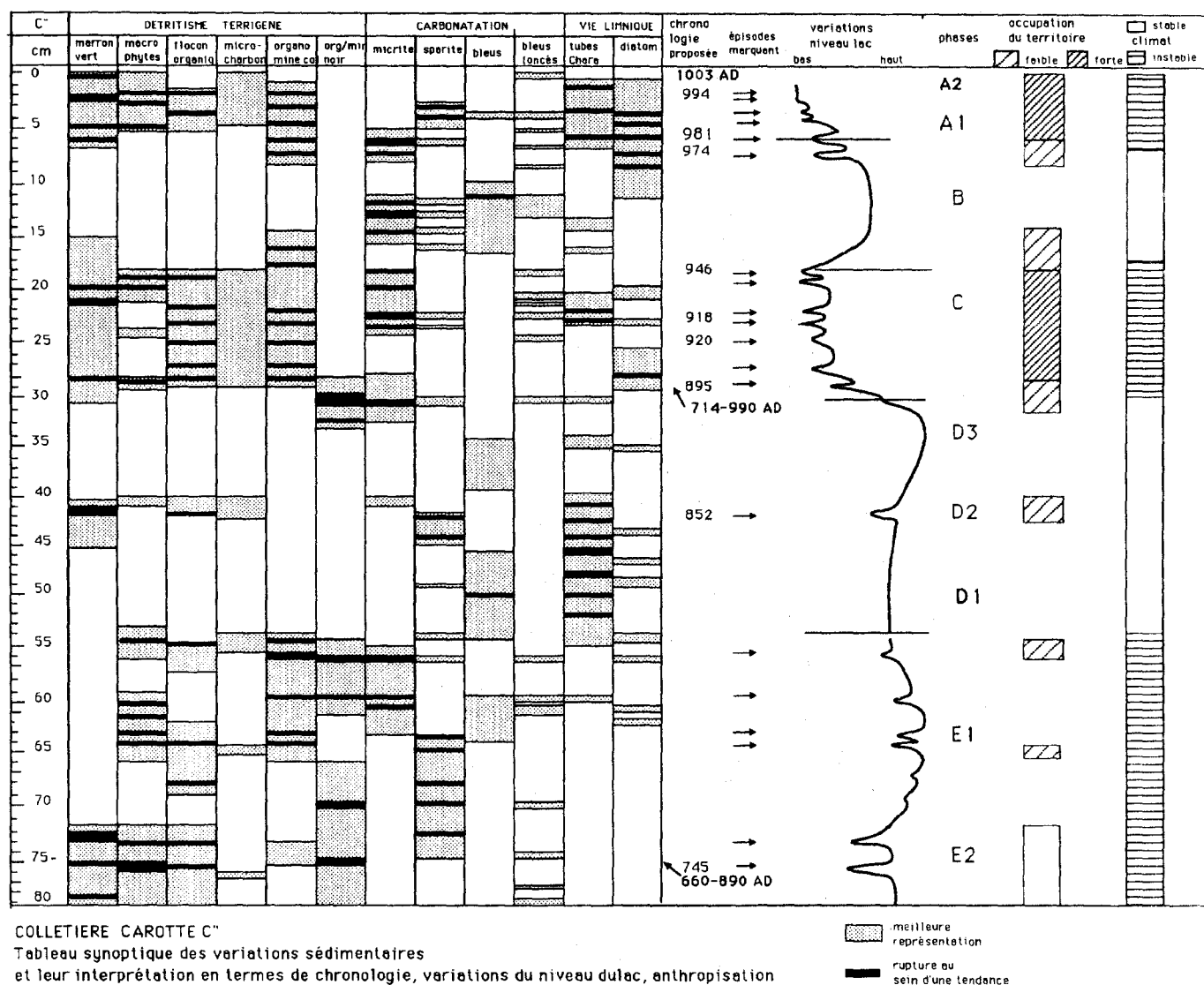


Figure 6.- Tableau synoptique des variations sédimentaires et leur interprétation en termes de chronologie, variations du niveau du lac, anthropisation

résultats biologiques et sédimentaires. Les courbes d'abondance des diatomées et des *Equisetum* sont tout à fait symétriques alors que les différents paramètres sédimentaires dénotent le contraire. Le début de cet épisode semble caractérisé par de hautes eaux. Il est marqué par une faible importance des espèces littorales (*Achnanthes* spp., *Navicula* spp., *Gomphonema* spp.), une forte dominance des *Cyclotella costei*, et une augmentation concomitante des *Equisetum*. Par contre, à la fin de l'épisode, le niveau du lac se situerait nettement plus bas, ce qui représenterait une situation de transition logique avec l'étape suivante, caractérisée par une baisse très prononcée du niveau moyen des eaux. En effet, celle-ci se distingue par une augmentation des espèces littorales (*Achnanthes* spp., *Navicula* spp., *Gomphonema* spp.) et une raréfaction des espèces pélagiques (*Cyclotella costei* et *Equisetum*).

- un troisième épisode de basses eaux au cours duquel on retrouve des conditions sédimentaires quasiment identiques à celles qui avaient prévalu à la fin de l'épisode régressif précédent. Les diatomées littorales sont très nombreuses (*Achnanthes* spp., *Navicula* spp., *Gomphonema* spp.). La disparition simultanée de *Cyclotella costei* correspond à un pic d'*Equisetum fluviatile* (BOREL, 1993), espèce qui vit dans des eaux très peu profondes. Les tubes de characées signalent le passage à une nouvelle phase de dynamique littorale.

- un quatrième épisode à instabilité moins marquée, qui indique une remontée des eaux comme le démontrent la présence importante de *Cyclotella costei* et la diminution des diatomées benthiques et des *Equisetum*.

- Enfin, peu avant l'An Mil, les données sédimentaires, diatomiques et polliniques indiquent une nette diminution de l'épaisseur de la tranche d'eau aboutissant à l'émersion de la presque île crayeuse sur laquelle a été édifiée la station littorale médiévale.

CONCLUSION

Une interprétation climatique de la séquence sédimentaire, vérifiée par des données historiques, dendrochronologiques et isotopiques, peut être proposée : les ruptures sont interprétées comme des données exceptionnelles, correspondant à des périodes plus sèches caractérisées par un bas niveau des eaux, qui sont alors fortement carbonatées. Les peuplements végétaux se caractérisent par des densités minimales de *Cyclotella* alors que les diatomées benthiques et *Equisetum fluviatile* abondent. La succession et le rythme de ces épisodes météorologiques sont déterminants dans la caractérisation des phases climatiques.

REFERENCES

- BOREL. J.L., 1993. Restitution des paysages végétaux de Colletière : la paléopalynologie. In : M. Colardelle et E. Verdel (EDS.). La formation d'un terroir au XIème siècle : les habitats du lac de Paladru, Isère, dans leur environnement. Paris, D.A.F., 71-76.
- BROCHIER. J.L. & J.C. DRUART, 1993. Le milieu lacustre. In : M. Colardelle et E. Verdel (EDS.). La formation d'un terroir au XIème siècle : les habitats du lac de Paladru, Isère, dans leur environnement. Paris, D.A.F., 148-151.
- DRUART. J.C., 1990. Etude paléoécologique du site archéologique de Colletière-Charavines (Paladru, Isère, France). Cryptogamie Algol., 11/2 : 91-110.
- DRUART J.C. & F. STRAUB., 1988. Description de deux nouvelles cyclotelles (Bacillariophyceae) de milieux alcalins et eutrophes : *Cyclotella costei* nov. sp et *Cyclotella wuethrichiana* nov. sp. Schweiz. Z. Hydrol. 50 : 182-188.

Influence des variations hydrodynamiques de l'oued Tensift (Maroc) sur les peuplements de Diatomées

Arlette CAZAUBON* et Abdeljalil BADRI**

RESUME

Les phénomènes de crue constituent un facteur de stress très important pour les écosystèmes lotiques de cette région semi-aride du Maroc. L'analyse temporelle de l'impact de la crue sur les algues fixées et en dérive de l'oued Tensift repose sur la prise en compte des peuplements intrastationnels de trois principaux habitats benthiques : l'axe du chenal, la berge d'alluvions et la berge d'érosion et d'un habitat planctonique, la dérive en pleine eau. Après un appauvrissement sélectif et brutal des peuplements épilithiques sous l'influence de la crue, la recolonisation algale du cours d'eau est rapide, réalisée par quelques espèces pionnières. Quinze jours après la crue, la stabilité structurale des peuplements est atteinte, montrant le fort pouvoir de résilience de l'écosystème considéré.

MOTS-CLES : Diatomées, cours d'eau, Maroc, crue, recolonisation, microhabitats

SUMMARY

In this semi-arid area of Morocco floods are particularly intense. For the first time their effects on both epilithic and drifting algae are analysed. This temporal study investigates separately three microhabitats of the bed-river : the channel axis, each edge and drift. Immediately after the flood only a scarce Diatoms community grows. However the recovery is early realized by some pioneer-species. The structure of the algal community is reached approximatively two weeks after the spate pike, showing a high resilience of this lotic ecosystem.

KEY WORDS : Diatoms, freshwater, Morocco, flood, recovery, microhabitats

INTRODUCTION

Les cours d'eau méditerranéens non aménagés se caractérisent par des fluctuations hydrologiques saisonnières, très irrégulières et contrastées, susceptibles d'influencer l'installation, le développement et le maintien des biocénoses aquatiques. Si les crues sont citées dans la littérature comme un facteur de perturbations très sévères pour ces communautés (MARGALEF, 1983 ; BADRI *et al.*, 1987 ; SABATER S. *et al.*, 1992), les modifications structurales qu'elles apportent au sein des peuplements d'algues sont très peu analysées (SCRIMGEOUR *et al.*, 1988, en Nouvelle-Zélande et CAZAUBON, 1988, en Provence, dans le sud-

est de la France). Cette carence découle, en grande partie, du caractère imprévisible de la crue qui rend difficile l'appréhension du phénomène dans son intégralité mais également, de l'inaccessibilité aux rivières en période de hautes-eaux.

Dans la région semi-aride du Maroc où se situe le cours d'eau étudié, les travaux algologiques de BOUTIN *et al.*, 1982 ; DARLEY et COUTE, 1983 ; SAADI, 1986 ; EL MEZDI, 1985 ; MOUHRI, 1987 ; THIERY, 1987 ; LOUDIKI, 1990 ; MARQUE et METGE, 1991 ; CHERIFI, 1992, n'ont pris en compte que des hydrosystèmes stagnants, naturels ou artificiels (lacs de barrage, dayas, sebkhas, khattaras, bassins de lagunage, canaux d'irrigation) ; à notre connaissance, le seul travail sur les écosystèmes lotiques de ce secteur porte sur l'impact des rejets polluants de la ville de Marrakech sur les peuplements de Diatomées de l'oued Tensift (MAIFFI, 1988).

* Laboratoire d'Ecologie des Eaux Continentales Méditerranéennes. Faculté des Sciences et Techniques Saint-Jérôme 13397 MARSEILLE Cedex 20 - France

** Département de Biologie. Université Cadi Ayyad. Faculté des Sciences Semlalia. B.P. 515. MARRAKECH - Maroc

Cette étude préliminaire analyse, pour la première fois, l'influence de la crue sur la dynamique spatiale et temporelle des peuplements de Diatomées benthiques et en dérive de l'oued Tensift ainsi que les processus de recolonisation des différents microhabitats considérés.

MATERIELS ET METHODES

Localisation de la station d'étude

L'oued Tensift a une longueur de 230 kilomètres. Comme on peut le voir sur la figure 1, il prend naissance dans le Haut-Atlas central, à 550 mètres d'altitude au pied du Ras El Ain, sous forme de petites résurgences situées dans des dépôts limoneux. Alimenté par de petits affluents, issus des Jbilet, mais surtout par des oueds atlasiques qu'il reçoit en rive gauche, le Rdat, le Zat, l'Ourika, la Reraya et le Nfis, il s'écoule dans la plaine du Haous. Sa pente moyenne est de 0,25 % en amont de la confluence avec le Nfis. Ce cours d'eau de plaine présente un régime hydrologique très irrégulier.

La station prospectée se situe près de Zaoui ben Sassi, à environ 30 km de la source et à une

altitude de 460 mètres. Le cours d'eau y est permanent avec un écoulement modéré ($40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). La largeur du lit mineur varie entre 8 mètres, durant les périodes des hautes eaux, en hiver et au printemps, et 2 m, en été, période d'étiage au cours de laquelle la hauteur d'eau passe de 30 à 10 cm. Au moment des crues, les eaux débordent sur le champ d'inondation ce qui permet au lit majeur d'atteindre, dans certains secteurs, une largeur de 1000 mètres. Le Tensift se différencie des autres cours d'eau voisins par le fait qu'il subit des crues très violentes qui durent plus longtemps.

Le substrat est composé de blocs et de cailloux sur lesquels se développe une couverture de micro-organismes et d'algues filamenteuses. Dans les endroits abrités, la lenteur du courant favorise le dépôt de sables et de limons où prolifèrent *Potamogeton* et *Ceratophyllum* avec une prédominance de *Juncus* sur les bords limoneux. La végétation riveraine est composée essentiellement de plantes halophiles (*Tamarix*, *Salicornia*, *Suaeda*), liées à des dépôts de sels résultant de l'évaporation de la nappe phréatique salée.

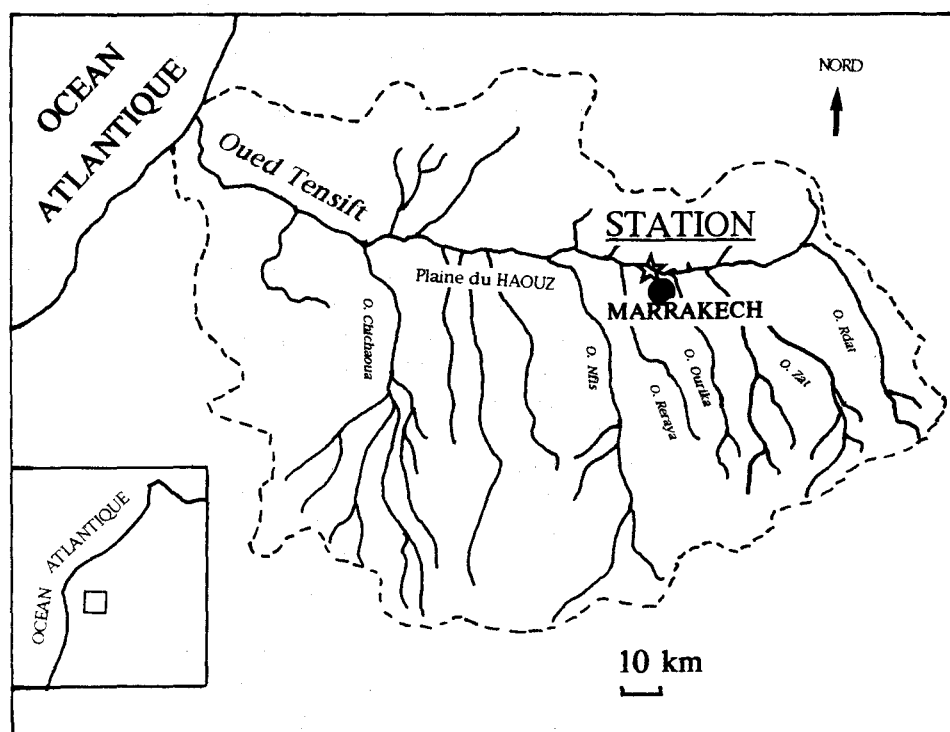


Figure 1.- Localisation de la station d'étude sur l'oued Tensift

Données mésologiques

Les valeurs présentées dans le tableau 1, traduisent des variations importantes des descripteurs physico-chimiques, entre le début de la période de crue (6/04/1992) et la fin de cette période (10/05/1992), caractérisée par le retour à une stabilité hydrologique.

L'amplitude thermique annuelle des eaux est élevée dans les cours d'eau de plaine; elle atteint 24° C dans l'oued Tensift. L'impact de la crue sur la température est plus ou moins marqué selon la saison; la température baisse de 6° C au cours de la crue printanière, seulement de 3° C en hiver.

Les quantités de matières en suspension transportées (MEST) sont principalement déterminées par les débits; en période de crue, elles augmentent fortement (35 g . l⁻¹ dans le Tensift). Les hautes eaux charrient alors une quantité importante de particules minérales argileuses et limoneuses (70 à 80% des MEST). En été, au cours de l'été, la charge en MEST est faible (0,2 g . l⁻¹); leur origine est alors essentiellement organique, suite à la prolifération algale qui se produit dans le cours d'eau.

Les eaux, neutres à basiques (pH compris entre 7,5 et 8,4), se minéralisent progressivement depuis la source, où la conductivité est de 62 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, jusqu'à la station d'étude, où les valeurs de la conductivité s'échelonnent entre

740 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, durant la période de crue, et 6500 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, à l'été. Au cours de la crue printanière, on note une forte diminution de la conductivité qui passe de 6200 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (période précédant la crue) à 920 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, le 6 avril 92 (période de crue), et à 6500 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, le 10 avril (période à laquelle le Tensift a recouvré une relative stabilité hydrologique). Ces valeurs élevées de la conductivité sont dues à la richesse des eaux en chlorures (de 510 à 3300 mg . l⁻¹).

Dans le secteur étudié, l'oued présente des eaux bien oxygénées, surtout en été, où le taux de saturation en oxygène atteint 145%, en relation avec l'intense production photosynthétique. En mai, au cours du stress, il se produit une légère désoxygénation du milieu qui résulte, probablement, de l'arrachage des macrophytes par le fort courant.

Durant la crue, les eaux se chargent en azote et phosphore, phénomène lié au ruissellement et au lessivage des bassins versants ainsi qu'au transfert des sédiments et des nutriments retenus dans le lit des oueds. Durant le pic de crue on note un élargissement considérable du lit mouillé qui passe, en peu de temps, de 4 à 60 mètres. Le lit, rappelons le, est composé essentiellement de sables, de quelques galets et de plantes halophiles (*Tamarix*, *Suaeda*) qui sont immergées durant la phase d'inondation ce qui entraîne une forte mobilisation des éléments, suivie d'un dépôt de fines particules qui colmatent les substrats au cours de la décrue.

Tableau 1
Variations des valeurs de quelques descripteurs mésologiques de l'oued Tensift durant la crue (6 avril 1992, période de crue et 10 mai 1992, période de recouvrement de la stabilité hydrologique)

PARAMETRES	6/04/1992	10/05/1992
Largeur de l'oued (m)	60	4
Vitesse du courant (m . s ⁻¹) :		
- axe du chenal	>3	0,25
- rive d'érosion	>1	0,20
- rive de dépôt	78	5
Débit (m ³ . s ⁻¹)	18	0,2
MEST (g . l ⁻¹)	35	0,2
Conductivité ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	990	6500
pH	7,8	8,4
Cl (mg . l ⁻¹)	510	3300
SO ₄ (mg . l ⁻¹)	-	350
PO ₄ (mg . l ⁻¹)	3,2	1,5
NO ₃ (mg . l ⁻¹)	7,2	2,3
CaCO ₃ (mg . l ⁻¹)	-	1900
O ₂ dissous (%)	97	130

Campagnes et sites de prélèvement

Six campagnes de prélèvements d'algues ont été effectuées dans le Tensift, le 25/02/1992, période de référence du point de vue de la stabilité hydrologique de cet oued, puis les 12, 16, 22, 28/04/92 et 4/05/1992, périodes qui correspondent aux différentes étapes de la recolonisation biologique de l'oued.

Dans le lit de la rivière, les prospections ont porté sur quatre microhabitats susceptibles de traduire l'évolution transversale et, en partie, longitudinale des peuplements d'algues : les substrats de l'axe du chenal, de la berge de dépôt et de la berge d'érosion ainsi que l'eau qui transporte les algues planctoniques ou en dérive.

Dans la station, deux types de prélèvements ont été réalisés selon la catégorie d'algues considérée :

1- pour l'épilithon ou algues périphytiques (fixées sur les substrats naturels du lit, cailloux, blocs ou galets), plusieurs cailloux de taille comprise entre 8 et 15 cm de diamètre et de 1 à 4 cm de haut, sont récoltés sur chacun des trois sites de chaque station prospectée. Une surface de 4 à 12 cm² du biotecton qui colonise la face supérieure de ces substrats est grattée au moyen d'un scalpel et précautionneusement recueillie, puis immédiatement fixée au formol neutre à 5 %.

Au laboratoire, chaque échantillon est placé entre lame et lamelle en vue du comptage cellulaire et de l'identification. Quand le peuplement est très pauvre, 8 cm² ont été analysés, *in toto*; quand la densité algale est forte, seuls 4 cm² sont pris en compte pour le dénombrement. Dans tous les cas, la totalité de l'échantillon a été observée au microscope. Un grillage des algues qui élimine la matière vivante a permis d'identifier les Diatomées à l'espèce et à la variété. Les résultats densitaires sont exprimés en nombre de cellules pour 4 cm².

2- pour les algues en dérive, constituées d'algues planctoniques et périphytiques, entraînées depuis l'amont, des prélèvements d'un litre d'eau ont été effectués immédiatement au dessous de la surface. Ce volume a été choisi après l'évaluation des densités algales les plus faibles. Sur le terrain, les échantillons ont été aussitôt fixés au formol neutre.

Au laboratoire, le comptage et l'identification cellulaire ont été réalisés au microscope inversé, selon la méthode d'Utermöhl. Un sous-échantillon est versé dans une cuve de 10, 25 ou

50 cm³, puis laissé à décanter durant 12 heures. Les résultats sont exprimés en nombre de cellules au litre. Une partie des prélèvements a été filtrée, puis grillée pour l'identification des Diatomées.

RESULTATS ET DISCUSSION

Composition des peuplements d'algues

Le peuplement algal est constitué de 95 taxons dont 73 appartenant aux Diatomophycées. Ils sont recensés dans l'inventaire qui figure dans le tableau 2. Dans les cours d'eau de montagne, on retrouve fréquemment le type d'assemblage algal présenté ci-après, avec des Diatomées qui prédominent, associées à des Chlorophytes et des Cyanophycées, dans la composition du périphyton qui tapisse les cailloux et les galets.

EMBRANCHEMENTS	RICHESSSE TAXONOMIQUE
CHROMOPHYTES	74
CHLOROPHYTES	9
EUGLENOPHYTES	1
CYANOPHYTES	8
RHODOPHYTES	1
PYRRHOPHYTES	2

La richesse spécifique des peuplements d'algues de l'oued Tensift est tout à fait comparable à celle de plusieurs cours d'eau méditerranéens dont les références sont indiquées dans le tableau 3.

Dans son ensemble, le peuplement d'algues est constitué d'espèces adaptées, pour certaines d'entre elles, à une forte minéralisation, et pour d'autres, à une eutrophisation importante des eaux. On trouve ainsi :

- des espèces calcicoles comme les Diatomées *Achnanthes lanceolata*, *Caloneis amphisbaena*, *Cymbella minuta*, *Gyrosigma spencerii*, *Melosira varians*, *Nitzschia sigmoidea* ou la Cyanophycée *Phormidium incrustatum*. Leur présence a été signalée à maintes reprises dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse (COSTE, 1978 ; CAZAUBON, 1988) et au Maroc dans le Tensift (MAIFFI, 1988) ou dans le complexe hydrologique de Lakhdar (LOUDIKI, 1990).

- des espèces oligohalobes (concentration en sels comprise entre 0,2 et 2 g . l⁻¹) et subhalobes-mésahalobes (entre 2 et 16 g . l⁻¹), définies selon la classification de SERVANT-VILDARY & BIANCO (1984). Appartiennent à ce groupe

Tableau 2
Inventaire algal de la station d'étude (Tensift)

Chromophytes	Chrysophycées	<i>Dinobryon divergens</i> (Imhof)
	Diatomophycées	<i>Achnanthes lanceolata</i> (Brebisson) Grunow
		<i>Achnanthes minutissima</i> Lange-Bertalot var. <i>minutissima</i>
		<i>Amphora ovalis</i> (Kützing) Kützing
		<i>Amphora coffeaeformis</i> (Agardh) Kützing
		<i>Caloneis amphisbaena</i> (Bory) Cleve
		<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg
		<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing
		<i>Cymbella affinis</i> Kützing
		<i>Cymbella cesatii</i> (Rabenhorst) Grunow
		<i>Cymbella minuta</i> Hilse
		<i>Cymbella heteropleura</i> (Ehrenberg) Kützing
		<i>Cymbella microcephala</i> Grunow
		<i>Denticula elegans</i> Kützing
		<i>Denticula tenuis</i> Kützing
		<i>Diploneis puella</i> (Schumann) Cleve
		<i>Entomoneis paludosa</i> var. <i>subsalina</i> (Cleve) Krammer
		<i>Fragilaria ulna</i> (Nitzsch) Lange-Bertalot
		<i>Gomphonema angustatum</i> (Kützing) Rabenhorst
		<i>Gomphonema angustum</i> Agardh
		<i>Gomphonema parvulum</i> (Kützing) Kützing
		<i>Gyrosigma acuminatum</i> (Kützing) Rabenhorst
		<i>Gyrosigma spencerii</i> (W. Smith) Cleve
		<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehrenberg) W. Smith
		<i>Mastogloia elliptica</i> Agardh
		<i>Melosira nummuloides</i> (Dillwyn) C.A. Agardh
		<i>Melosira varians</i> Agardh
		<i>Meridion circulare</i> (Greville) Agardh
		<i>Meridion circulare</i> var. <i>constrictum</i> (Ralfs) Van Heurck
		<i>Navicula capitatoradiata</i> Germain
		<i>Navicula cryptocephala</i> Kützing
		<i>Navicula cryptocephala</i> var. <i>exilis</i> Grunow
		<i>Navicula cuspidata</i> (Kützing) Kützing
		<i>Navicula elginensis</i> (Gregory) Ralfs
		<i>Navicula gastrum</i> Ehrenberg
		<i>Navicula gregaria</i> Donkin
		<i>Navicula halophila</i> (Grunow) Cleve
		<i>Navicula molestiformis</i> Hustedt
		<i>Navicula pupula</i> Kützing
		<i>Navicula radiosa</i> Kützing
		<i>Navicula rhynchocephala</i> Kützing
		<i>Navicula subminuscula</i> Manguin
		<i>Navicula</i> sp.
		<i>Navicula tripunctata</i> (O.F. Müller) Bory
		<i>Navicula trivialis</i> Lange-Bertalot
		<i>Neidium affine</i> (Ehrenberg) Pfitzer
		<i>Neidium dilatatum</i> (Ehrenberg) Cleve
		<i>Nitzschia acicularis</i> (Kützing) W. Smith
		<i>Nitzschia apiculata</i> (Gregory) Grunow
		<i>Nitzschia bilobata</i> Grunow
		<i>Nitzschia communis</i> Rabenhorst
		<i>Nitzschia commutata</i> Grunow
		<i>Nitzschia dissipata</i> (Kützing) Grunow
		<i>Nitzschia fruticosa</i> Hustedt
		<i>Nitzschia frustulum</i> (Kützing) Grunow
		<i>Nitzschia granulata</i> Grunow
		<i>Nitzschia linearis</i> (Agardh) W. Smith

	<i>Nitzschia lorenziana</i> Grunow
	<i>Nitzschia normannii</i> Grunow
	<i>Nitzschia obtusa</i> W. Smith
	<i>Nitzschia palea</i> (Kützinger) W. Smith
	<i>Nitzschia recta</i> Hantzsch
	<i>Nitzschia reversa</i> W. Smith
	<i>Nitzschia sigma</i> (Kützinger) W. Smith
	<i>Nitzschia sigmoidea</i> (Nitzsch) W. Smith
	<i>Nitzschia vitrea</i> Norman
	<i>Nitzschia</i> sp.
	<i>Pleurosigma angulatum</i> Quekett
	<i>Rhopalodia</i> sp.
	<i>Stauroneis phoenicenteron</i> (Nitzsch) Ehrenberg
	<i>Stephanodiscus dubius</i> (Fricke) Hustedt
	<i>Surirella ovalis</i> Brebisson
	<i>Surirella ovata</i> Kützinger
	<i>Thalassiosira weissflogii</i> (Grunow) Fryxell & Hasle
Chlorophytes	<i>Chaetophora</i> sp.
	<i>Mougeotia</i> sp.
	<i>Oedogonium</i> sp.
	<i>Ourococcus</i> sp.
	<i>Pandorina morum</i> (Müller) Bory
	<i>Penium</i> sp.
	<i>Scenedesmus</i> sp.
	<i>Stigeoclonium</i> sp.
	<i>Ulothrix zonata</i> Kützinger
Euglénophytes	<i>Euglena</i> sp.
Cyanophycées	<i>Anabaena</i> sp.
	<i>Lyngbya</i> sp.
	<i>Merismopedia tenuissima</i> Lemermann
	<i>Oscillatoria</i> sp.1
	<i>Oscillatoria</i> sp.2
	<i>Oscillatoria</i> sp.3
	<i>Oscillatoria</i> sp.4
	<i>Phormidium incrustatum</i> (Nègeli) Gomont
Rhodophytes	<i>Bangia</i> sp.
Pyrrophytes	<i>Ceratium hirundinella</i> (O.F. Müller) Schrank
	<i>Peridinium cinctum</i> (Müller) Ehrenberg

Tableau 3
Richesse taxonomique des peuplements d'algues de cours d'eau méditerranéens

RIVIERE	RICHESSSE TAXONOMIQUE	REFERENCES
FRANCE		
Zingaju	75	LOUDIKI (1985)
Orta	88	—
Rizzanése	159	—
Restonica	187	—
Tavignano	97	—
Buech	81	VESPINI (1985)
Arc	146	CAZAUBON (1988)
Verdon	38 (Diatomées)	MILLERIOUX <i>et al.</i> (1981)
Argens	175	CAZAUBON (1988)
ITALIE		
La Menotre	60	DELL'UOMO (1982)
ESPAGNE		
Llobregat	116	TOMAS & SABATER (1983)
L'Avenco	86	SABATER (1983)

Amphora coffeaeformis, *Entomoneis paludosa* var. *subsalina*, *Gyrosigma spencerii*, *Hantzschia amphioxys*, *Navicula halophila*, *Nitzschia lorenziana* ou *N. sigma*.

- des espèces α ou β mésosaprobies ou polysaprobies : bon nombre des algues du Tensift appartiennent à ce groupe, telles les Diatomées *Cyclotella meneghiniana*, *Gomphonema parvulum*, *Navicula capitatoradiata*, *N. cryptocephala*, *N. cuspidata*, *N. gregaria*, *N. radiosa*, *N. tripunctata*, *N. trivialis*, *Nitzschia palea*, *N. reversa*, la Chlorophycée *Pandorina morum* ou encore, la Cyanophycée *Merismopedia tenuissima*.

Enfin quelques espèces constitutives de ces biocénoses sont planctoniques ou tycho-pélagiques ; c'est le cas de *Nitzschia reversa*, *Entomoneis paludosa*, *Melosira varians*, *Meridion circulare*, *Thalassiosira weissflogii*, *Pandorina morum*, *Ceratium hirundinella*, *Peridinium cinctum*, très fréquemment signalées dans les lacs ou autres écosystèmes stagnants.

Crue et recolonisation

La figure 2 montre une évolution chronologique parallèle de la composition du périphyton d'une part et des algues en dérive d'autre part. On note que, pour chaque période étudiée, la dynamique des variations qualitatives des peuplements d'algues du Tensift suit un schéma tracé par les peuplements diatomiques.

Les communautés en place durant la période de stabilité hydrologique (25/02/1992) se caractérisent par une composition globale relativement variée (39 taxons pour le périphyton et 18 pour les algues en dérive). Elles sont très fortement affectées par la crue qui réduit de deux tiers la richesse taxonomique du périphyton (13 taxons seulement le 12/04/1992) et, encore plus radicalement, celle de la dérive qui devient alors monospécifique, représentée par *Fragilaria ulna* dont la présence semble, de surcroît, accidentelle. Les algues, arrachées au substrat, ont dû transiter par la dérive au moment du pic de crue, enrichissant fortement celle-ci, mais l'absence de prélèvement à cette période, ne nous permet pas de confirmer cette hypothèse.

Les semaines suivantes, les deux communautés microphytiques se diversifient progressivement retrouvant au début du mois de mai (4/05/1992) une composition aussi variée qu'avant la crue.

Ce temps de résilience pour l'écosystème est assez court ; peut-être, certains éléments de

l'épilithon, demeurés en place, à proximité de ces substrats ont-ils pu, en association avec des cellules potentiellement colonisatrices qui dérivent de l'amont, recoloniser les substrats vierges.

Plus ponctuellement, les peuplements de chaque microhabitat réagissent différemment à cette perturbation comme en témoignent les différents histogrammes de la figure 3. Ainsi, on remarque que c'est dans l'axe du chenal que le périphyton est le plus affecté par les perturbations physiques et hydrochimiques conjointes.

Les variations des effectifs durant ces différents épisodes de la crue sont également importantes. On peut voir sur la figure 4 que les densités cellulaires décroissent très fortement au début de la crue matérialisée par une flèche : le périphyton passe de 112446 cellules.4 cm⁻² (période précédant la crue), à 382 cellules, le 12 avril (période de crue) ; plus spectaculairement encore, la densité des algues qui dérivent chute de 9450 cellules au litre à seulement 4 cellules, ce qui témoigne de l'importance du stress qui a rendu ce milieu quasiment abiotique.

L'analyse sur la figure 5, des variations densitaires qui affectent chaque microhabitat montre que, dans le secteur axial du lit, le peuplement de Diatomées est totalement éliminé par la brusque montée des eaux ; toutefois, celles-ci persistent, en petits effectifs, sur les rives aquatiques du cours d'eau débarrassées des Cyanophycées et des Chlorophycées.

Une dizaine de jours après la crue, la densité du périphyton s'intensifie avec 12889 cellules.4 cm⁻² pour le périphyton et 21880 cellules au litre pour la dérive qui s'est, sans doute, enrichie au détriment de l'épilithon des substrats recolonisés en amont.

La densité algale atteint sa densité maximale, environ deux semaines après la crue (28 avril) ; la densité du périphyton est alors de 744165 cellules. 4 cm⁻², et celle de la dérive de 76600 cellules au litre.

Les Diatomées sont souvent considérées comme des algues pionnières dans la colonisation de substrats et l'association algale *Achnanthes-Gomphonema* est souvent observée dans les sources. Selon SCRIMGEOUR *et al.* (1988), la recolonisation des cailloux après une crue dans la rivière Ashley (Nouvelle Zélande), est massivement réalisée par *Gomphonema*.

Parmi les espèces pionnières qui s'installent sur les substrats de la station étudiée et qui

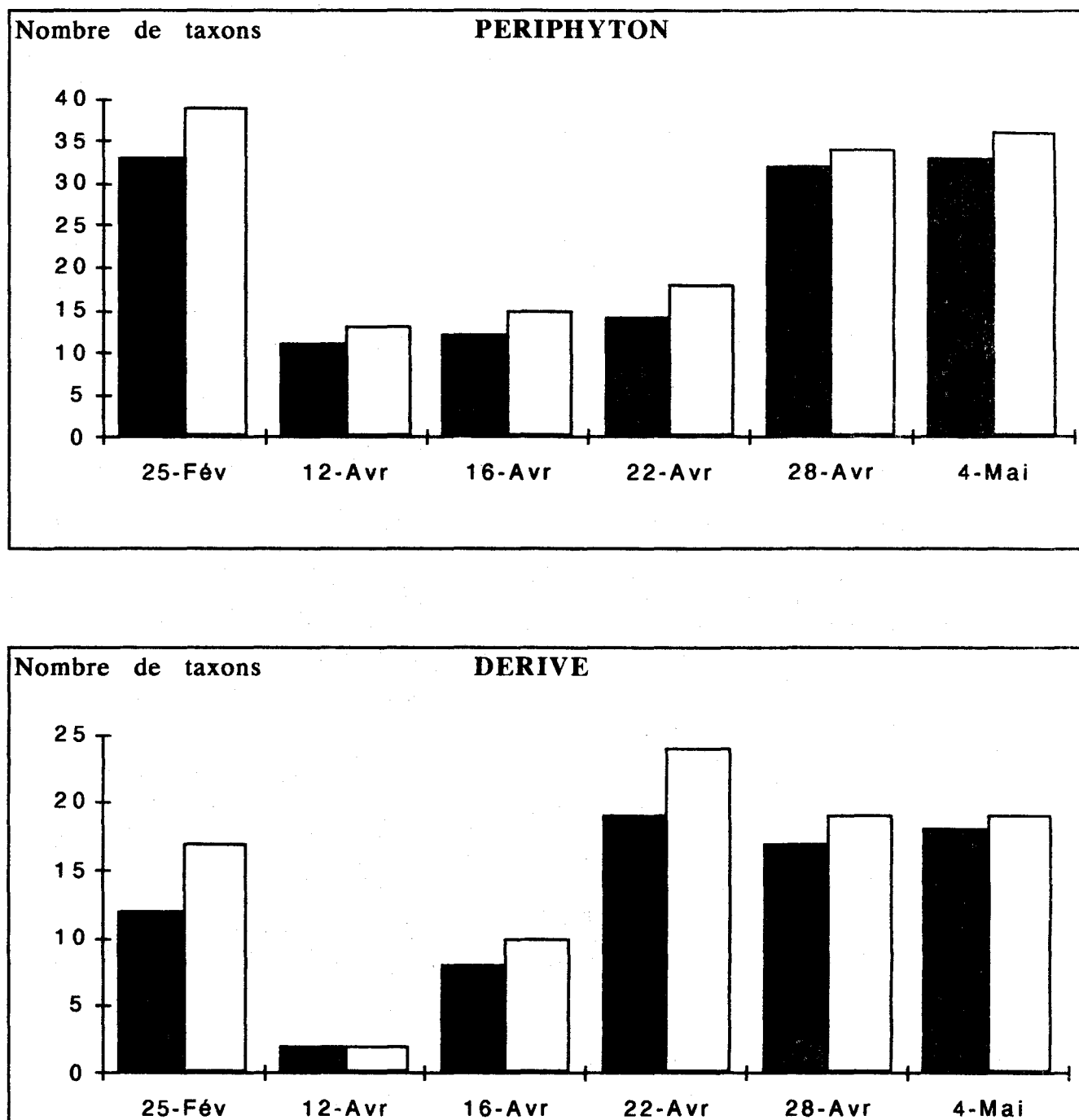


Figure 2.- Variations de la richesse spécifique des peuplements d'algues périphériques et en dérive, au cours des 6 campagnes de prospection de la station d'étude de l'oued Tensift (en noir, les Diatomées ; en blanc, le peuplement total d'algues)

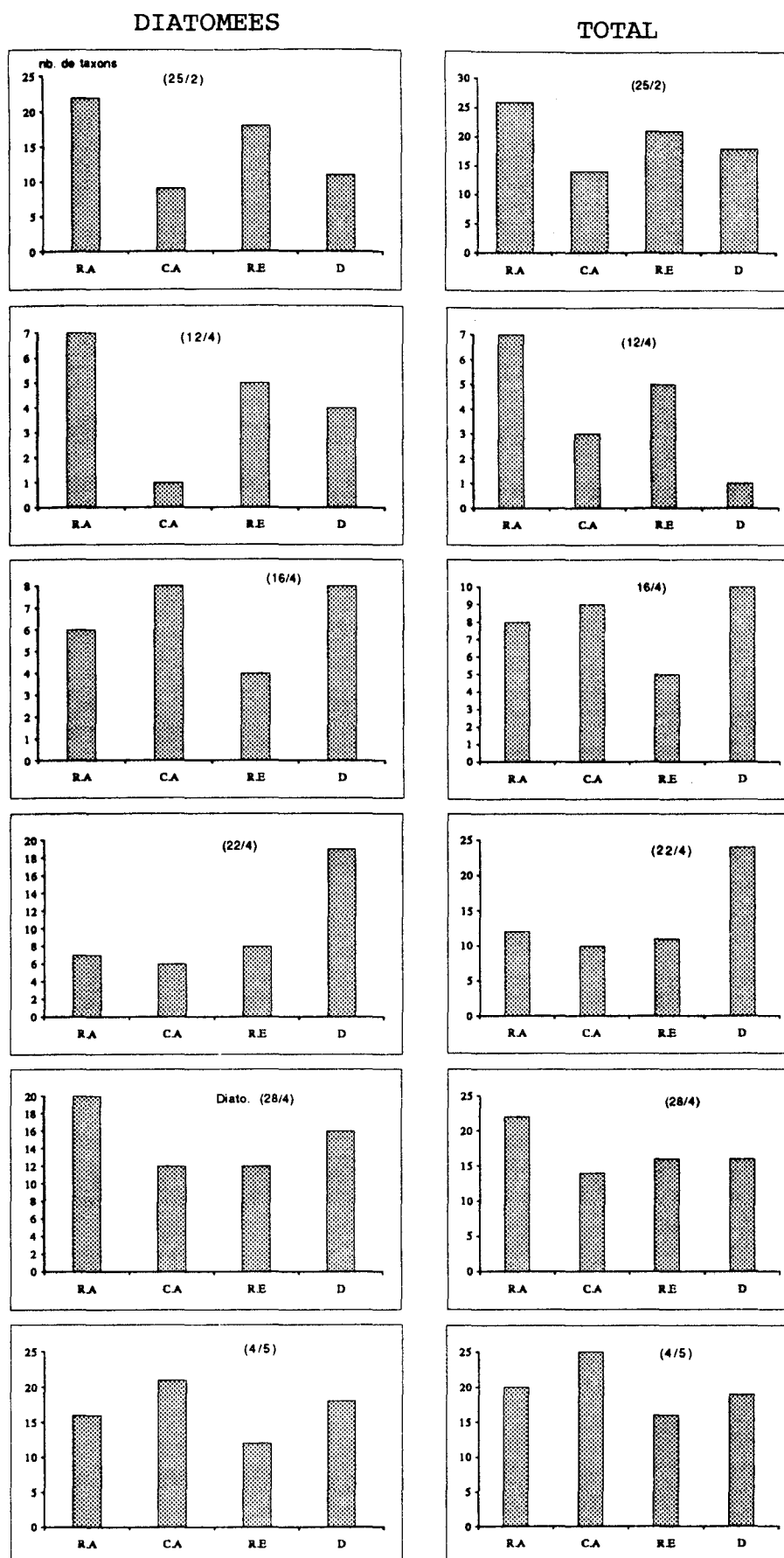


Figure 3.- Variations de la richesse spécifique des peuplements d'algues (Diatomées et peuplement total de la rive d'alluvions (RA), de l'axe du chenal (CA), de la rive d'érosion (RE) et des algues en dérive (D), au cours des 6 campagnes de prospection

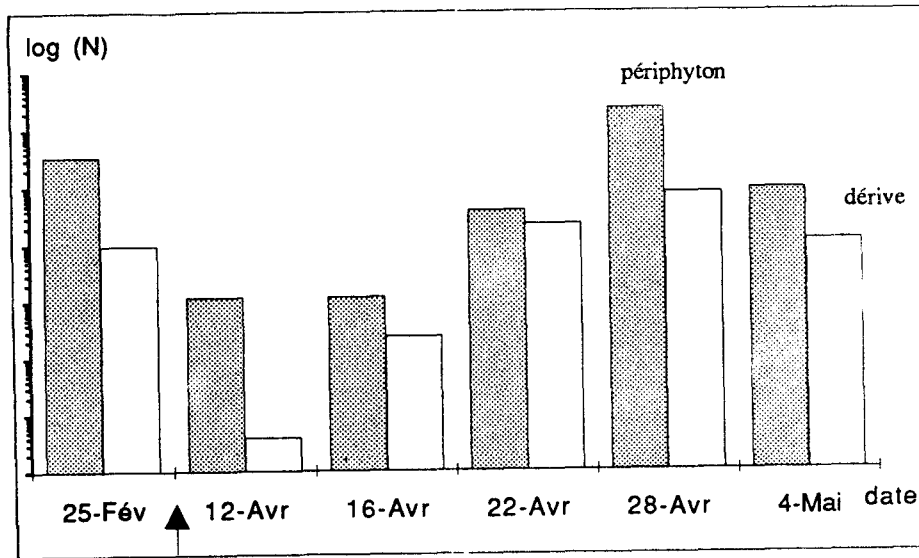


Figure 4.- Variations des densités des peuplements d'algues périphytiques et en dérive au cours des 6 campagnes de prospection

entrent, vraisemblablement en compétition pour se maintenir dans tous les microhabitats, abondent des Diatomées épilithiques comme *Achnanthes minutissima* et *Gomphonema parvulum*, accompagnées de *Fragilaria ulna* et *Nitzschia palea*. Ultérieurement succèdent, (le 22/04/1992), *Gomphonema angustatum*, *Navicula cryptocephala*, *N. gregaria* ainsi qu'une Rhodophycée, *Bangia sp.*

La diversification de la biocénose après ces premières étapes de recolonisation se caractérise par l'abondance de certaines espèces au sein de l'épilithon (*Cyclotella meneghiniana*, *Fragilaria ulna*, *Gomphonema angustatum*, *G. parvulum*, *Navicula cryptocephala*, *N. subminuscula*, *Nitzschia palea*, *N. recta*, *N. reversa*, *N. sigma*, *Chaetophora sp.* et *Bangia sp.*). Leur prolifération traduit, à la fois une minéralisation des eaux et une augmentation de la température des eaux en avril, associées à une réduction considérable du débit de l'oued. La stabilité structurale des peuplements est atteinte environ deux semaines après la crue

La dérive se diversifie simultanément et prolifèrent certaines espèces comme *Achnanthes minutissima*, *Cyclotella meneghiniana*, *Gomphonema parvulum* ou *Nitzschia palea* et des formes planctoniques, telle *Nitzschia reversa*.

CONCLUSION

L'impact de la crue analysée dans ce travail est très destructurant sur le phytobenthos et, par voie de conséquence sur les algues en dérive.

Il ressort qu'à l'échelle intrabiotopique, les microhabitats sont différemment affectés par les modifications brutales des paramètres physiques, notamment le débit, et chimiques du milieu. L'augmentation du débit a pour effet une érosion plus ou moins forte des substrats qui sont, sélectivement, plus ou moins débarrassés de leur couverture biologique. Sur la rive d'alluvions ne se maintient qu'une communauté de Diatomées relativement appauvrie. Dans la partie centrale de l'oued, les Diatomées disparaissent et il ne subsiste que quelques rares Cyanophycées et Chlorophycées.

La restauration de la microflore, après un délai relativement court, consiste, dans un premier temps, en la prolifération de quelques espèces pionnières, euryèces pour la plupart d'entre elles, ce qui assure leur maintien dans le cours d'eau, en dépit des fortes variations des paramètres abiotiques. Dans ces processus de recolonisation, les Diatomées constituent l'élément pionnier, mais il faut noter que les microhabitats sont affectés différemment par cette reconquête.

Dans le Tensift, la résilience de l'écosystème est forte, favorisée sans doute par le

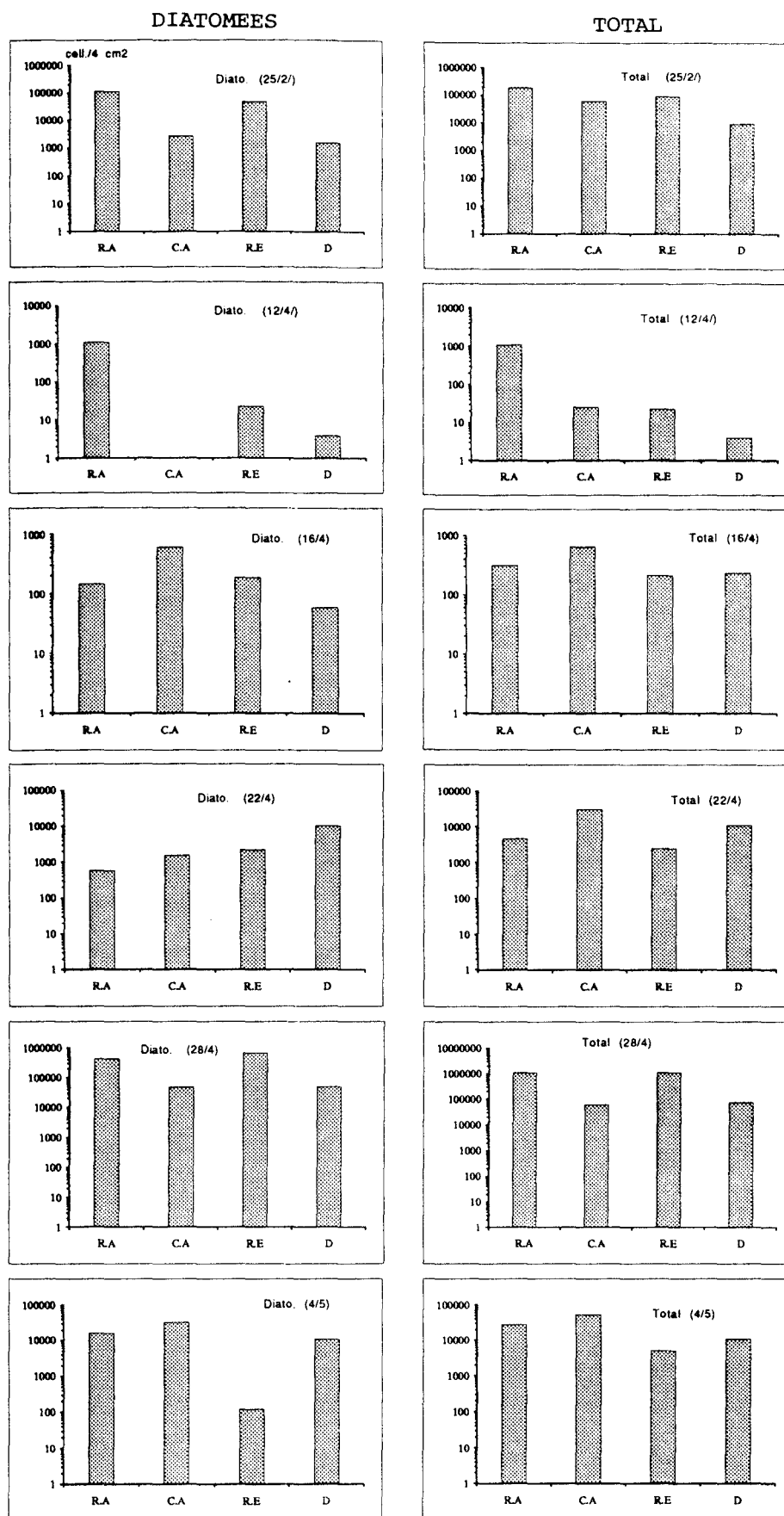


Figure 5.- Variations des densités des peuplements d'algues (Diatomées et peuplement total) de la rive d'alluvions (RA), de l'axe du chenal (CA), de la rive d'érosion (RE) et des algues en dérive (D), au cours des 6 campagnes de prospection

réchauffement des eaux et l'allongement de la durée du jour, à cette période, ce qui engendre une meilleure activité photosynthétique. Il ressort de ce travail que ce type d'écosystème présente, à l'échelle stationnelle, un caractère de très grande hétérogénéité qui pourrait, si d'autres études le confirment, apparaître comme une spécificité des cours d'eau méditerranéens.

BIBLIOGRAPHIE

- BADRI A., GIUDICELLI J. & PREVOT G., 1987.- Effets d'une crue sur la communauté d'invertébrés benthiques d'une rivière méditerranéenne, le Rdat (Maroc). *Acta Oecologica. Oecol. Generalis.* 4 (8) : 481-500.
- BOUTIN C., LESNE T. & THIERY A., 1982.- Ecologie et typologie de quelques mares temporaires à Isoetes d'une région aride du Maroc occidental. *Ecologia mediterranea* VIII (3) : 31-52.
- CAZAUBON A., 1988.- Etude des peuplements d'algues en dérive et benthiques (épiphytiques, épilithiques, épipsammiques et épipéliciques) des rivières méditerranéennes (Sud-Est de la France : Provence et Corse). *Thèse d'Etat.* Univ. Aix-Marseille 3 : 327 p.
- CAZAUBON A., 1988.- Crue et communautés diatomiques (Moyenne-Durance, Provence). *Cahier Biol. Mar.* 29 : 233-246.
- CHERIFI W., 1992.- Evolution et dynamique du phytoplancton en relation avec certains paramètres biotiques et abiotiques au niveau de la retenue Lalla Takerkoust (Maroc). *Thèse 3ème Cycle.* Univ. Cadi Ayyad. Marrakech : 155 p.
- COSTE M., 1978.- Sur l'utilisation des Diatomées benthiques pour l'appréciation de la qualité biologique des eaux courantes. Méthodologie comparée et approche typologique. *Thèse 3ème cycle.* Faculté de Franche-Comté : 143 p.
- DARLEY J. & COUTE A., 1983.- *Cosmarium marocanum*, nov. sp. (Chlorophyta, Zygothryx, Desmidiaceae, Desmidiaceae). *Cryptogamie-Algologie* (4) 1/2 : 99-103.
- EL MEZDI Z., 1985.- Etude hydrobiologique des khetaras de la région de Marrakech. *Thèse 3ème cycle.* Univ. Cadi Ayyad. Marrakech : 118 p.
- LOUDIKI M., 1990.- Fonctionnement et évolution d'un complexe hydrologique aménagé, récemment mis en eau sur l'oued Lakhdar (Maroc) : retenues de barrage, cours d'eau régulé et canal de rocade. Apports du bassin versant, Hydrochimie, Algues et Macrophytes. *Thèse es Sciences.* Univ. Aix-Marseille 3 : 333 p.
- MAIFFI M., 1988.- Impact des rejets des eaux usées de la ville de Marrakech sur l'oued Tensift. Les Diatomées, indicateurs biologiques. *Thèse de Doctorat.* Univ. de Paris 6.
- MARGALEF R., 1983.- *Limnologia.* Omega Edit. Barcelona : 1010 p.
- MARQUE C. & METGE G., 1991.- Influence des facteurs physique et chimique des eaux superficielles sur la production primaire des mares temporaires (dayas) de la Meseta occidentale marocaine; essai de typologie. *Ecologia mediterranea* XVII : 89-102.
- MOUHRI K., 1987.- Répartition et association des Desmidiées des différentes zones géographiques de la région de Marrakech (Maroc). *Thèse 3ème cycle.* Univ. Cadi Ayyad. Marrakech : 152 p.
- SAADI A., 1986.- Ecologie du zooplancton de deux hydrosystèmes saumâtres temporaires du bassin de la Bahira (Maroc). *Thèse de 3ème cycle.* Univ. Aix-Marseille 1 : 262 p.
- SABATER S., GUASH H., MARTI E., ARMENGOL J., VILLA M. & SABATER F., 1992.- The Ter, a Mediterranean river system in Spain. *Limnetica* : 141-149.
- SCRIMGEUR G.J., DAVIDSON R.J. & DAVIDSON J.M., 1988.- Recovery of benthic macroinvertebrate and epilithic communities following a large flood in an unstable braided New-Zealand river. *New Zealand Journal of marine and freshwater Research* (22) : 337-344.
- SERVANT-VILDARY S., BLANCO M., 1984.- Les Diatomées fluviolacustres plio-pléistocènes de la formation Charana (Cordillères occidentales des Andes, Bolivie), *Cah. ORSTOM sér. Géol.* (14) 1 : 55-102.
- THIERY A., 1987.- Les Crustacés Branchiopodes Anostraca, Notostraca & Conchostraca des milieux limniques temporaires (dayas) au Maroc. Taxonomie, Biogéographie, Ecologie. *Thèse d'Etat.* Univ. Aix-Marseille 3 : 405 p.

Dynamique pluriannuelle d'une population d'*Aulacoseira granulata* Sim. var. *angustissima* (Müller) (Bacillariophyceae centrale) dans le lac-réservoir Hassan I (Maroc)

Mohammed LOUDIKI*, Arlette CAZAUBON** & Mustapha HASNAOUI*

RESUME

L'étude de la dynamique du peuplement phytoplanctonique, menée au sein du lac-réservoir Hassan I depuis sa mise en eau, montre que la Bacillariophyceae *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* présente régulièrement une croissance maximale en hiver et se maintient à de faibles effectifs presque tout le reste de l'année.

De 1987 à 1990, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* démarre régulièrement son cycle de développement au mois de décembre dans les couches superficielles du lac et se développe rapidement par la suite pour constituer l'essentiel de la biomasse en janvier et février (plus de 90 % du peuplement global). Dès le mois de mars, cette espèce régresse progressivement dans la zone euphotique et sédimente au niveau des couches profondes (entre 15 et 30 m) aux eaux relativement froides (12 à 15 °C) où elle peut se maintenir à l'état vivant presque tout le reste de l'année.

La prolifération hivernale d'*Aulacoseira granulata* var. *angustissima* dans le réservoir Hassan I paraît être déterminée par les basses températures et les teneurs relativement élevées en sels dissous et particulièrement en silice.

En hiver 1991, aucun filament de cette espèce n'a pu être détecté dans les échantillons prélevés. Cette disparition coïncide d'une part avec des apports liquides au lac très réduits et d'autre part avec des faibles teneurs en silice dont la moyenne hivernale ne dépasse guère 0,3 mg.l.⁻¹

MOTS-CLES : dynamique pluriannuelle, population, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, cycle de développement, lac-réservoir

SUMMARY

The evolution of phytoplanktonic community studied at the Hassan I lake since its first use shows that the bacillariophyceae *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* has generally an optimum growth during the winter and is stabilized at low numbers during the rest of the year.

From 1987 to 1990, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* starts usually its life cycle in december in the superficial layers of the lake and rapidly develops to constitute the main biomass in january and february (more than 90% of global population). Since march, this species disappears progressively in the euphotic zone and in sediments of the lower layers (from -15 m to -30 m) which are relatively cold (12 to 15 °C) where it can be maintained alive almost during the rest of the year.

Winter proliferation of *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* in Hassan I Lake appears to be determined by the low temperatures and relatively high contents of dissolved nutrients particularly silicium.

During 1991, in winter, no filament of such species can be detected in the collected samples. A such disappearance shows the very low silicium contents whose average is lower than 0.3 mg/l.

KEY WORDS : dynamic, population, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, life cycle, reservoir

* Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Département de Biologie, Laboratoire d'Algologie, B.P. 515 Marrakech, Maroc.

** Université Aix-Marseille III, Faculté des Sciences et Techniques de Saint Jérôme, Laboratoire de Biologie Animale (écologie), 13397 Marseille, France

INTRODUCTION

Au Maroc, plusieurs travaux de recherches ont été récemment entrepris sur la microflore algale dans divers systèmes limniques (dayas, cours d'eau, lacs, réservoirs, bassins ...) en particulier dans la région de Marrakech (DARLEY et COUTE, 1983 ; MAIFFI, 1988 ; DUPUIS, 1988 ; MOUHRI *et al.*, 1990 ; LOUDIKI, 1990 ; OUDRA, 1990 ; ESSINI *et al.*, 1991 ; HASNAOUI, 1992 ; CHERIFI, 1992). Les résultats de ces recherches ont permis d'avoir une connaissance taxinomique importante des principaux groupes d'algues et surtout de cerner divers aspects de leur écologie méconnus jusqu'alors sous climat semi-aride.

Dans ce sens, le programme de recherche mené sur le réservoir Hassan I depuis sa mise en eau a permis de comprendre la dynamique pluri-annuelle du peuplement phytoplanctonique et en particulier de certaines espèces de Diatomophycées en relation avec l'évolution de plusieurs variables abiotiques.

La présente note se consacre à l'analyse des variations spatio-temporelles d'une population d'*Aulacoseira granulata* var. *angustissima*. Bien que cette variété ait été inventoriée avec l'espèce type pour la première fois au Maroc par

GAYRAL en 1954 (dans le lac El Kansera), sa bioécologie reste cependant sommairement connue.

Dans les lacs tempérés, cette espèce se développe souvent en été où elle indiquerait des conditions d'eutrophie (CLEVE-EULER, 1951 ; SALDEN, 1978) et parfois même de salinité (PIERRE, 1969 ; MARILLEY, 1972).

Dans le lac Hassan I, seule la variété a pu être identifiée et sa période de croissance y est localisée pendant la saison froide hivernale. Le suivi de cette croissance sur quatre cycles annuels (1987 à 1991) devrait permettre de mieux cerner sa bioécologie dans les lacs en climat chaud.

MATERIEL ET METHODES

Le lac réservoir Hassan I, mis en eau fin 1986, se situe à la confluence de l'oued Lakhdar avec son affluent Bernat à 860 m d'altitude et à 150 km à l'est de la ville de Marrakech (figure 1). Il fait partie de l'ensemble des aménagements du grand bassin de l'Oum-er-Rbia et porte à douze le nombre total des lacs de barrage réalisés dans ce bassin.

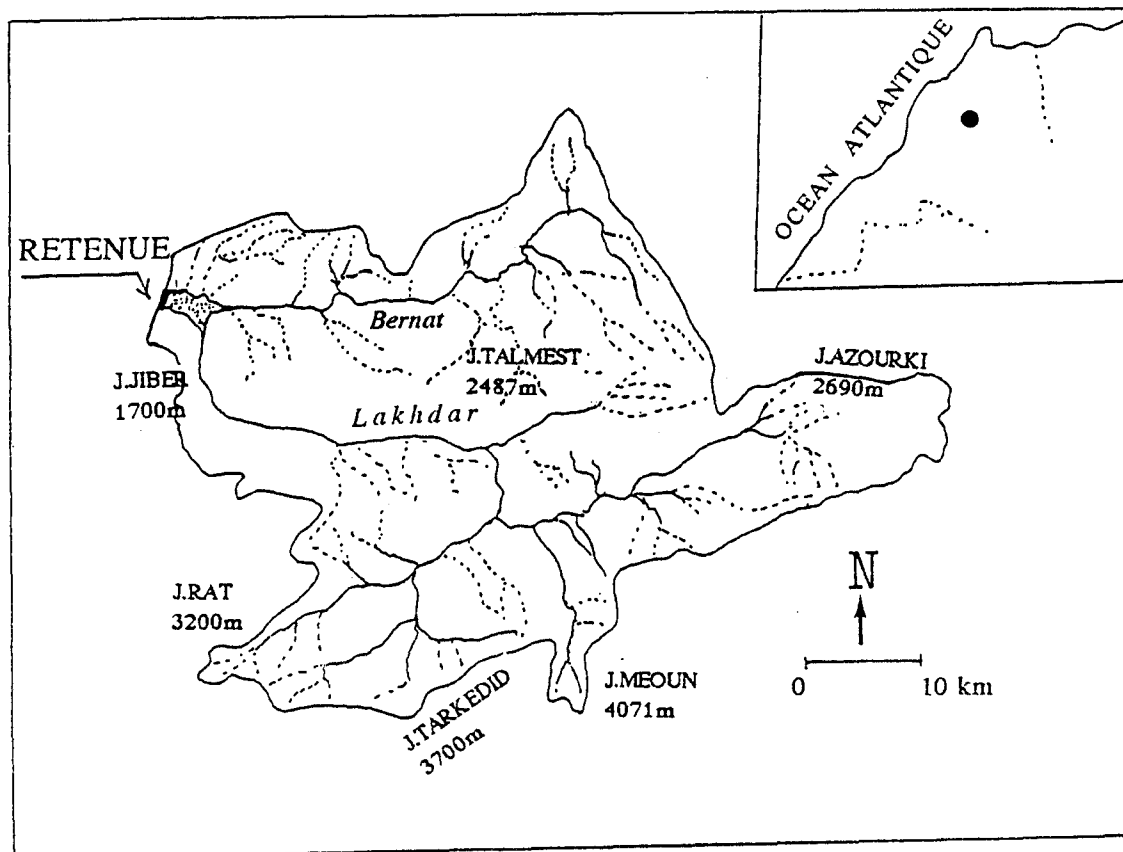


Figure 1.- Bassin versant du lac-réservoir Hassan I

Il se caractérise par une cuvette creuse avec une profondeur maximale de 110 m, une capacité de 270 h³, atteinte pour la première fois en avril 1989, et un temps de rétention des eaux de 416 jours. Le bassin versant du lac, d'une superficie de 1667 km², est établi sur le Haut Atlas calcaire soumis à un climat méditerranéen à dominance semi-aride.

L'analyse quantitative d'*Aulacoseira granulata* var. *angustissima* a été effectuée sur

des échantillons d'eau prélevés au moyen d'une bouteille opaque type Van Dorn à différents niveaux de profondeur (surface ; 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 mètres et le fond) dans le secteur le plus profond du lac (station 4 de la figure 2).

L'analyse qualitative a été réalisée sur des échantillons prélevés à l'aide d'un filet à plancton de 40 µm de vide de maille.

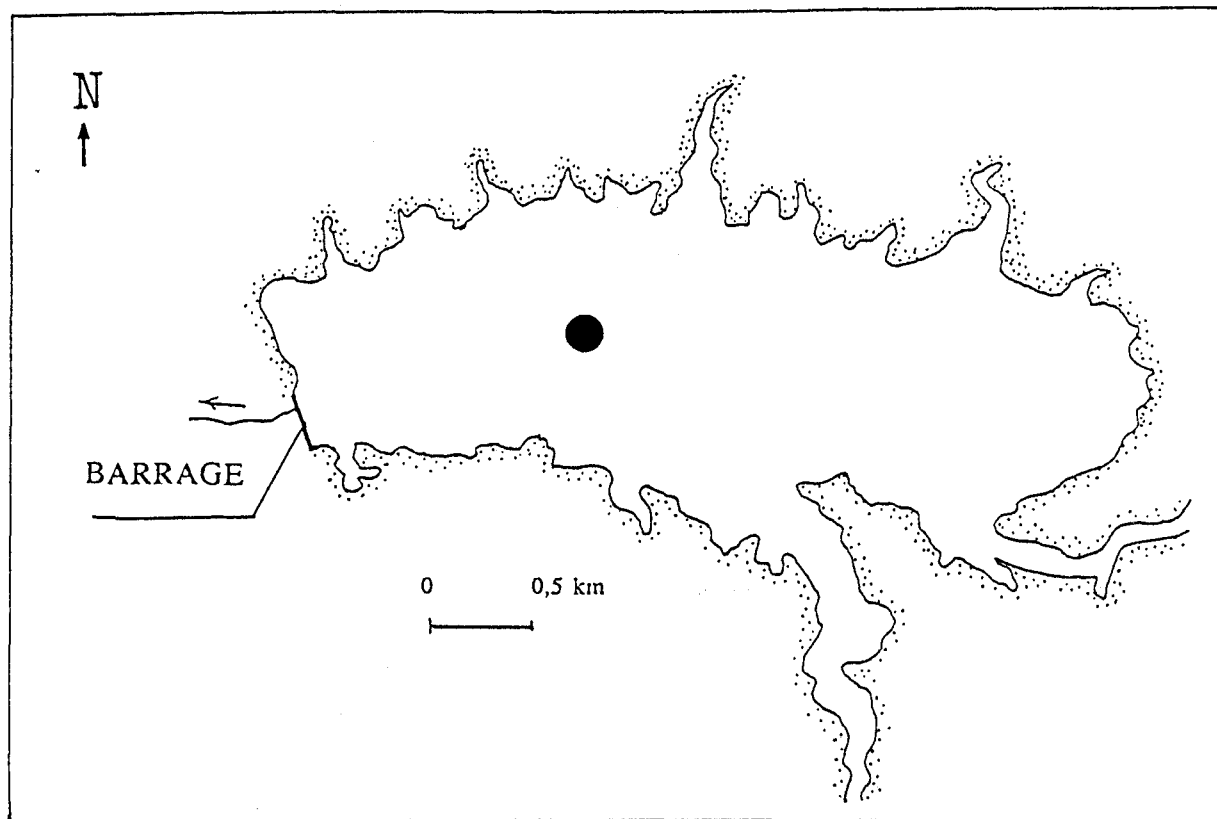


Figure 2.- Emplacement de la station d'étude sur le réservoir Hassan I

Le suivi de la dynamique de cette espèce a été basé sur l'évaluation de trois paramètres :

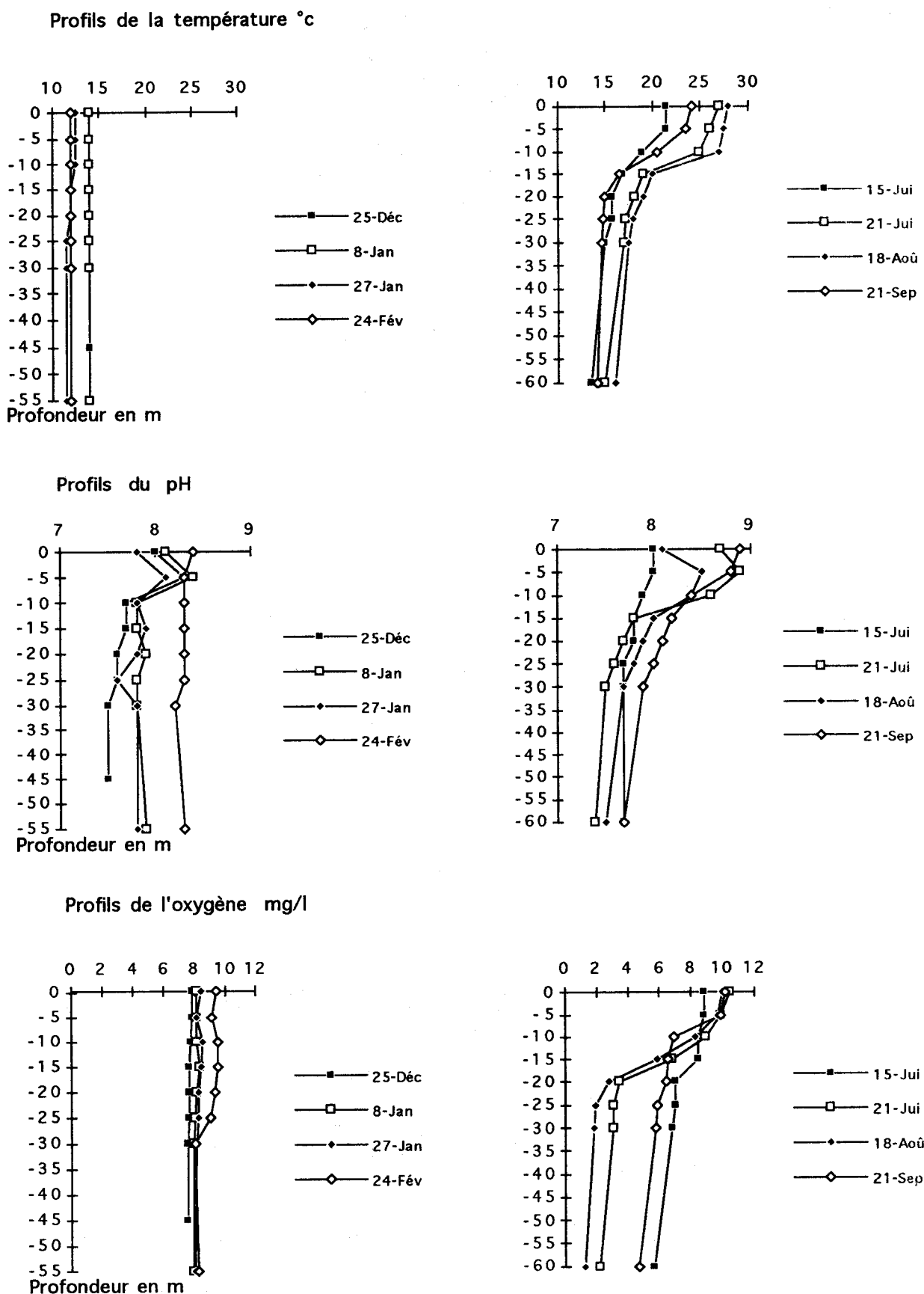
- Le dénombrement cellulaire réalisé selon la méthode d'UTERMOHL (1958).
- La conversion des comptages en poids frais après détermination du biovolume cellulaire (mesures effectuées par l'auteur).
- Le dosage de la chlorophylle *a* et des phéophytines selon la méthode de LORENZEN (1967).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le réservoir Hassan I est un lac monomictique chaud avec une seule période de mélange hivernal et une période de stratification estivale (figure 3).

Détermination de la zone euphotique

La zone euphotique du lac a été déterminée à partir de la profondeur de disparition du disque de Secchi (REYNOLDS, 1984). Elle oscille entre 4 (été, hiver) et 14 m (printemps).



Importance relative des Bacillariophycées dans le phytoplancton du lac

Les Bacillariophycées représentent 40 % de la richesse spécifique totale du peuplement phytoplanctonique (59 espèces et variétés). À côté d'autres espèces généralement peu abondantes (*Synedra acus*, *Nitzschia acicularis*, *Navicula cryptocephala*, *Nitzschia sigma* ...), seules deux diatomées centriques jouent un rôle quantitatif important : *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* et *Cyclotella ocellata*.

La figure 4, qui représente l'évolution des biomasses (exprimées en densité et en poids frais) au niveau de la zone euphotique de décembre 1987 à mars 1989 montre que :

- Durant la période de mélange hivernal, le phytoplancton du lac est régulièrement dominé par les Diatomophycées en particulier l'espèce *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* aussi bien en densité qu'en biomasse. Cette dominance des Diatomées s'accroît encore plus avec la profondeur (plus de 95 % à 25 m) (figure 5). Au cours de l'hiver 1991, la biomasse phytoplanctonique est nettement plus faible suite au non développement d'*Aulacoseira*.

- Au printemps, les Diatomophycées dominent encore largement au niveau de toute la colonne d'eau avec principalement l'espèce *Cyclotella ocellata*. Cette abondance relative s'accroît à mesure qu'on se déplace vers les couches d'eau profondes (figure 5).

- En été, période de stratification thermique, le phytoplancton se diversifie et l'abondance relative des Diatomophycées régresse en densité et surtout en biomasse au profit d'autres groupes d'algues de taille beaucoup plus grande.

- En période de destratification automnale et malgré une légère augmentation des densités relatives, les Diatomophycées participent faiblement à la biomasse planctonique totale.

À mesure qu'on s'enfonce en profondeur, les algues siliceuses semblent prédominer, mettant ainsi en évidence l'importance de la sédimentation. En effet, durant les périodes de stratification et de destratification thermiques, une fraction non négligeable des populations de Diatomées, développées au printemps et en été au niveau de la zone euphotique sédimente dans les couches hypolimniques profondes. En réalité, cette biomasse n'est qu'apparente car plus de 50 % des cellules dénombrées sont plus ou moins moribondes (frustules vides).

Dynamique spatio-temporelle de la population d'*Aulacoseira granulata* Sim. var. *angustissima* (Müller)

La figure 6, qui représente l'évolution de la densité cellulaire d'*Aulacoseira* dans la zone euphotique de décembre 1987 à février 1991, montre que la période de croissance est principalement localisée durant la saison froide hivernale.

Durant cette période, les eaux du lac se caractérisent par une homogénéité thermique avec des températures relativement basses comprises entre 10 et 15°C, un pH légèrement alcalin (entre 7,5 et 8,3) et des teneurs en oxygène dissous relativement élevées sur toute la colonne d'eau (figure 3). La transparence des eaux est généralement faible (<2 m) d'où une pénétration réduite des radiations lumineuses en raison d'une turbidité élevée liée aux apports de particules argileuses et limoneuses par les crues hivernales. À l'inverse, ces manifestations hydro-logiques sont à l'origine d'apports non négligeables en sels nutritifs. Les teneurs en azote nitrique présentent généralement une évolution croissante de décembre à février (de 0,2 à 1,5 mg/l⁻¹ avec une nette homogénéisation sur toute la colonne d'eau. Le phosphore total suit généralement le même type d'évolution avec des teneurs variant entre 25 et 300 µg.l⁻¹).

Durant les années 1988, 1989 et 1990, *Aulacoseira* démarre régulièrement son cycle de développement au mois de décembre au niveau des eaux de surface. Elle croît rapidement par la suite pour constituer l'essentiel de la biomasse en janvier et février.

Alors qu'elle se cantonne dans les deux premiers mètres au démarrage de la croissance, le maximum densitaire se situe plutôt dans la tranche 5-10 mètres à mesure que la croissance augmente (figure 7). Ce maximum coïncide souvent avec des teneurs élevées en chlorophylle *a*. Ce type de distribution a été déjà signalé par TAKAMURA *et al.* (1984).

À partir du mois de mars, *Aulacoseira* commence à régresser progressivement dans la zone euphotique et sédimente au niveau des couches profondes (entre 15 et 30 mètres) relativement froides (12 à 15°C) où elle peut se maintenir à l'état vivant (sans doute en vie ralentie) mais à très faible densité presque tout le reste de l'année. En effet, il semblerait qu'il existe une corrélation positive entre le taux de sédimentation et la mortalité des cellules.

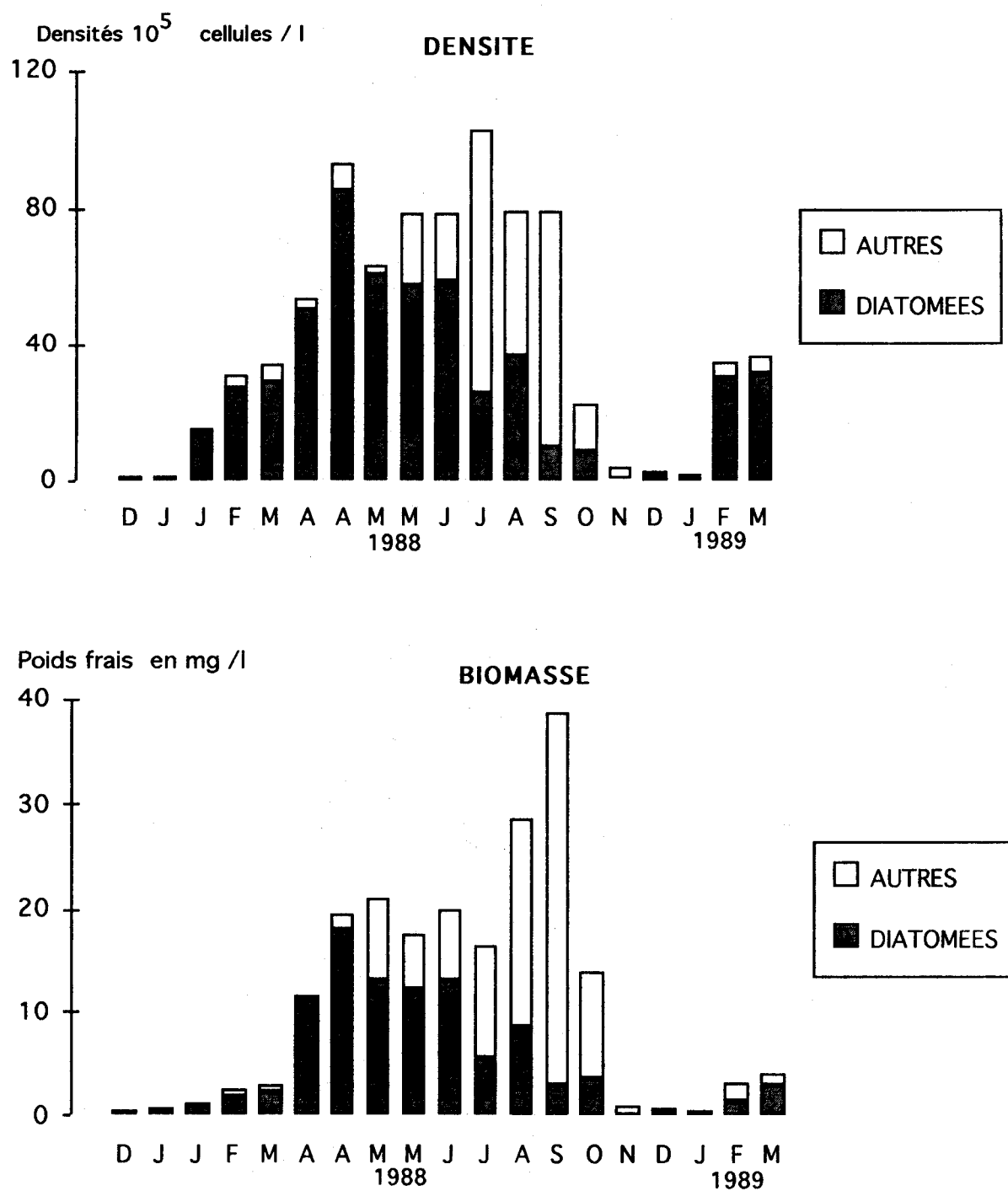


Figure 4.- Evolution de la densité et du poids frais dans la zone euphotique de décembre 1987 à mars 1989

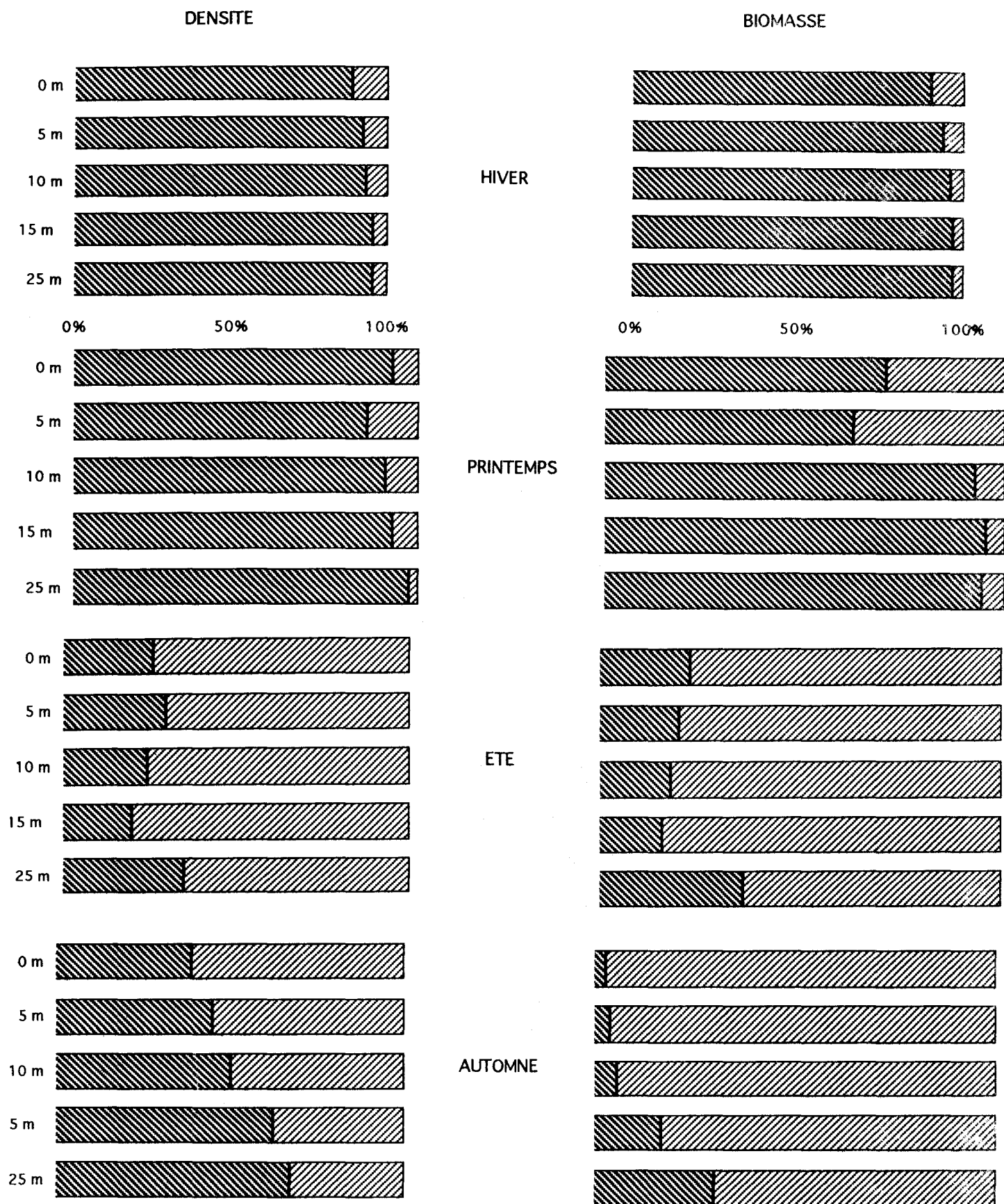


Figure 5.- Profils verticaux des abondances relatives des Diatomophycées (traits serrés) et des autres groupes (traits clairs) durant l'année 1988

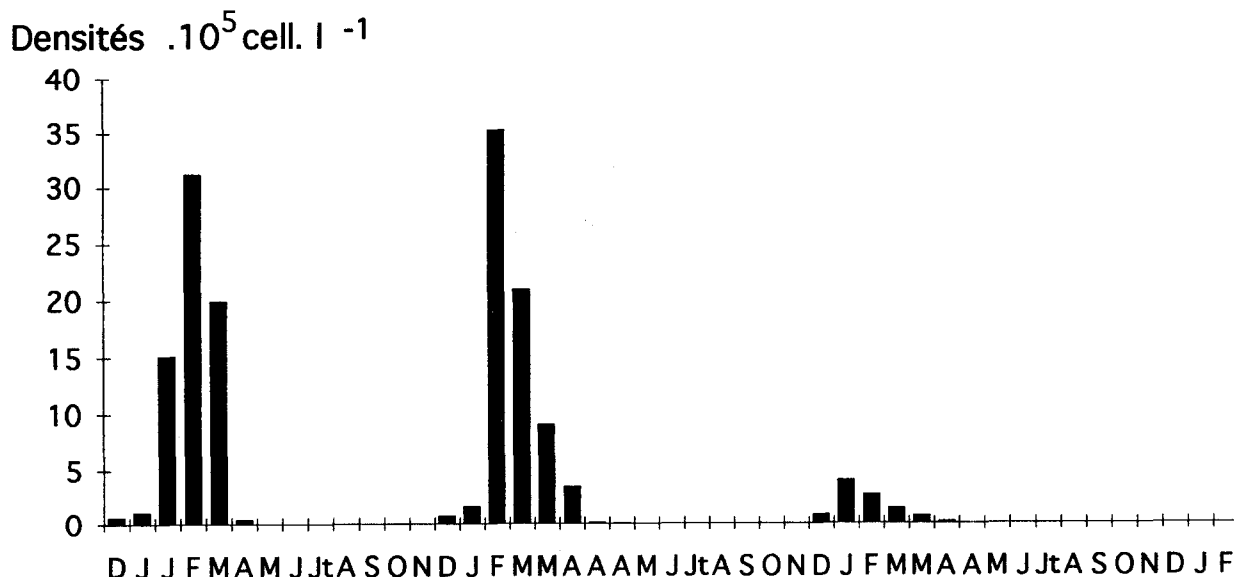


Figure 6.- Evolution de la densité d'*Aulacoseira* dans la zone euphotique de décembre 1987 à février 1991

Ce phénomène de sédimentation a été déjà mis en évidence par LUND (1958) qui a montré que les filaments d'*Aulacoseira* peuvent subsister au fond du lac pendant plusieurs années. Selon PETROVA (1986), cette Diatomée centrique se caractérise par son taux de sédimentation relativement élevé et sa capacité de se maintenir en vie même en zone obscure profonde.

Plus récemment encore, AMBLARD *et al.* (1990) ont décrit ce même comportement pour une autre espèce d'*Aulacoseira* (*A. italica* var. *subarctica*) dans le lac Pavin. Cette espèce forme également 80 à 95 % de la biomasse algale globale du lac mais avec un léger décalage dans le temps (mai-juin) par rapport au lac Hassan I. Selon ces mêmes auteurs, 40 à 60 % des cellules atteignant l'hypolimnion sont encore vivantes. Cette constatation corrobore nos observations microscopiques puisqu'une fraction non négligeable des filaments d'*Aulacoseira* présente encore des plastes quasiment intacts même à 30 m de profondeur. En outre, à côté des teneurs élevées en phéopigments, l'analyse pigmentaire révèle aussi des concentrations non négligeables en chlorophylle *a* et *c* (figure 8).

Toujours selon AMBLARD *et al.* (1990), les mécanismes qui permettent la survie et le maintien d'*Aulacoseira* dans la zone aphotique seraient liés à l'utilisation des produits de réserves (hydrates de carbone et lipides). La diminution avec la profondeur du rapport protéines / hydrates de carbone met en évidence l'importance des réactions cataboliques et par là les capacités hétérotrophiques de cette algue.

D'autre part, le développement saisonnier d'*Aulacoseira* dans les lacs tempérés dimictiques semble être principalement lié aux périodes de forte turbulence des eaux (printemps et automne). Ces mouvements d'eau permettent et prolongent le maintien en suspension des filaments de l'algue dans la zone euphotique (LUND 1962 ; PETROVA, 1986). Dans les lacs tropicaux stratifiés, le mélange vertical des eaux semble constituer un facteur déterminant dans la dynamique saisonnière de cette espèce.

Dans le lac Hassan I, la croissance hivernale d'*Aulacoseira* ne semble pas seulement liée aux conditions de trophie comme c'est le cas dans les lacs tempérés. Cette espèce microplanctonique se développe malgré les températures des eaux relativement basses. Toutefois, le rôle limitant de ce paramètre semble être moins important que dans les lacs tempérés où cette espèce est plutôt estivale.

D'autre part, dans un milieu aussi turbide que le lac Hassan I et où les nutriments semblent être largement disponibles, la pénétration de la lumière ne semble pas être un facteur limitant réellement la croissance d'*Aulacoseira*.

À l'inverse, les teneurs en sels dissous et en particulier en silice peuvent limiter le développement de cette espèce. Il est bien connu dans les lacs des régions tempérées que le maximum de développement des Diatomées coïncide généralement avec un net appauvrissement en silice dans l'épilimnion (<1 mg/l) (CAPBLANCQ, 1974 ; CASPER, 1985).

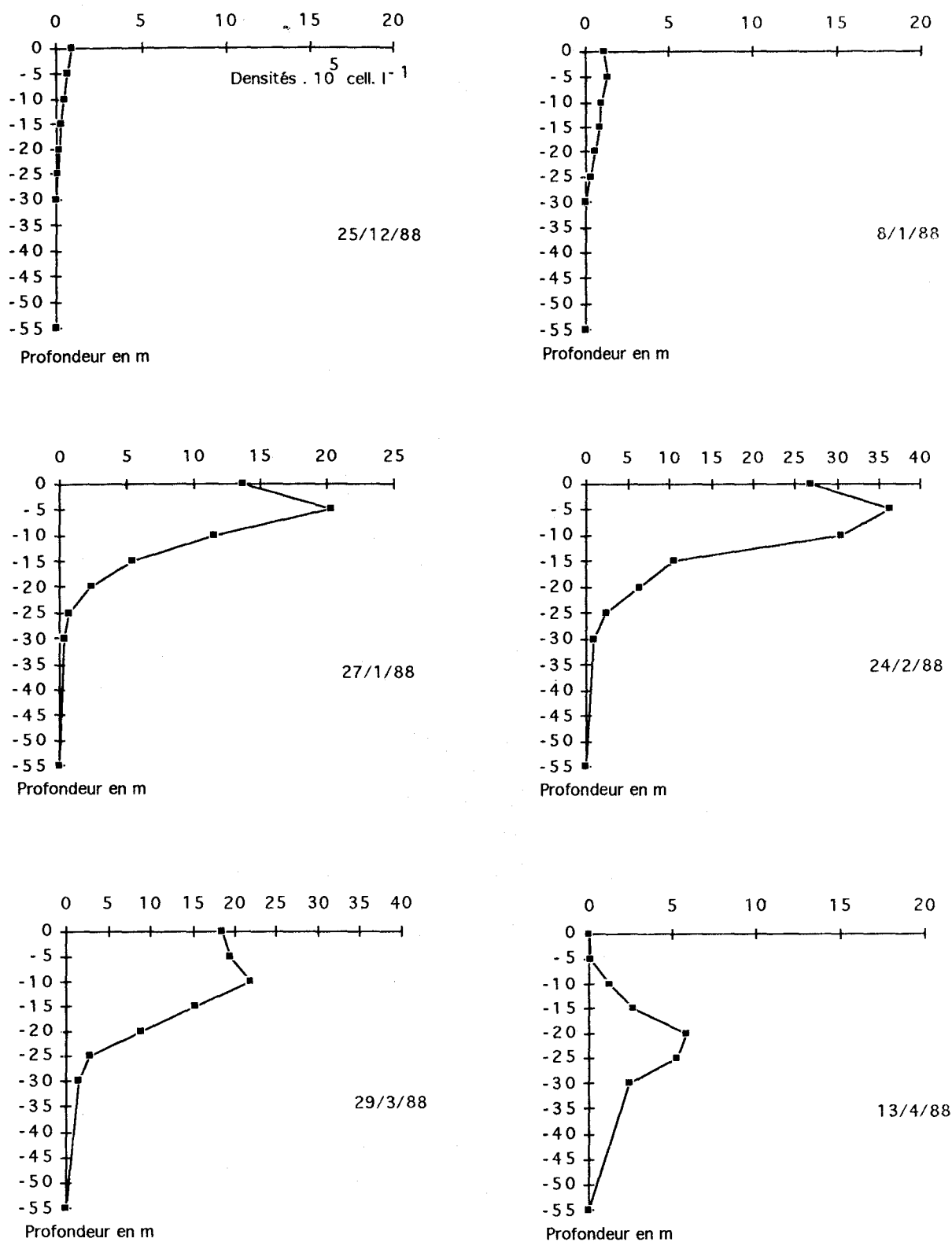


Figure 7.- Profils verticaux des densités d'*Aulacoseira* de décembre 1987 à avril 1988

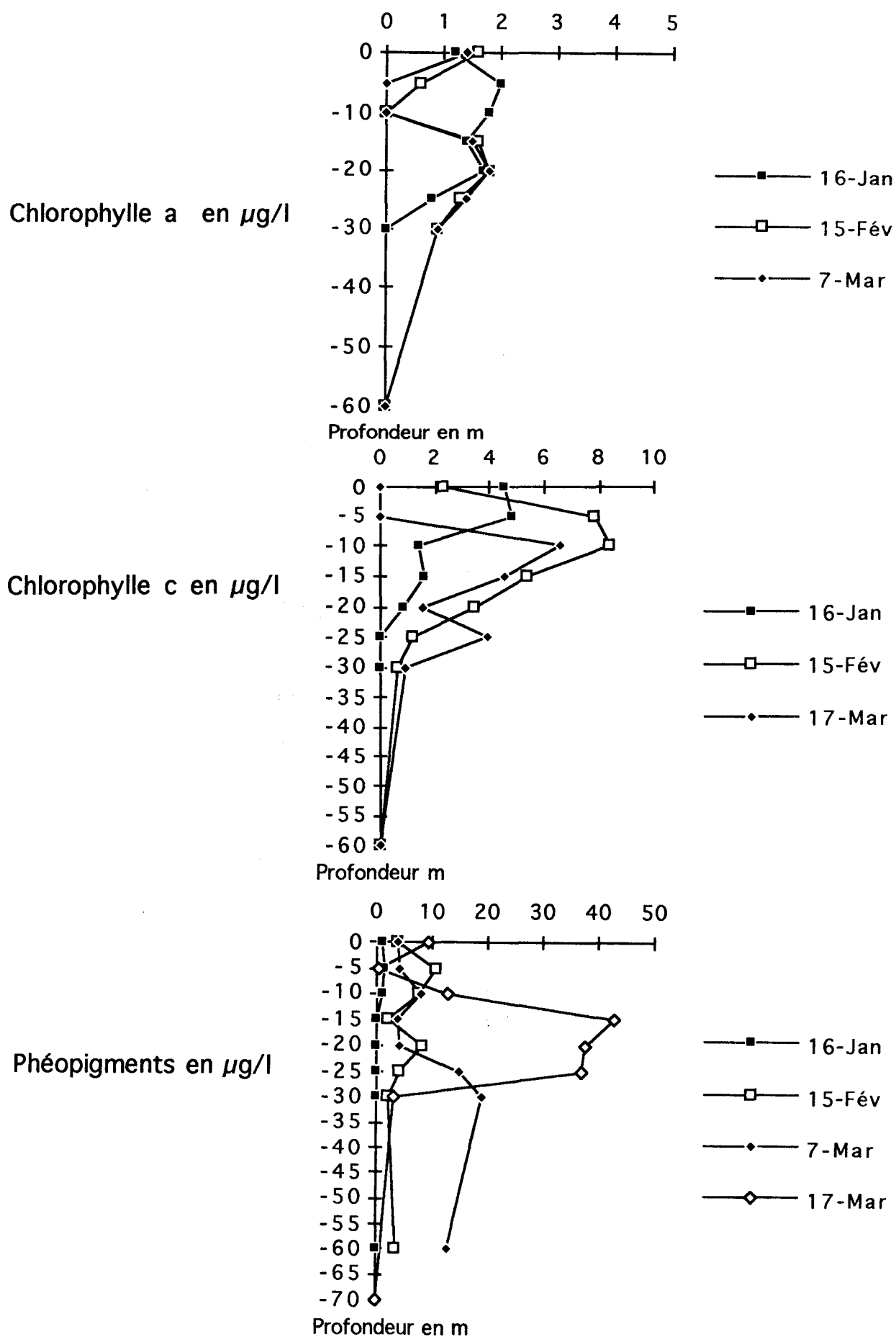


Figure 8.- Profils verticaux de la chlorophylle *a*, la chlorophylle *c* et des phéopigments de janvier à mars 1989

Dans le lac Hassan I, la croissance hivernale d'*Aulacoseira* entraîne un épuisement progressif de la silice dans les eaux de surface mais sans pour autant la rendre réellement limitante pour d'autres espèces de Diatomées. En effet, les teneurs moyennes mesurées en hiver 1988, 1989, et 1990 sont de l'ordre de 5 mg.l^{-1} avec un net gradient croissant de la surface au fond. Les teneurs maximales mesurées dépassent les 10 mg.l^{-1} dans les couches d'eaux profondes.

Ces concentrations relativement élevées en comparaison avec les lacs tempérés reflètent sans doute l'importance des phénomènes de lessivage et d'érosion des sols sous climat chaud. En effet, selon GOLTERMAN (1975), une grande fraction de la silice dans les lacs provient de la dissolution des silicates suite à une érosion intense du bassin versant.

Ces constatations expliqueraient d'ailleurs le maintien d'une densité relativement élevée de Diatomées au printemps et en été dans l'épilimnion. Selon WETZEL (1975), la poussée printanière de Diatomées peut persister plus longtemps dans les eaux plus riches en silice.

Durant l'hiver 1991, *Aulacoseira* ne s'est pratiquement pas développée dans le lac et aucun filament n'a pu être détecté dans tous les échantillons prélevés sur toute la colonne d'eau. Alors que la température, la lumière, les sels d'azote et de phosphore n'ont pas montré de variations notables par rapport aux années précédentes, la teneur en silice, au contraire, a nettement diminué et la moyenne hivernale ne dépasse guère $0,3 \text{ mg.l}^{-1}$. Les teneurs varient entre $0,01 \text{ mg.l}^{-1}$ en surface et $0,55 \text{ mg.l}^{-1}$ au fond. Ces faibles teneurs en silice coïncident avec des apports liquides au lac très réduits durant l'automne 1990 et l'hiver 1991, ce qui a entraîné une baisse importante du niveau du lac (plus de 15 m de marnage). En outre, la masse d'eau n'a pas connu véritablement son brassage automnal et vernal tel est le cas lors des autres années. Ceci s'est traduit naturellement par une plus grande stabilité hydrologique et une faible turbulence des eaux.

En définitive, à côté des autres variables, la silice et la turbulence des eaux semblent être les facteurs limitants de la croissance d'*Aulacoseira granulata* var. *angustissima* espèce caractéristique du peuplement phytoplanctonique hivernal depuis la mise en eau du lac. Cette espèce semble être beaucoup plus exigeante en silice que d'autres espèces de Diatomées.

Dès que les conditions optimales ne sont plus réunies dans la zone euphotique, cette espèce disparaît progressivement pour être rem-

placée par une autre Diatomée *Cyclotella ocellata* qui aurait des exigences moindres vis-à-vis de la silice.

Ces résultats sont en parfait accord avec les observations de GAYRAL (1954) qui a montré que la période de végétation d'*Aulacoseira* se localise à la moitié de l'année pendant laquelle la température est la plus basse ($11,8$ à 22°C) de janvier à juin et sa disparition est marquée par l'éclosion d'autres Diatomées, *Cyclotella ocellata* d'abord, puis *Synedra acus* ensuite.

Toujours selon GAYRAL (1954), la différence chimique essentielle entre la période où les *Aulacoseira* sont absentes et celle où elles sont dominantes, porte surtout sur la teneur en silice. Une autre hypothèse a été également émise en supposant un phénomène d'antagonisme entre les *Aulacoseira* et les Péridiniens. Dans le lac Hassan I, ces deux types d'algues se développent mais ni à la même saison, ni au même niveau lorsqu'ils sont parfois présents simultanément (période de transition).

CONCLUSION

Le lac Hassan I est un lac monomictique chaud caractérisé par une seule période de mélange hivernal et une période de stratification estivale.

Durant la période de mélange hivernal, les basses températures constituent sans doute la cause essentielle des faibles biomasses phytoplanctoniques. Le peuplement est principalement dominé par la Diatomophycée *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* dont la croissance s'étale régulièrement de décembre à février. En hiver 1991, cette espèce ne s'est pas développée dans le lac en raison des très faibles teneurs en silice par rapport aux années précédentes.

La dynamique de la population d'*Aulacoseira* dans le lac semble dépendre plus de la silice que des conditions thermiques ou de trophie. Sa croissance hivernale paraît être simplement induite par la grande disponibilité de la silice en cette période.

BIBLIOGRAPHIE

- AMBLARD C. et BOURDIER G., 1990 - The spring bloom of the diatom *Melosira italica* subsp. *subarctica* in lake Pavin : biochemical, energetic and metabolic aspects during sedimentation. J. Plankton Res., 12 (3) : 645-660.
- CAPBLANCQ J., 1974 - Recherches sur la productivité primaire des lacs d'altitudes. Docto-

- rat es-Sci., Univ., Paul Sabatier, Toulouse : 230 p.
- CASPER S.J., 1985 - Lake Stechlin : a temperate oligotrophic lake. Monographie biologique, 58, 553 p.
- CHERIFI O., 1992 - Evolution et dynamique du phytoplancton en relation avec certains paramètres biotiques et abiotiques au niveau de la retenue Lalla Takerkoust (Maroc). Doct. 3ème cycle, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech : 155 p.
- CLEVE-EULER A., 1951 - Die Diatomeen von Schweden und Finland. Kundl. SV. Vetensk. Hadlingar Fj. ser. 2 (1) : 163 p.
- DARLEY et COUTE A., 1983 - *Cosmarium marocanum* nov. sp. (Chlorophyta Zygothryxaceae ; Desmidiaceae ; Desmidiaceae). Algologie, 4, 1/2 : 99-103.
- DUPUIS P., 1988 - Dynamique et production primaire des macrophytes et microphytes des mares temporaires des Jbilet (Dayas de la région de Marrakech - Maroc). Thèse de Doctorat, Univ. Paris 6 : 134 p.
- ESSINI A. et DARLEY J., 1991 - Bacillariophycées et qualité des eaux souterraines dans la région d'El Azzouzia (Maroc). Rev. Fac. Sc. Mar., n°5 : 106-120.
- GAYRAL P., 1954 - Recherches phytolimnologiques au Maroc. Thèse doctorat es sciences, Univ. Paris : 310 p.
- GOLTERMAN H.L., 1975 - Physiological limnology. Elsevier in water science. Amsterdam, Oxford, New-York : 489 p.
- HASNAOUI M., 1992 - Biomasse, production primaire et distributions verticale et horizontale du phytoplancton dans le lac-réservoir Hassan I (Maroc). Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech : 135 p.
- LORENZEN C.J., 1967 - Determination of chlorophyll and pheopigments : spectrophotometric equations. Limnol. Oceanogr., 12 : 343-346.
- LOUDIKI M., 1990 - Etude limnologique d'un hydrosystème récemment aménagé dans la région de Marrakech (Maroc). Thèse Doct. es-Sci., Univ. Aix-Marseille III : 353 p.
- LUND J.W.G., 1955 - Further observations on the seasonal cycle of *Melosira italica* (Ehr.) Kutz. subsp. *subarctica* O. Mull. J. Ecol. 43 : 90-102.
- LUND J.W.G., 1962 - The periodicity of *Melosira italica* O. Mull. in Great Slave lake. J. Fish. Res. Bd. Can. 19 : 501-504.
- MAIFFI M., 1988 - Impact des rejets des eaux usées de la ville de Marrakech sur l'oued Tensift, les Diatomées, indicateurs biologiques. Thèse de Doct. de l'Univ. de Paris 6 : 243 p.
- MARILLEY M., 1972 - Etude écologique d'un étang saumâtre méditerranéen : l'étang de l'Olivier. Eaux, sédiments, plancton. Thèse 3ème cycle, Univ. Aix-Marseille : 88 p.
- MOUHRI K., DARLEY J., LE COHU R., et LOUDIKI M., 1990 - Desmidiées en tant qu'indicateurs de la qualité des eaux dans la région de Marrakech (Maroc). Annals Limnol. 26 (2-3) : 109-118.
- OUDDA B., 1990 - Bassins de stabilisation anaérobie et aérobie facultatif pour le traitement des eaux à Marrakech : Dynamique du phytoplancton (microplancton et picoplancton) et évaluation de la biomasse primaire. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, 144 p.
- PIERRE J.F., 1969 - Etude hydrobiologique de la Meurthe. Contribution à l'écologie des populations algales. Univ. Nancy Thèse Fac. Sci. Sci. Nat. : 150 p.
- PETROVA N., 1986 - Seasonality of *Melosira* plankton of the great northern lakes. Hydrobiologia, 138 : 65-73.
- REYNOLDS C.S., 1984 - Phytoplankton periodicity : the interactions of form, function and environmental variability. Freshw. Biol., 14 (2) : 111-142.
- SALDEN N., 1978 - Beitrag zur ökologie der Diatomeen (Bacillariophyceae) des Subwassers. Decheniana Beih. 22 : 1-238.
- TAKAMURA N., YASUNO M., 1984 - Diurnal changes in the vertical distribution of phytoplankton in hypertrophic lake Kasumigaura, Japan. Hydrobiologia 112 : 53-60.
- UTERMOHL H., 1958 - Zur vervollkommen der quantitativen phytoplankton methodik. Mitt. Int. Verein. Theor. Angew. Limnol., 9 : 1-38.
- WETZEL R.G., 1957 - Limnology W.B. Saunders company (Ed.) Philadelphia, : 418 p.

Comparaison de six indices diatomiques et deux indices invertébrés pour l'estimation de la qualité de l'eau de la rivière Sensée (France)

Jean PRYGIEL*

Résumé

Deux campagnes de prélèvements hydrobiologiques ont été réalisées en mai et en septembre sur le bassin versant de la rivière Sensée. Sur l'ensemble des 40 stations ont été calculés six indices diatomiques et deux indices invertébrés. Les données biologiques et physico-chimiques ont été traitées en analyse en composantes principales. Contrairement aux indices invertébrés, les indices diatomiques apparaissent peu corrélés aux différents paramètres chimiques indicateurs de la qualité de l'eau. Ceci est dû au caractère instantané des analyses chimiques mais aussi à la différence de pouvoir intégrateur entre ces deux types de bioindicateurs. Les indices diatomiques intègrent les phénomènes d'eutrophisation et donnent des résultats beaucoup plus nuancés que les indices invertébrés. L'utilisation des diatomées et des indices diatomiques dans des milieux très hétérogènes n'est cependant pas sans poser de problèmes en raison du manque de standardisation des méthodes.

MOTS-CLES : cours d'eau, qualité de l'eau, diatomée, invertébré, indice

Summary

From 2 investigations in may and september on 40 sites of the River Sensée, 6 indices have been applied on Diatoms and Invertebrates. Biologic, physical and chemical data have been treated by a P.C.A. Unlike the invertebrates, Diatomic indexes seem to be weakly correlated with the different physical and chemical parameters used for the assessment of the water quality. It is both linked to the instantaneous feature of chemical analysis and the different integrating power of the two kinds of bioindicators. Diatom indices traduce the eutrophication and give more expressive results than macroinvertebrates indices. Use of Diatom and Diatom indices in heterogeneous rivers is really a problem linked to the gap in standardized methods.

KEY WORDS : river, diatoms, invertebrates, index

INTRODUCTION

Pour suivre l'évolution de la qualité des eaux en France, des réseaux de stations d'observation ont été mis en place. Dans ces stations sont réalisés périodiquement des prélèvements en vue d'analyses physico-chimiques, et dans certains cas des analyses biologiques et bactériologiques. En ce qui concerne les eaux continentales superficielles, ce suivi correspond à une obligation

légale prévue par la loi sur l'eau de 1964. Le suivi hydrobiologique des cours d'eau se fait par utilisation de méthodes standardisées basées sur la macrofaune benthique. Ces méthodes trouvent cependant leurs limites dans le bassin Artois-Picardie en raison d'un réseau canalisé particulièrement dense. L'Agence de l'Eau Artois-Picardie a donc décidé d'utiliser les diatomées et les indices diatomiques pour la surveillance de son réseau dès 1988 (PRYGIEL, 1991, Agence de l'Eau Artois-Picardie, 1992) parallèlement aux indices biotiques traditionnellement utilisés par les DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) dans le cadre de la surveillance du RNB. L'élaboration d'un contrat de rivière sur le

* Agence de l'Eau Artois-Picardie, 764 boulevard Lahure, 59508 Douai cedex, France

bassin de la Sensée a été l'occasion d'appliquer simultanément les deux types d'approche. Six indices diatomiques et deux indices invertébrés ont ainsi été utilisés simultanément et étudiés en fonction des caractéristiques chimiques des eaux de ce bassin ainsi que de la nature du milieu.

PRESENTATION DU SITE

Le bassin versant de la Sensée se situe dans le nord de la France, dans le bassin Artois-Picardie. D'une superficie de 745 km², il s'étend sur les départements du Nord et du Pas-de-Calais sur un substratum crayeux du Sénonien. Les reliefs sont faibles puisque les altitudes extrêmes sont de 34 et 165 m. Ceci conduit à des pentes moyennes de l'ordre de 0,242%. La Sensée a fait l'objet de nombreux aménagements depuis la période gallo-romaine et son cours a été largement modifié. Le creusement du Canal du Nord qui a débuté en 1907 pour s'achever en 1965 a conduit en particulier à l'existence de deux Sensées (figure 1). La Sensée amont, d'une longueur de 16 km, prend sa source dans le département du Nord et se jette dans le Canal du Nord après avoir traversé plusieurs étangs et reçu trois affluents (la Trinquise, l'Hirondelle et l'Agache). Elle a une pente moyenne de 0,07%. La Sensée aval a une longueur de 20 km et une pente moyenne de 0,02%. Elle prend naissance dans le triangle formé par le Canal du Nord et le Canal de la Sensée, et se jette dans le Canal de l'Escaut à Bouchain après avoir également traversé plusieurs étangs. Elle possède un seul affluent : la Naville Tortue.

La superficie des surfaces boisées reste faible sauf dans la vallée elle-même où 20% de la superficie est occupée par des peupleraies. La vallée subit une forte pression touristique qui se traduit par la présence de nombreux campings et par une floraison de caravanes et cabanons, rendant l'accès aux étangs quelquefois impossible. Les activités humaines sont essentiellement tournées vers l'agriculture, ce qui a conduit à l'implantation d'une activité industrielle basée sur le sucre et la conserverie respectivement situées en amont de la Sensée et de l'Hirondelle.

MATERIELS ET METHODES

Deux campagnes de prélèvements ont été menées en mai et en septembre 1991. Vingt stations situées sur les Sensée amont et aval ainsi que sur les principaux affluents ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques (figure 1). Les différentes formes d'azote et de phosphore sont

exprimées en nitrites, nitrates, ammonium, azote Kjeldhal et en orthophosphates. La nature du substrat et la vitesse du courant jouent un rôle important dans le déterminisme des peuplements algaux (ROUND, 1981, ROUND, 1991). Les prélèvements ont donc été réalisés en faciès lotique par grattage de substrats durs naturels de préférence, sur une surface d'environ 10 cm² chaque fois que cela a été possible. En l'absence de substrat dur, les prélèvements ont été réalisés sur substrat végétal (macrophytes et algues filamenteuses). Les diatomées ont été nettoyées à chaud à l'eau oxygénée concentrée et montées dans du naphrax. Les déterminations ont été menées au niveau spécifique suivant la taxonomie de KRAMMER et LANGE-BERTALOT (1986-1991) sur un effectif de 400 valves au minimum. Les inventaires ont été saisis après codification sur le logiciel OMNIDIA (LECOINTE *et al.*, 1993), qui permet le calcul de six indices diatomiques : l'indice de Descy ou DES (DESCY, 1979), l'indice de polluosensibilité spécifique ou IPS (COSTE in CEMAGREF, 1982), l'indice de Slade ek ou SLA (SLADE EK, 1986), l'indice de Leclercq et Maquet ou ILM (LECLERCQ et MAQUET, 1987), l'indice diatomique générique ou IDG (COSTE et AYPHASSORHO, 1991) et enfin l'indice CEE (DESCY et COSTE, 1991). Les cinq premiers sont calculés à partir de la formule proposée par ZELINKA et MARVAN (1961) : $ID = \frac{A_j v_j i_j}{A_{vj}}$ où A_j est l'abondance relative de l'espèce j ; v_j est la valeur indicatrice de l'espèce j ($1 < v < 3$) et i_j est la sensibilité à la pollution de l'espèce j ($1 < i < 5$). L'indice CEE est calculé à partir d'une grille à double entrée où les groupes sont composés d'espèces à large distribution rangées par ordre de tolérance croissante à la pollution, et les sous-groupes d'espèces à faible amplitude écologique classées par ordre d'apparition le long d'un écosystème théorique amont-aval.

Dans le même temps, des prélèvements portant sur la macrofaune invertébrée ont été réalisés par la DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) Nord - Pas-de-Calais (DIREN Nord-Pas de Calais, 1993). Ces prélèvements ont conduit au calcul de deux indices de qualité hydrobiologique : l'Indice Biotique ou IB (VERNEAUX et TUFFERY, 1967) et l'Indice Biologique Global ou IBG (VERNEAUX *et al.*, 1982).

Les données physico-chimiques et biologiques ont été centrées et réduites puis traitées en analyse en composantes principales (ACP). Les premières ont été placées en variables actives et les différents indices de qualité en variables supplémentaires.

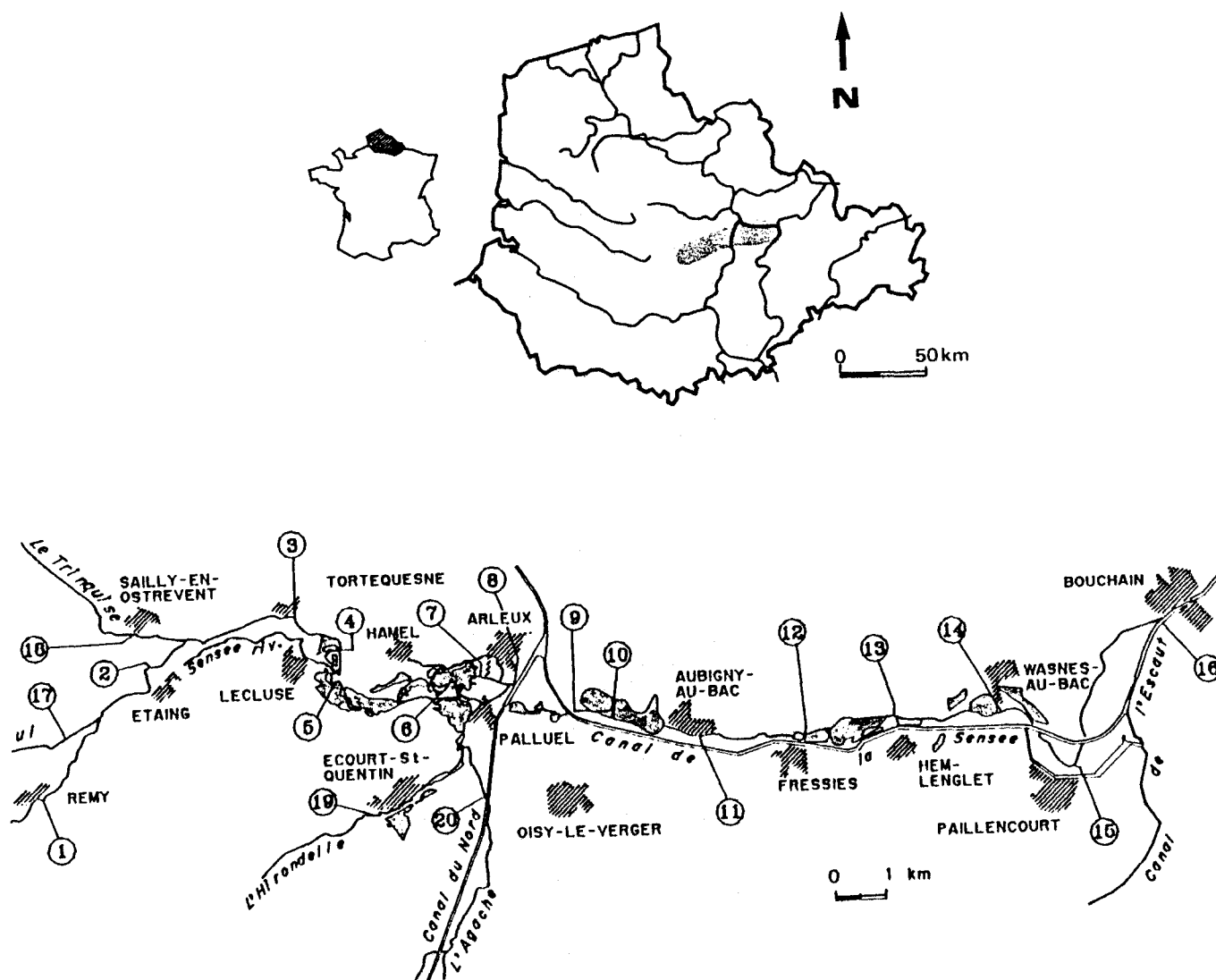


Figure 1.- Carte de situation générale du bassin de la Sensée et localisation des stations de prélèvements. 1 = Rémy ; 2 = Etaing ; 3 = Tort. ; 4 = Lec.ht ; 5 = Lec.bas ; 6 = Exut.Pall. ; 7 = Pruss. ; 8 = Confl.Nd ; 9 = Brun. ; 10 = Syphon ; 11 = Aubigny ; 12 = Fressies ; 13 = Hem ; 14 = Wasnes ; 15 = Paill. ; 16 = Bouchain ; 17 = Cojeul ; 18 = Trinq. ; 19 = Hirond. ; 20 = Agache

RESULTATS

Caractérisation chimique des eaux du bassin de la Sensée

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur l'ensemble du jeu de données en vue de classer les 40 échantillons en fonction de 15 variables environnementales. Les deux premières composantes totalisent 58% de la variance totale. Le premier axe (33,1% de la variance) est déterminé par la DBO₅ (demande biochimique en oxygène dissous), la DCO (demande chimi-

que en oxygène dissous), le phosphore total et les orthophosphates. Le deuxième axe (25 % de la variance) oppose l'oxygène dissous et les matières en suspension à la conductivité et à l'ammonium. Le plan factoriel principal peut donc être divisé en quatre secteurs (figures 2 et 3) : un quart nord-est caractérisé par une absence de pollution et par des concentrations élevées en O₂ (partie amont des cours d'eau) ; un quart sud-est caractérisé par une absence de pollution organique mais par la présence d'une forte conductivité liée à la présence de sels dissous qui résulte du déstockage des eaux des bassins de lagunage de la sucrerie située en amont de la Sensée amont ;

un quart sud-ouest caractérisé par une forte pollution de type domestique (présence de phosphore et d'ammonium) et enfin un quart nord-ouest caractérisé par la présence de matières organiques essentiellement d'origine végétale comme le montrent les fortes concentrations en oxygène dissous associées.

Indices diatomiques

L'IPS est souvent considéré comme l'indice de référence (DESCY et COSTE, 1991) et est largement utilisé en Artois-Picardie. L'interprétation des résultats sera donc basée sur celui-ci. Les hauts bassins versants (Rémy, Etaing, Tort., Trinq., Hirond.) et l'aval de la Sensée aval (Hem, Bouchain) ont un débit relativement rapide et un peuplement diatomique généralement dominé par *Achnanthes minutissima* Kützing, *Amphora pediculus* Kützing, *Achnanthes conspicua* A. Meyer. Ceci conduit à des valeurs indicielles

bonnes à très bonnes. On note toutefois deux exceptions : la station Lec. Bas1 avec un IPS de 6,4 et un peuplement dominé par *Nitzschia palea* Kützing, *N. paleacea* Grunow et *N. fronticola* Grunow malgré une eau de bonne qualité (figure 2), et la station Cojeul 2. Cette dernière station subit directement l'influence du déstockage des eaux de lagunage de la sucrerie située en amont. Celui-ci survient courant septembre et de fait, les eaux de cette station étaient d'une couleur verte intense lors des prélèvements. On retrouve d'ailleurs dans le peuplement diatomique des espèces indicatrices de pollution organique comme *Fragilaria ulna* Nitzsch., *Nitzschia palea* mais aussi des espèces légèrement halophiles comme *Fragilaria pulchella* Ralfs ex Kütz., qui entraînent une chute des valeurs indicielles. La composition du peuplement en mai traduit également l'arrivée d'une eau aux caractéristiques plus lenticques (présence de *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, *S. hantzschii*

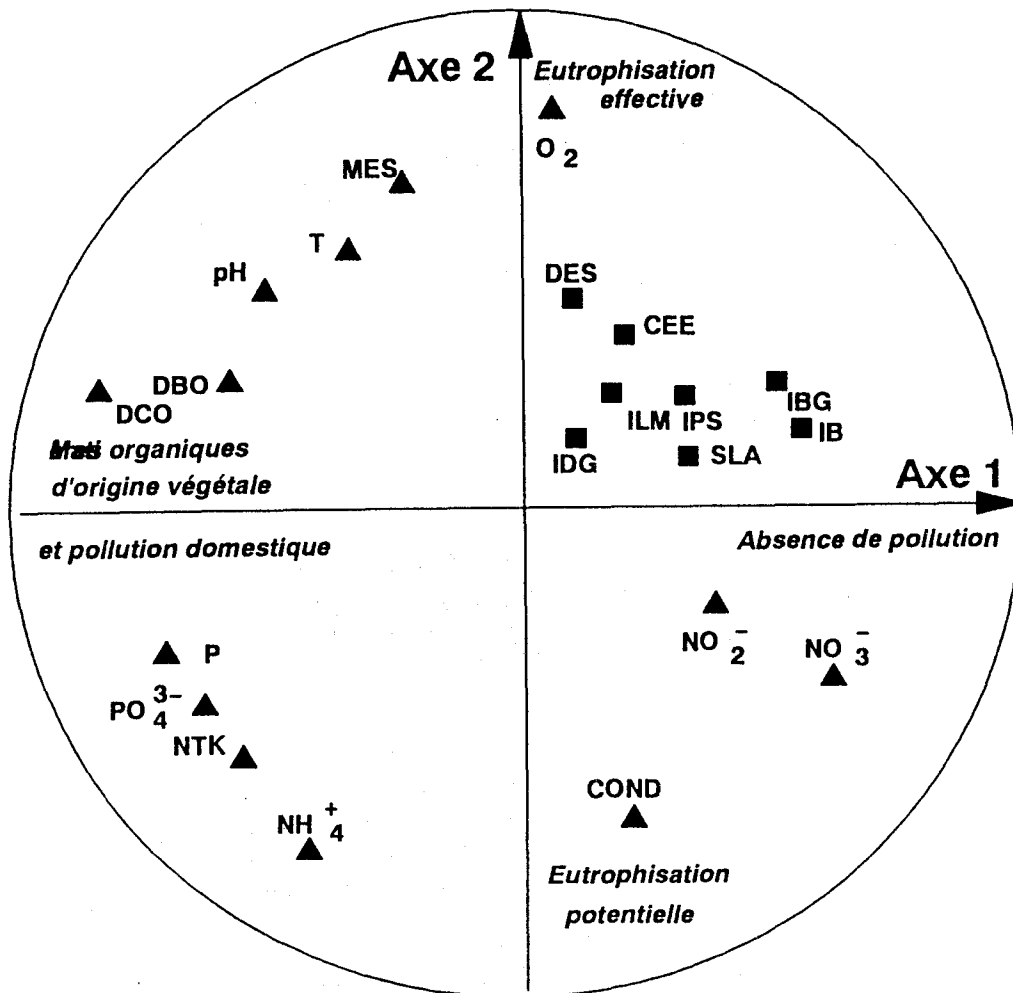


Figure 2.- Caractérisation chimique des eaux du bassin de la Sensée. Plan factoriel de l'ACP (n° 37). ◆ = variables biologiques illustratives. ▲ = variables chimiques actives. COND = conductivité ; DBO = demande biochimique en oxygène ; DCO = demande chimique en oxygène ; MES = matières en suspension totales ; NH_4^+ = ammonium ; NO_2^- = nitrites ; NO_3^- = nitrates ; NTK = azote Kjeldhal, O_2 = oxygène dissous, P = phosphore total, PO_4^{3-} = orthophosphates, T = température.

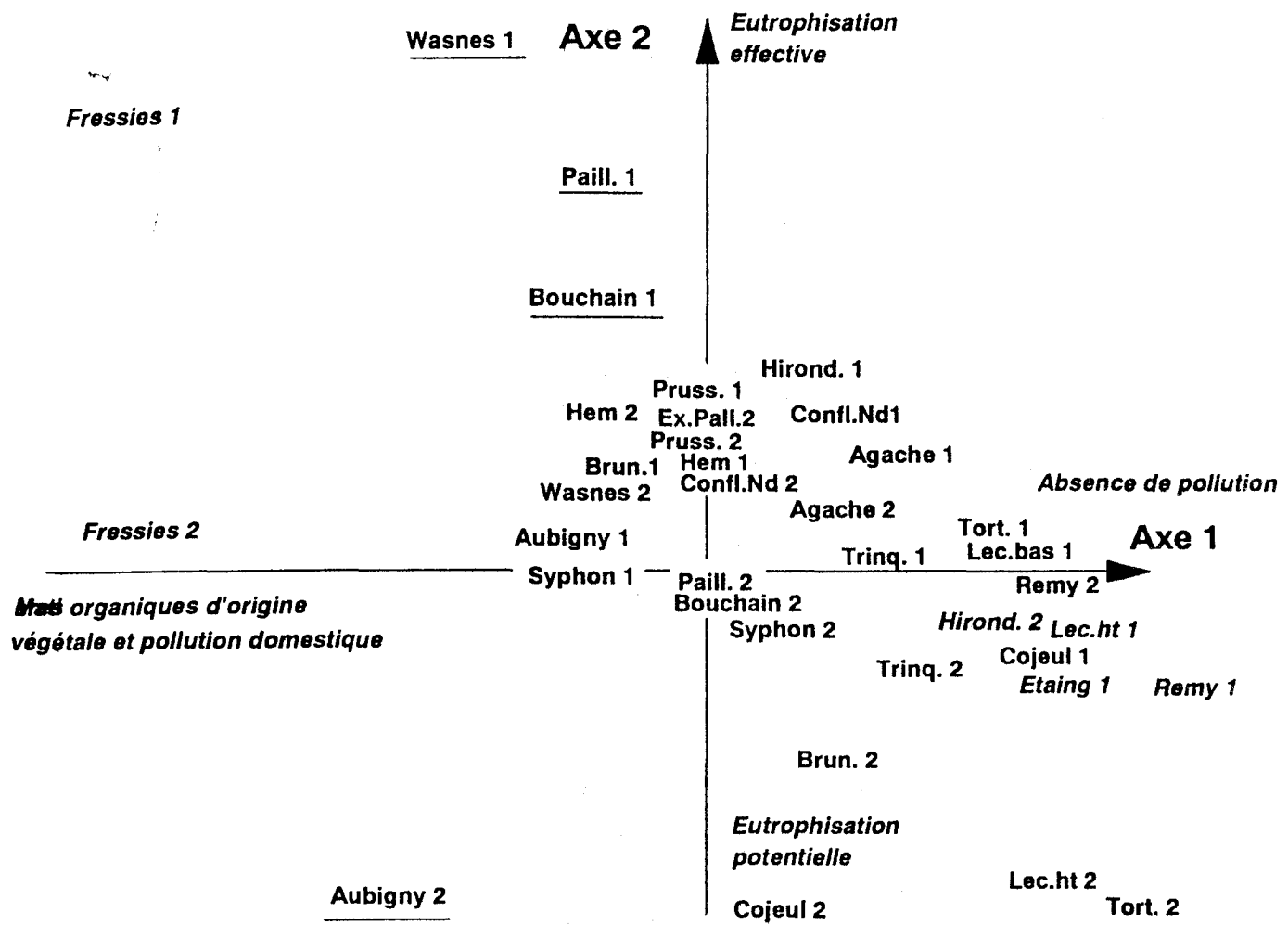


Figure 3.- Distribution des stations du bassin versant de la Sensée sur le premier plan factoriel de l'ACP. Les stations en italique caractérisent l'axe 1 et les stations soulignées l'axe 2

fo. *tenuis* Hustedt et *Aulacoseira granulata* Ehrenberg). Ces espèces indicatrices d'eutrophisation se retrouvent également sur les stations situées à l'exutoire des grands étangs traversés par les deux Sensée (Wasnes, Paill., Confl.Nd.2, Pruss.2, Exut.Pall.2) où l'on trouve également des espèces appartenant au genre *Cyclotella* (*C. meneghiniana* Kützing, *C. radiosa* Grunow, *C. atomus* Hustedt, *C. stelligera* Cleve et Grün). Les stations Aubigny et Fressies1 ont un peuplement dominé par *Gomphonema parvulum* Kützing, *Nitzschia palea*, *Navicula joubaudi* Germain, *N. saprophila* Lange-Bertalot & Bonik, *N. seminulum* Grunow, *N. veneta* Kützing, qui traduisent une pollution de type organique importante (tableau 1).

Les six indices diatomiques donnent des résultats concordants (tableaux 2 et 3). Les profils peuvent toutefois différer sensiblement (figure 4). Ainsi, l'indice de Descy donne des valeurs sensiblement plus optimistes alors que l'indice de Slàde ek donne dans certains cas des résultats discordants. Ceci est dû en grande partie

au nombre et à la nature des espèces prises en compte par les indices mais aussi aux différents paramètres intégrés par chacun d'entre eux (COSTE *et al.* 1991 ; PRYGIEL et COSTE, 1993). Les indices de Slàde ek et de Descy sont bien corrélés avec les paramètres indicateurs de charge organique tandis que les indices IPS, CEE, IDG et dans une moindre mesure ILM intègrent la pollution organique, la minéralisation et l'eutrophisation (PRYGIEL et COSTE, 1993). L'IDG donne des valeurs proches des indices basés sur les espèces. Lorsque les espèces dominantes appartiennent au genre *Navicula* ou *Nitzschia*, il peut toutefois y avoir discordance. Ces deux genres renferment de nombreuses espèces dont l'écologie peut être très différente si bien que la valeur de sensibilité à la pollution et la valeur indicatrice qui leur ont été attribuées sont moyennes. Lorsque des espèces sensibles à la pollution sont dominantes, l'IDG sous-estime la qualité de l'eau et inversement lorsque des espèces résistantes sont dominantes, l'IDG sur-estime la qualité de l'eau (figure 4).

A l'exception de l'indice de Slède ek, les indices diatomiques ne sont pas significativement corrélés au premier axe de l'ACP qui correspond à un axe de pollution par des matières organiques d'origine végétale ainsi qu'à une pollution domestique (tableau 4). Seuls les indices DES et CEE sont corrélés significativement ($p = 5\%$) à l'axe 2 qui représente une opposition entre eutrophisation réelle (présence de phytoplancton) et eutrophisation potentielle (présence de sels nutritifs).

L'examen des corrélations entre les indices diatomiques et les paramètres chimiques mesurés (tableau 5), montre l'absence de corrélations significatives avec la conductivité, les matières en suspension, la DBO_5 , la DCO, les sulfates, les nitrites et des corrélations significatives à 5% de certains indices avec le pH (DES), l'azote Kjeldhal (CEE), les nitrates (IPD, SLA, ILM, CEE), l'ammonium (DES, CEE), les orthophosphates et le phosphore total (CEE), la température de l'eau (IPS, SLA) et l'oxygène dissous (SLA et CEE).

Indices invertébrés

L'interprétation des données est basée sur les indices biotiques qui demeurent la méthode la plus utilisée dans la région Nord-Pas de Calais. Dans l'ensemble, on constate que les valeurs indicielles sont assez peu discriminantes. Au cours des deux campagnes, on constate que la Sensée amont présente une qualité acceptable sur l'ensemble de son parcours (tableau 2). Les plus fortes valeurs indicielles sont atteintes en aval des étangs de Lecluse (stations Lec. ht et Lec. bas), les plus faibles à Tort.. Ceci est dû à un ralentissement du courant, à un envasement plus important et à une végétation supérieure aquatique moins diversifiée. Les stations Ex. pall. et Confl. Nd ne présentent plus qu'un seul faciès (faciès lentique). La granulométrie devient homogène avec prédominance de limons. Ceci entraîne une légère diminution de la qualité hydrobiologique. La Sensée aval avant Fressies ne présente qu'un seul faciès mixte lentique. A la station Syphon, le substrat est diversifié et les phanérogames abondants d'où des valeurs indicielles satisfaisantes. A Brun., les limons organiques dominent et la végétation est devenue rare mais les indices demeurent relativement élevés. Aubigny et Fressies présentent des valeurs faibles, signe d'une très forte pollution. Ce n'est qu'à partir de Hem, que les faciès lotique et lentique sont de nouveau présents et que les indices retrouvent des valeurs élevées. Les affluents sont de bonne qualité sauf la station Agache. Les résultats obtenus par la méthode des IBG sont davantage pénalisants dans l'appré-

tion de la qualité de l'eau de la Sensée et de ses affluents puisque l'on constate un recul d'une classe de qualité sur environ 50% des stations (tableau 2 et figure 5).

Les corrélations entre les indices IB et IBG et l'axe 1 de l'ACP sont significatives au seuil $p = 1\%$ (tableau 4). Ils répondent donc bien à la pollution organique telle que définie dans le cadre de cette étude. Ceci s'explique par les corrélations significatives au seuil de 5% observées pour les paramètres décrivant cet axe (DCO , DBO_5 , PO_4^{3-} , P total). Les indices invertébrés ne présentent cependant aucune corrélation significative avec l'axe 2 (eutrophisation) ainsi qu'avec les paramètres chimiques qui le décrivent.

CONCLUSION

Les indices diatomiques comme les indices invertébrés donnent des résultats homogènes dans l'appréciation de la qualité des eaux du bassin de la Sensée mais sont très peu corrélés entre eux. Il n'y a que l'IBG qui présente une corrélation significative à $p = 5\%$ avec l'IPS. Ces deux méthodologies n'intègrent pas les mêmes facteurs environnementaux. Les indices diatomiques intègrent essentiellement la qualité de l'eau que ce soit la pollution de type organique, ou l'eutrophisation et la salinité pour certains d'entre eux (PRYGIEL et COSTE, 1993) mais dépendent également du type de substrat échantillonné (CAZAUBON, 1988, CAZAUBON, 1989; CAZAUBON et LOUDIKI, 1986) ainsi que de la vitesse du courant (CAZAUBON, 1988; WENKLER, 1992). La nature des peuplements invertébrés dépend quant à elle de la qualité générale de l'eau mais aussi de la qualité du substrat (LAFONT, 1984; LAFONT et JUGET, 1985). Il faut ajouter à cela le pouvoir intégrateur de ces deux types de bioindicateurs. Le cycle de développement est beaucoup plus court chez les diatomées que chez les invertébrés. Celles-ci répondent donc plus vite que les invertébrés aux variations de la qualité de l'eau et du substrat. L'étude de jeux de données de grande taille montre en général d'excellentes corrélations entre indices diatomiques et paramètres liés à la charge organique (DBO_5 et DCO) à l'azote et surtout au phosphore (DESCY et COSTE, 1989; PRYGIEL et COSTE, 1993). L'absence de corrélations significatives entre les indices diatomiques et ces paramètres lors de cette étude est vraisemblablement liée au fait que les données sont issues de deux campagnes dont une en période d'eutrophisation intense. Toutefois, lorsque les conditions environnementales sont stables dans le temps, un à deux échantillons par an peuvent

Tableau 1

Résultats des analyses chimiques effectuées sur les cours d'eau Sensée amont et aval. Les stations suivies du chiffre 1 ont fait l'objet d'analyses en mai 1991 et celles suivies du chiffre 2 en septembre 1991. Les concentrations sont exprimées en mg/l, la conductivité en $\mu\text{S}/\text{seconde}$ et la température en $^{\circ}\text{C}$.

	pH	cond	MES	DCO	DBO	NTK	NO3	SO4	NH4	NO2	PO4	Ptot	TEMP	OXY	%
Rémy 1	7.23	642	3	5	2	0.9	39	22	0.2	0.02	0.1	0.1	11	12.2	120
Etaing 1	7.57	636	6	5	1	1.2	31	31	0.2	0.3	0.4	0.5	12.2	11.4	108
Tort. 1	7.71	645	12	5	2	1.1	9	24	0.2	0.49	0.2	0.1	12.4	14.8	141
Lec.ht 1	7.67	627	6	8	2	1.3	29	25	0.2	0.52	0.1	0.1	13.5	11.3	107
Lec.bas 1	7.9	609	4	11	3	1.5	28	28	0.2	0.47	0.2	0.1	14.6	13.6	136
Pruss. 1	7.99	472	25	21	5	2.4	10	24	0.2	0.25	1.7	0.2	17.1	12.3	129
Confl.Nd 1	7.85	474	21	22	4	2	9	23	0.2	0.24	0.1	0.1	17.2	10.5	110
Syphon 1	7.53	639	33	51	10	3	1	59	0.2	0.10	1.1	0.3	14.4	1.7	17
Brun.1	7.57	603	19	42	10	2.2	1	50	0.2	0.03	0.6	0.2	15.8	7	71
Aubigny 1	7.56	548	12	39	8	3.3	1	66	0.8	0.03	0.6	0.3	18.3	2.2	24
Fressies 1	8.97	610	41	69	17	4.5	1	63	0.2	0.04	2.2	1.1	17.3	19	199
Hem 1	7.94	534	14	27	5	2.7	1.6	36	0.4	0.19	0.5	0.2	17.1	9.4	98
Wasnes 1	8.58	544	36	42	9	3.1	1.9	34	0.2	0.24	0.7	0.5	17.6	26.9	284
Paill.1	8.05	532	41	38	9	3.2	1.9	34	0.2	0.19	0.4	0.3	16.6	20.4	212
Bouchain 1	7.95	536	43	35	11	3.1	1.5	33	0.2	0.15	0.3	0.3	16	13.2	135
Cojeul 1	7.44	647	7	5	2	1	31	25	0.2	0.05	0.1	0.7	12.5	12.8	120
Trinq.1	7.55	675	8	19	4	1.5	7	52	0.2	1.2	0.8	0.5	15.8	13.7	140
Hirond 1	7.67	647	65	26	5	1.8	24	27	0.2	0.13	0.5	0.1	14.4	12	120
Agache 1	8.17	582	18	6	2	1.3	18	25	0.2	0.18	0.3	0.4	15.8	12.5	127
Cojeul 2	7.48	1453	11	32	13	6.9	30	21	6	1.2	0.9	0.5	10.7	7.4	67
Trinq.2	7.64	740	4	17	2	1.4	15	55	0.3	0.16	1	0.2	13.9	6	58
Bouchain 2	7.79	554	7	24	4	2.2	3.8	25	0.3	0.2	0.6	0.2	17.3	4.5	47
Confl.Nd 2	8.07	585	16	25	8	2.5	4.9	21	0.4	0.22	0.3	0.2	19.1	7.6	84
Wasnes 2	7.92	535	8	42	7	2.3	3.1	25	0.4	0.19	1	0.4	18.8	7.7	87
Tort. 2	7.67	859	5	8	5	1.1	37	23	0.8	0.93	0.4	0.3	11	6	55
Hirond. 2	7.75	614	4	22	1	1.1	22	27	0.2	0.20	0.2	0.1	13.8	8.4	81
Lec.ht 2	7.7	853	4	10	3	1.6	34	22	0.4	0.74	0.5	0.2	12.7	3.2	30
Exut.Pall. 2	8.17	612	9	42	5	1.9	8	22	0.3	0.33	0.1	0.2	18.9	12	130
Pruss. 2	7.89	588	11	33	7	1.7	6	23	0.6	0.23	0.2	0.2	19.2	9.4	103
Hem 2	8.07	468	8	43	7	2.3	2.9	27	0.2	0.05	0.4	0.2	19.2	7.9	87
Rémy 2	7.28	656	5	5	1	0.3	2.8	58	0.2	0.02	0.3	0.1	10.2	10.3	91
Aubigny 2	7.81	793	4	55	6	16.7	1	13	18.5	0.04	6.2	2.4	14.4	0.9	9
Syphon 2	7.65	604	15	9	3	1.6	3.8	27	0.4	0.1	0.5	0.3	18	2.3	30
Fressies 2	9.08	490	31	78	22	5.7	2.9	28	1.9	0.13	3.7	1.7	19	5	58
Brun. 2	7.53	552	3	18	2	2.2	3.3	22	1.4	0.03	0.8	0.3	14.8	0.5	7
Paill. 2	7.72	549	9	19	4	1.9	3.7	24	0.3	0.19	0.9	0.3	18.1	4.9	52
Agache 2	8.41	569	12	6	1	1.3	19	27	0.2	0.17	0.2	0.8	13.6	12.5	122

Tableau 2

Résultats des calculs indiciels diatomiques et invertébrés sur les cours d'eau Sensée amont et aval. Les stations suivies du chiffre 1 ont fait l'objet d'investigations en mai 1991, celles suivies du chiffre 2, en septembre 1991. Effectif = nombre de cellules comptées, nb sp = nombre d'espèces recensées, IPS = indice du Cemagref, SLA = indice de Slàde ek, DES = indice de Descy, ILM = indice de Leclercq et Maquet, IDG = indice diatomique générique, CEE = indice européen, IB = indice biotique, IBG = indice biologique global.

station	effectif	nb sp	IPS	SLA	DES	ILM	IDG	CEE	IB	IBG
Rémy 1	483	26	15.6	14.1	14.9	12.5	14.3	13	7	9
Etaing 1	479	43	12.8	13.6	15.8	13.1	10.6	13.7	7	11
Tort. 1	467	38	12.1	11.5	14.4	10.5	11.2	11.5	6.5	8
Lec.ht 1	541	42	14.5	12.5	17	12.3	11.1	13.4	7	10
Lec. bas 1	482	38	6.4	12.8	10.8	9.4	4.1	9.5	7	11
Pruss. 1	516	49	11.6	10.8	18.1	10	12.3	15.8	7	10
Confl. Nd 1	574	66	13.9	12.8	18.2	12.5	12.8	15.6	6	8
Syphon 1	400	52	10.6	10.9	13.2	10.9	11.5	11.3	8	12
Brun. 1	822	37	18.3	14.7	15.7	14.8	16.5	17	7	8
Aubigny 1	433	55	7.7	10.5	12.9	8.8	11.2	8	2	2
Fressies 1	409	36	9.5	11.5	17.1	11.9	11.2	10.3	5	5
Hem 1	479	41	13.8	12.6	18.2	13.1	11.1	13.9	7.5	13
Wasnes 1	512	55	9.3	10	15.1	9	10.7	12.2	7	11
Paill. 1	451	50	12.4	13	18.2	11.9	9.9	13.7	7.5	9
Bouchain 1	655	25	18.3	14.9	15.3	14.4	16.5	16.6	7	10
Cojeul 1	461	51	13.7	12.5	15.2	11.7	13.3	15.8	7	10
Trinq. 1	535	32	13.7	12.1	18.7	11.9	13.1	12.2	7	11
Hirond. 1	469	48	17.3	14.4	15.4	13.9	16	16	6.5	11
Agache 1	264	41	11.6	12.1	16.6	11.6	10.5	12.4	5.5	5
Cojeul 2	357	51	9.8	11	10.9	10.1	11.7	9.7	7.5	11
Trinq. 2	487	36	14.7	11.9	15.2	11.4	13.2	11.8	6.5	9
Bouchain 2	564	43	11.4	12.2	12.8	11.1	9.6	11.3	7	9
Confl.Nd 2	448	51	9.9	11.5	10.8	10.7	12.4	10.7	7	8
Wasnes 2	560	33	13.4	12.4	19.2	13	10.3	15.1	7	10
Tort. 2	629	37	14.5	14.1	17.7	14.2	13.6	14.1	6.5	9
Hirond. 2	697	27	18.7	14.9	15.6	14.8	16.5	16.6	7	11
Lec.ht 2	449	33	15.4	14.1	17.2	14	12.1	15.3	8	12
Exut.Pall. 2	527	40	13.5	13.4	14.1	12.2	13.9	13.9	—	—
Pruss. 2	530	32	10	11.4	14	10.5	13.6	11.5	7	11
Hem 2	494	55	12.6	12.3	15.6	11.9	11.2	13.4	5.5	9
Remy 2	448	31	12	14.5	12.8	11.5	11.4	11.1	7	10
Aubigny 2	658	33	8.3	10.9	8.3	9.3	11.9	6.9	3	2
Syphon 2	408	40	5.8	10.6	6.8	8.6	6.3	5.4	7	7
Fressies 2	644	30	13.7	12.4	19.5	13.4	11.6	12	3	2
Brun. 2	363	36	5.5	10.6	6.5	8.6	6.5	5.4	6	6
Paill. 2	546	69	7.9	11	11.5	9.9	8.7	9.2	7	11
Agache 2	405	37	13.3	13	18.3	12.8	11.1	12.8	6	7

Tableau 3

Matrice des corrélations entre indices diatomiques et indices invertébrés appliqués à 37 stations du bassin de la Sensée en 1991. Les valeurs exprimées en caractères gras sont significatives à $p = 5\%$

	IPS	IDG	DES	SLA	ILM	CEE	IB	IBG
IPS	1							
IDG	0.8	1						
DES	0.7	0.4	1					
SLA	0.9	0.6	0.4	1				
ILM	0.90	0.7	0.7	0.9	1			
CEE	0.9	0.70	0.8	0.70	0.8	1		
IB	0.3	0.1	0.1	0.3	0.2	0.4	1	
IBG	0.4	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.9	1

Tableau 4

Corrélations entre indices diatomiques et invertébrés et les deux premiers axes de l'analyse en composantes principales. Les corrélations exprimées en caractères gras sont significatives à $p = 5\%$

	Axe 1	Axe 2
IPS	0.29	0.13
IDG	0.08	0.04
DES	0.06	0.44
SLA	0.36	0.05
ILM	0.19	0.14
CEE	0.27	0.34
IB	0.60	0.16
IBG	0.57	0.16

Tableau 5

Corrélations entre indices diatomiques et invertébrés et les paramètres chimiques ayant fait l'objet d'analyses. Les valeurs exprimées en caractères gras sont significatives à $p = 5\%$.

COND = conductivité ; MES = matières totales en suspension, DBO = demande biochimique en oxygène, DCO = demande chimique en oxygène, NH₄ = ammonium, NTK = azote Kjeldhal, NO₂ = nitrites, NO₃ = nitrates, O₂ = oxygène dissous, PO₄ = orthophosphates, P = phosphore total, SO₄ = sulfates, T = température

	IPS	IDG	DES	SLA	ILM	CEE	IB	IBG
pH	0.09	0.12	0.38	0.20	0.06	0.03	0.37	0.38
Cond	0.03	0.11	0.24	0.01	0.04	0.16	0.17	0.16
MES	0.12	0.22	0.22	0.05	0.15	0.24	0.02	0.00
DBO	0.14	0.06	0.08	0.25	0.03	0.10	0.46	0.37
DCO	0.08	0.09	0.15	0.18	0.05	0.05	0.34	0.32
NTK	0.31	0.04	0.31	0.33	0.28	0.37	0.52	0.48
NO ₃	0.42	0.29	0.20	0.42	0.37	0.34	0.27	0.29
SO ₄	0.01	0.09	0.13	0.02	0.01	0.07	0.13	0.06
NH ₄	0.28	0.31	0.41	0.25	0.29	0.39	0.44	0.42
NO ₂	0.12	0.08	0.20	0.14	0.11	0.08	0.30	0.34
PO ₄	0.26	0.08	0.17	0.31	0.22	0.35	0.60	0.56
P	0.24	0.10	0.08	0.25	0.14	0.32	0.63	0.61
T°	0.32	0.23	0.04	0.42	0.23	0.13	0.28	0.24
O ₂	0.21	0.18	0.48	0.10	0.12	0.39	0.23	0.24

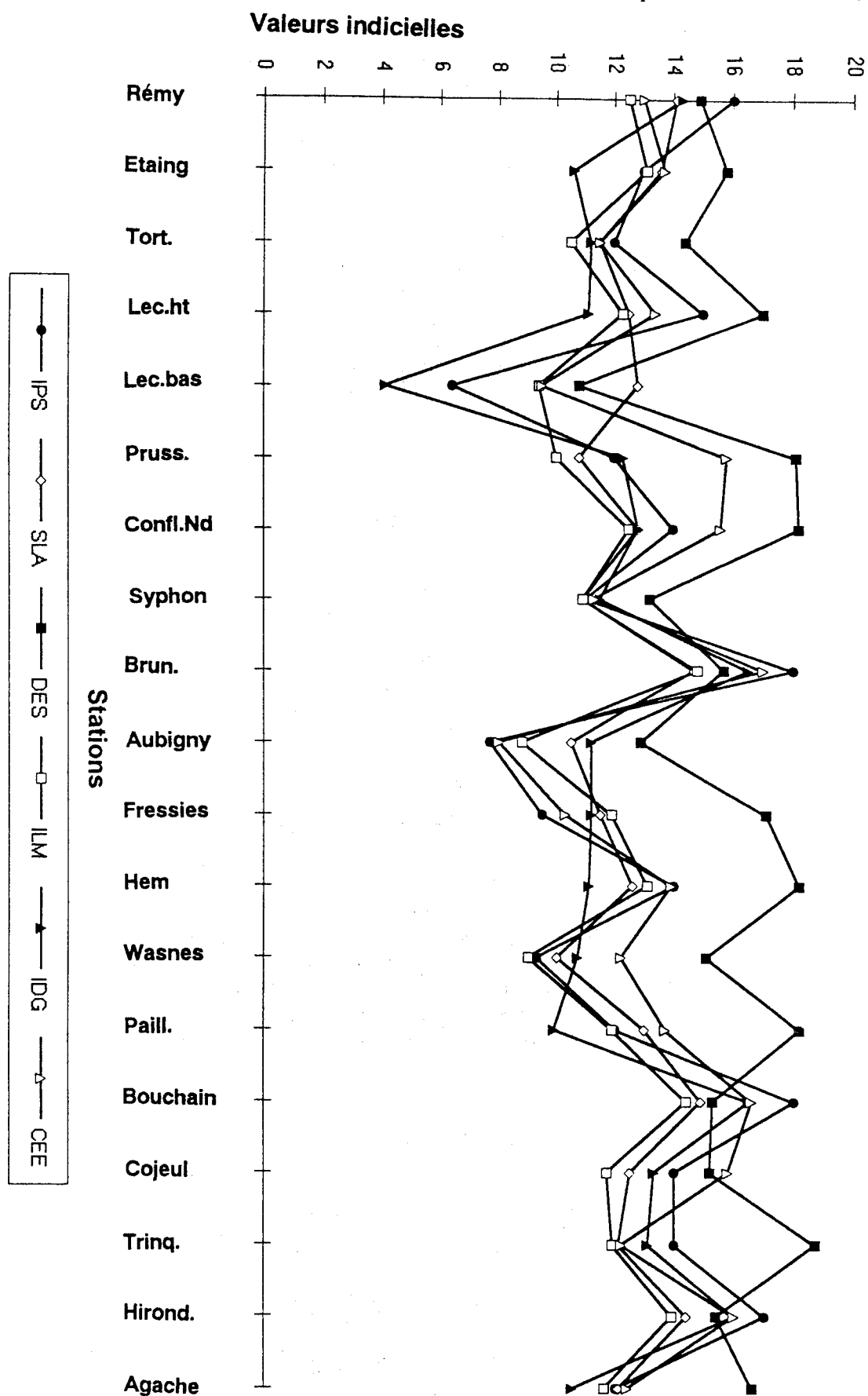


Figure 4.- Evolution des indices diatomiques le long des rivières Sensée amont et aval en mai 1991. Les indices diatomiques donnent des résultats concordants à l'exception de l'indice de Descy, plus optimiste et de l'IDG. Les genres *Nitzschia* et *Navicula* renferment des espèces à écologie très différente, et ont par conséquent des valeurs de sensibilité à la pollution et de valeur indicatrice moyennes. Lorsque des espèces appartenant à ces genres sont dominantes, il peut y avoir discordance avec d'autres indices. A Aubigny, *Navicula saprophila* Lange-Bertalot et Bonik constitue une espèce dominante et la qualité de l'eau est surestimée. A Paill., *Nitzschia dissipata* (Kützinger) est dominante et la qualité de l'eau est sous-estimée.

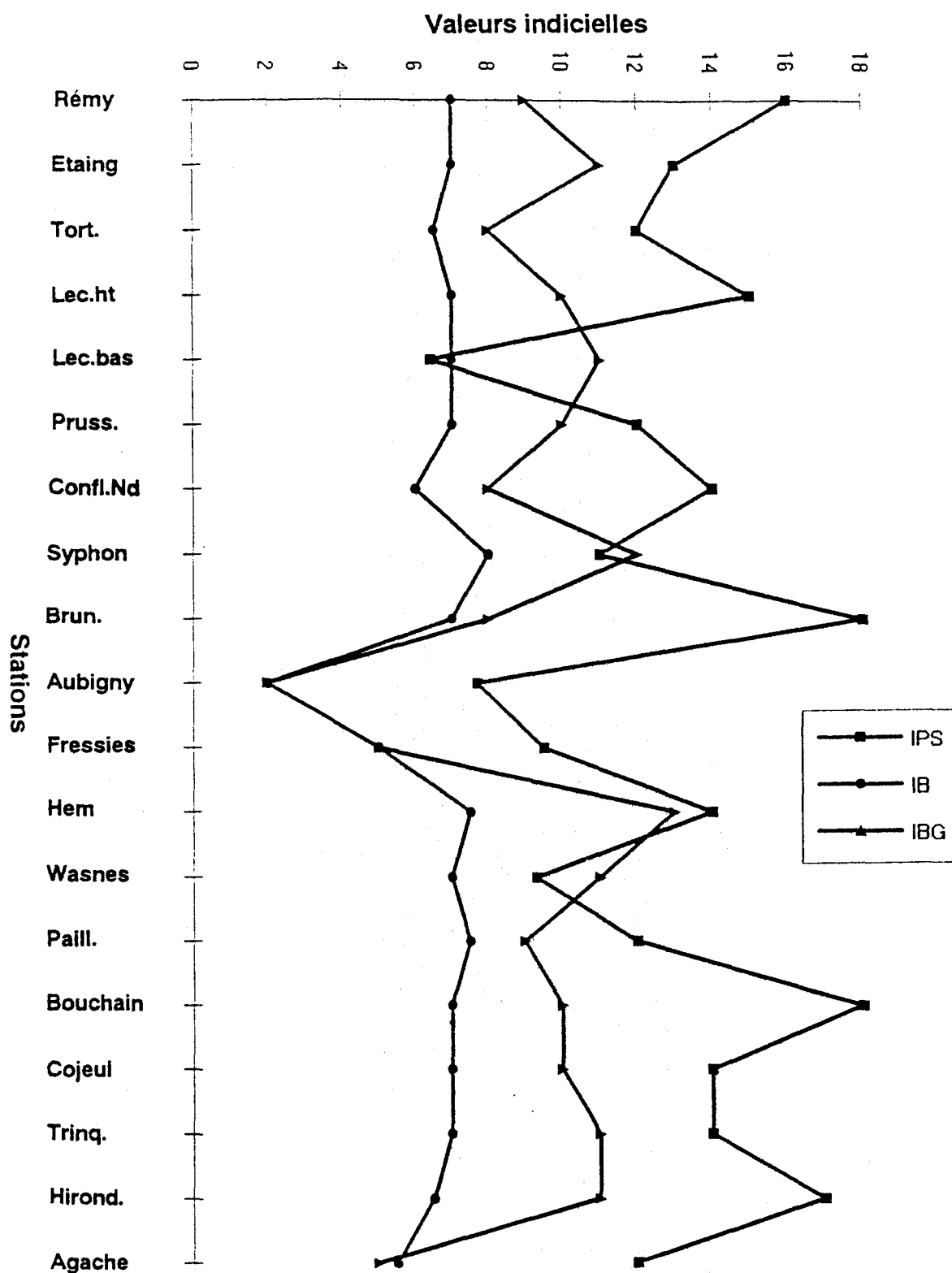


Figure 5.- Evolution de l'indice diatomique IPS et des indices invertébrés IB et IBG sur les rivières Sensée amont et aval en mai 1991. Les résultats fournis par les deux types d'approche sont discordants (stations Lec.bas et Confl.Nd)

suffire (LECLERCQ, 1989; PRYGIEL et COSTE, 1993). Ces deux types d'approche sont complémentaires ainsi que l'ont montré LAFONT *et al.* en 1988. Toutefois, lorsque les stations présentent une grande diversité de faciès, l'échantillonnage est délicat et l'interprétation des résultats est rendue d'autant plus difficile qu'il n'existe pas à ce jour de protocole standardisé (CAZAUBON, 1991).

Remerciements

L'auteur remercie M. COSTE du Cemagref de Bordeaux pour son aide dans les déterminations difficiles et pour ses suggestions lors de la relecture du manuscrit.

REFERENCES

- AE Artois-Picardie 1992 - Carte de qualité hydrobiologique des cours d'eau du bassin Artois-Picardie. Doc. AE Artois-Picardie, 15 p. + carte.
- CAZAUBON (A.). 1988 - Rôle du courant sur la Microdistribution des diatomées Epitithiques dans une Rivière Méditerranéenne, l'Argens (Var, Provence). In F.E. Round (ed.), Proc. of the 9th Internat. Diatom Symp., Bristol. O. Koeltz Publ., Koenigstein, 93-108.
- CAZAUBON (A.). 1988. The significance of a sample in a Natural Lotic Ecosystem : micro-distribution of diatoms in the Karstic Argens Spring, South-East France. In H. Simola (ed.) Proc. of the 10th Internat. Diatom Symp., Joensuu. O. Koeltz Publ., Koenigstein, 513-519.
- CAZAUBON (A.). 1989 - La florule épiphyte-principalement diatomique- de diverses plantes-hôtes à la source d'une rivière méditerranéenne (l'Argens, Sud-est de la France). *Cryptogamie, Algol.* 10(3) : 195-207.
- CAZAUBON (A.). 1991 - Problems and objectives of sampling river algae for monitoring. In B.A. Whitton, E. Rott & G. Friedrich (eds.), Düsseldorf, E. Rott, Innsbruck : 17-24.
- CAZAUBON (A.) et LOUDIKI (M.). 1986 - Microrépartition des algues épilithiques sur les cailloux d'un torrent corse, le Rizzanèse. *Annls Limnol.* 22(1) : 3-16.
- CEMAGREF, 1982 - Etude des méthodes biologiques quantitatives d'appréciation de la qualité des eaux. Rapport Q.E. Lyon - A.F.B. Rhône-Méditerranée-Corse : 28 p.
- COSTE (M.) et AYPHASSHORHO (H.). 1991 - Etude de la qualité des eaux du Bassin Artois-Picardie à l'aide des communautés de diatomées benthiques (Application des indices diatomiques). Rapport Cemagref Bordeaux-AE Artois-Picardie : 227 p.
- COSTE (M.), BOSCA (C.) et DAUTA (A.). 1991 - Use of algae for monitoring rivers in France. In B.A. Whitton, E. Rott & G. Friedrich (eds.), Use of algae for monitoring rivers, Düsseldorf, E. Rott, Innsbruck : 75-88.
- DESCY (J.P.). 1979 - A new approach to water quality estimation using diatoms. *Nova Hedwigia* 64 : 305-323.
- DESCY (J.P.) et COSTE (M.). 1989 - Application d'un nouvel indice diatomique (indice CEE 88) au réseau national de bassin Rhône-Méditerranée-Corse (1988). Rapport AE Rhône-Méditerranée-Corse : 86 p.
- DESCY (J.P.) et COSTE (M.). 1991 - A test of methods for assessing water quality based on diatoms. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 24 : 2112-2116.
- DIREN Nord-Pas de Calais - SEMA. 1993 - Suivi de la qualité des eaux du bassin de la Sensée. Rapport d'étude Agence de l'Eau Artois-Picardie - DIREN Nord-Pas de Calais, 30 pages + annexes.
- KRAMMER (K.) et LANGE-BERTALOT (H.). 1986 - 1991 - Bacillariophyceae. Teil 1 Naviculaceae, 876 pp. Teil 2 Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae, 596 pp. Teil 3 centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae, 576 p. Teil 4 Achnanthaceae, 437 p.
- LAFONT (M.). 1984 - Oligochaete communities as biological descriptors of pollution in fine sediments of rivers. *Hydrobiologia* 115 : 127-129.
- LAFONT (M.) et JUGET (J.). 1985 - Les oligochètes de quelques lacs français : proposition en vue leur utilisation pratique pour apprécier l'état biologique des sédiments profonds. *Verh. Internat. Limnol.* 22 : 3019-3023.
- LAFONT (M.), COSTE (M.), WASSON (J.G.) et FAESSEL (B.). 1988 - Comparaison de quatre indices biologiques pour apprécier l'impact de la pollution dans des cours d'eau français. *Naturalist can. (Rev. Ecol. Syst.)* 115 : 77-87.
- LECLERCQ (L.). 1989 - Intérêt et limites des méthodes d'estimation de la qualité des eaux

- courantes. Rapport complémentaire au cycle de cours spécialisés en épuration des eaux dans les zones rurales. Arlon, 29 avril-24 juin 1988 : 47 p.
- LECLERCQ (L.) et MAQUET (B.). 1987 - Deux nouveaux indices chimique et diatomique de qualité d'eau courante. Application au Samson et à ses affluents (bassin de la Meuse belge). Comparaison avec d'autres indices chimiques, biocénétiques et diatomiques. *Inst. Roy. Sci. Nat. Belgique*, doc trav. 28, 113 p.
- LECOINTE (C.), COSTE (M.) et PRYGIEL (J.). 1993 - «OMNIDIA»: a software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management. *Hydrobiologia* 269/270 : 509-513.
- PRYGIEL (J.). 1991 - Use of benthic diatoms in surveillance of the Artois-Picardie basin hydrobiological quality. In B.A. Whitton, E. Rott & G. Friedrich (ed.), Use of algae for monitoring rivers, Düsseldorf, E. Rott, Innsbruck : 89-96.
- PRYGIEL (J.) et COSTE (M.). 1993 - Use of diatom indices for monitoring rivers in the Artois-Picardie water basin. Significance of result. *Hydrobiologia* 269/270 : 343-349.
- ROUND (F.E.). 1981. The ecology of algae. Cambridge University Press, Cambridge : 653 pages.
- ROUND (F.E.). 1991 - Diatoms in river water-monitoring studies. *Journal of applied Phycology* 3 : 129-145.
- SLADE EK (V.). 1986 - Diatoms as indicators of organic pollution. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.* (14/5) : 555-566.
- VERNEAUX (J.) et TUFFERY (G.). 1967 - Une méthode zoologique pratique de détermination de la qualité des eaux courantes. Indices biotiques. *Ann. Sci. Univ. Besançon* 3 : 79-89.
- VERNEAUX (J.), GALMICHE (P.), JANIER (F.), MONNOT (A.). 1982 - Une nouvelle méthode pratique d'évaluation de la qualité des eaux courantes. Un indice biologique de qualité générale (I.B.G.). *Ann. Sci. Univ. Fr. Comté, Besançon, Biol. Anim.* 4(3) : 19 p.
- WHITTON (B.A.), ROTT (E.) et FRIEDRICH (G.). 1991 - Use of algae for monitoring rivers. Proc. Internat. Symp., Düsseldorf, Germany 26-28 May 1991, Innsbruck : 193 p.
- ZELINKA (M.) et MARVAN (P.). 1961 - Zur praxisierung der biologischen Klassifikation des Rheinheit Fliessender Gewasser. *Archiv. Hydrobiol.* 57 : 389-407.
- WENDKLER (S.). 1992 - Influence of current velocity on diatoms of a small softwater stream. *Diatom Research* 7(2) : 387-396.
-

Avis aux auteurs désirant publier dans la revue

Ecologia Mediterranea

Généralités

Ecologia Mediterranea publie des travaux originaux et des mises au point sur des sujets se rapportant à l'écologie générale, fondamentale ou appliquée, terrestre et limnique, en régions méditerranéennes. Les articles peuvent être rédigés, de préférence, en français ou en anglais, mais aussi en allemand, en espagnol ou en italien.

Ecologia Mediterranea est équipé d'un matériel informatique destiné à assurer la composition de la revue, tout en augmentant sa qualité et son homogénéité, permettant ainsi une parution plus rapide.

Ce matériel comporte d'une part un micro-ordinateur de la famille des PC compatibles MS-DOS, muni de deux lecteurs permettant de lire des disquettes de 3" 1/2 (de 720 Ko ou 1,4 Mo) et de 5" 1/4 (de 360 Ko ou 1,2 Mo) et, d'autre part, d'une imprimante Laser Postscript. Les logiciels utilisés sont «PageMaker» pour la composition et «Word5» pour le traitement de texte. A défaut de ce logiciel, il est souhaitable de transformer les fichiers au moyen du format d'échange appelé RTF (Rich Text Format). Néanmoins, les textes saisis sous «Macintosh» seront récupérés sous «MS-DOS».

Texte

Les articles proposés doivent être envoyés, en triple exemplaires, dactylographiés en double interligne, en format A4, au Secrétariat général de la revue, accompagnés de la disquette contenant le texte déjà informatisé. Les articles doivent être complets : titres français et anglais, auteur(s) et adresse(s), résumé et abstract (au minimum), mots clés, texte, conclusion, bibliographie, figures et tableaux, afin d'être soumis au Comité de lecture avant confirmation de leur acceptation. Les tableaux numériques, les tableaux phytosociologiques et, si possible les graphiques, seront inclus dans le texte informatisé. N'envoyez les figures originales qu'après acceptation de l'article. Les disquettes seront renvoyées.

Les articles comportant plus de 20 pages seront acceptés dans la mesure des possibilités. Les vingt premières pages des articles (incluant tableaux et figures) seront édités à titre gracieux. Les pages excédentaires seront facturées. Il est fourni 25 tirés-à-part par article, même lorsqu'il y a des auteurs multiples. A la demande, des tirés-à-part supplémentaires peuvent être obtenus : ils seront facturés.

Une fois leur article accepté, les auteurs devront tenir compte des remarques des lecteurs, puis ils renverront leur texte corrigé imprimé (en un exemplaire) et informatisé. Ils devront s'assurer de la correspondance entre le texte imprimé (pour contrôle) et le texte informatisé. Les figures et les photographies originales seront jointes à l'envoi. La disquette et les documents associés doivent parvenir dans les meilleurs délais au Secrétariat de la revue.

Résumé et mots-clés

Le résumé doit comporter 100 à 150 mots au maximum. Le nombre de mots-clés est limité à 5, dans la langue des résumés.

Auteurs et Adresses

L'adresse de chaque auteur sera indiquée. Chaque adresse doit être complète et comportera le numéro de téléphone ou de télécopie (fax), pour faciliter les communications avec l'auteur principal. Dans le cas où une publication est le fait de plusieurs auteurs, lors du premier envoi, l'auteur devra préciser la personne à qui doit être retourné l'article, après lecture.

Bibliographie

La bibliographie regroupera toutes les références citées et elles seules. Les références seront rangées dans l'ordre alphabétique des auteurs et de façon chronologique. Les abréviations internationales des titres des revues peuvent être utilisées.

Conventions

Sur le plan de la saisie du texte, il est simplement demandé aux auteurs de distinguer clairement les titres des différents paragraphes, de

taper le texte «au kilomètre», en respectant les conventions ci-dessous. La mise en forme définitive du texte sera assurée par la revue.

Principaux titres et numérotation

Introduction, Matériel et méthodes, Résultats, Conclusion et Bibliographie seront centrés pour faciliter la lecture : ils ne seront pas numérotés. Pour numéroté les sous-chapitres, éviter les lettres.

Abréviations

Les abréviations sont à proscrire, sauf les plus courantes. En tout état de cause, l'usage d'une abréviation technique doit être précédée de sa signification lors de sa première apparition.

Citations et renvois appelés dans le texte

Les mots «figures» et «tableaux» annoncés dans le texte sont écrits en toutes lettres et en minuscules. Exemples : ... sur la figure 3. ... comme le montre la carte (figure 3). Ne pas écrire : «voir figure 3», ni «cf. fig. 3». Pour les citations, suivre ces exemples : «ainsi que le dit DUPONT (1962)» ou, dès qu'il y a plus d'un auteur, «(DUPONT *et al.*, 1962)». La page de la citation n'est mentionnée que dans le cas où elle correspond à une citation entre guillemets.

Mots latins

Les mots latins doivent être mis en *italiques* afin de les distinguer du reste du texte (*et al.*, *a priori*, *stricto sensu*, etc.), et en particulier les noms de plantes ou d'animaux (*Quercus toza* et *Q. pubescens*). Pour les plantes une seule majuscule sur le nom de genre, l'épithète reste en minuscules. Pour distinguer un nom d'espèce d'un groupement végétal en latin, il peut être utile de différencier la typographie de ce dernier par des lettres grasses.

Unités et symboles

Les unités de mesure et les symboles ne sont jamais suivis d'un point. Exemples : «10 °C, 100 mm, 10 s, 2 500 m, 50 FF, 50 %».

Typographie

En français, n'utilisez les majuscules que pour les noms propres, sauf exception justifiée. Pour associer l'unité de mesure à sa valeur, utilisez l'«espace insécable» plutôt que la barre d'espacement pour éviter que, lors de la justification, la valeur ne se trouve en fin de ligne et son unité en début de la ligne suivante. De même, pour les doubles ponctuations (: ; ! ?), les faire précéder d'un espace insécable. Les ponctuations simples (, .) ne sont pas précédées d'un espace. Par contre, toutes les ponctuations sont suivies d'un espace. Les (parenthèses), les [crochets], les { accolades } et les «guillemets» doivent être accolés aux mots qu'ils enserment. Le tiret «-» marquant un sous-alinéa sera avantageusement suivi d'un espace «insécable» de façon que le mot qui suit le tiret ne soit séparé que d'un seul espace.

Figures et tableaux

Les figures rassemblent tout ce qui est dessin ou photographies ; les tableaux, tout ce qui peut être écrit avec une machine à écrire. Les figures et tableaux, doivent être remis prêts à l'impression, sans nécessiter de réduction (format 16 x 22 cm au maximum, ou 8 x 22). Les figures comme les tableaux doivent être conçus pour être vus ou lus en format «Portrait» et non «Paysage» (ou «à l'italienne»). Les caractères utilisés doivent avoir au minimum un millimètre de hauteur tout en restant lisibles (caractères de qualité professionnelle, non manuscrits). Les figures qui ne se prêtent pas à la reproduction seront retournées. Tous les documents (figures et tableaux) devant être insérés dans le texte doivent être annoncés et numérotés dans l'ordre croissant : ils doivent comporter une légende (éviter les formules vagues telles que «pour les explications, voir dans le texte»). Les titres des figures seront inscrits là où l'auteur veut les faire apparaître, en tenant compte de la place qu'elles occuperont. En ce qui concerne les tableaux phytosociologiques, il est indispensable d'indiquer par des points les relevés où la plante ne figure pas, de façon à en permettre l'observation dans les différents relevés où elle se trouve. Les tableaux informatisés ne doivent pas comporter de signes (: ou !) pour marquer les colonnes.

Les propositions de publication d'articles doivent être adressées au Secrétaire général.

TABLE DES MATIERES

BROFAS G. et ECONOMIDOU E. Le dépérissement du Sapin du Mont Parnasse (Grèce). Le rôle des conditions climatiques et écologiques	1
COQUILLARD P., GUEUGNOT J., JULVE P., MICHALET R. et MICHELIN Y. Carte écologique du Massif du Sancy au 1/25 000 (*)	9
FRILIGOS N., GIOURGA C., KARYDIS M. and MARGARIS N. S. Modern agricultural practices and eutrophication in Pagassitikos Gulf, Greece	59
NEDJRAOUI D. et TOUFFET J. Influence des conditions stationnelles sur la production de l'Alfa (<i>Stipa tenacissima</i> L.)	67
TRABAUD L., METHY M. Tolérance aux stress thermiques des feuilles et aire de répartition de <i>Quercus ilex</i>	77

COLLOQUE DES DIATOMISTES (Octobre 1993)

BOREL J.-L., BROCHIER J.-L. et DRUART J.-C. Résultats préliminaires des études paléoécologiques et paléoclimatiques du sondage Colletière C " (lac de Paladru, France)	89
CAZAUBON A. et BADRIA. Influence des variations hydrodynamiques de l'oued Tensift (Maroc) sur les peuplements de Diatomées	97
LOUDIKI M., CAZAUBON A. et HASNAOUI M. Dynamique pluriannuelle d'une popula- tion d' <i>Aulacoseira granulata</i> Sim. var. <i>angustissima</i> (Müller) (Bacillariophyceae centrale) dans le lac-réservoir Hassan I (Maroc)	109
PRYGIEL J. Comparaison de six indices diatomiques et deux indices invertébrés pour l'estimation de la qualité de l'eau de la rivière Sensée (France)	121