



Les problèmes de reboisement dans l'étage subalpin a la lumière de l'expérience acquise en Autriche et en Suisse

Michel Arbez, Maurice Bonneau, Helfried Oswald, André Poncet

► To cite this version:

Michel Arbez, Maurice Bonneau, Helfried Oswald, André Poncet. Les problèmes de reboisement dans l'étage subalpin a la lumière de l'expérience acquise en Autriche et en Suisse. *Revue forestière française*, 1971, 23 (6), pp.571-596. 10.4267/2042/20533 . hal-02731778

HAL Id: hal-02731778

<https://hal.inrae.fr/hal-02731778>

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES PROBLÈMES DE REBOISEMENT DANS L'ÉTAGE SUBALPIN

**A LA LUMIÈRE DE L'EXPÉRIENCE ACQUISE
EN AUTRICHE ET EN SUISSE**

M. ARBEZ - M. BONNEAU - H. OSWALD - A. PONCET

Class. Oxford 233 : 384 (234.3)

La forêt subalpine et sa limite supérieure ont subi une énorme dévastation par l'homme depuis des temps historiques. La colonisation et la transhumance ont attaqué la forêt de nos Alpes simultanément par le haut et par le bas. Les conséquences de cette agression continuelle ne se sont pas fait attendre. On a observé une fréquence accrue des dégâts causés par les torrents de montagne et les avalanches et une diminution du rendement agricole en montagne.

Au milieu du siècle dernier, l'opinion publique fut émue par la fréquence et l'ampleur des dégâts et une importance accrue fut accordée à la forêt de montagne. De nombreuses études botaniques, géologiques et forestières furent entreprises et d'importants travaux de reboisement ont été réalisés dans l'ensemble des pays alpins.

En France, les lois de 1860 et de 1882 sur la restauration des terrains en montagne ont permis le reboisement d'environ 150.000 ha dans les Alpes et le Massif Central. Mais tous ces travaux ont connu un ralentissement important à partir de la première guerre mondiale, de même les recherches sur l'écologie et la sylviculture des forêts de montagne en France ne connurent aucun développement notable.

L'extension croissante des sports d'hiver depuis les dix dernières années entraînant l'agrandissement des stations existantes et la création de nouvelles stations, l'augmentation du tourisme en montagne encouragé par la création de parcs nationaux et l'intérêt croissant qu'on semble accorder aux problèmes de l'environnement et tout particulièrement au rôle social de la forêt, ont créé en France un climat nouveau en faveur de la forêt de montagne et de son rôle de protection. Mais ce n'est que depuis les avalanches catastrophiques de l'hiver 1969-1970, qui n'ont malheureusement pas épargné la France, que l'opinion publique fut réellement sensibilisée.

Il en était tout autrement dans les pays comme la Suisse et l'Autriche où les recherches furent continuées lentement et ont connu un développement important il y a une vingtaine d'années.

L'ÉTUDE DE LA FORÊT DE MONTAGNE EN AUTRICHE ET EN SUISSE

LES RECHERCHES EN AUTRICHE

A partir de 1947, le Service « Restauration des terrains en montagne » (R.T.M.) du Tyrol a disposé pendant 9 ans d'un laboratoire pour l'étude de la neige dont la tâche essentielle consistait à établir un cadastre des avalanches au Tyrol qui fut terminé à la fin de l'année 1950. On a recensé dans les régions habitées 2.000 avalanches à départs plus ou moins réguliers dont 2/3 environ prennent naissance en-dessous de la limite supérieure potentielle de la forêt.

A la suite des avalanches catastrophiques de l'hiver 1950-1951 (135 morts, 188 blessés, 66 maisons totalement détruites, dégâts considérables sur les voies de communications et 350.000 m³ de chablis), l'Autriche créa en 1953 à Innsbruck une station de recherches sur l'écologie de l'étage subalpin pour étudier les conditions et les possibilités de reboisement. Un groupe de chercheurs de différentes disciplines commença, dès 1953, d'abord au sein du Service R.T.M., puis après rattachement à l'Institut fédéral de recherches forestières, à étudier les problèmes de la forêt subalpine. Rapidement, cette Station fut dotée de laboratoires modernes, d'un phytotron et de moyens importants.

Dès 1953, un important dispositif a été installé à Obergurgl dans l'Ötztal, sur un versant ouest. Ce dispositif qui s'étend de 1.900 m jusqu'à 2.240 m d'altitude (limite potentielle de la forêt) a permis l'étude des facteurs microclimatiques et de la végétation aussi bien dans la forêt subalpine qu'à sa limite actuelle (2.000 m) et dans la « zone de combat ».

Depuis 1966, un deuxième dispositif important a été installé sur un versant plein sud dans le Kühtai pour étudier plus en détail les problèmes qui se posent pour les reboisements des adrets.

En même temps, des travaux de reboisement dans l'étage subalpin et à la limite même de la forêt furent entrepris et des crédits substantiels furent engagés dans les constructions paravalanches.

LES RECHERCHES EN SUISSE

La Suisse, pays situé au cœur même des Alpes, a depuis toujours attaché une importance notable au rôle de la forêt en montagne mais un effort particulier fut accompli pour la protection des voies de communication contre les avalanches. La création de l'Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (I.F.N.A.) en 1931 à Davos en est le témoin.

De nombreuses études scientifiques entreprises dans le domaine de la mécanique de la neige ont fourni des bases solides pour la construction d'ouvrages paravalanches et des types nouveaux d'ouvrages furent développés.

Le reboisement en haute montagne du siècle dernier avait donné des résultats encourageants, notamment dans l'Engadine (Schlatter, 1935) et de nombreuses études ont largement contribué à une meilleure connaissance de l'étage subalpin.

Ce n'est qu'en 1958 qu'un programme de recherches écologiques (Gebirgsprogramme) voit le jour avec l'installation d'un vaste dispositif expérimental au « Stillberg » dans le Val Dischma près de Davos. Il existe une étroite collaboration entre l'Institut fédéral de recherches forestières et l'I.F.N.A.

Ainsi de nombreux chercheurs de différentes disciplines travaillent ensemble dans un même et unique dispositif à la réalisation de ce programme (10 contributions originales sont publiées à ce jour).

LES CONDITIONS ÉCOLOGIQUES DE L'ÉTAGE SUBALPIN

GÉNÉRALITÉS

Dans l'étage subalpin et à la limite supérieure de la forêt, l'action de certains facteurs écologiques est très marquée et devient décisive.

Les conditions de vie des végétaux et notamment des essences forestières sont de plus en plus difficiles et le nombre d'espèces capables de survivre diminue rapidement. Des corrélations étroites existent souvent entre groupements floristiques et facteurs écologiques et on observe fréquemment une délimitation très tranchée entre les différents groupements. Pour cette raison évidente, on a commencé, aussi bien en Autriche qu'en Suisse, par l'étude parallèle de la variation spatiale des facteurs écologiques et des groupements floristiques, et leur représentation cartographique. Simultanément, les études physiologiques, tant sur le terrain qu'en milieu contrôlé, permirent une approche causale de l'autécologie de certaines espèces.

LE CLIMAT

Le climat de montagne est caractérisé par une variation altitudinale et horizontale des différents facteurs et on peut parler des « effets de niveau » et des « effets de relief » (Turner, 1970). Les combinaisons multiples de ces effets conduisent à une très grande complexité climatique ; de plus, chaque grand massif montagneux peut avoir son climat particulier.

Comme les conditions climatiques deviennent plus marquées en haute altitude, l'influence du relief s'accroît également. Ce sont donc essentiellement les conditions microclimatiques qui régissent la croissance et la survie des essences forestières.

Parmi les facteurs climatiques, il faut accorder une importance particulière à la radiation et au vent, mais également aux précipitations et notamment à la neige.

La radiation et le régime thermique

Dans le dispositif « Stillberg », Turner (1966) a effectué une cartographie très détaillée (1/500) de la durée d'insolation et de la radiation globale. Il en ressort clairement l'influence prépondérante du relief (pente et exposition). Ainsi la radiation globale moyenne s'élève à environ 60 kcal/cm² pendant la période de végétation à l'exposition générale NE, pente moyenne 35°, tandis que les sous-expositions ESE et NNW reçoivent respectivement 90 kcal/cm² et 20 kcal/cm². Une comparaison de la carte de radiation globale avec la répartition des groupements floristiques, la survie et la croissance des plantations d'essai (mélèze et épicéa notamment) et la répartition des fructifications de champignons formant des mycorhizes (Horak, 1963) montre que des corrélations étroites existent entre la radiation et la végétation en général.

Le régime thermique est étroitement lié à la radiation et au vent. Il faut mentionner les températures élevées à la surface du sol (maximum observé 80°C pendant quelques instants) qui peuvent compromettre la survie des plantules (Turner, 1958 ; Kronfuss, 1970 ; Turner, 1971).



Photo n° 1 : Cembraie pure d'altitude dans le Koutai

Photo BONNEAU

Le vent

Avec la radiation, le vent est un des facteurs décisifs dans l'étage subalpin. Il intervient puissamment sur la répartition des précipitations, notamment de la neige, influence le régime thermique et l'évaporation, agit sur la transpiration et la photosynthèse et par là sur la croissance des végétaux. Il faut également mentionner ses effets mécaniques sur la végétation et la surface du sol. Une cartographie de la vitesse moyenne du vent (50 cm au-dessus du sol) dans le dispositif « Obergurgl » laisse apparaître une étroite liaison non linéaire avec l'épaisseur et la durée du manteau neigeux (Kronfuss, 1970).

D'une manière générale, on observe une influence marquée du macro- et micro-relief sur la répartition de la vitesse moyenne du vent (Aulitzky, 1955 ; Nägeli, 1971 ; Caldwell, 1970).

Les précipitations, la neige

En ce qui concerne les précipitations, tous les auteurs font remarquer l'importance du relief et du vent sur leur répartition.

Friedel (1952, 1961) a montré l'étroite corrélation qui existe entre la durée de l'enneigement et la répartition de la végétation. L'importance de ce facteur est indéniable

pour la croissance et la survie des essences forestières (Lenz, 1967 ; Stern, 1965). Il faut noter également que le degré d'attaque du pin cembro par le champignon *Phacidium infestans* Karts. est étroitement lié à la hauteur de la neige (Donaubauer, 1961). D'autre part, la connaissance exacte des hauteurs de neige est indispensable pour le calcul des ouvrages paravalanches et l'implantation des dispositifs anticongères (Bernard, 1965).

Des études d'interception ont été faites dans des peuplements de l'étage subalpin ; on observe une forte interception (60 %) dans des peuplements très denses de pin cembro, tandis que le mélèzin n'intercepte que 30 % environ (Turner, 1961 ; Prutzer, 1967).

Il faut remarquer que, dans l'ensemble des dispositifs visités, le bilan hydrique est plutôt favorable grâce à une bonne répartition des précipitations pendant la période de végétation.

LES SOLS

Au sommet de l'étage subalpin, sur roche mère siliceuse, les sols de la forêt mélangée d'épicéa, de mélèze et de pin cembro, ceux de la cembraie et de la lande épaisse à rhododendrons sont des podzols ferrugineux à horizon A₂ beaucoup plus mince que celui des podzols atlantiques. A une altitude plus élevée existe une frange de podzols humo-ferrugineux correspondant à des landes à éricacées naines (rhododendrons et vaccinium) et faisant transition avec les sols bruns de pelouse de l'étage alpin.

Sous l'influence du déboisement, accompagné d'une érosion plus ou moins intense, les horizons supérieurs de ces podzols sont éliminés ou mélangés à l'horizon B : on arrive ainsi soit à des renkers, soit à des podzols remaniés ou tronqués dont le profil ressemble à celui des sols bruns alpins. Il est donc assez difficile de se baser de manière certaine sur la morphologie des sols pour déterminer la limite potentielle de la végétation forestière, d'autant plus que les sols de l'actuel étage alpin eux-mêmes montrent encore d'anciens horizons B de podzols, hérités d'une extension beaucoup plus grande de la forêt en altitude à l'époque atlantique. On procède souvent par interpolation entre les podzols qui ont subsisté et les noyaux recolonisés par les landes à éricacées après abandon des pâturages sous lesquels la podzolisation redevient active (podzols régénérés).

Cette difficulté est d'autant plus réelle que la limite potentielle varie beaucoup en fonction des conditions microclimatiques déterminées par le relief.

L'érosion consécutive au pâturage correspond à un appauvrissement du profil, surtout en azote, du fait de l'élimination de l'horizon A₀ qui, par suite du cycle biologique ralenti dans les forêts d'altitude, contenait une réserve importante de cet élément.

LA VÉGÉTATION ET SA CARTOGRAPHIE

La végétation des Alpes a déjà fait l'objet de nombreuses études parfois très détaillées et sa cartographie avance rapidement. Un effort particulier a été fait en ce qui concerne le Tyrol (Schiechtel, 1961) ; dans les autres pays alpins, les travaux sont déjà achevés (Suisse : Schmid, 1949, 1961) ou largement engagés (France : Ozenda, 1966).

Cette cartographie de la végétation permet de tracer les limites supérieures actuelles et potentielles de la forêt, d'étudier les déboisements (Fromme, 1957 ; Stern, 1966), d'évaluer les surfaces à reboiser, d'étudier la répartition des essences forestières et de délimiter les étages de végétation (Schiechtel, 1970).

De nombreuses cartes spéciales, souvent à grande échelle, permettent d'étudier des corrélations spatiales entre la végétation et les facteurs écologiques (Schiechtel, 1967, 1954 ; Kuoch, 1970).

Il existe certes une différence globale assez grande entre les régions de l'arc alpin (Wagner, 1966), mais les différents groupements végétaux de l'étage subalpin montrent une ressemblance physionomique et floristique assez grande, et avec une certaine approximation, on peut admettre que les conditions écologiques sont suffisamment semblables pour permettre une transposition de certains résultats dans les Alpes françaises.

En concluant, il apparaît clairement qu'une bonne cartographie de la végétation est indispensable aussi bien pour des problèmes d'aménagement du territoire que pour guider le reboiseur sur le choix des essences et des méthodes de plantation ; elle sert également de base pour toute recherche écologique en montagne.

PARTICULARITÉS PHYSIOLOGIQUES IMPOSÉES PAR LA VIE EN HAUTE ALTITUDE

Confrontés aux conditions difficiles de l'étage subalpin, les arbres ne peuvent survivre et se développer que grâce à certaines particularités de leur physiologie.

Durée de la saison de végétation

Les espèces et les écotypes d'altitude sont manifestement adaptés à la brièveté de la saison de végétation. Elevées dans les mêmes conditions de milieu et comparées à des provenances d'épicéa de basse altitude, des provenances de haute altitude de la même région géographique arrêtent beaucoup plus tôt l'élongation de leur pousse terminale (Holzer, 1966 ; Bouvarel, 1961 ; Baradat, 1966). Ce comportement, explicable par un conditionnement photopériodique, permet d'échapper aux premiers froids d'automne. Parce qu'il s'avère sous contrôle génétique strict, il est utilisé pour la sélection précoce des provenances autrichiennes d'épicéa les mieux adaptées aux conditions du reboisement en haute altitude.

Par le jeu des différences de date de débourrement et d'arrêt de l'élongation, les espèces utilisent de manière très inégale la durée de la période sans neige :

Mélèze	86 j (valeurs extrêmes 78 et 91)
Epicéa	72 j (valeurs extrêmes 64 et 78)
Pin à crochets	68 j (valeurs extrêmes 58 et 73)

(Moyennes sur 6 années au Stillberg. Turner : communication personnelle.)

Effets de la neige et du vent

Les conditions diffèrent suivant que l'on considère de jeunes plants en voie d'installation à découvert ou des peuplements plus âgés et fermés.

Jeunes reboisements. Un manteau neigeux d'épaisseur et de durée modérées représente un élément favorable. Il protège efficacement les jeunes plants d'une transpiration trop intense et des extrêmes de température (froids rigoureux du fait des fortes radiations).

Les effets mécaniques, d'autant plus intenses que la couche de neige est plus épaisse et la pente plus forte, sont très néfastes : écrasement et arrachement des plants provoqués par le poids et la reptation du manteau.

Un recouvrement trop prolongé est défavorable : il rend la saison de végétation encore plus brève et favorise l'attaque de certains champignons parasites (*Phacidium infestans*, *Herpotrichia nigra*).

Durant la phase hivernale, les jeunes plants sont protégés des effets du vent par la neige. Au contraire, durant la saison de végétation, encore isolés les uns des autres

et ne bénéficiant d'aucune protection mutuelle, ils ont à subir au maximum les effets mécaniques et physiologiques du vent : augmentation croissante de la transpiration avec la vitesse du vent, compensée en partie seulement par la régulation stomatique. La sensibilité aux effets physiologiques du vent varie suivant les espèces ; en particulier le pin cembro est plus résistant que l'épicéa.

Peuplements fermés. Au stade adulte, les cimes émergent du manteau neigeux et supportent l'action combinée de la neige, du givre et du vent. C'est pourquoi sous l'action de la sélection naturelle, les populations d'altitude, d'épicéa par exemple, ont évolué vers des types à cimes étroites leur assurant une meilleure résistance.

Photo n° 2 : Cembrales très près de sa limite supérieure

Photo BONNEAU



Conditions de radiations et de températures

Hors de la neige, les arbres doivent résister à de très basses températures hivernales (*Pinus cembra* : — 42°C, *Picea abies* : — 38°C) et supporter des alternances brutales de gel et de dégel (radiation intense) des parties aériennes. En fin d'hiver, avec la disparition partielle du manteau neigeux, ils sont soumis à la sécheresse physiologique (transpiration sans réapprovisionnement possible en eau à partir du sol gelé).

En haute montagne, la radiation solaire est intense (transparence atmosphérique accrue). De ce fait, en été, les sols de couleur sombre peuvent atteindre des températures très élevées (50 à 80°C). Cette radiation solaire intense entraîne aussi une destruction partielle de la chlorophylle des aiguilles, sans conséquence très importante d'ailleurs pour la production de matière sèche.

Globalement, les conditions de la haute altitude (courte saison de végétation, extrêmes de température, faible pression partielle de CO₂, radiation solaire intense) sont défavorables au bilan photosynthétique annuel ; la croissance s'en trouve diminuée d'autant. Génétiquement, la teneur en chlorophylle et le rendement photosynthétique des provenances d'altitude d'épicéa sont d'ailleurs plus faibles que ceux des provenances de basse altitude (Tranquillini, 1963, 1963 a ; Baradat, 1966).

Les études de physiologie des plantes de l'étage subalpin engagées de longue date en Autriche et principalement au Tyrol (Innsbruck) sont actuellement poursuivies par l'équipe du Professeur Tranquillini sur le terrain (Obergurgl, Kühtai) et en chambres conditionnées (Phytocyclone du Patscherkofel).

L'originalité de ces dernières installations réside dans la possibilité de soumettre les plants aux conditions extrêmes de la haute altitude :

température : — 40° à + 50°C

vent : 0-20 m/sec.

lumière : jusqu'à 100.000 lux

humidité relative de l'air : 15 à 90 % à 15°

et d'entreprendre l'étude des échanges gazeux (assimilation, respiration, transpiration) dans ces conditions.

Ces différents paramètres peuvent être programmés et il existe en outre un conditionnement partiel et séparé de la température et de l'humidité du sol.

Par contre, on ne peut étudier que 5 plants de faible dimension (Tranquillini, 1967).

L'AMÉNAGEMENT GLOBAL DE LA HAUTE MONTAGNE

Bien que très attaché à ses antiques traditions alpestres, le Tyrol a très vite exploité les nouvelles vocations de ses hautes montagnes dans l'économie d'échanges de la civilisation industrielle.

L'entreprise de correction des torrents et de lutte contre les avalanches est aussi ancienne en Autriche qu'en France, fondée sur les mêmes principes (reboisement), mais reste de nos jours plus encouragée et soutenue par l'opinion et les pouvoirs publics.

Dans le domaine de la protection des forêts et des pâturages de montagne, les contraintes administratives des « Länder » renforcent la loi fédérale pour promouvoir une séparation stricte des domaines respectifs des troupeaux et de la forêt et le

contrôle de leur exploitation, mais aussi leur mise en valeur, grâce à la restructuration foncière, aux équipements et à l'amélioration des pratiques et des techniques, dans le respect des équilibres naturels.

Rien de tout cela ne pouvant se faire sans le maintien d'une population rurale, l'économie rurale montagnarde est protégée, assistée ou encouragée grâce à un large arsenal de lois ou règlements permettant une pleine mobilisation des ressources du terroir, au premier plan desquelles s'inscrivent aujourd'hui, au-delà du bois et des produits de l'élevage, les eaux, la neige, l'esthétique du paysage, et la qualité de l'accueil dans un cadre fidèle à ses traditions, bucolique et reposant.

Les vallées, qui ont toujours constitué des cellules sociales et économiques individualisées et constituent aujourd'hui les unités hydrologiques pourvoyeuses de l'industrie, avec des voies d'accès qui leur sont propres, font l'objet de plans de développement individualisés concevant l'aménagement intégré de toutes leurs ressources, harmonisé en fonction des situations et vocations locales particulières.

Un rôle éminent est reconnu au développement forestier dans ces plans, tant pour le soutien que la production ligneuse apporte à l'économie rurale qu'en raison des autres fonctions ou usages de la forêt : protection pérenne contre les avalanches, régularisation du régime des eaux (devenue un dogme en Autriche) et consolidation des pentes affouillables, ressources cynégétiques et attrait touristique.

L'ampleur des hauts bassins de réception façonnés par l'érosion torrentielle quaternaire, les éboulis instables issus de la désagrégation des hautes crêtes englacées dont les débris encombrant les couloirs d'avalanches, la raideur des pentes inférieures aux flancs des vallées en auge, tapissés de placages morainiques affouillables ou instables, enfin l'implantation fréquente des villages sur les cônes de déjections au-dessus d'un fond de vallée insalubre ou inondable engendrent de sérieux risques d'alluvions torrentielles sauvages en dépit de la solidité de l'ossature géologique et d'un climat favorable à la forêt.

Le service fédéral R.T.M., ou Wildbach und Lawinen Verbauung, se voit donc confier un rôle primordial dans les plans de développement ou d'aménagement intégré, tant en raison de l'ampleur des surfaces à reboiser, défrichées autrefois pour les besoins du pâturage, que de l'importance des ouvrages de stabilisation ou de protection nécessaires.

D'autre part la connaissance des risques naturels acquise par le service R.T.M. qui put constituer dès 1950 un cadastre des avalanches, lui permet de jouer un rôle éminent en matière d'urbanisme, dans le cadre des plans communaux d'aménagement nécessités par le développement du tourisme et des résidences. Ceux-ci répartissent en effet le territoire communal en 3 zones :

- rouge : zone non œdificandi, pour cause de risques naturels certains,
- jaune : construction possible sur avis d'expert agréé (R.T.M.) éventuellement sous réserve de travaux spéciaux,
- verte : zone de construction libre.

La mise au point de ces plans par les collectivités devient nécessaire pour obtenir le concours technique du service fédéral R.T.M. avec les importants subsides qui mettent les très onéreux travaux de protection à portée des intéressés : Etat fédéral, 65 à 70 % du devis, Land, 20 à 25 %. Les travaux de mise en valeur des forêts ou des pâturages, plus directement productifs et moins lourds pour le maître d'ouvrage, ne sont en général subventionnés qu'à 25 %, avec le concours de l'Inspection des Forêts ou de celle des alpages (Alp Inspektorat).

La rive gauche du bas Zillertal, sur micaschistes et gneiss, a fait l'objet sur près de 20.000 ha de la plus importante et d'une des plus anciennes entreprises d'aménagement intégré du Tyrol, aujourd'hui en voie d'achèvement. Là 1.440 ha d'alpages ingrats

ou avalancheux sont en voie de reboisement intégral, d'importants droits d'usage grevant la santé et la prospérité des forêts ont été rachetés, et compensés par de nombreuses améliorations pastorales permettant le maintien du cheptel et la prospérité de l'élevage sur des pelouses exploitables en bonnes conditions, souvent encloses ; 115 km de chemins carrossables d'intérêt sylvopastoral et touristique ont été réalisés ; on a corrigé une dizaine de torrents plus ou moins fantasques et stabilisé le manteau neigeux par des ouvrages charpentés sur les zones de départ d'avalanches les plus dangereuses en considérant le développement des sports d'hiver. L'entreprise aura coûté en tout 220.000.000 shillings, près d'un milliard d'anciens francs... Seuls les revenus forestiers agricoles et pastoraux de cet investissement global ont été escomptés aux environs de 3.000.000 shillings par an. Mais ses retombées touristiques, et le prix de la sécurité acquise, eu égard aux problèmes posés par l'équipement de la Ziller pour l'énergie hydroélectrique, doivent peser beaucoup plus lourd dans un bilan économique complet.

Plus à l'ouest, dans les préalpes calcaires du Lechtal, au relief très redressé et aux possibilités pastorales plus limitées, le dépeuplement rural et la dégradation des ressources sylvopastorales ont atteint un stade trop avancé pour autoriser le même effort de sauvegarde de la vie rurale. Dans la petite vallée de Bschiabs, assez déshéritée par la raideur des pentes, l'effort de l'administration porte avant tout sur la restauration des forêts, dangereusement appauvries et vieilles après des siècles de parcours du bétail et du gibier et d'usages imprudents, sur le remembrement des terres pour la conservation d'un minimum de fermes viables, et sur la protection des villages principaux, et de leurs routes d'accès, contre les avalanches. Sur les chaumes lisses de ces raides pelouses délaissées par la faux, au sol fort compact, le succès des plantations forestières est subordonné à une sérieuse protection mécanique contre les effets du glissement de la neige.

Photo n° 3 : Rive gauche du bassin du Telbach (Zillertal) vers 1.950 m d'altitude. Travaux d'équipement sylvopastoral : route desservant la forêt et les alpages améliorés et consolidés par des travaux de drainage visibles au-dessus des chalets.



LES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL

Au développement exponentiel dans le temps des processus de l'érosion en montagne, par le jeu de nombreux effets multiplicateurs, seul le dynamisme de la vie végétale, développant lui-même les effets multiplicateurs, peut s'opposer durablement. Malheureusement cette vie est fort délicate à son origine, et se trouve en général exposée d'emblée à des forces destructrices considérables qui, d'autre part, menacent gravement et immédiatement des installations humaines, auxquelles il faut bien assurer une protection immédiate par des ouvrages de génie civil. Nombre de ceux-ci sont donc également conçus pour protéger dans son jeune âge la végétation appelée à assurer, au bout d'un temps plus ou moins long, le relai des ouvrages inertes exposés de plein fouet aux forces destructrices et subissant les injures du temps.

Au surplus en haute altitude le dynamisme de la végétation et sa puissance diminuent pour s'annuler au niveau des neiges éternelles et de la gélifraction des roches. Et même aux basses altitudes aucune végétation à effet physique ou mécanique notable ne peut construire un sol sur des roches dures et compactes ou stabiliser des terrains fluants, sur des pentes excessives.

OUVRAGES DE CORRECTION TORRENTIELLE

Cette dernière considération est illustrée par les ouvrages de correction de torrents entrevus dans les combes bien boisées du Zillertal en particulier dans le Riedbach,

En second plan à droite, les prébois de la R. D. du bas Zillertal

Photo PONCET





Photo n° 4 : Le barrage perméable de protection du Ried am Ziller, au bas de la Gorge du Riedbach : grille métallique démontable formant piège à sédiments grossiers, susceptible de purge artificielle (aéridation contrôlée)

Photo PONCET

ruisseau torrentiel qui menace le coquet village de Ried am Ziller bâti sur son cône de déjection.

La concentration de précipitations orageuses sur le vaste bassin de réception déboisé et pastoral, peu perméable, précipite parfois dans la gorge boisée un flot de crue qui arrache au passage des pans de berge affouillable dans un placage morainique de médiocre consistance, chargé de végétation forestière, étroitement entaillée par le torrent. Le lit d'écoulement a donc été consolidé, exhaussé et élargi, à la traversée de ces dépôts instables, par une échelle d'une centaine de très jolis seuils en maçonnerie mixte (béton parementé de moellons en opus incertum ou appareillés sur la cuvette déversoir), seuils qui sont utilement venus remplacer d'anciens barrages en bois (grumes assemblées) tombés en décrépitude par pourriture au bout de 40 ans. Mais le village restait exposé au débordement sur le cône de déjection d'une crue trop forte réussissant à remettre en mouvement de gros matériaux en transit depuis fort longtemps dans le lit du torrent, abandonnés par des crues antérieures à divers niveaux.

Ces gros matériaux et les arbres arrachés aux berges par un flot puissant ne manqueraient pas en effet d'obstruer le canal d'écoulement un peu étroitement calibré à la traversée du village, provoquant à ce niveau un catastrophique débordement.

Contre une telle éventualité, un piège à sédiments a été installé près du débouché de la gorge sur le cône de déjections en amont du village, sous la forme d'un barrage (Balkensperre) très original (photo n° 4). Il ne vise en effet à retenir que les plus gros sédiments, ceux qui ne pourraient transiter dans le canal d'écoulement inférieur sans risque d'engorgement. C'est donc un ouvrage très perméable à grille métallique largement ouverte, robuste charpente métallique démontable pour permettre le curage de la retenue quand elle viendra à être remplie. Car l'ouvrage ne reste pleinement efficace que si la retenue est maintenue vide.

L'ingénieur Stauder compte d'ailleurs fermement sur le reboisement entrepris sur le tiers des surfaces pastorales du haut bassin du Riedbach pour réduire l'importance et la puissance de charriage des flots de crue et l'aider à maintenir vide son piège à gros sédiments, avec le minimum de frais de curage.

OUVRAGES PARAVALANCHES ET DE PROTECTION DES PLANTATIONS

Paravalanches

Des réseaux d'ouvrages charpentés, solides et durables, assurent la fixation du manteau neigeux sur les zones de décrochement d'avalanches dominant les zones boisables et protégeant les jeunes plantations qui leur seraient exposées.

L'expérience autrichienne en matière de paravalanches est aussi ancienne que celle de la Suisse. Mais les études de l'Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches de Davos ont abouti à une certaine normalisation des structures et des règles de leur dimensionnement et de leur distribution sur le versant en fonction des données du terrain et de l'enneigement, traduite dans les directives de cet Institut qui sont en général respectées en Autriche.

Des ouvrages standardisés en profilés d'acier non traité sont, depuis longtemps, fabriqués en série par les firmes autrichiennes O.A.M. (Alpine Montan) et Vöst. Ce sont des rateliers et surtout des ponts ou claies à neige, **assez souples d'emploi**, grâce à une portée latérale limitée à 4 ou 5 mètres et à 2 piliers aval sustentateurs de hauteur réglable par coulissement.

Ces ouvrages sont implantés le long de courbes de niveau en disposition fragmentée discontinue avec intervalles latéraux inférieurs à 2 mètres. Mais ceux-ci sont de plus en plus fréquemment obturés par des éléments de traverses en profilé d'acier chevauchant 2 claies voisines et solidarissant latéralement leurs tabliers, de manière à constituer finalement un tablier continu à peu près horizontal sur toute la ligne.

Des **ouvrages déflecteurs** éoliens modifiant la répartition de la neige sont ensuite disposés sur les arêtes et les crêtes pour tenter de décharger les ouvrages trop chargés ou ensevelis, là où la neige s'accumule par l'effet du vent, en fixant la neige sur ces crêtes ou la rejetant sur les pentes ou sur les ouvrages moins exposés. L'empirisme restant la règle la plus sûre pour la distribution de ces déflecteurs, panneaux vire-vent, barrières ou toits-buses, on se garde de les implanter avant les ouvrages d'appui neigeux ou de protection de plantations qu'ils doivent eux-mêmes soulager.

Les Inspections du Service R.T.M. tyrolien, fortement structurées et équipées, exécutent en régie directe ces ouvrages à des prix défiant toute concurrence, malgré le poids des infrastructures de chaque chantier (route, téléphérique, câbles grues, decauville, baraquements), prix sensiblement moitié moindres que ceux consentis par les entreprises privées qui se voient, depuis peu en France, confier la réalisation intégrale des réseaux de paravalanches. Le prix des fournitures départ usine n'explique pas une telle différence. Sans doute convient-il de mettre en cause, outre la qualité et le prix de la main-d'œuvre, l'organisation des chantiers et en particulier leur équipement en câbles de transport. On ne travaille pas au Tyrol dans la précipitation selon l'importance de subsides délivrés annuellement au coup par coup et à épuiser en une saison, mais selon des programmes à long terme, de financement assuré et échelonné.

Il n'empêche que les aléas de ces entreprises, tant en matière de boisement que d'ouvrages, finissent le plus souvent par se traduire au bout de quelques années par des révisions des devis initiaux, sinon même parfois des programmes, et par des difficultés budgétaires pour mener l'entreprise à son terme.

Au Heuberg (Lechtal), sur une haute pente particulièrement raide et enneigée, les claies en acier O.A.M. de 4 m de large dominant et protégeant la zone boisable ont fini par coûter près de 250.000 F par hectare supportant 400 mètres linéaires d'ouvrages.

Aussi dès que la réduction de l'altitude permet d'envisager le succès du reboisement et une croissance assez rapide des jeunes arbres pour qu'ils puissent assumer le

relai des ouvrages stabilisateurs dans un délai raisonnable, a-t-on recours à des charpentes plus économiques, que leur durabilité autorise à attendre le relai des plantations.

Tel est l'objet de la claie rudimentaire en grumes résineuses écorcées et imprégnées de la photo n° 5, qui ne coûterait que le tiers d'une claie équivalente en acier.

Mais le bois même imprégné dure difficilement plus de 30 ans au contact du sol, ce qui est insuffisant eu égard à la lenteur de croissance des plantations, qui ne commencent à agir sur le manteau neigeux que lorsqu'elles en dépassent l'épaisseur maximale. D'où les recherches effectuées par l'Institut fédéral de Davos sur un type de claie en bois résistant particulièrement bien à la pourriture (photo n° 6), d'un prix raisonnable (250 F.S./m.l. pour 3 m de hauteur de neige) et dont la durée espérée excéderait 50 ans.

Aussi cher que puisse coûter le reboisement des intervalles entre lignes d'ouvrages, son prix à l'hectare reste de très loin inférieur à l'économie réalisable par substitution des charpentes en bois imprégné aux charpentes métalliques.



Photo n° 5 :
Protection provisoire par claies
rustiques en bois Photo PONCET



Photo n° 6 :
Ouvrage paravalanche provisoire
en bois ; les pieds sont protégés
par un enrobement de pâte anti-
septique à l'intérieur d'un embal-
lage de plastique Photo PONCET

Photo n° 7 :
Épicéas communs,
pins cembro et mélè-
zes de même âge
dans le reboisement
de Talbach

Photo PONCET



LE REBOISEMENT DANS L'ÉTAGE SUBALPIN

CHOIX DES ESPÈCES

Ce qui suit s'appuie sur les réalisations effectivement visitées en Autriche (chaînes primaires internes donc sols siliceux et pluviométrie estivale importante) et en Suisse ; certaines conclusions devraient sans doute être modifiées ou adaptées aux conditions des Alpes françaises (en particulier les Alpes du Sud).

Espèces autochtones

Épicéa : bien qu'il ne s'agisse pas d'une espèce exclusivement d'altitude, certains peuplements naturels autrichiens atteignent 1.800 m. Au moins, durant les premières années, les reboisements d'épicéa effectués à découvert dès 1.700 m d'altitude sont assez décevants (croissance lente, aiguilles jaunes).

Mélèze : partout où il a été installé, il montre une croissance extrêmement rapide, lui permettant, le cas échéant, d'abriter, et par là, de favoriser le démarrage d'une espèce moins bien adaptée comme l'épicéa ; pur ou en mélange, il semble qu'il puisse être planté jusqu'à environ 100 m de la limite potentielle de la végétation forestière (soit 1.800 à 2.200 m en Autriche, suivant les régions). Néanmoins, il n'est pas très efficace pour la fixation de la neige.

Pin cembro : c'est une essence spécifiquement de haute altitude (il en existe de beaux peuplements naturels adultes à la limite potentielle de la forêt, même au-dessus de 2.000 m d'altitude). Bien que la croissance initiale soit lente, l'espèce supporte magnifiquement des conditions d'installation très difficiles (plants trapus et vigoureux parfaitement verts). Elle est utilisée en reboisement jusqu'à la limite potentielle de la forêt.

Pin mugho : différent du pin à crochets par son port rampant caractéristique, il est peu utilisé (introduction en mélange sur banquettes discontinues jusque vers 2.100 m d'altitude dans les reboisements de Taschach). Malgré une bonne réussite, il n'est employé que pour la fixation du sol, son port le rendant peu efficace pour la fixation de la neige.

Pin à crochets : son aire naturelle est très limitée en Autriche, et il n'a malheureusement pas fait encore l'objet d'essais.

Les tentatives de boisement en haute altitude, à partir du sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) jugé initialement espèce pionnière, se sont finalement soldées par des échecs.

Espèces exotiques

On doit déplorer l'absence d'essais systématiques (dispositifs statistiques à plusieurs répétitions) de comportement des espèces exotiques dans l'étage subalpin, tant en France que dans le reste de l'Europe semble-t-il.

En France, un petit arboretum écologique d'altitude installé par E.F. Debazac, près de l'Alpe-d'Huez en 1965, n'a malheureusement pas fourni les résultats escomptés, en raison des taux de mortalité catastrophiques après plantation. De tels essais devraient être repris sous une autre forme (utilisation de techniques de reboisement appropriées, meilleur contrôle des variations du milieu). En toute hypothèse, de nombreuses espèces exotiques d'altitude devraient être essayées, en particulier les espèces nord-américaines (Montagnes Rocheuses). A ce titre, le comportement intéressant de *Picea engelmannii* a déjà été noté en Suisse, et des essais de provenances concernant la même espèce et *Abies lasiocarpa* sont en préparation en Autriche (Holzer, stade pépinière).

Mélange et succession

Les différentes réalisations visitées en Autriche et en Suisse mettent en évidence l'utilisation de l'épicéa, du mélèze et du pin cembro en proportion variable suivant l'altitude. De 1.700 à 2.200 m (roches primaires métamorphiques des massifs centraux, versant sud), on utilise, très schématiquement :

- *au niveau inférieur* : l'épicéa dominant, en mélange avec le mélèze et quelques rares pins cembro,
- *au niveau intermédiaire* : le mélèze dominant, en mélange avec le pin cembro et quelques rares épicéas,
- *au niveau supérieur* : le pin cembro pratiquement pur.

TECHNIQUES D'INTRODUCTION

Aménagement du milieu

Préparation du sol. L'importance de la pente interdit généralement l'utilisation des moyens mécaniques. La plantation en potets, ouverts manuellement suivant les courbes de niveau, est la technique la plus communément employée. La plantation en fente se solde par des taux de mortalité importants (Stern, 1965) ; elle n'est pratiquement pas employée en Autriche.

Protection rapprochée des plantations contre les méfaits de la neige. La neige, dont le vent assure sur le relief une répartition très inégale mais assez constante, ne protège les jeunes plants forestiers que pour une épaisseur optimale, et exerce beaucoup d'effets néfastes, voire dirimants, soit par son absence (évapotranspiration desséchante et gel), soit par son excessive épaisseur et son excessive durée.

Deux types de protection sont donc à considérer au niveau des plantations comme en matière de paravalanches selon qu'elles visent :

a) *l'égalisation de la répartition de la neige, par des déflecteurs éoliens légers et économiques*, qui contribuent également à consolider le manteau neigeux, réduisant localement sa reptation, et à protéger latéralement les jeunes plants contre les effets desséchants du vent.

Telles sont les fonctions des barrières légères, ajourées ou pleines, visibles sur les photos 8 et 9, disposées perpendiculairement au vent dominant, de préférence sur les croupes, côté au vent, pour y retenir la neige et éviter la formation de congères sous le vent, ou pour décharger les combes d'un trop grand poids de neige.

b) *la lutte contre le glissement de la neige au sol*. Il ne s'agit plus d'empêcher le départ d'une avalanche, en donnant un appui à toute l'épaisseur du manteau, mais de freiner simplement la lente reptation de ce manteau à sa base, en augmentant la rugosité du sol par divers artifices.

Parmi ceux-ci, les petites constructions en ponts à neige visibles sur la photo n° 10 s'avèrent trop onéreuses. Par contre les réseaux de piquets, sous réserve d'une densité importante, tels que ceux de Bschlabs, réalisés, faute de bon bois à piquets, en chutes de fer à béton recourbées en U renversé coiffant chaque jeune plant (photo n° 11) semblent donner satisfaction à un prix raisonnable (1.200.000 F/ha). Mais les essais systématiques entrepris depuis 1955 au Dorfberg sur Davos par In der Gand,

Barrière à neige pour la protection de la plantation contre les congères par vents d'ouest :

Photo n° 8 : Détail d'une barrière en lames de plastique montée sur supports métalliques légers

Photo n° 9 : Bandes de plastique Rehau, clouées au sol dans le sens de la pente (N-S), perpendiculairement aux vents dominants (O-N-O)

Photos PONCET

Protection des plantations contre la reptation nivale :

Photo n° 10 : Petits ponts en bois intercalés dans les plantations

Photo n° 11 : Piquets de fer recourbé protégeant des plants de mélèze et d'épicéa

Photos PONCET

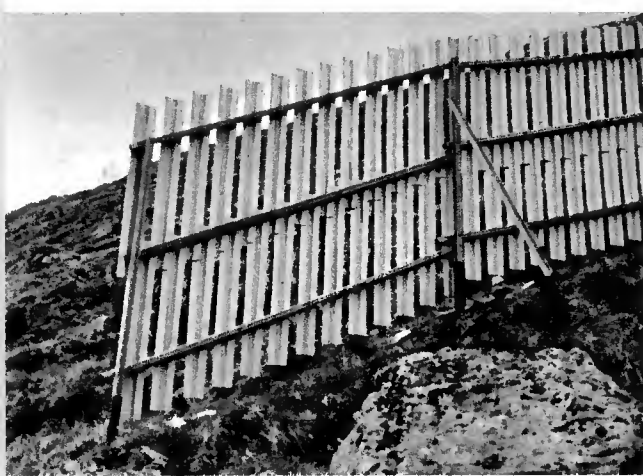




Photo n° 12 :
Place d'expérience du Still-
berg (Davos). Petites bermes
destinées à empêcher le
glissement de la neige

Photo PONCET

pour comparer l'efficacité des différents systèmes de freinage de la reptation nivale dans les plantations, semblent bien donner l'avantage aux banquettes terrassées, sub-horizontales. Celles-ci par le travail et l'aération du sol, l'effet de talus et l'élimination de la concurrence des herbes ou arbrisseaux, procurent par ailleurs aux jeunes plants d'autres avantages que Demontzey avait perçus.

Dans un pays aussi peu aride que le Tyrol ou les Grisons, ces avantages sont quelque peu négligés au profit de la densité de la plantation. Nous n'avons vu au Tyrol de larges banquettes que dans un dispositif expérimental à Haggen. Et au champ d'essai du Stillberg sur Davos, on se contente de toutes petites bermes de 0,30 m à 0,40 m de large, très rapprochées (photo n° 12) réalisées manuellement avec beaucoup de soin, en empilant les mottes pour constituer une murette aval, évitant de ramener en surface les horizons inférieurs stériles, et recouvrant la banquette avec la terre fine et fertile des horizons supérieurs humifères par recoupement du petit talus de déblai. Il en coûte ainsi 2 F.S. par mètre, ce qui représente au moins 8.000 F.S. par hectare.

M. In der Gand attache beaucoup de prix, dans la lutte contre la reptation nivale, au maintien d'une bonne structure physique et donc de la perméabilité du sol, qui évite la constitution au contact du sol et des herbes couchées d'un film d'eau de fusion favorisant le glissement. Il pense, avec certains praticiens suisses, que l'abandon de la fumure organique des prairies peut être tenu, en partie, pour responsable de l'accélération actuelle des glissements de neige.

Techniques d'introduction proprement dites

● Plantation :

Age des plants : le reboisement en altitude utilise de préférence des plants petits, trapus, bien pourvus en chevelu racinaire, élevés le plus souvent dans des pépinières elles-mêmes situées en altitude (1.000-1.700 m). L'épicéa est utilisé en 2-2, le mélèze en 2-1, le pin cembro en 2-4 (avec cernage 2 ans après le repiquage au moment du débourrement).

Méthode d'introduction : les plants sont installés à racines nues. Néanmoins deux améliorations possibles mais non encore utilisées dans la pratique courante, peuvent être envisagées :

— l'emploi de plants en godets, élevés sans repiquage mais avec mycorhization (Göbl) ;

— ou lorsque la plantation est effectuée à racines nues, l'utilisation d'un film protecteur sur les racines pour éviter la dessiccation entre l'arrachage et la plantation.

Les études entreprises par le Professeur Tranquillini (au phytocyclone du Patscherkofel et sur le terrain) montrent que la protection des racines est nettement plus importante pour l'amélioration des taux de reprise en altitude que la protection des aiguilles (antitranspirant). Le produit commercial qui a donné les meilleurs résultats est « l'Agricol ». Il est utilisé par trempage des racines dans une solution à 1 % dans l'eau (Rabensteiner et Tranquillini, 1971).

Epoque de plantation : la plantation se fait généralement en automne (octobre), en raison de la disparition tardive de la neige au printemps. Pour le pin cembro, les plantations commencent souvent très tôt (août) ; il pourrait en être de même pour l'épicéa (Holzer). Il n'est cependant pas inutile de rappeler que le climat d'altitude des Alpes internes autrichiennes est caractérisé par des pluies d'été fréquentes. Pour le mélèze, la période de plantation la plus favorable serait le printemps.

Densité : la densité de plantation généralement adoptée varie entre 4.000 dans les cas les plus favorables et 20.000 plants/ha sur les crêtes seulement.

● Semis direct :

Actuellement le semis direct n'est pas utilisé dans la pratique courante. Toutefois, un essai entrepris en Autriche en 1956 avec le pin cembro (ensemencement d'un alpage en versant nord) a donné des résultats assez satisfaisants, 10 ans après, malgré un pronostic pessimiste à la suite d'une invasion massive de casse-noix. Les conditions favorables au semis direct seraient les suivantes (Stern) :

- en versant nord, formation à *Vaccinium myrtillus* et *Rhododendron*,
- en versant sud, formation à *Calluna vulgaris*.

Doctrines générale

La doctrine sous-jacente à la plupart des réalisations visitées peut se résumer ainsi :

Mise en place préalable des ouvrages,

— d'abord installation des ponts à neige et étude de leur effet sur la répartition du manteau neigeux dans les années qui suivent la mise en place,

— puis installation des ouvrages légers (barrières à neige, déflecteurs) sur les arêtes et les bosses, pour diminuer la charge imposée aux ponts à neige situés dans les endroits critiques (couloirs).

Reboisement en commençant par le haut de la pente et les reliefs (arêtes, bosses) pour enrayer les glissements et améliorer la répartition de la neige. Dans un premier temps, les couloirs d'avalanche ne sont pas plantés ; ils ne peuvent l'être qu'après plusieurs années lorsque la répartition de la neige s'est suffisamment améliorée sous l'effet du reboisement.

Les versants sud offriraient finalement (dans les Alpes internes autrichiennes), des conditions plus favorables au reboisement que les versants nord.

Le coût total d'un reboisement dans l'étage subalpin varie entre 4.000 et 12.000 F suivant l'importance des ouvrages légers de répartition de la neige et de protection des plants contre la reptation et le vent.

Les améliorations biologiques

Les difficultés de reprise des plants, leur faible croissance, la carence accentuée en azote des jeunes plants d'épicéa (teneur des aiguilles en N de l'ordre de 0,8 à 0,9 %) ont conduit à envisager des procédés d'amélioration soit par fertilisation, soit par mycorhization.

La fertilisation des plantations

Les possibilités d'utilisation sont très contestées dans les conditions de l'étage subalpin. En effet la brièveté de la saison de végétation est telle qu'on ne peut attendre d'une fertilisation, même théoriquement efficace, qu'un faible gain de croissance. Selon l'opinion des chercheurs autrichiens la carence en azote tiendrait d'ailleurs plus à des difficultés physiologiques d'assimilation qu'à une disponibilité insuffisante dans le sol. Les reboiseurs, aussi bien en Suisse qu'en Autriche, attachent beaucoup plus d'importance à la robustesse des plants, à leur résistance au froid et aux attaques parasitaires, qu'à la rapidité de leur croissance. Or il est pratiquement prouvé que les plants richement alimentés en azote subissent de plus forts dégâts de gel et, dans le cas de l'épicéa, sont plus rapidement détruits par *Herpotrichia nigra* que les plants carencés.

Toutefois la question de la fertilisation à la plantation ne semble pas close et deux expérimentations peuvent ouvrir de nouvelles perspectives. En Autriche des semis de pin cembro ont été cultivés en godets à 1.850 m d'altitude. Un substrat contenant 60 % d'humus (correspondant à ce qui serait réalisé dans une plantation en pots travaillés sur podzol par mélange des horizons F et H) et auquel on applique une fertilisation minérale riche en azote et en cuivre (équivalent à 2.000 kg de superphosphate, 800 kg de sulfate d'ammoniaque et 50 kg de sulfate de cuivre/ha) assure une très bonne croissance, une partie aérienne bien développée et vigoureuse et une bonne survie (Mme I. Neuwinger, 1965).

En Suisse, Th. Keller a cultivé en zone subalpine des plants d'épicéa dans des godets dont la terre avait été fertilisée de diverses manières. Les fortes fertilisations minérales ne permettent qu'une faible croissance supplémentaire de l'épicéa mais entraînent par contre une mortalité par *Herpotrichia nigra*, beaucoup plus importante que celles des témoins. Cependant des apports d'azote organique (corne, sang), permettent une croissance légèrement accélérée, une meilleure proportion de plants forts que dans les témoins et une aussi bonne survie. Des tests physiologiques ont pu montrer que plus les plants étaient riches en azote (par fertilisation on passe de 0,85 à 1,35 % de N dans les aiguilles) plus la respiration était intense. Les plants fertilisés avec N minéral étant plus sensibles à *Herpotrichia nigra*, on doit en déduire qu'une forte respiration est liée à une moindre résistance à ce parasite. Or, les plants qui ont reçu de la corne et du sang séché et qui, tout en étant relativement résistants au champignon, sont bien alimentés en azote, montrent justement une respiration réduite : ces engrais organiques exercent donc sur la physiologie du plant une action très différente de celle des engrais minéraux.

En résumé, des recherches plus poussées sur l'emploi d'engrais azotés organiques et l'apport de quantités importantes de cuivre (et peut-être aussi de molybdène) pourraient se révéler intéressantes.

La mycorhization

Les recherches ont porté sur l'épicéa et le pin cembro, avec un effort particulier sur ce dernier en Autriche. Bien qu'aucune expérience rigoureuse de comportement de plants mycorhizés artificiellement et de plants non mycorhizés n'ait été publiée (l'une d'elle, récente, n'a pas encore fourni de résultats nets), certaines études ont montré

l'utilité probable de la mycorhization : dans un essai de semis artificiel la mycorhization spontanée s'est révélée inégale, les taches bien réussies correspondant aux plants fortement mycorhizés. Il semble que l'élimination des humus bruts par érosion ait fait régresser la quantité de mycelium présent dans le sol et diminué ses facultés d'association active avec le pin cembro.

Ce sont surtout *Suillus plorans*, *Boletus placidus* qui sont des symbiotes actifs du pin cembro.

Conduite des pépinières

Devant les incertitudes des résultats de la fertilisation à la plantation, les reboiseurs s'attachent à produire en pépinière des plants sains, trapus, vigoureux et déjà mycorhizés.

Les planches de repiquage sont systématiquement inoculées en mycelium de *Suillus plorans* et *Boletus placidus*, par apport de tourbe ayant servi de support à une culture du mycelium de ces deux espèces (3 dm³ de tourbe inoculée par m²).

La pépinière reçoit régulièrement une fertilisation minérale (500 kg/ha et par an d'un engrais complet 10.10.15 contenant divers oligo-éléments) et on maintient une teneur élevée en humus par apports réguliers de tourbe compostée (2 m³/are au moment du repiquage), et de composts : tous les 6 ans on laisse les planches au repos et on cultive un mélange de crucifères à pivot profond, de graminées (avoine) et de légumineuses (féverolle, lupin, pois) ; on fait ainsi trois cultures dans l'année ; les deux premières sont fauchées, enrichissant ainsi le sol de la matière organique de leurs racines, tandis que les parties aériennes servent à la fabrication d'un compost d'herbes et de terre (3 ans de maturation) ; la troisième récolte est enfouie.

Photo n° 13 : Forêt mélangée de Pin cembro de très belle forme et d'Epicéa. Régénération par coupes à blanc de petite surface

Photo PONCET



AMÉNAGEMENT, SYLVICULTURE ET PRODUCTION DE LA FORÊT DE HAUTE MONTAGNE

Nous avons pu visiter sous la direction de Monsieur N. Mair — ancien Directeur technique de l'Administration forestière du Tyrol — un certain nombre de peuplements d'altitude et apprécié le travail considérable déjà accompli dans les domaines de l'aménagement et de la sylviculture au Tyrol.

LES AMÉNAGEMENTS

Le Service forestier du Tyrol utilise depuis 1950 exclusivement l'inventaire statistique par échantillonnage pour tous les aménagements. La densité de l'échantillonnage varie entre 1 et 2 points par hectare selon la structure des forêts et la précision demandée. Dans un seul et unique parcours, on mesure les placettes d'échantillonnage — à surface variable ou fixe — avec un certain nombre d'arbres-échantillons, on note les types de végétation, l'état sanitaire et qualitatif du peuplement et le type de forêt. En progressant d'un point à l'autre, on fixe sur une carte topographique à grande échelle (1 : 5000) les différentes limites (végétation, peuplement, etc.). Sur les arbres-échantillons, on prélève une carotte pour déterminer l'accroissement courant.

L'ensemble du Tyrol est divisé en « régions de croissance » (Wuchsgebiete) avec une subdivision en « cantons de croissance » (Wuchsbezirke) ainsi qu'en plusieurs étages de végétation avec un certain nombre de types de forêt. L'aménagiste tient largement compte de cette division et chaque série (Betriebsklasse) correspond à une unité de production écologiquement aussi homogène que possible.

Le calcul de possibilité annuelle est essentiellement basé sur l'accroissement courant. Les aménagements sont entièrement révisés tous les 10 ou 20 ans.

De 1956 à 1966, 30.000 ha de forêt ont été aménagés ou révisés (50.000 points d'échantillonnage, 328.000 arbres-échantillon) et grâce à cette quantité de données, on commence à très bien connaître la structure et la production de forêts de haute montagne (Mair, 1966).

SYLVICULTURE ET PRODUCTION DES PEUPELEMENTS DE HAUTE MONTAGNE

Grâce aux résultats des inventaires statistiques et à sa riche expérience, le service d'aménagement a élaboré pour chacun des types de forêts un modèle optimal de production et de sylviculture, que l'aménagement cherche à réaliser dans un délai plus ou moins long.

Si nous nous limitons aux seuls peuplements de l'étage subalpin, on peut dégager quelques traits généraux de la sylviculture pratiquée au Tyrol :

- le jardinage est abandonné au profit des coupes à blanc-étoc de faible surface (1 ha à 3 ha) (photo n° 13) ou des coupes progressives en lisière (Saumfemelschlag). Exceptionnellement, le jardinage par bouquets est pratiqué dans des peuplements disloqués à la limite supérieure de la forêt ;

- la révolution varie entre 120 et 180 ans et on s'oriente vers une seule et unique éclaircie forte entre 40 et 80 ans ; ainsi 80 à 90 % de la possibilité annuelle sont réalisés par des coupes rases ;

- la régénération naturelle est très difficile à obtenir. Elle est limitée à quelques stations favorables et, d'une manière générale, on reboise immédiatement après l'exploitation avec 4.000 plants à l'hectare. L'ensemble des travaux est réalisé en régie ;

— la constitution de peuplements fermés jusqu'à la limite supérieure de la forêt avec une proportion croissante de pin cembro doit être un objectif à atteindre. Il faut d'ailleurs souligner l'importance considérable de cette essence, tant sur le plan de la production en volume et en valeur que pour sa résistance au dur climat de l'étage subalpin.

Les peuplements à la limite supérieure de la forêt posent des problèmes particuliers. L'action dévastatrice séculaire de l'homme a souvent profondément modifié et abaissé la limite supérieure de la forêt.

Le pâturage excessif, une exploitation abusive, par des coupes de jardinage, pour les besoins des alpages, la difficulté de vidange et l'absence d'une sylviculture adéquate ont conduit à des peuplements clairs et surannés. Le matériel sur pied ne représente que la moitié d'une densité estimée normale ; on constate un manque de bois moyens et la régénération naturelle fait le plus souvent défaut. Ces peuplements sont souvent classés en « forêt de protection hors production », pour des raisons fiscales.

A la lumière de recherches récentes, aussi bien dans les Alpes que dans d'autres régions montagneuses, de nombreux auteurs (Mair, 1966 ; Schiechl, 1967), sont unanimes pour penser que dans les conditions naturelles, la zone de dislocation (« zone de combat ») est étroite et que les peuplements partout où les conditions édaphiques le permettent, devraient être fermés et denses. Dans cette zone de dislocation, on observe fréquemment des groupes d'arbres formant une seule et unique cime. Selon les essences, ces groupes sont composés de plusieurs individus issus d'un dépôt de graines (pin cembro) ou, comme c'est le cas chez l'épicéa, une colonie se forme par multiplication végétative (marcottage) (Kuoch et Amiet, 1970).

En ce qui concerne la production des forêts de l'étage subalpin, on peut constater d'une manière générale, que la production, dans la mesure où les peuplements sont fermés et ont une structure optimale, n'est pas négligeable ; le taux d'accroissement est de l'ordre de 1 à 2 % du matériel sur pied, et on rencontre des peuplements avec 500 à 600 m³/ha à l'âge de 140 à 150 ans. Vers la limite supérieure de la forêt, la production diminue fortement. Dans la mesure où les peuplements sont restés fermés, on trouve encore un volume de 150 à 250 m³/ha sur pied avec un accroissement courant de 1,5 à 4 m³/ha et par an. Mais, généralement ces peuplements sont disloqués et remontent sur les crêtes du micro relief, leur volume sur pied est de l'ordre de 80 à 100 m³/ha et la production dépasse rarement 1 à 2 m³/ha et par an. Il faut cependant souligner que l'état sanitaire des peuplements et la qualité des produits sont très satisfaisants.

CONCLUSION

Le reboisement de la haute montagne ne peut avoir de sens que s'il est envisagé comme un élément d'un programme intégré d'aménagement global de l'espace et des activités : économie, tourisme, sociologie rurale, sécurité de l'habitat et des infrastructures.

Dans ce cadre, les projets antiavalanches n'ont d'intérêt que s'ils doivent protéger des habitats importants ou des installations de valeur ; on ne peut envisager d'agir en chaque point de la montagne et il est souvent plus économique de déplacer une ferme ou un hameau que de les protéger. Encore faut-il que le cadastre des avalanches soit tenu à jour.

On ne peut envisager l'action des reboisements sur le départ des avalanches qu'à long terme : 50 à 60 ans avec un peu d'optimisme, vraisemblablement davantage (des reboisements de 10 à 12 ans ont à peine « démarré » à ces altitudes).

Il est donc absolument indispensable que les jeunes plantations soient elles-mêmes protégées des avalanches et de la reptation de la neige pendant 50 ans environ, par des ouvrages. L'avantage du reboisement sur les travaux classiques de génie civil réside en grande partie dans la possibilité de construire des ouvrages de durée de vie et d'entretien limitée, donc moins coûteux. On adjoint à ces ouvrages des installations plus légères de répartition de la neige.

L'extrême variabilité des conditions écologiques sur de petites surfaces conduit à n'envisager au début que le boisement de microstations relativement favorables : on ne plantera pas, dans un premier temps tout au moins, les couloirs avalancheux ni même les dépressions où la neige s'accumule et on attendra pour ce faire que les premières tranches de reboisements aient elles-mêmes exercé leur influence sur la répartition de la neige. Il faut de toute manière se persuader que le démarrage du reboisement sera lent et que de nombreux regarnis seront nécessaires.

Ces reboisements de protection ont un intérêt économique indirect : ils font passer les forêts situées au-dessous d'eux du stade de boisements de protection à celui de forêts envisageables pour la production. Une sylviculture convenable doit cependant être élaborée pour ce type de boisement.

Un gros effort de recherche est encore nécessaire avant de pouvoir agir à coup sûr. Nos Alpes du Nord et bien plus encore les Alpes du Sud ont des conditions écologiques très différentes de celles des Alpes autrichiennes ; les études approfondies déjà effectuées dans ces pays ne peuvent donc nous dispenser d'un effort dans ce sens. L'emploi de certaines essences exotiques dans ces conditions a été très insuffisamment expérimenté, même à l'étranger : or certaines peuvent se révéler plus intéressantes que les essences traditionnelles. L'emploi de certaines provenances françaises de *Pinus uncinata* mériterait également d'être essayé. On doit de toute façon être conscient que la recherche dans ce domaine sera coûteuse : la variabilité extrême, même sur de petites surfaces, des conditions écologiques, la lenteur de croissance des plants, la disparité des circonstances météorologiques d'une année à l'autre, rendent toute investigation lente et délicate. Il semble justifié cependant d'entreprendre ces travaux.

Michel ARBEZ Ingénieur du G.R.E.F. Chargé de recherche à l'I.N.R.A. Station d'amélioration des arbres forestiers au C.N.R.F. Champenoux, 54 - EINVILLE	Maurice BONNEAU Ingénieur en chef du G.R.E.F. Directeur de la Station des sols forestiers au C.N.R.F. Champenoux, 54 - EINVILLE	Helfried OSWALD Chargé de recherches C.N.R.F. Station de Sylviculture et de Production Champenoux, 54 - EINVILLE	André PONCET Ingénieur en chef du G.R.E.F. C.E.R.A.F.E.R. Domaine Universitaire B.P. 114 38 - ST-MARTIN-D'HÈRES
---	---	--	---

REMERCIEMENTS

Les données nécessaires à la rédaction de cet article ont été rassemblées au cours d'une mission en Autriche et en Suisse et nous tenons à remercier les praticiens et chercheurs qui nous ont reçus de leur très cordial et très instructif accueil :

Service R.T.M. du Tyrol : MM. HANAUSECK, chef du Service, ELISKASES, HOPF, LEYS, STAUDER.

Service des forêts du Tyrol : MM. HENSLE et MAIR.

Station de recherches forestières fédérale d'Autriche : le Professeur TRANQUILLINI (Directeur de la Station de recherches forestières pour la zone subalpine), Mme NEUWINGER, Mlle GÖLB, MM. HOLZER et STERN.

Institut fédéral suisse de recherches forestières : MM. TURNER et KELLER.

Institut fédéral suisse pour l'étude de la neige et des avalanches : M. IN DER GAND.

BIBLIOGRAPHIE

- AULITZKY (H.). — Über die lokalen Wind verhältnisse einer zentralalpiner Hangstation. *Archiv für Meteorologie, Geophysik, und Bioklimatologie*, vol. 6, 1955, pp. 353-373.
- BARADAT (Ph.). — Croissance comparée de différentes variétés d'épicéa (*Picea abies* Karst.) sous divers éclaircissements. — Publication interne du C.N.R.F., 1966. — 92 p.
- BERNARD (J.). — Verwehungsbeuten im Dienste von Lawinenvorbeugung und Aufforstung (In : Beiträge zur subalpinen Waldforschung). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 66, 1965, pp. 197-214.
- BOUVAREL (P.). — Observations sur la date de l'aoûttement de quelques provenances françaises d'épicéas. *Annales des sciences forestières*, tome XVIII, 1961, pp. 97-129.
- CALDWELL (M.). — The wind regime at the surface of the vegetation layer above timberline in the central Alps. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 87 Jahrgang, 1970, pp. 65-74.
- DONAUBAUER (E.). — Über die Schneeschüttekrankheit (*Phacium infestans* Karst.) der Zirbe (*Pinus cembra* L.) und einige Begleitpilze (In : Ökologische Untersuchungen in der subalpinen Stufe. Teil II). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 60, 1963, pp. 575-604.
- FRIEDEL (H.). — Gesetze der Niederschlagsverteilung im Hochgebirge. *Wetter und Leben*, vol. 4, 1952.
- FRIEDEL (H.). — Schneedeckenandauer und Vegetationsverteilung im Gelände (In : Ökologische Untersuchungen in der subalpinen Stufe. Teil I). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 59, 1961, pp. 317-369.
- FROMME (G.). — Der Waldrückgang im Oberinntal (Tirol). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 54, 1957, pp. 3-222.
- GÖBL (F.). — Die Zirbenmykorrhiza in Pflanzgärten. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 80 Jahrgang, 1963, pp. 20-30.
- GÖBL (F.). — Mykorrhiza-Untersuchungen in subalpinen Wäldern (In : Ökologie der alpinen Waldgrenze). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 75, 1967, pp. 335-356.
- GÖBL (F.), PLATZER (H.). — Düngung und Mykorrhizabildung bei Zirbenjungpflanzen. *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 74, 1967, 63 p.
- GÖBL (F.), PLATZER (H.). — Einfluss von Düngung und Mykorrhiza-Impfung auf das Wachstum von Fichtenjungpflanzen. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 85 Jahrgang, 1968, pp. 160-172.
- HOLZER (K.). — Winterliche Schäden an Zirben nahe der alpinen Baumgrenze. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 76 Jahrgang, 1959, pp. 232-244.
- HOLZER (K.). — Die Vererbung von physiologischen und morphologischen Eigenschaften der Fichte. I. Sämlingsuntersuchungen. *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 71, 1966, 185 p.
- HORAK (E.). — Pilzökologische Untersuchungen in der subalpinen Stufe (Piceetum subalpinum und Rhododendro-Vaccinietum) der Rätischen Alpen (Dismatal, Graubünden). *Mitteilungen schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, vol. 39, fasc. 1, 1963, pp. 1-112.
- IN DER GAND (H.). — Aufforstungsversuche an einem Gletschneehang. Ergebnisse der Winteruntersuchungen 1955/56 bis 1961/62. *Mitteilungen schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, vol. 44, fasc. 3, 1968, pp. 229-326.
- KELLER (T.). — Wuchsleistung, Gaswechsel, Überlebensprozente und Schneeschimmelpilzbefall gedüngter Ballenpflanzen an der oberen Waldgrenze. *Mitteilungen schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, vol. 46, fasc. 1, 1970, pp. 1-31.
- KRONFUSS (H.). — Das Kleinklima an einem entwaldeten Südhang im Sellraintal. *Allgemeine Forstzeitung*, 81 Jahrgang, n° 12, Dezember 1970, pp. 324-326.
- KRONFUSS (H.). — Räumliche Korrelation zwischen der Windstärke in Bodennähe und der Schneedeckenandauer. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 87 Jahrgang, 1970, pp. 99-116.
- KUOCH (R.). — Die Vegetation auf Stillberg (Dismatal, Graubünden). *Mitteilungen schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, vol. 46, fasc. 5, 1970, pp. 329-342.
- KUOCH (R.), AMIET (R.). — Die Verjüngung im Bereich der oberen Waldgrenze der Alpen. *Mitteilungen schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, vol. 46, fasc. 4, 1970, pp. 159-328.
- LENZ (O.). — Action de la neige et du gel sur les arbres de montagne, en particulier sur leur forme et l'anatomie de la tige. *Mitteilungen schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, vol. 43, fasc. 3, 1967, pp. 289-316.
- MAIR (N.). — Zuwachs- und Ertragsleistung subalpiner Wälder (In : Ökologie der alpinen Waldgrenze). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 75, 1967, pp. 383-426.
- AUTRICHE. Agriculture (Ministère). — Wildbach- und Lawinenvorbeugung im Zillertal (Tirol). — Vienne, Ministère de l'Agriculture, 1964. — 12 p.
- NÄGELI (W.). — Der Wind als Standortsfaktor bei Aufforstungen in der subalpinen Stufe (Stillbergalp im Dismatal). *Mitteilungen schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen* (sous presse. 1971).
- NEUWINGER (I.). — Wirkungen von Substrat und Düngung auf das Wachstum von Jungzirben. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 83 Jahrgang, 1964, pp. 173-192.
- NEUWINGER (I.). — Zum Nährstoffhaushalt in Vegetations-Einhelfen der subalpinen Entwaldungszone (In : Ökologie der alpinen Waldgrenze). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 75, 1967, pp. 269-303.
- NEUWINGER (I.). — Böden der subalpinen und alpinen Stufe in den Tiroler Alpen. *Mitteilungen der Ostalpine-dinarischen Gesellschaft für Vegetationskunde*, 11, 135-150, 1970.
- NEUWINGER-RASCHENDORFER (I.), CZELL (A.). — Böden in den Tiroler Zentraltälern (In : Ökologische Untersuchungen in der subalpinen Stufe. Teil I). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 59, 1961, pp. 371-410.

- OZENDA (P.). — Etat actuel (été 1964) de la cartographie de la végétation dans les Alpes Occidentales. *Angewandte Pflanzensoziologie*, tome XVIII/XIX, 1966, pp. 221-231.
- PRUTZER (E.). — Die Niederschlagsverhältnisse an der Waldgrenze (In : Ökologie der alpinen Waldgrenze). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 75, 1967, pp. 173-206.
- RABENSTEINER (G.), TRANQUILLINI (W.). — Die Bedeutung von Antitranspiranten und Wurzellfrischhaltemitteln für den Anwuchs Erfolg von Forstpflanzen. *Allgemeine Forstzeitung*, 81 Jahrgang, n° 12, Dezember 1970, pp. 319-320.
- SCHIECHTL (H.M.). — Die Folgen der Entwaldung am Beispiel des Finsingtales in Nordtirol. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 71 Jahrgang, 1954, pp. 13-28.
- SCHIECHTL (H.M.). — Grundlagen der Grünverbauung. *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 55, 1958, 273 p.
- SCHIECHTL (H.M.). — Die Vegetationskartierung im Rahmen der Wiederbewaldungsprobleme der subalpinen Stufe (In : Ökologische Untersuchungen in der subalpinen Stufe. Teil I). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 69, 1961, pp. 21-32.
- SCHIECHTL (H.M.). — Die Physiognomie der potentiellen natürlichen Waldgrenze und Folgerungen für die Praxis der Aufforstung in der subalpinen Stufe. (In : Ökologie der alpinen Waldgrenze). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 75, 1967, pp. 6-55.
- SCHIECHTL (H.M.). — Die Ermittlung der potentiellen Zirbenwaldfläche im Ötztal. *Mitteilungen der Ostalpin-dinarischen Gesellschaft für Vegetationskunde*, 11, 197-204, 1970.
- SCHLATTER (A.J.). — Die Aufforstungen und Verbauungen des Oberengadins in den Jahren 1875-1934. *Journal forestier suisse*, 86 Jahrgang, n° 9, sept. 1935, pp. 309-328.
- SCHMID (E.). — Vegetationskarte der Schweiz 1/200.000 (4 feuilles). — 1949.
- SCHMID (E.). — Erläuterungen zur Vegetationskarte der Schweiz. *Beiträge zur geobotanischen Landesaufnahme der Schweiz*, vol. 39, 1961.
- STERN (R.). — Anlage und Ergebnisse von Versuchspflanzungen in der subalpinen Entwaldungszone Nordtirols (In : Beiträge zur subalpinen Waldforschung). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 66, 1965, pp. 215-240.
- STERN (R.). — Der Waldrückgang im Wipptal. *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 70, 1966, 159 p.
- TRANQUILLINI (W.). — Die Frosthärte der Zirbe unter besonderer Berücksichtigung autochthoner und aus Forstgärten stammender Jungpflanzen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 77 Jahrgang, 1958, pp. 89-105.
- TRANQUILLINI (W.). — Der Jahresgang der CO₂-Assimilation junger Zirben (In : Ökologische Untersuchungen in der subalpinen Stufe. Teil II). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 60, 1963, pp. 501-534.
- TRANQUILLINI (W.). — Die CO₂-Jahresbilanz und die Stoffproduktion der Zirbe (In : Ökologische Untersuchungen in der subalpinen Stufe. Teil II). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 60, 1963, pp. 535-546.
- TRANQUILLINI (W.). — The physiology of plants at high altitudes. *Annual review of plant physiology*, vol. 15, 1964, pp. 345-362.
- TRANQUILLINI (W.). Das Phytocyclon, eine neuartige, vollklimatisierte Gaswechselmesskammer für Pflanzen. *Angewandte Botanik*, vol. 41, 1967, pp. 1-12.
- TRANQUILLINI (W.). — Photosynthese und Transpiration einiger Holzarten bei verschieden starkem Wind. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 86 Jahrgang, 1969, pp. 35-48.
- TURNER (H.). — Maximaltemperaturen oberflächennaher Bodenschichten an der alpinen Waldgrenze. *Wetter und Leben*, vol. 10, 1958, pp. 1-12.
- TURNER (H.). — Die Niederschlags- und Schneeverhältnisse (In : Ökologische Untersuchungen in der subalpinen Stufe. Teil I). *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn*, Heft 59, 1961, pp. 265-316.
- TURNER (H.). — Die globale Hangbestrahlung als Standortsfaktor bei Aufforstungen in der subalpinen Stufe. *Mitteilungen schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, vol. 42, fasc. 3, 1966, pp. 113-167.
- TURNER (H.). — Grundzüge der Hochgebirgsklimatologie. In : Die Welt der Alpen. — Innsbrück, Pinguin-Verlag, 1970.
- TURNER (H.). — Mikroklimatographie und Ihre Anwendung in der Ökologie der subalpinen Stufe. *Annalen der Meteorologie*, neue Folge n° 5, 1971, pp. 275-281.
- WAGNER (H.). — Ost- und West Alpen, ein pflanzengeographischer Vergleich. *Angewandte Pflanzensoziologie*, tome XVIII/XIX, 1966, pp. 265-278.