

**INFLUENCE DE L'ALTITUDE, DE L'EXPOSITION ET DU CLIMAT SUR LA CROISSANCE DU PIN À CROCHETS (*PINUS UNCINATA RAM.*) EN CERDAGNE (PYRÉNÉES ORIENTALES FRANÇAISES)**

Jeanne FLORENCE SCHUELLER & Christian ROLLAND

Laboratoire de Biologie Alpine. Université Joseph Fourier. BP 53 X. 38 041 GRENOBLE (France).

**RÉSUMÉ.**- Une étude dendroécologique du Pin à crochets (*Pinus uncinata* Ram.) réalisée en Cerdagne française (Pyrenées Orientales) a permis de quantifier le rôle de trois facteurs stationnels sur sa croissance: l'altitude, l'exposition et le climat. 175 arbres dominants ont été échantillonnés entre 1780 et 2120 mètres d'altitude, sur deux versants exposés au Nord et au Sud encadrant le plateau de Cerdagne. A altitude égale, les Pins d'ubac mesurent en moyenne 4 mètres de plus. Cependant, l'analyse détaillée de 12874 largeurs de cernes prouve que la croissance radiale est plus rapide en adret, où la surface terrière a 100 ans augmente de 43 % plus vite qu'en ubac. Les forêts des deux versants présentent une sensibilité au climat manifeste et comparable. L'étude de la réponse au climat permet de nuancer ces résultats: en adret les précipitations ont un rôle bénéfique accru, tandis que l'impact négatif de la neige est spécifique à l'ubac. Quant aux températures, elles jouent un rôle nettement plus marqué que les précipitations. La chaleur printanière agit surtout en adret, tandis que le rôle des températures d'automne est plus manifeste en ubac.

**RESUMEN.**- Un estudio dendroecológico sobre el Pino negro (*Pinus uncinata* Ram.) en la Cerdaña francesa permite obtener resultados cuantitativos sobre la influencia de tres parámetros ecológicos que influyen en el crecimiento de los árboles: la altitud, la exposición y el clima. Se han muestreado 175 árboles entre 1780 y 2120 m de altitud, en dos laderas expuestas al Norte y al Sur en la Llanura de Cerdaña. A la misma altitud, los pinos son 4 metros más altos en la ladera Norte. Se han analizado también 12.874 espesores de anillos, que prueban que el crecimiento radial es más rápido en la exposición Sur. En anillos de cien años aumenta un 43% más en la exposición Sur que en la Norte. El estudio de la respuesta biológica al clima permite matizar los resultados. En la solana las precipitaciones son más beneficiosas, mientras que la nieve tiene un impacto negativo en las umbrías. La influencia de las temperaturas es más importante que la de las precipitaciones. El calor de primavera es más influyente en la solana, mientras que las temperaturas de otoño lo son en la umbría.

*ABSTRACT.- A dendroecological study was carried out on mountain Pine (Pinus uncinata Ram.) in the French Cerdagne (Pyrénées Orientales). It permits to analyze the influence of three environmental factors: the altitude, the exposure and the climate. 175 dominant trees were sampled between 1780 and 2120 meters on north and south slopes. At the same altitude, the pines on north facing slope are four meters higher than those growing on south slope. However, a detailed analysis of 12874 tree-rings demonstrates that the radial growth is faster on the south slope. On such exposure, the basal area of the hundred years old trees increases 43 % higher than on north slope. Both forests show a similar high mean sensitivity. However, slight differences appear on the climatical response. The rainfall plays a more important part on south exposure, whereas the snow reduces the growth on north slopes. Moreover, the influence of the temperatures is greater than those of the precipitations. Warm spring temperatures are more efficient in the South, while the North is more influenced by the temperatures in autumn.*

**Key-words:** Pinus uncinata, growth, slope, exposure, rainfall, Pyrenees.

## 1. Introduction

Bien que de nombreux travaux aient été réalisés en France et à l'étranger sur les espèces subalpines comme le Pin cembro ou le Mélèze (Contini & Lavarelo, 1981), (Tessier, 1981), peu d'entre eux portent spécifiquement sur le Pin à crochets: (Puig, 1982), (Cantegrel, 1983, 1984), (Dendaletche, 1984), (Sandoz, 1983), (Edouard, Tessier, Thomas, 1991). Néanmoins, cette essence a déjà été bien étudiée en Espagne (Creus & Puigdefábregas, 1976), (Ruiz Flaño, 1988), (Gutiérrez, 1991), (Génova Fernández, 1987), (Richter & Eckstein, 1990).

En Cerdagne française, le Pin à crochets forme d'importants peuplements monospécifiques dont l'intérêt économique justifie l'étude de ses caractéristiques dendroécologiques. Nous chercherons ici à quantifier précisément l'influence sur sa croissance de trois facteurs: l'altitude, l'exposition et le climat.

## 2. Techniques et méthodes

### 2.1. Localisation des sites

Les deux sites analysés se situent dans le vaste massif granitique de Mont-Louis, encadrant le plateau de Cerdagne (Figure 1). La forêt communale de Font-Romeu a été retenue, étant la seule de Cerdagne française à être exposée plein sud. C'est une pinède acidiphile à *Arctostaphylos uva-ursi*, *Juniperus nana* et *Cytisus oromediterraneus* sur sol brun forestier.

## INFLUENCE DE L'ALTITUDE, DE L'EXPOSITION ET DU CLIMAT

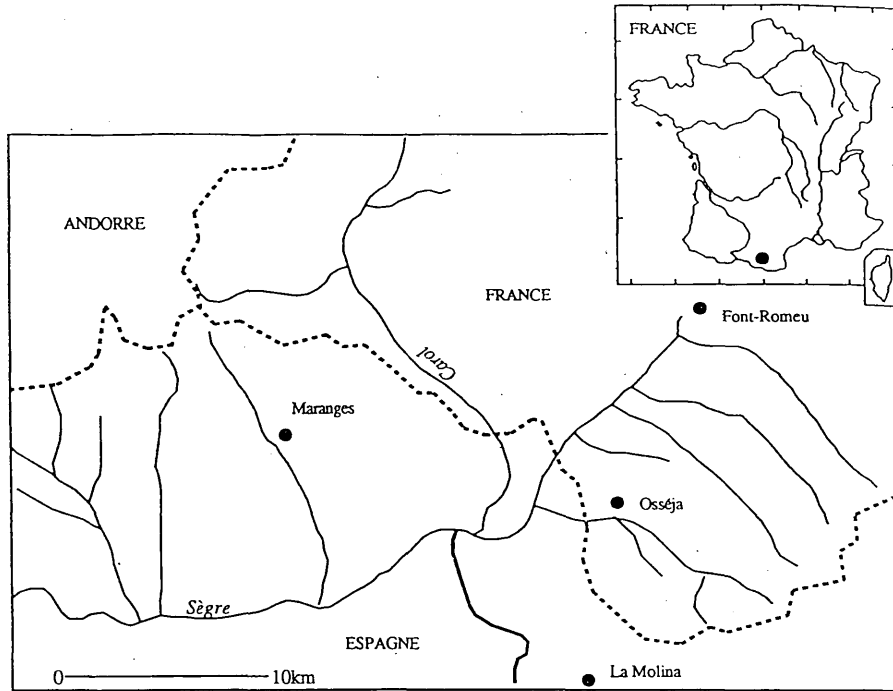


Fig. 1. Localisation des stations de Cerdagne (Font-Romeu et Osséja), d'après la Carte Recta. Editions cartographiques et touristiques.

Elle s'oppose à la forêt d'Osséja, également sur silice, qui lui fait face sur le versant Nord de la chaîne du Puigmal. D'autres travaux consacrés au Pin à crochets y ont d'ailleurs déjà été réalisés (Puig, 1982), (Probst & Rouane, 1984). *Rhododendron ferrugineum*, *Vaccinium myrtillus*, *Festuca gaultieri*, et *Deschampsia flexuosa* y poussent sur un sol plus profond formé sur schistes et dépôts de pente. Dans les deux cas, la pente moyenne avoisine 30° à 35°.

### 2.2. Le climat de Font-Romeu

Le climat de Font-Romeu (à 1754 mètres) est caractérisé par 824 mm de précipitations par an, avec un maximum en août (86 mm), la température moyenne annuelle étant de 6,1°C.

L'ensoleillement est intense, atteignant 2457 heures/an. Il en résulte un air sec et lumineux.

### 2.3. Les Prélèvements

L'étude porte sur 150 Pins à crochets dominants à Font-Romeu, régulièrement répartis entre 1780 et 2120 mètres d'altitude, et parallèlement des prélèvements ont aussi été effectués à Osséja sur 25 Pins, à titre de comparaison. La hauteur de chaque arbre est mesurée avec un dendromètre Blume Leiss et la circonférence à 1.30 m. de hauteur avec un mètre ruban. Chaque arbre est sondé à la tarière de Pressler, les largeurs des cernes étant ensuite mesurées selon des méthodes classiques (Keller & Millier, 1970) (Schweingruber, 1983) sur des agrandissements de positifs radiodensitométriques. Ceux-ci ont été obtenus au "Laboratoire de la Qualité des Bois" (R. Keller) à Nancy.

### 2.4. Le traitement des données

Les séries de cernes sont interdatées par confrontation visuelle sur écran d'ordinateur des profils de largeurs. Pour éliminer l'influence de l'âge sur la croissance, ces séries brutes sont ensuite transformées en indices par filtrage avec des moyennes glissantes sur 7 années de recouvrement (Rolland, 1993). Puis une chronologie maîtresse est établie pour chaque site en calculant la moyenne des cernes formés durant chaque année.

Pour analyser l'impact du climat sur la croissance radiale, on calcule la "Mean Sensitivity" ou sensibilité moyenne caractérisant de façon globale la réaction des arbres aux fluctuations climatiques annuelles. Elle s'obtient à partir des N largeurs des cernes  $C_i$  de chaque carotte par la formule:

$$MS = 2/(N-1) * \sum |C_{i+1} - C_i| / (C_{i+1} + C_i)$$

(Schulman, 1956 in Creus & Puigdefábregas, 1976).

En outre, une analyse plus fine est réalisée par le calcul des coefficients de corrélation linéaires entre les deux chronologies maîtresses de Font Romeu et d'Osséja et les données climatiques mensuelles (Blasing, *et al.*, 1984). On utilise pour cela les mesures de précipitations et de température moyenne mensuelle de Font-Romeu, couvrant la période 1950-1984.

## 3. Resultats

### 3.1. Influence de l'altitude

En adret, la croissance en hauteur présente un optimum voisin de 18 m. pour une altitude de 1850 m., puis diminue linéairement jusqu'à 10 m. à 2120 m d'altitude (Figure 2). Une telle décroissance dans l'étage subalpin a également été observée par Cantegrel pour le Pin à crochets dans le massif karstique d'Anie (Cantegrel, 1983). La réduction des

## INFLUENCE DE L'ALTITUDE, DE L'EXPOSITION ET DU CLIMAT

hauteurs en ubac est similaire, mais les arbres mesurent systématiquement 4 m de plus pour une altitude équivalente, et présentent une plus faible variabilité des hauteurs. Le sol plus frais et profond en ubac est sans doute à l'origine de ce meilleur développement.

En revanche, les diamètres des Pins à crochets sont peu affectés par l'altitude (Figure 3). En ubac ils restent voisins de 40 cm, tandis qu'en adret les diamètres sont sensiblement plus faibles (35 cm), la décroissance observée au delà de 2000 m étant à mettre en relation avec l'âge plus faible des arbres en haut du peuplement.

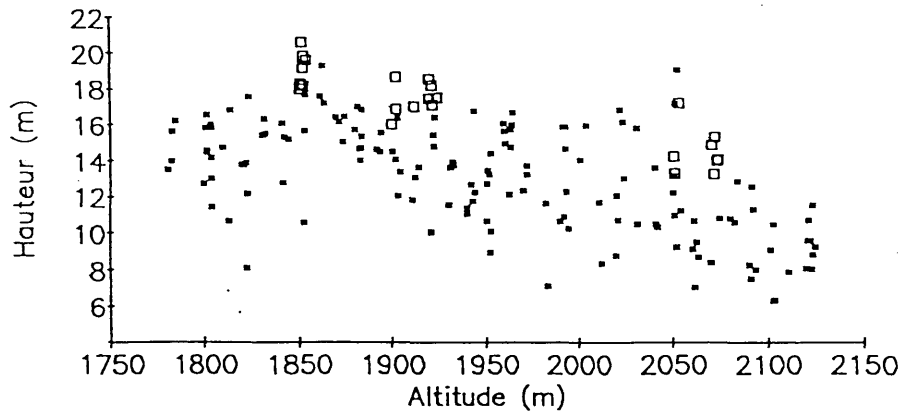


Fig. 2. Hauteur des Pins à crochets en fonction de l'altitude dans les peuplements de Font Romeu (adret) et d'Osséja (ubac).

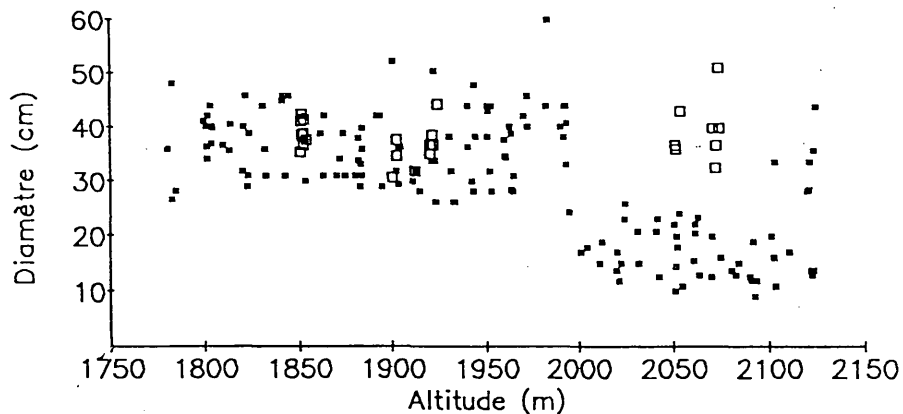


Fig. 3. Diamètre des Pins à crochets en fonction de l'altitude dans deux peuplements.

Quant à la "Mean Sensitivity", elle reste assez constante quelle que soit l'altitude (Figure 4). Il ressort cependant que les plus fortes valeurs s'observent pour les arbres en adret à basse altitude, où les températures sont les plus fortes et modulent fortement le bilan hydrique d'une année à l'autre.

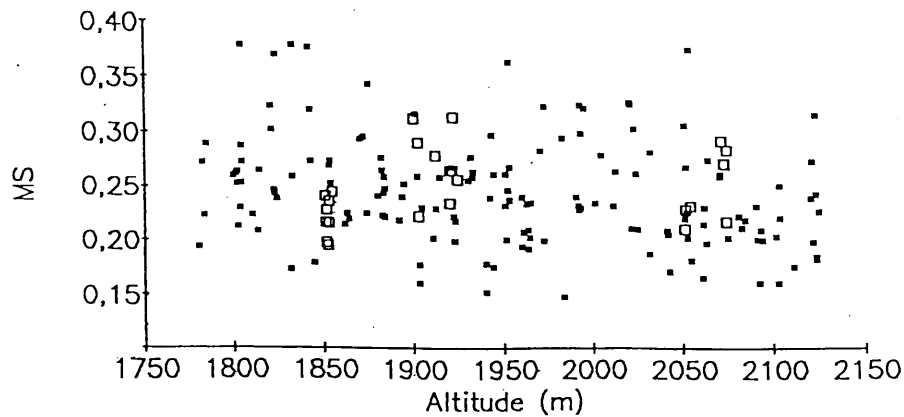


Fig. 4 - Sensibilité moyenne (M.S.) des cernes de Pin à crochets en fonction de l'altitude de croissance, en adret et ubac.

### 3.2. Répartition des largeurs de cernes

L'analyse des largeurs de cernes permet de comparer quantitativement la croissance entre adret et ubac. A partir de 9231 cernes de Pin à Font-Romeu et 3643 cernes à Osséja (pour un total de 175 arbres) on note une plus grande proportion de cernes étroits en ubac. Ainsi, 37 % des cernes sont inférieurs à 0.5 mm à Osséja en ubac, contre seulement 15 % à Font-Romeu en adret. A l'inverse, seulement 20 % des cernes dépassent 1.5 mm à Osséja, contre 36 % à Font-Romeu. Un fort ensoleillement apparaît donc comme étant bénéfique à la croissance radiale du Pin à crochets, malgré les conditions de faibles précipitations de la Cerdagne, et un sol moins profond en adret.

Ainsi, si à altitude égale les arbres dominants présentent des dimensions plus élevées en ubac, aussi bien en hauteur qu'en diamètre, ceci ne provient pas d'une croissance plus rapide, mais seulement de conditions stationnelles plus clémentes. Au contraire, c'est en adret que la croissance présente le plus fort dynamisme, bien qu'elle plafonne plus tôt. L'analyse de la croissance en fonction de l'âge permet de le mettre clairement en évidence, comme nous allons le montrer.

3.3. *Dynamique de la croissance radiale*

En calculant la moyenne de tous les cernes formés à un même âge, on obtient la courbe d'accroissement radial, pour chaque peuplement (Figure 5). Comme des cernes formés au même âge chez différents arbres le sont durant des années différentes, ce procédé élimine en grande partie l'effet du climat (Becker, 1989). Si on additionne ensuite toutes les largeurs moyennes de cernes jusqu'à un âge fixé, on obtient le rayon atteint à cet âge (R). On en déduit les courbes d'évolution de l'accroissement radial moyen (R/âge) (Figure 6), du diamètre (2 R) (Figure 7), ou encore de la surface terrière ( $\pi R^2$ ) en fonction de l'âge (Figure 8) (Rolland, 1993). (La surface terrière représente la surface totale de la section transversale du tronc).

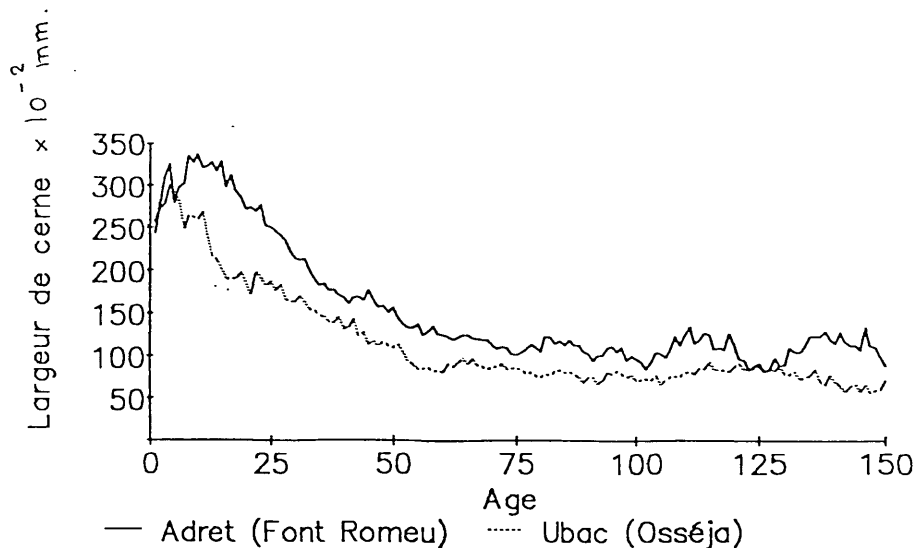


Fig. 5. Largeur moyenne des cernes de Pin à crochets ( $\times 10^{-2}$  mm.) en fonction de l'âge des arbres.

Grâce au grand nombre de cernes utilisés pour ces calculs (plus de 12000) on obtient des résultats particulièrement précis. Il en ressort que les deux peuplements se différencient dès les premières années de la vie des arbres, et présentent des dynamiques de croissances nettement distinctes. Ainsi, à l'âge de 100 ans les cernes mesurent en moyenne 0.99 mm à Font-Romeu, contre 0.75 mm à Osséja (soit 24.2 % de plus). Les diamètres qui résultent du cumul de ces largeurs de cernes sont respectivement de 36 cm et 27 cm, et les accroissements annuels en surface terrière atteignent 11.2  $\text{cm}^2/\text{an}$  en adret contre 6.4  $\text{cm}^2/\text{an}$  en ubac.

Cet écart important de 42.9 % témoigne de la sensibilité à la concurrence du Pin à crochets, qui pousse nettement plus vite en adret malgré la forte insolation, profitant d'une physionomie plus ouverte des peuplements.

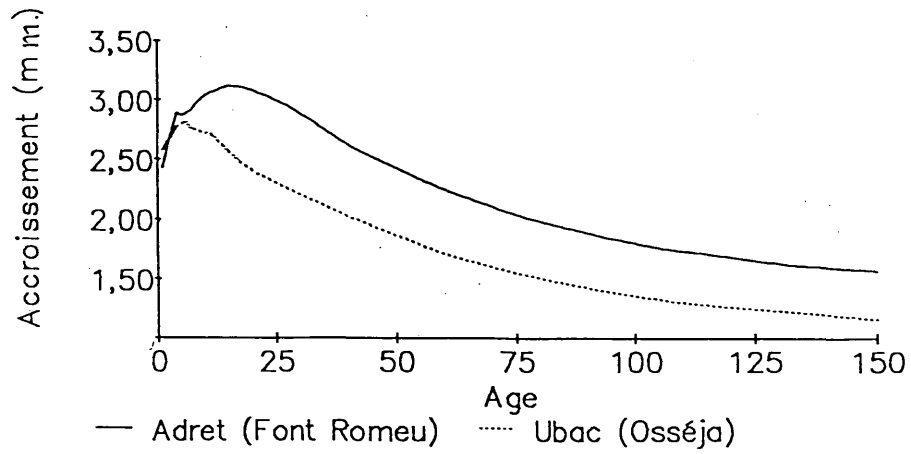


Fig. 6. Accroissement radial moyen (en mm.) en fonction de l'âge des arbres.

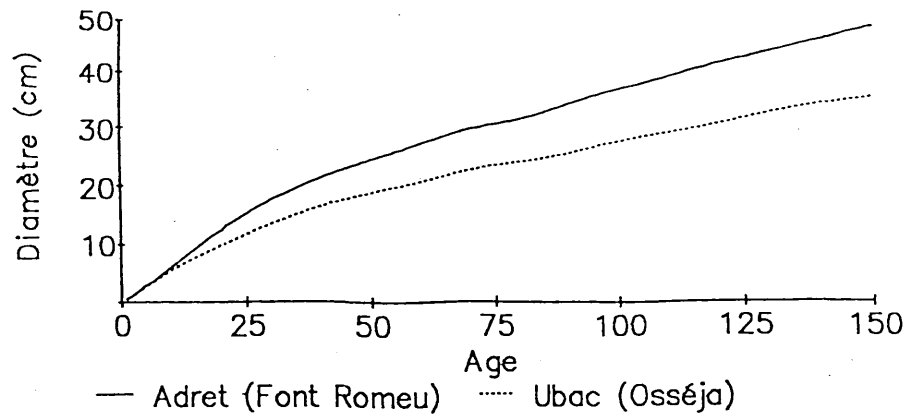


Fig. 7. Diamètre des pins à crochets (en cm.) en fonction de l'âge des arbres.



INFLUENCE DE L'ALTITUDE, DE L'EXPOSITION ET DU CLIMAT

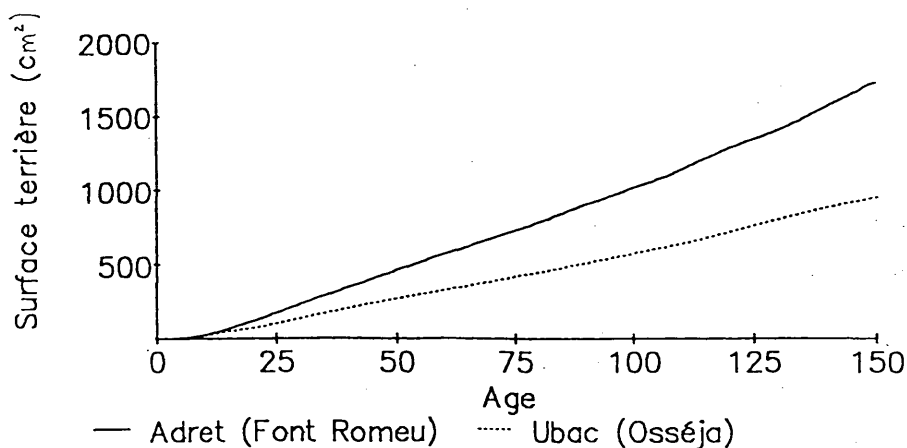


Fig. 8. Surface terrière (en cm<sup>2</sup>) en fonction de l'âge des arbres.

Une régression linéaire permet de modéliser simplement l'accroissement de la surface terrière en fonction de l'âge, avec une grande précision, les résultats étant significatifs au delà du seuil de 0,995 :

$$\text{Adret: } St \text{ (cm}^2\text{)} = 11,66 \cdot \text{Age} - 114,25 \quad R^2 = 0,996 \quad N=150 \text{ ans}$$

$$\text{Ubac: } St \text{ (cm}^2\text{)} = 6,51 \cdot \text{Age} - 54,56 \quad R^2 = 0,997 \quad N=150 \text{ ans}$$

Nous pouvons conclure que malgré une apparence plus vigoureuse en ubac (arbres dominants plus hauts et plus gros), c'est en adret que la croissance est la plus vigoureuse. Les Pins y poussent nettement plus vite, mais cependant moins haut.

### 3.4. Influence du climat selon l'exposition

Les coefficients de corrélation mensuels entre indices de croissance et climat ont été calculés sur une période de 21 mois. Seuls ceux qui sont significatifs au seuil de probabilité de 0.8 sont discutés ici (et figurés en noir sur les graphes, Figure 9).

D'emblée, on remarque une influence plus grande du climat durant l'année précédant la croissance (n-1) par rapport à l'année de formation du cerne (n). Cette inertie de l'espèce la rend particulièrement rustique.

L'influence positive des précipitations sur la croissance radiale en juin (n-1), en octobre (n-1) ou en mai (n) apparaît clairement aussi bien en adret qu'en ubac, mais de façon plus prononcée en adret, témoignant ainsi du rôle accru de l'eau lorsque les conditions sont plus xériques.

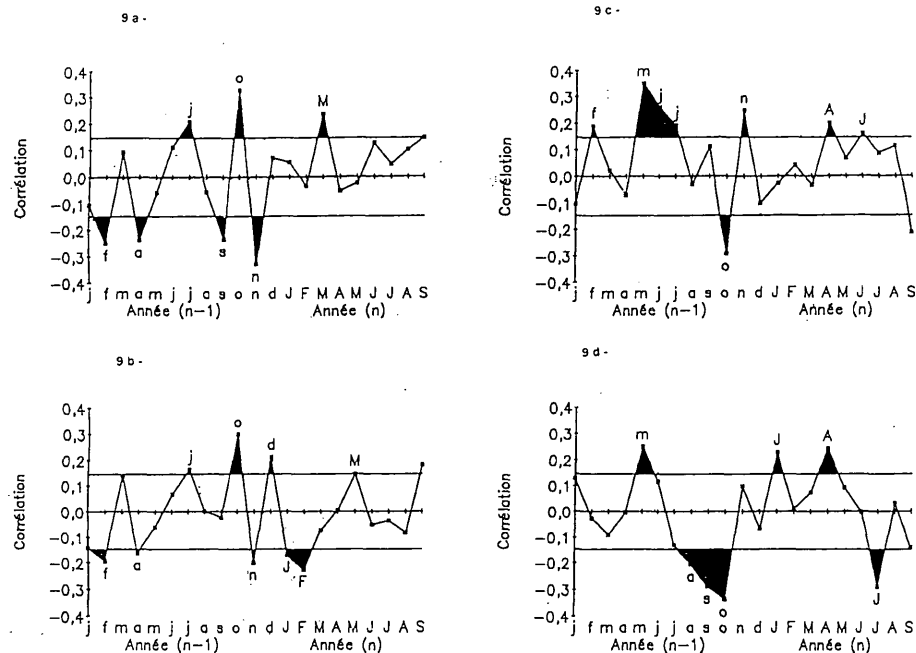


Fig. 9. Fonctions de corrélations entre les largeurs de cernes de *Pinus uncinata* et les facteurs climatiques, durant l'année précédant la croissance (de Janvier à Décembre) ainsi que pendant l'année de formation du cerne (de janvier à août).  
 9a) Influence des précipitations en adret (à Font-Romeu).  
 9b) Influence des précipitations en ubac (à Osséjà).  
 9c) Influence de la température moyenne en adret (à Font-Romeu).  
 9d) Influence de la température moyenne en ubac (à Osséjà).

En revanche, l'impact négatif de la neige qui tombe en janvier (n) et février (n) est spécifique au peuplement d'ubac. L'abondance de la neige doit probablement retarder le démarrage printanier de la croissance, ce qui n'apparaît pas en adret où l'exposition favorise une fonte de la neige plus rapide. Comme le remarquait déjà Gausson, le Pin à crochets "recherche les parties convexes souvent rocheuses qui ne gardent pas la neige trop longtemps en hiver" (Gausson & Barruel, 1959). Puig confirme d'ailleurs que le démarrage de la végétation est retardé de 3 semaines à Osséjà par rapport au versant d'adret (Puig, 1982).

Le rôle de la température est nettement plus marqué que celui des précipitations, ce qui confirme la résistance du Pin à crochets, capable de pousser dans des régions particulièrement sèches, telles que la Cerdagne.

La réponse à la température est qualitativement similaire en adret et en ubac. Cependant, l'effet positif des températures élevées printanières en mai (n-1) se prolonge les deux mois suivants seulement en adret, tandis

## INFLUENCE DE L'ALTITUDE, DE L'EXPOSITION ET DU CLIMAT

que l'effet négatif de fortes chaleurs d'automne en octobre (n-1) commence plus tôt en ubac. Le concept de "fenêtre climatique" permet d'interpréter ces résultats, qui semblent démontrer que la période de croissance radiale est retardée en ubac, où le réchauffement est plus tardif.

Enfin, durant la période de végétation, des coups de gel sont la règle en ubac mais n'affectent pas les adrets, ce qui explique l'effet bénéfique plus marqué à Osséja d'une température chaude en avril (n).

### 4. Conclusions.

L'étude de la réponse au climat fait ressortir que le Pin à crochets résiste très bien à la sécheresse, mais il est plus exigeant quant aux conditions thermiques. Il est sensible au climat tout en présentant une inertie importante. Le Pin trouve son optimum de vigueur en adret où la douceur du printemps et l'absence de coups de gels estivaux lui permettent une meilleure croissance radiale. De même, Ruiz-Flaño (1988) a observé une meilleure croissance du Pin à crochets subalpin en adret à Coronas et Aigualluts (Vallée de Benasque, dans les Pyrénées Aragonaises). Ceci s'explique sans doute par une saison de végétation plus longue en adret, où la période avec une température de plus de 5 °C dure 21 semaines au lieu de 18 en ubac (Puig, 1982).

Contrairement à ce que laisserait penser l'aspect physiologique des pinèdes d'ubac, où les Pins dominants sont plus grands, c'est en adret que l'accroissement radial est le plus fort, quel que soit l'âge des arbres. Pourtant, la sécheresse de l'air, l'insolation extrême et de fortes températures en adret laisseraient présager le contraire. En fait, le Pin est une essence suffisamment résistante pour s'en accommoder parfaitement, sans doute grâce à ses mycorhizes (Poitou *et al.*, 1984). Par contre, il est exigeant en lumière et de ce fait supporte mal la concurrence, ce qui explique sa croissance radiale plus forte en adret.

**Remerciements.** Nous tenons à remercier tout particulièrement J. Lucas ainsi que le laboratoire de R. Keller pour leur précieuse aide technique.

### References

- Becker, M. (1989): The role of climate on present and past vitality of silver Fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research*, 19: 1110-1117.
- Blasing, T.J., Salomon, A.M. & Duwick, D.N. (1984): Response functions revisited. *Tree Ring Bulletin*, 44: 1-15.
- Cantegrel, R. (1983): Le Pin à Crochets pyrénéen: biologie, biochimie, sylviculture. *Acta Biológica Montana*, 2-3: 87-331.

- Cantegrel, R. (1984): Contribution à l'étude de la variabilité biologique et biochimique du Pin à crochets (*Pinus uncinata* Ramond) dans les Pyrénées. *Annales des Sciences Forestières*, 41 (3): 273-302.
- Contini, L. & Lavarello, Y. (1981): Le Pin cembro (*Pinus cembra* L.). Répartition, écologie et croissance. *CNRF Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux des Eaux et Forêts*, Doc 81/01, 252 p + annexes.
- Creus, J. & Puigdefabregas, J. (1976): Climatología histórica y dendrochronología de *Pinus uncinata* Ramond. *Cuadernos de investigación (Geografía e Historia)*, 2 (2): 17-30.
- Dendaletche, Cl. (Ed.) (1984): Biocénoses d'altitude 1, La forêt subalpine, Pyrénées. *Acta Biologica Montana*, 420 pp.
- Edouard, J.L., Tessier, L., Thomas, A. (1991): Limite supérieure de la forêt au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Dendrochronologia*, 9: 125-142.
- Gausson, H. & Barruel, P. (1959): *Montagnes, la vie aux hautes altitudes*. Ed: Horizons de France, 207 pp. Paris
- Génova Fernández, R. (1987): Análisis y significado de los anillos de crecimiento de dos especies forestales: *Pinus uncinata* y *Pinus sylvestris*, en la península Ibérica. *Tesis Doctoral, Departamento de Ecología, Facultad de Biología, Universidad de Barcelona*, 355 p + annexes.
- Gutiérrez, E. (1991): Climatic tree growth relationships for *Pinus uncinata* Ram. in the Spanish pre-Pyrenees. *Acta Oecológica*, 12(2): 213-225.
- Keller, R. & Millier, C. (1970): Utilisation des composantes de la densité en xylochronologie. *Annales des Sciences Forestières*, 27 (2): 157-166.
- Poitou N., Mamoun, M., Delpech, P. & Darriere, J. (1984): Mycorhization contrôlée de *Pinus uncinata* dans les Pyrénées. *Acta Biologica Montana*, 4: 115-125.
- Probst, A. & Rouane, P. (1984): Introgression entre *Pinus sylvestris* L. et *Pinus uncinata* Ramond dans la forêt d'Osséja (Pyrénées-Orientales). *Documents d'Ecologie Pyrénéenne*, 3-4. Colloque international "Écologie et Biogéographie des Milieux montagnards et de haute altitude" Gabas, 10-12 Sept 1982: 523-529.
- Puig, J.N. (1982): Recherches sur la dynamique des peuplements forestiers en milieu de montagne: contribution à l'étude de la régénération en forêt d'Osséja. *Thèse 3ème Cycle*, 188 pp., Toulouse.
- Richter, K. & Eckstein, D. (1990): A proxy summer rainfall record for Southeast Spain derived from living and historic Pine trees. *Dendrochronologia*, 8: 67-82.
- Rolland, C. (1993): Fonctionnement hydrique et croissance du Sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Alpes françaises. Dynamique des flux de sève, écophysiologie et dendroécologie. *Thèse Université de Grenoble*, 180 pp.
- Ruiz-Flaño, P. (1988): Dendroclimatic series of *Pinus uncinata* R. in the Central Pyrenees and in the Iberian system, Spain. A comparative study. *Pirineos*, 132: 49-64.
- Sandoz, H. (1983): *Recherches taxonomiques, biogéographiques et phytoécologiques sur les principaux conifères subalpins des Alpes: Mélèze d'Europe, Pin à crochets et Pin mugho. Etudes de terrain centrées sur les Alpes Maritimes et Ligures*. Thèse Dès Sciences, 3: 650 pp., Aix Marseille
- Schweingruber, F.H. (1983): *Der Jahrring*. Ed: Paul HAUPT, Bern & Stuttgart., 235 pp.
- Tessier, L. (1981): Contribution dendroclimatologique à la connaissance écologique du peuplement forestier des environs des chalets de l'Orgère (Parc National de la Vanoise). *Travaux Scientifiques du Parc National de la Vanoise*, 11: 29-61.