



**CEMAGREF**

4314

CELLULE DE DOCUMENTATION  
Forêt Médit et Incendie  
CEMAGREF  
B.P. 31 LE THOLONET  
13612 AIX-EN PROVENCE CEDEX 1  
Tél. : 42.28.93.10'

**LES REBOISEMENTS D'ALTITUDE**  
**RESULTATS ACTUELS DES EXPERIMENTATIONS**

**P. MULLENBACH**

avec la collaboration de :

**A. BEDECARRATS,  
JC. BROTONS,  
C. GUET,  
JP. PERNEY,  
H. LAPIERRE,  
N. SARDAT (dessins)**

**GROUPEMENT DE GRENOBLE**

**Division Protection contre les érosions**

**„P. 76 - 38402 St-MARTIN-d'HERES Cedex**

## **QUELS SONT LES BUTS DES REBOISEMENTS EN HAUTE ALTITUDE : FORETS DE PROTECTION**

Les objectifs assignés aux reboisements d'altitude sont multiples : fixer le manteau neigeux dans les zones de départ des avalanches, lutter contre la formation de congères et l'érosion superficielle, protéger les forêts de production sous-jacentes, recréer l'ambiance forestière, améliorer l'environnement paysager des stations touristiques. Mais la réussite de ces reboisements est souvent aléatoire et leur efficacité n'est réelle que dans le long terme. Aussi, sont-ils très complémentaires des ouvrages de génie civil réalisés pour répondre à un besoin urgent de protection d'enjeux socio-économiques importants ; les reboisements d'altitude prolongent dans le temps les effets de ces ouvrages, tels que râteliers paravalanches. Le prix de l'installation de ces derniers est de 1 500 000 F/ha environ et leur entretien en moyenne est de 15 000 F/an. Les dépenses concernant les reboisements d'altitude (sur banquettes) sont de l'ordre de 100 000 F/ha (4 000 plants/ha). Il faut tenir compte de l'obligation de regarnis, souvent importants.

La réussite de ces plantations d'altitude ne peut être obtenue sans une analyse fine des paramètres naturels du milieu, un choix motivé des espèces et des provenances et l'utilisation de techniques de plantation adaptées aux conditions de la haute montagne.

Cette étude a débuté en 1973 à la demande de Monsieur PONCET, responsable à l'époque de la division protection contre les érosions.

### **1 - CONDITIONS ECOLOGIQUES QUI CARACTERISENT LES STATIONS, HORS FORET (BIOTOPES), EN ALTITUDE A LA LIMITE SYLVESTRE**

#### **1.1 - Les causes de mortalité des plants, hors forêt, en altitude : plants non protégés par le manteau neigeux. Accidents climatiques - accidents physiologiques**

Dans les sites situés, hors forêt, en altitude, on peut faire les observations suivantes au sujet des jeunes plants forestiers colonisant naturellement ces zones ou mis en place sous la forme des reboisements d'altitude : c'est au cours de la fin de l'automne, l'hiver et du début du printemps, que l'on rencontre les phénomènes qui amènent la destruction des plants dans les sites difficiles à reboiser. Cela correspond à la période de repos. En altitude la sécheresse estivale n'est pas une cause de destruction, excepté dans les sites des Alpes du Sud, caractérisés par la pente, l'état minéral du sol et l'orientation à dominante sud.

##### 1.1.1 - La sécheresse physiologique

###### Figure 1

Le jeune plant, s'il n'est pas recouvert et protégé par le manteau neigeux, présente, malgré un arrêt presque total de son activité apparente, une évapotranspiration au niveau des aiguilles et de la jeune tige. Des recherches étrangères ont montré que, chez le Mélèze qui a perdu ses aiguilles, la perte d'eau au niveau de la jeune tige était beaucoup plus élevée que chez les conifères "classiques". Le sol, souvent humide, contient de l'eau, mais gelée, donc inutilisable. D'autre part, les racines ont un fonctionnement très limité aux températures rencontrées. L'appareil aérien se dessèche donc plus ou moins complètement, suivant l'intensité du phénomène. Un tel cas se rencontre dans les stations orientées au sud ou à orientation voisine et soumises à forte ventilation. Les Epicéas sont particulièrement sensibles à ce phénomène, sauf certaines provenances d'espèces exotiques et des écotypes de *Picea abies* sélectionnés en altitude dans des sites caractérisés par un enneigement très faible. Le Mélèze d'Europe, malgré le fait de perdre ses aiguilles en hiver, est également très perturbé, en particulier du fait de son aoûtement incomplet, provoqué soit par les conditions extrêmes rencontrées en haute altitude, soit par le choix d'une provenance inadéquate, ou soit par le fait de réaliser la culture en pépinière de moyenne altitude. On peut faire la même observation pour les trois phénomènes suivants.

##### 1.1.2 - Le gel cellulaire

Si les nouveaux tissus construits ont eu la possibilité de se former parfaitement (aoûtement) et si la résistance normale au froid a eu le temps de s'installer (mouvement des substances chimiques et

augmentation de la pression osmotique), le plant résiste à une forte baisse de température. Si cette dernière baisse encore, on observe le gel extra-cellulaire, au niveau des méats. Ce dernier type de gel est réversible, mais la plante souffre beaucoup si, du fait du rayonnement nocturne du sol et du rayonnement diurne, le tissu passe, au cours des semaines, journalièrement d'un état à l'autre (gel - dégel). Les orientations sud, sud-est sont défavorables dans ce cas. Si la température baisse encore, on observe le gel intracellulaire, cytoplasmique : la cellule et le tissu sont tués. Cela correspond à une déshydratation extrême.

### 1.1.3 - Rayonnement intense

Voir figure 1

Sur adret ou orientations voisines, le plant est soumis au rayonnement direct du soleil auquel s'ajoutent le rayonnement diffus dû à l'atmosphère et aux nuages et le rayonnement réfléchi sur la neige. Dans l'atmosphère sèche rencontrée dans les Alpes du Sud, la somme de ces rayonnements détruit les aiguilles. Cela correspond à une très forte déshydratation et à la destruction de la chlorophylle. La durée de l'ensoleillement dans ces régions en hiver rend ce phénomène destructeur. Les brûlures diverses se conjuguent avec le gel nocturne "matraquant" les plants et rendent leur survie aléatoire.

## 1.2 - Destruction des plants par les accidents mécaniques

### 1.2.1 - Déchaussement

Voir figure 1

Le manteau neigeux protège efficacement les jeunes plants quand son épaisseur "moyenne" varie de 0,5 m à 1,5 m et que sa durée est suffisante et continue.

### 1.2.2 - Déformation, écrasement et arrachement dus à la neige

Figure 3

Sur les pentes enneigées, on connaît bien le phénomène des arbres dont la base est en forme de crosse. Moins connu, est l'effet dévastateur dû à la surcharge de la neige (à partir de 1,5 m). L'arbre est écrasé au sol, puis forme une baïonnette, un demi-cercle, une boucle, etc. Le mouvement du manteau neigeux sur les pentes brise le tronc au collet, ou au-dessus, et arrache les branches situées en amont. Les branches aval, emprisonnées dans la neige, accentuent, par un effet de traction la déformation du tronc. Même des branches de 10 cm de diamètre, sur des grands arbres, peuvent être arrachées. La destruction de la flèche est une des explications données à l'existence extrêmement courante d'arbres présentant plusieurs troncs dont le départ se situe assez près du sol ou à la mi-hauteur.

Quand la pente dépasse 25 à 30°, même des arbres de 15 à 30 cm de diamètre au collet peuvent casser à la base, sous la poussée de la reptation du manteau neigeux.

Figure 2

Dans ce cas, l'arbre, non seulement à la base en crosse, mais n'est pas vertical et pousse en position inclinée dans le sens de la pente. Au fur et à mesure que l'arbre grandit la charge de la neige augmente. Finalement le bras de levier (tronc) et la charge en neige deviennent si importants que le tronc casse à la base.

### 1.2.3 - Autres effets physiques

Instabilité du sol. Glissements de terrain. Chutes de pierres et de rocher, avalanches, déformation, bris et chablis dus au vent, destructions dues au gibier, pâturages et skieurs.

### 1.3 - Réduction de la saison de végétation

#### 1.3.1 - La croissance

A la limite sylvestre naturelle (physiologique) et dans les sites à conditions extrêmes, la somme des calories disponibles pour le plant pendant la saison de végétation est faible et souvent la quantité de matière organique produite est insuffisante pour une bonne évolution du plant. La croissance est très lente, mais ce qui est tout particulièrement dommageable est la mauvaise formation des bourgeons, voire leur non formation si le printemps a été trop tardif. Les années "courtes" voient également la construction d'aiguilles dont la longueur n'est que de la moitié ou du quart.

#### 1.3.2 - Le débourrement et l'aoûtement

Le plant forestier peut être fortement lésé si, en automne, les tissus ne sont pas suffisamment "aoûtés", c'est-à-dire si la lignification n'est pas achevée. Quand une gelée précoce intervient, le bourgeon ou la pousse entière sont détruits. L'arbre, ultérieurement, présentera souvent plusieurs cimes. De la même manière, au printemps, les gelées tardives détruisent le bourgeon à son ouverture ou la jeune pousse. Dans les deux cas, cela correspond à une véritable "taille" de l'arbre. Il faut donc que l'écotype soit adapté à un débourrement tardif et à un aoûtement précoce.

Les pépinières se rencontrent, au mieux, en moyenne altitude. Au printemps, les sites à reboiser en altitude ne sont ni déneigés ni accessibles. Il y a donc un décalage entre le débourrement précoce en pépinière et l'époque de plantation. De même, en automne, les plants destinés au reboisement d'altitude doivent être disponibles en septembre. A cette époque l'aoûtement n'est pas toujours réalisé dans les pépinières de moyenne altitude, en particulier pour le Mélèze. Seul le choix de provenances sélectionnées et de techniques adaptées (en particulier les différents types de jauges) permet de réduire les inconvénients décrits.

### 1.4 - Floraison et fructification

La régénération naturelle est souvent très réduite dans les stations d'altitude où les mauvaises conditions climatiques entraînent une faible quantité de matière organique disponible pour la formation des bourgeons floraux, la destruction des fleurs matures et une mauvaise évolution de la graine. Plus on monte en altitude, moins le nombre de graines possédant un bon pouvoir germinatif est élevé. C'est une des raisons pour laquelle dans les stations à conditions extrêmes les reboisements d'altitude sont non seulement utilisés pour les sites situés hors forêt, mais également pour pallier à une régénération naturelle incomplète.

Les caractéristiques particulières des stations en altitude démontrent que les conditions écologiques auxquelles sont soumis les plants forestiers sont profondément différentes de celles rencontrées en moyenne montagne. Il faut donc préciser, de manière succincte, les conditions que l'on observe en haute montagne qui caractérisent l'écologie des stations : topographie, climatologie et milieu vivant. Cela permet, entre autre, de diriger le choix et la sélection au niveau des espèces et des provenances. Cela permet également de préciser les techniques culturales, de stockage et de mise en place des plants.

### 1.5 - L'altitude

C'est une donnée fondamentale. La valeur prise par les paramètres climatiques, les accidents physiques, les multiples interactions augmente en fonction de l'altitude. Exemple : précipitations sous forme solide ou liquide.

### 1.6 - L'orientation et la topographie

#### 1.6.1 - Orientation

Elle intervient au niveau du rayonnement : adret et ubac, de la température, de l'évapotranspiration, de la ventilation (situations au vent ou sous le vent). Elle agit sur la répartition des précipitations (pluie et neige) et intervient dans la notion de continentalité. Dans une certaine mesure, l'orientation nord diminue l'effet de la continentalité. L'orientation est un facteur important du climat régional et du microclimat. Le choix des espèces, l'époque de plantation, le positionnement du plant sur la banquette et le conditionnement des plants en dépendent.

## 1.6.2 - La topographie

Figures 3 et 10

Elle accentue et différencie les phénomènes précédents, ainsi que les autres paramètres écologiques (effet de mosaïque, interaction des différents facteurs). L'importance des masques est mise en évidence.

Ainsi on peut distinguer des zones défavorables au reboisement : les couloirs d'avalanches, de chutes de pierres, de zones d'érosion et de mouvements de terrain, les versants permettant l'accumulation et le mouvement du manteau neigeux, les zones à très long enneigement (attaque des champignons pathogènes), les zones à ensoleillement très faible et à accumulation d'air froid (replats et cuvettes). Il est également déconseillé de reboiser, dans un premier temps, les stations suivantes : sommets, cols, arêtes à forte ventilation, zones sous l'influence de glaciers ou dont le sol est trop mouilleur, trop peu profond, ou particulièrement squelettique. Ainsi, le mélèze à racines pivotantes, placé dans ces conditions, sera handicapé à partir d'un certain âge.

## 1.7 - le sol

En haute montagne les sols de pelouses et Landes subalpines sont en général jeunes, peu évolués, riches en matière organique car la minéralisation est souvent faible du fait des basses températures. Il y a superposition d'une action verticale (pédologie) et oblique (pente - géomorphologie). La nature du sol et ses qualités ont un rôle limitatif beaucoup plus faible que pour le phénomène de régénération naturelle en forêt. Une épaisseur de 30 cm peut être suffisante ; il est par contre essentiel que le substrat ait une matrice suffisamment fine. La compacité élevée des sols de pelouses (substrat peu perméable) est très défavorable à l'installation du plant, ce qui explique l'intérêt du pote travaillé.

Quand la matière organique ou (et) l'humidité manquent, on a recours aux espèces colonisatrices : Pin à crochets, Mélèze, etc... Il est fortement déconseillé d'installer une forêt sur des sols instables, à glissements prévisibles. Si la pente est faible, le drainage peut être un remède. Sinon, il faut se contenter d'introduire des arbustes ou des plantes basses.

## 1.8 - La végétation

Figure 3 bis

L'interprétation de la végétation basse nous donne de précieuses indications sur les caractéristiques écologiques des stations. Elle est en effet un excellent intégrateur. Malheureusement, elle n'intègre essentiellement que les conditions de milieu correspondant à la saison de végétation, car en période d'hiver les plantes basses sont protégées par la neige. Néanmoins, la connaissance des associations végétales nous renseigne sur la limite forestière (subalpin - alpin), l'abondance du manteau neigeux, la richesse en eau et la matière nutritive du sol.

La concurrence, provoquée par les plantes basses (eau, nutrition minérale, etc...) est très dommageable et doit donc être réduite au maximum (décapage du sol). La reconstitution d'une ambiance forestière aérienne se heurte aux conditions suivantes : humidité de l'air faible, ventilation, température et rayonnement souvent très élevés, mauvaise répartition de l'enneigement, glissement du manteau. Hors forêt, l'ambiance souterraine est également très différente : porosité, infiltration et aération faibles, érosion superficielle et aérienne, enracinement difficile, pénétration et attaque de la roche mère limitée. Hors forêt, les variations des paramètres climatiques sont très fortement amplifiées.

## 1.9 - Les précipitations

Figure 4

### 1.9.1 - Les précipitations liquides

Figure 5

Elles augmentent avec l'altitude et diminuent en fonction de la continentalité. En général, dans le subalpin elles sont suffisantes, excepté dans la partie la plus sèche des Alpes du sud. Les précipitations occultes (rosée, brume, givre, brouillard) peuvent dans certains cas, atteindre 400 mm d'eau par an. L'interception au niveau de la couronne des arbres peut elle atteindre 4 mm d'eau pour un épisode pluvieux (sur feuilles sèches) et 300 mm de neige. L'efficacité de la pluie dépend de la période annuelle, de l'effet de masque (vent - obstacles) de la perméabilité du sol, de la pente et des écoulements superficiels. Sa variation stationnelle dépend également de l'orientation et de la préparation du terrain : rôle de la banquette à la plantation. Les pluies déterminent l'importance de l'hygrométrie de l'air et représentent un volant thermique extrêmement important. La présence de gouttelettes dans l'air, ainsi que les poussières et les différentes particules, diminuent fortement le rayonnement. Son rôle est donc déterminant dans la notion de continentalité.

### 1.9.2 - Précipitations solides : neige

Le manteau neigeux, de part son rôle protecteur ou destructeur a une influence prépondérante.

#### 1.9.2.1 - Epaisseur, variation, répartitions : effet protecteur

Figures 6, 7, 2

La neige tombée au sol est redistribuée par le vent et s'accumule en fonction de la topographie, des accidents de terrain (masques : importance de la notion : au vent - sous le vent). Dessin 9. La vitesse de la fonte de la neige dépend de l'altitude, de l'orientation et des épisodes climatiques rencontrés sur le site. Sur le terrain, les épaisseurs de neige sont donc très variables. La répartition de la végétation matérialise ce phénomène sur le site. Les photos prises au printemps, quand le déneigement a atteint les 2/3 ou 3/4, sont également très révélatrices et utiles. Les zones encore enneigées ne doivent pas être reboisées dans un premier temps, à moins de disposer de techniques améliorant la répartition de la neige.

La protection apportée par la neige est assurée pour une épaisseur de 0,5 à 1,5 m et ceci suffisamment tôt et pas trop tard (réduction de la saison de végétation dans la saison). Son effet sur le végétal dépend, pour une part, de ses caractéristiques : légère, lourde, en mouvement, plus ou moins transformée. L'augmentation de la hauteur ou de la durée du manteau neigeux peut être obtenue à l'aide de barrières à neige ou de banquettes, destinées à retenir (reptation) et à accumuler la neige.

La forêt stabilise le manteau neigeux en facilitant une répartition régulière, en diminuant sa reptation (pente), en favorisant sa transformation et en retardant sa fonte.

#### 1.9.2.2 - Effet destructeur

Si la durée du manteau neigeux est trop longue, les plants sont souvent attaqués par des champignons : *Herpotrichia nigra*, *Plasmodium infectans* : aiguilles et branches d'un noir charbonneux, entraînant des destructions plus ou moins importantes et même la mort du jeune plant. Quand le manteau est trop épais ou en mouvement (pente), la neige arrache, écrase, déracine, casse, déforme les plants. L'avalanche détruit de nombreux arbres. La saison de végétation raccourcie ne permet plus la construction et l'existence de l'arbre.

Le choix des espèces et des techniques de reboisement dépend donc étroitement du paramètre précipitation.

## 1.10 - Le rayonnement

Figure 8

### 1.10.1 - Nature et variations

Le rayonnement augmente avec l'altitude, car la densité de l'air y est faible : eau, gaz, particules. Il varie en fonction de l'orientation (adret - ubac : biotopes radicalement différents). Cette variation est encore accentuée par l'effet de pente. Le rayonnement varie également suivant la situation géographique : continental, c'est-à-dire zone interne des chaînes montagneuses non situées sous l'influence des mers.

### 1.10.2 - Influence sur l'anatomie et la physiologie

La morphologie : les plantes d'altitude ont une morphologie toute particulière, qui est sous l'influence des rayonnements élevés et de la sécheresse relative rencontrée dans ces sites. La photosynthèse est élevée en montagne, et ceci dès que la température le permet. Un excès de rayonnement détruit la chlorophylle, dessèche les tissus et restreint la photosynthèse. Le manteau des aiguilles, qui enveloppe les couronnes, présente des conditions de photosynthèse plus élevées que celles rencontrées sous forêt (feuilles de lumière et feuilles d'ombre). Le sol peut atteindre parfois des températures de 80° (sols noirs organiques). Figure 8 bis. Le photopériodisme, caractérisé dans l'arc alpin par des jours courts, provoque une physiologie très différente de celle rencontrée dans le nord de l'Europe (jours longs). Le choix des provenances est donc différent.

### 1.10.3 - Rayonnement trop intense

Il provoque une déperdition en eau élevée, une fermeture des stomates qui entraîne une chute de la photosynthèse. Les phénomènes, déjà cités de sécheresse physiologique, irradiation trop intense (destruction de la chlorophylle), gel cellulaire et déchaussement sont liés à l'excès de rayonnement. La durée de l'ensoleillement, particulièrement dans les Alpes du sud, rend ce phénomène destructeur en hiver. Les brûlures diverses se conjuguent avec le gel nocturne "matraquant" les plants et rendent leur survie aléatoire.

Figure 1

De même que pour les paramètres cités antérieurement, on voit que les caractéristiques particulières du rayonnement en altitude nous obligent à un choix tout particulier quant aux espèces et aux techniques de reboisement.

## 1.11 - La température

Figure 1

La température détermine la longueur de la période de végétation et les très basses températures sont les causes principales des limites des aires de répartition des végétaux. Le choix des espèces (provenances) et des techniques est donc soumis à ce facteur.

### 1.11.1 - La température : facteur positif (essentiellement)

#### 1.11.1.1 - Rôle et interaction avec les autres facteurs

Elle intervient au niveau des phénomènes suivant : germination de la graine, ensemble des réactions physiologiques et de régulation de la plante, élaboration de la matière organique (tissus et organes), floraison, fructification, débourrement - aoûtement. Les provenances d'altitude débourent pour une quantité de calories plus faible que les provenances de basse altitude. (Voir rayonnement). Nous rappelons ici la notion : "arbre produit de luxe", si on la compare aux plantes basses. La température en utilisant comme vecteur le vent et la pluie est la cause majeure de la fonte de la neige.

### 1.11.1.2 - Variation de la température

Quand on s'élève en altitude de 100 m, la température baisse de 0,4° à 0,8°C. Les variations journalières sont particulièrement importantes dans les zones continentales, en adret et hors couvert forestier. Elles augmentent en été, pour une atmosphère sèche et pure et dans les biotopes situés loin de l'eau libre. Sur une même horizontale elle varie en fonction de l'orientation, de la topographie, de la géomorphologie, de la qualité et de la couleur du sol, de la présence de glaciers et de névés. Elle est étroitement liée à la ventilation et aux chutes de pluie et neige.

### 1.11.2 - Gel et basses températures

Ces phénomènes ont une importance prépondérante en ce qui concerne la répartition des végétaux. (Séquences de températures anormalement basses). le gel dans les tissus cellulaires (déshydratation) et le déchaussement sont responsables de gros dégâts. Les très basses températures pénalisent les débourrements précoces et les aoûtements tardifs ainsi que les sites sensibles aux gelées tardives. L'ensemble des phénomènes ayant trait à la régénération naturelle sont pénalisés par les températures défavorables.

## 1.12 - Le vent

Son action intervient au niveau d'un grand nombre de facteurs

Figures 6, 9

### 1.12.1 - Facteur physique

Il existe un grand nombre de vents soumis soit à la climatologie générale, soit au mésoclimat : brises de montagne, de vallée, de versant, foehn. Au niveau du sol (0 - 30 cm) son intensité est en général beaucoup plus faible. Ses caractéristiques sont la direction, la régularité, la vitesse (en forêt elle représente 15 % de la vitesse à découvert), sa distance au sol. La présence ou non d'un masque change complètement les données ; en particulier, le vent déplace et transporte la neige, forme des congères et augmente l'érosion et la dessiccation des sols et des plantes. Sa répartition dépend également de l'orientation (versants ouest humides). Associé aux fortes températures, il peut faire disparaître la neige très rapidement.

### 1.12.2 - Le vent et la physiologie

Son action est déterminante en ce qui concerne la forme des arbres. Il est responsable des chablis et de la formation des arbres (bois de compression et de tension). La pollinisation et la dissémination des graines en dépendent également. Par le brassage de l'air, il régularise les fortes ou faibles températures, la concentration en CO<sub>2</sub> et en eau (de l'air). Son optimal se situe de 0,5 m/s à 4 m/s. En déplaçant le manteau neigeux protecteur, il favorise ou défavorise le développement des plants. La répartition des végétaux en dépend.

## 1.13 - La limite sylvestre

Figures 10, 11, 12, 13

Zone de combat ou de démantèlement de la forêt. Ces zones sont particulièrement difficiles à reboiser ; il en est de même des zones situées plus bas, mais où les conditions sont extrêmes. Dans ces cas, il est nécessaire de faire une très bonne étude des conditions écologiques du site ; de veiller tout particulièrement au choix des espèces et des provenances et d'utiliser au maximum les apports et avantages apportés par les techniques. La matérialisation, sur le terrain, de la limite sylvestre potentielle (physiologique) est d'une grande utilité : elle détermine le niveau extrême des reboisements et marque la limite entre le subalpin et l'alpin. Il faut garder à l'esprit que les forêts situées à la limite sylvestre protègent efficacement les forêts sous-jacentes.

## 1.14 - Conclusion

De la complexité du milieu étudié, il ressort que chaque site présente des caractéristiques bien précises et particulières, c'est-à-dire que nous sommes en présence d'un milieu souvent hétérogène, matérialisé par une mosaïque plus ou moins complexe et soumis à des facteurs liés et inter-réagissant entre eux. L'étude du milieu écologique des stations est donc indispensable si l'on veut avoir une réponse pour les questions fondamentales suivantes : pourcentage de survie et croissance des plants forestiers, limite des aires de répartition des espèces, choix des espèces et provenances adaptées, acclimatation nécessaire des plants, dommages dus aux facteurs climatiques et importance des accidents mécaniques dus aux facteurs physiques, choix des techniques.

## 1.15 - Essais de classement des facteurs : comment approcher un biotope

Figure 4

Face à une station qui doit être reboisée, dans quel ordre doit on considérer les facteurs ? Il n'est pas toujours possible de faire un classement, mais il est impératif de les prendre tous en compte, même si certains se révèlent, pour un site donné, sans importance.

Il faut tout d'abord déterminer deux choses : le reboisement est-il absolument nécessaire (forêts de protection) ou non ? Ensuite, si oui, sommes-nous à la limite sylvestre ou dans une station à conditions extrêmes, ou, au contraire les conditions ne sont-elles que moyennement difficiles ? Cela détermine l'ampleur de l'effort à consentir : analyse sérieuse des conditions du milieu (écologie de la station), sélection plus ou moins stricte des espèces et des provenances, utilisation de techniques sophistiquées ou non.

En premier lieu, la climatologie générale nous indiquera si nous sommes dans les Alpes françaises du nord, les Alpes intermédiaires ou les Alpes du sud, et notre position par rapport au facteur continentalité : continental (partie interne des chaînes de montagne, éloignée des mers), semi-continental ou sous influence marine. Les Pyrénées orientales peuvent se rattacher aux Alpes du sud et la partie centrale et atlantique aux Alpes du nord.

Puis, il faut considérer la topographie : situation de pente ou non, l'hétérogénéité du terrain, l'orientation (le nord diminue l'effet de la continentalité), puis les effets dépressifs de certaines situations : effets de col, de sommet, de glaciers, chutes de pierres (voir limite sylvestre). Ensuite, il faut prendre en compte les précipitations (quantitatif) et leur nature : eau ou neige. Cette dernière, suivant son épaisseur a une action protectrice (jusqu'à 1,5 - 2 cm), ou destructrice (voir neige). Le vent agit sur la répartition de la neige (effet déterminant) et de la pluie, modifie les effets de la température et du rayonnement. Le sol, suivant qu'il est squelettique, riche, humifère, sec, pentu, demande l'utilisation d'espèces colonisatrices, climatiques... Les autres plantes, provoquent une forte concurrence (choix des espèces) et par leur présence nous renseignent sur les possibilités qui existent pour la réinstallation des arbres. Les accès au site et les risques de pâturage sont également des données intéressantes. Il faut alors finalement conjuguer ces différentes données et tenir compte de ces indications pour le choix des espèces (provenances) et des techniques.

## 2 - LES ESPECES

Voir figures 4 et 4 bis

Pour la réussite des reboisements en conditions difficiles, l'étude des caractéristiques écologiques des espèces est de première importance. En effet, seule la sélection de provenances (de certaines espèces aptes à coloniser les biotopes d'altitude) peut nous permettre d'éviter un échec. Les caractéristiques écologiques des sites à reboiser et des sites dont sont issues les graines des plants à utiliser doivent présenter une forte analogie. Nous avons réalisé différentes expériences à ce sujet en ce qui concerne les autochtones et les exotiques.

### 2.1 - Origine des graines - Expérimentation : Mélèze, Epicéa commun, Pin à crochets

En ce qui concerne le Mélèze nous avons réalisé quelques expériences et montré que, seul le Mélèze d'altitude des Alpes du sud était à retenir si l'on reboise dans les Alpes du sud. Pour l'Epicéa, deux expérimentations (Alpe d'Huez) : les provenances d'altitude et de sites à faible enneigement sont significativement supérieures pour les Alpes du sud. Le Pin à crochets : les provenances d'altitude,

sélectionnées par l'INRA, se sont révélées significativement supérieures aux origines d'altitude inférieure.

## 2.2 - Les quatre espèces autochtones (description sommaire)

### 2.2.1 - Pinus cembra (Arole - Cembro - Auvier)

Son aire de répartition (qui est très morcelée dans les Alpes françaises) est limitée aux Alpes, dans la partie continentale et semi-continentale du subalpin. Il peut exister à plus basse altitude, mais il est très sensible à la concurrence des autres arbres. Le Cembro remonte aux altitudes extrêmes et souvent en compagnie du Mélèze (2500 m). Sa croissance est très lente, sa longévité grande (400 ans) et sa fertilité régulière. La présence de casses noix améliore énormément l'importance de la régénération naturelle. La plantule reste herbacée, jusqu'à 3 ans, puis la croissance devient plus élevée voire assez élevée au delà de 20 - 30 ans. L'enracinement situé en surface ou semi-pivotant, est important. Il reforme facilement sa flèche.

Sa physiologie : il est particulièrement bien adapté à la haute altitude : basses températures, rayonnement et ventilation élevés, période de végétation courte ; la photosynthèse peut se réaliser sous un éclaircissement moyen, ce qui permet une régénération naturelle en forêt (climacique). Sa transpiration est réduite et il est particulièrement sensible aux fortes températures dans son jeune âge. Ces adaptations aux mauvaises conditions climatiques permettent au P. cembro de disposer d'une période de végétation étendue : avril - mai à novembre. Si l'hygrométrie et la matière organique sont suffisants, il peut se développer même sur gypse. Une bonne mycorhization de ses racines est indispensable. Il prospère mieux sur ubac qu'en adret.

Le Cembro n'est pas un colonisateur. Il doit être planté dans des sites ni trop secs, ni trop chauds, le sol doit contenir de la matière organique et les mycorhizes adéquates. A la plantation, sa taille ne doit pas être inférieure à 25 cm et la plantation à l'aide de godet est indispensable. C'est une excellente espèce de haute altitude.

### 2.2.2 - Pinus uncinata, Pin à crochets (origine France)

L'aire de répartition est très vaste. Il colonise le montagnard et le subalpin et peut constituer la limite sylvestre dans les Pyrénées (2700 m) et dans les Alpes du sud, sur terrain très chaud et sec. C'est une espèce de deuxième grandeur, qui est représentée par un grand nombre d'écotypes, qui passent de l'arbuste prostré, en cépées, aux multiples cimes et branches inclinées vers le sol à l'arbre au fut droit. On observe une mortalité régulière à tous les âges. Cette longévité relativement faible (surtout en moyenne montagne de 150 à 250 ans), pose un problème au reboiseur. Sur forte pente, son port couché, enseveli sous la neige, fait de lui une essence peu apte à lutter contre la reptation du manteau neigeux.

Sa croissance juvénile est bonne, le tronc est souple, l'enracinement puissant mais relativement traçant. Il supporte une ombre légère, ce qui lui permet de se régénérer sous lui-même. Sa résistance à la chaleur et à la sécheresse est grande, mais à très haute altitude, il résiste moins bien aux attaques climatiques que le Pin cembro. Le débourrement est précoce et les pousses sont rarement détruites par les gelées tardives. L'espèce est indifférente à l'orientation, à la topographie, à la nature du sol et à l'excès d'humidité du sol. Il fructifie abondamment et colonise facilement les sites hors forêt.

Pour conclure, c'est une espèce à très grande amplitude. C'est un très bon colonisateur, malheureusement relativement peu longévif et qui se déforme aisément sous le poids de la neige. Sa venue est meilleure dans les Alpes du sud et les Pyrénées que dans les Alpes du nord françaises.

### 2.2.3 - Picea abies : l'Epicéa commun

L'aire de répartition de l'Epicéa est vaste, mais morcelée. Il peut former la limite sylvestre dans la zone préalpine et semi-continentale des Alpes du nord. Du fait de sa grande plasticité on rencontre de nombreux écotypes. Les provenances d'altitude sont significativement meilleures pour les reboisements en conditions difficiles et présentent de nettes différences tant au point de vue anatomique que physiologique. Les provenances de très hautes altitudes ont une croissance réduite de moitié dans les stades juvéniles. Il en est de même d'ailleurs pour les espèces exotiques dont nous parlerons ultérieurement. Le système racinaire est puissant, traçant, mais si le sol est profond, il peut prospecter en profondeur.

Espèce de demi-ombre, il peut à l'état adulte vivre en peuplements très fermés. La luminosité au sol est alors très faible et l'humus, non décomposé, atteint une forte épaisseur ; la régénération naturelle devient alors impossible. A l'état jeune, ils sont très sensibles à la sécheresse physiologique, à l'excès de rayonnement et au froid. Un mauvais aoûtement augmente les risques. A l'état adulte il résiste bien au froid. Sa protection contre la transpiration est bonne. En altitude on ne rencontre pas de pousses d'août et en conditions extrêmes sa croissance peut être très fortement réduite : hauteur 2 à 3 m, diamètre 7 cm pour 100 ans. Il supporte mal la sécheresse et l'eau doit lui parvenir pendant toute l'année de végétation, accompagnée d'une atmosphère humide. Il a un comportement de colonisateur sur les terrains situés hors forêt, humides et non compactes. Son sol préféré est acide, mais si l'eau est présente il se contente de sols calcaires. La fertilisation azotée, comme pour les autres espèces si elle augmente la croissance, augmente également la sensibilité au froid. Si la végétation concurrente est très développée (lumière, eau, azote) l'Epicéa doit être dégagé annuellement (Savoie). Le semis direct est peu pratiqué, car peu efficace alors que la culture en pépinière est très facile. La plantation printanière doit être préférée dans les sites peu enneigés (adret). Sur banquettes, ils faut alors le planter en amont. Il est très utile pour la fixation du manteau neigeux sur les terrains pentus, car son tronc et son collet sont très résistants. Dans les Alpes du nord, on peut le planter en ubac et en adret, dans les Alpes du sud il faut lui réserver les zones préalpines et semi-continrentales et les faces nord à l'extrémité sud des Alpes.

#### 2.2.4 - Larix europea : Mélèze d'Europe

Voir figure 4

L'aire de répartition est extrêmement vaste et il existe de nombreux écotypes. Il faut réserver cette essence aux zones a, b, a', b'. Sa croissance est rapide jusqu'à 60 ans et son système racinaire, pivotant extrêmement puissant. Il est donc absolument nécessaire de la réserver pour des sols suffisamment profonds. Le débourrement a lieu avant la poussée radiculaire. La flèche se reforme facilement. L'écorce, à l'état juvénile, est très mince, et protège très peu le plant contre les déperditions en eau. C'est une essence très longévine et qui dans les Alpes du sud constitue souvent la limite sylvestre (avec le Pin cembro).

Fréquemment déformé par le vent (houppier), le Mélèze résiste très bien aux très basses températures. Seul un aoûtement incomplet le rend sensible aux différentes attaques climatiques hivernales. Les pousses prennent alors un aspect desséché. La photosynthèse est importante à condition que le degré hygrométrique de l'air soit faible et le sol riche en eau, car sa transpiration est extrêmement élevée, malgré la faible importance de son feuillage. Du fait de son manque d'aiguilles en hiver, le Mélèze craint peu la neige. Il redoute beaucoup la concurrence herbacée. La très grande souplesse de son tronc lui permet d'en supporter de grosses quantités. Si la pente est supérieure à 30°, il a tendance à pousser dans le sens de la pente, sinon, à former une crosse à la base. Quand l'eau manque dans le sol, il se cantonne sur ubac. La nature du sol lui est indifférente, mais il craint la matière organique et prospère bien dans les lithosols bien approvisionnés en eau (très bon colonisateur). S'il est planté en godets, le substrat ne doit contenir que très peu de matière organique. La régénération naturelle est très difficile, car la graine est très petite et reste piégée dans les touffes d'herbes concurrentes. Pour les Alpes du sud, seule une origine locale d'altitude peut amener des résultats satisfaisants. En automne les Mélèzes provenant des pépinières de moyenne altitude sont rarement d'aoûtés. Il est préférable de le planter au printemps, à condition de le maintenir en chambre froide (au printemps) ou en jauge en altitude. Cette espèce est fortement attaquée par le bétail.

#### 2.3 - Choix des espèces en fonction des stations (autochtones)

Voir figure 4

Dans l'arc alpin, on ne dispose que de quatre espèces. Leurs facultés de reprise sont variables suivant les sites. Ces derniers ont des caractéristiques écologiques originales. Pour garantir la réussite dans une station il faut :

2.3.1 - Introduire plusieurs espèces en mélange, de manière à créer des forêts stables (et jardinées). Elles réduisent les attaques parasitaires, permettent d'exploiter toute la potentialité du milieu (climatologie, système racinaire, nutrition). Les espèces peuvent se protéger mutuellement et évoluer vers des forêts climaciques.

### 2.3.2 - Tenir compte des aires de répartition des espèces

- Deux espèces, zone climatique c' + c (nord de Die) : Epicéa et Pin à crochets c' et c (Sapin).
- Deux + (une) espèces, zone climatique b + b' : Epicéa (au nord de Die) et Pin à crochets (Pin cembro) + (en prévision, le Sapin).
- Trois espèces, zone climatique a : Mélèze, Pin cembro, Pin à crochets. Une quatrième en zone a' : l'Epicéa.

### 2.3.3 - Choisir des espèces colonisatrices et (ou) climaciques

- Au plus, trois colonisateurs : Mélèze (zones a + a' et parfois b + b'), Pin à crochets, Epicéa (zones a' + b' + c' et b + c).
- Au plus, trois climaciques : Pin cembro (zones a + a' et b + b'), Pin à crochets (très forte isolation, lumière et sécheresse moyenne du sol, forêt suffisamment claires), Epicéa (hors forêt) (zones a' et b + b' c' + c au nord de Die) + (en prévision, le Sapin).

### 2.3.4 - Préférer des espèces offrant des possibilités de régénération naturelle

- Bonne régénération. Deux espèces : Pin cembro (zones a + a' et b + b') Pin à crochets (peuplements suffisamment clairs) + (en prévision le Sapin).
- Régénération difficile en forêt fermée : Epicéa.
- Régénération très difficile en forêt : Mélèze.

### 2.3.5 - Tenir compte de l'action et de la réaction par rapport au facteur neige

- Interception, transformation : Mélèze très peu efficace.
- Reptation, enfouissement : Epicéa le plus efficace.
- Départ d'avalanches dans le peuplement : Mélèze peu efficace.
- Dégâts dus à la neige : bris, arrachements de branches
  - . Epicéa : très sensible                    stade
  - . Mélèze : très peu sensible            jeune

Pour le stade perchis (0 collet 20 cm), le classement est inversé sur très fortes pentes. L'Epicéa est efficace, le Mélèze à tendance à pousser dans le sens de la pente.

- Risque de passages d'avalanches de poudreuse : partant au-dessus du boisement. Mélèze très peu endommagé.

### 2.3.6 - Prendre en compte l'orientation

- Adret : Mélèze sur sol humide, Pin à crochets (Epicéa et Sapin dans les Alpes du nord).
- ubac : Pin cembro, Epicéa (et Sapin) Alpes du sud - Mélèze (sur sols suffisamment humides) dans les Alpes du sud.

On voit que le choix est très limité pour une station. On comprend également le rôle que peuvent jouer les conifères exotiques : augmentation du nombre d'espèces disponibles pour une station et aider à la constitution de forêts d'altitude, du moins dans la phase colonisatrice de première génération.

## 2.4 - Les conifères exotiques

### 2.4.1 - Les limites à l'utilisation des conifères exotiques

- Leur utilisation devrait être limitée au stade colonisateur : certains pourraient mieux résister au milieu découvert, croître plus rapidement (Pinus contorta).
- Leur longévité n'est pas connue. Le Picea pungens paraît être peu longévif. C'est un point important, car le coût des reboisements sont élevés.
- Croissance à l'état juvénile (en pépinières et les 10-15 premières années). Pendant les 4 à 5 premières années (pépinière) la croissance des exotiques d'altitude est 2 à 3 fois plus lente que celles des conifères de moyenne altitude (autochtones). Elle est de l'ordre de celle du Pin cembro. Il faut donc attendre 5 à 7 ans avant de pouvoir les mettre en place. Cela entraîne un coût plus élevé pour l'obtention d'un plant de 20 à 25 cm de hauteur.
- Les expérimentations ne portent, à ce jour, que sur l'état juvénile (15 à 18 ans maximum).

- La réaction à la présence ou non du manteau neigeux protecteur hivernal et à son action physique sur les plants n'est pas bien connue, car les reboisements sont trop jeunes.
- Les stations où l'enneigement est faible ou (et) de courte durée sont défavorables à toutes les espèces, et tout particulièrement aux Epicéas exotiques.
- La réaction aux neiges lourdes, collantes et aux vents (chablis) n'est pas connue.
- Le comportement des exotiques par rapport à la reptation et au glissement du manteau neigeux (influence de la pente) et les dommages dus à l'écrasement sont également inconnus.
- La sensibilité des plants au moment où leur bourgeon terminal émerge du manteau neigeux, phase extrêmement préjudiciable, n'est pas connue pour bon nombre d'espèces (car elles sont à l'heure actuelle ou trop petites ou proches de cette phase). Seules certaines provenances de Pinus contorta, Picea engelmanni et Tsuga mertensiana ont victorieusement passé ce cap dangereux.
- Les hivers sans neige : exemple 1988-89 (dans le passé : 1920-21, 1948-49, 1963-64). Dans l'ensemble des expérimentations (Alpes du sud et intermédiaires) les dégâts ont été considérables. Certaines espèces et provenances sont parfois totalement détruites. Une provenance de Picea engelmanni, une d'Abies lasiocarpa, la grande majorité des Pinus contorta et quelques plants par provenances, suivant les sites, des Picea glauca, Picea mariana et Picea sitchensis, ont parfaitement résisté. Il faut remarquer que les Epicéas autochtones ont également fortement souffert, et même certains qui étaient âgés de 10 à 15 ans (voire plus). Les Pins à crochets et les Pins cembro ont également été endommagés.
- La régénération : on ne possède pas d'observations pour les zones d'altitude. Ce problème est très important pour la stabilité et la durée des forêts. L'étude de l'Abies lasiocarpa prend ici toute sa valeur.
- L'abrouissement : Le Picea pungens paraît nettement moins attaqué que les autres espèces. Ses aiguilles très fortement piquantes rebutent le gibier et les bêtes d'élevage, sauf au moment du débourrement et jusqu'en août.
- Le comportement des espèces aux attaques des champignons et insectes est peu connu.

#### 2.4.2 - Le choix des espèces et des provenances des conifères exotiques sélectionnés

On a recherché, dans les zones montagneuses du globe, les régions de climatologie voisine. L'analogie entre latitude et altitude a également été exploitée. Nord Canadien, Montagnes Rocheuses, montagnes continentales de la Chine, Sibérie, Manchourie, Caucase, Balkans. Monsieur PONCET, alors responsable de la division protection contre les érosions et Monsieur LACAZE, responsable de ces problèmes à l'INRA ont réalisé le choix. L'INRA a fourni les plants, âgés de 2 à 3 ans. Ils ont été repiqués et cultivés dans une pépinière de moyenne altitude (1100 m) dans les Alpes du sud (pépinière ROBIN). La mise en place, dans les dispositifs expérimentaux s'est faite à l'âge de 6 à 7 ans et a débuté en 1973.

Les espèces testées (30 espèces, 200 provenances) sont :

- Larix laricina, L. europea,
- Picea glauca, P. abies, P. glehnii, P. engelmanni, P. rubens, P. pungens, P. sitchensis, P. mariana, P. orientalis, P. omorica, P. asperata,
- Pinus concorta, P. cembra, P. uncinata, P. aristata, P. Strobus, P. leucodermis, P. excelsa, P. ponderosa, P. résinosa, P. peuce,
- Abies lasiocarpa, A. grandis, A. veitchii, A. concolor,
- Tsuga mertensiana - Cedrus atlantica.

#### 2.4.3 - Expérimentation

Les services ONF gestion et RTM ont gracieusement mis en place les reboisements. Nous les remercions pour cet aide si utile. La plupart des expérimentations ont été réalisées suivant un plant statistique (randomisation). La taille de l'échantillon était variable (nombre de plants offerts et problèmes culturels) et est de l'ordre de 50 à 500. Quand cela n'a pas été possible nous avons simplement constitué des collections de plants. Des témoins (autochtones) ont également été mis en place.

La prise de mesures, réalisée 2 à 3 ans après la plantation consistait en mesures quantitatives : hauteur totale, pousse terminale, parfois latérale, diamètre au collet et observations qualitatives : état du plant : bon, médiocre, mort, descente de cime, jaunissement, nombre de tiges ou apex, état sanitaire ; dans certains cas, débourrement et aoûtement. Les mesures furent réalisées par des étudiants, sous le contrôle de techniciens du CEMAGREF, dont le travail a été très apprécié : Messieurs BROTONS, BEDECARATS, LAPIERRE et PERNEY.

Les données furent traitées au CEMAGREF, avec l'aide du CICG (domaine universitaire). Les traitements ont été effectués par Madame GUET, Messieurs BEDECARRATS et BROTONS. Leur aide nous a été extrêmement utile. Les résultats de 45 expériences traitant, soit de comparaison entre espèces ou provenances d'exotiques, soit de comparaison entre différentes techniques intéressant les reboisements d'altitude sont disponibles, sous forme de fiches (10 - 20 pages) au CEMAGREF. Pour chaque site expérimental, une analyse des caractéristiques écologiques de la station en question a été faite.

#### 2.4.4 - Résultats observés avant les hivers, sans neige, de 1988-1989 et 1989-1990

Au cours de ces hivers, l'absence du manteau neigeux protecteur, a causé de très grands dommages parmi les dispositifs expérimentaux, tant au niveau des conifères exotiques que des autochtones. Dans le chapitre 2.3.5, nous indiquerons les espèces (provenances) que l'on peut recommander sans risques.

##### 2.4.4.1 - Espèces bien venantes :

- Larix laricina : croissance en pépinière extrêmement élevée (pouvant aller jusqu'à 1 m par an). Tronc et branches plus fines que *L. europea*. Pourcentage de survie élevé. (Pyrénées orientales 2000 m),
- Pinus contorta (latifolia) : c'est avec le *Picea engelmanni*, les meilleures espèces, supérieures aux autochtones pour le pourcentage de reprise, la bonne venue, la croissance et la résistance aux agressions climatiques (certaines provenances). Le *P. contorta* a une croissance élevée et très régulière d'une année à l'autre (30 cm). L'enracinement est important. La flèche peut être détruite en moyenne altitude, soit par un débourrement trop précoce, soit par une attaque de la tordeuse du Pin. La flèche se reforme très bien. Port droit,
- Pinus peuce : résultats semblables au *P. cembro*, voire légèrement supérieurs (croissance, résistance aux agressions climatiques).
- Pinus leucodermis : bons résultats dans la zone C à 1400 m d'altitude,
- Picea engelmanni : résultats excellents en haute altitude. Impropre en zone plus basse (1500 m). Croissance régulière, assez forte. Gros diamètre, couronne bien fournie. Résiste très bien (certaines provenances) au manque d'enneigement. Peu attaqué par *Herpotrichia nigra*,
- Picea pungens : résultats bons, croissance très lente ; longévité considérée comme faible (bibliographie). Arbre très trapu et fourni. Peu attaqué par le gibier et le bétail,
- Picea glauca : croissance moyenne, houppier étroit, nombreuses aiguilles relativement courtes. peu attaqué par *Herpotrichia nigra*.
- Abies lasiocarpa : très intéressante espèce. Croissance moyenne à forte, trapue, bien fournie. Elle peut être plantée à découvert. Certaines provenances sont peu gênées par l'absence de manteau neigeux protecteur. L'*A. lasiocarpa* doit être plantée à des altitudes supérieures à 1500 m,
- Tsuga mertensiana : le pourcentage de réussite est extrêmement élevé et cette espèce est très peu sensible aux agressions climatiques. De croissance très lente, son port est prostré (à l'état jeune) et elle est particulièrement sensible à la concurrence végétale. Cette espèce ne doit être utilisée qu'en altitude (au-dessus de 1500 m) et paraît craindre la chaleur.

##### 2.4.4.2 - Espèces ayant donné des résultats moyens

*Picea glehnii* (insensible à la concurrence végétale) (croissance très lente), *P. mariana*, *P. rubens*, *P. orientalis*, *P. sitchensis*, *Abies concolor*, *A. grandis*. Les autres espèces paraissent incapables de coloniser les sites d'altitude.

#### 2.4.5 - Espèces pouvant être retenues et très bien venantes après les séquences des hivers sans neige de 1988-1989 et 1989-1990

Les quatre espèces suivantes donnent, en général, des résultats supérieurs aux meilleurs autochtones.

##### 2.4.5.1 - *Pinus contorta*

*L'aire de répartition correspond à la région nord-ouest de l'Amérique du nord et est relativement vaste. L'espèce est représentée par quatre formes géographiques principales. De ce fait,*

on rencontre le *Pinus contorta* à des altitudes très différentes : 100 à 3500 m et en des sites géographiques passant du bord de la mer (prépondérance de l'influence hydrique) aux sites représentés par les hautes chaînes continentales des Montagnes Rocheuses (caractérisés par une très forte luminosité, une sécheresse importante, de très basses températures et à l'influence due à l'enneigement)... en passant par les chaînes côtières à altitude relativement élevée, dont les caractéristiques sont intermédiaires. Les provenances testées proviennent de différents sites géographiques des régions continentales.

Provenances : Colombie britannique (2000 m), Colombie britannique (1200 m), Washington (1300 m), Montana (1500 m), Orégon (1400 m) et Californie (2400 m) et le *P. contorta latifolia* du commerce. La croissance est très forte, voire, trop forte. Les risques de bris de tronc sont à prévoir. Il serait intéressant, au vue de la résistance extraordinaire que présente cette essence vis-à-vis des agressions climatiques, de sélectionner des provenances à croissance plus lente. Cette espèce peut être plantée, sans gros risques, dans les Alpes françaises et les Pyrénées.

#### 2.4.5.2 - *Picea engelmanni*

*Cette espèce est localisée dans la partie ouest de l'Amérique du nord et occupe une aire relativement vaste mais morcelée. Au Canada, on la rencontre à des altitudes de 300 à 2000 m, alors que dans le sud des Montagnes Rocheuses elle oscille entre 1000 à 3500 m. Elle est très résistante au froid.*

Elle est aussi performante que le *P. contorta*. Sa croissance est moyenne et son tronc très résistant. Provenances : Idaho (2100 m) dont les flèches dépassant le manteau neigeux protecteur ont évolué normalement, Montana (1200 m), Montana (2500 m), Utah (3470 m), Orégon (1800 m). Le *Picea engelmanni* peut être conseillé dans les Alpes et les Pyrénées. Il doit être planté en altitude (au-dessus de 1500 m).

#### 2.4.5.3 - *Abies lasiocarpa*

*Espèce qui présente une aire de répartition très vaste, située dans le nord-ouest de l'Amérique du nord, de l'Alaska à l'Arizona. Altitude 1500-3300 m (dans la partie centrale des Montagnes Rocheuses). A la plantation la protection apportée par l'ambiance forestière ne paraît pas absolument indispensable pour cette espèce.*

Très bons résultats, peu sensible au gelées tardives. Provenances : Montana (1700 m), Idaho (2110 m), Utah (3200 m), Colorado (3100 m). Il est conseillé de planter cette espèce seulement en altitude et dans des sites suffisamment enneigés. Le terrain ne doit être, ni trop sec, ni trop continental et à orientation sud.

#### 2.4.5.4 - *Tsuga mertensiana*

*Cette espèce occupe les chaînes côtières (de l'Alaska à l'Orégon) et les chaînes situées immédiatement à l'est (de la Colombie britannique à la Californie). On la rencontre de 0 m (Alaska) jusqu'à 3000 m (chaînes plus continentales). Dans ce cas, comme essence subalpine, elle peut constituer la limite sylvestre. Arbre de petite taille (15 m), qui offre souvent un aspect rampant à l'état jeune.*

Californie (2620 m). Très bons résultats, voir paragraphe 2.4.4.1 (fin).

Dans une moindre mesure, on peut également conseiller les espèces suivantes.

#### 2.4.5.5 - *Picea pungens* (voir paragraphe 2.4.4.1)

*Espèce cantonnée dans la partie médiane des Montagnes Rocheuses de l'Amérique du nord. Altitude : 1500-3500 m. Introduite en France depuis un siècle, et assez bien connue en ce qui concerne son acclimatation en France. Par rapport à l'*Epicéa commun*, on observe les différences suivantes : sa croissance est réduite d'un tiers (à 1/2). Il a donc un aspect plus trapu et sa couronne est plus dense. L'ensemble du plant est plus rigide et résiste mieux à la reptation du manteau neigeux. Les aiguilles sur leurs axes forment une brosse cylindrique très touffue. Elles sont plus épaisses, rigides et piquantes (un peu moins attaquées par les ovins). Quand la flèche est détruite, il s'en forme très facilement une nouvelle, mais le tronc acquiert un développement en baïonnette très caractéristique. Son amplitude est plus grande en ce qui concerne ses besoins en eau. Il paraît mieux résister à la sécheresse physiologique, aux grands froids ainsi qu'aux excès de rayonnement et il est légèrement moins attaqué*

par les champignons parasites qui se développent dans le manteau neigeux au printemps (*Phacidium infectans* et *Herpotrichia nigra*) et est également moins sensible au Chermès de l'Épicéa. Comme l'Épicéa commun, il est parfois brûlé par les gelées tardives du printemps. C'est sa longévité chez nous qui peut poser un problème, car il n'y a pas encore de peuplements réellement âgés et on observe parfois une décrépitude relativement précoce (60-80 ans).

Provenances : Colorado (2000 m et 2500 m), Arizona (2000-2500 m), Utah. Il ne faut pas planter cette espèce dans les sites à enneigement insuffisant, trop secs et dans les zones continentales : a, trop strictes.

#### 2.4.5.6 - Pinus peuce

Originnaire des Balkans, son aire de répartition est peu étendue. On le rencontre de 1600 à 2200 m d'altitude sur des sols qui peuvent ne pas être riches. Il peut, à lui seul, constituer la limite sylvestre. Sa résistance au froid est très grande. Les caractéristiques climatiques des stations à Pinus peuce sont : température annuelle moyenne de +4°C à +2°C. Température absolue minimum : -31°C. Pluviosité annuelle générale de 870 mm à 1160 mm. Humidité relative de l'air 75 à 81 %. Il ne paraît pas sensible à la Rouille vésiculeuse du Pin. Dans nos collections, au Lautaret (zone a), le comportement de cette espèce est analogue à celle de *P. cembra* (culture sans mycorhization artificielle). Sa résistance aux conditions climatiques dommageables (haute altitude), sa croissance, la rectitude de son fût sont plutôt supérieures à celles offertes par le *P. cembra*. L'hiver 1988-89 sans neige au sol ne l'a pas fortement handicapé.

Il peut être utilisé dans les stations et avec les techniques du Pin cembro (voir paragraphe 2.4.4.1).

#### 2.4.5.7 - Larix laricina (voir paragraphe 2.4.4.1)

Espèce transcontinentale de l'Amérique du nord. Elle peut former la limite sylvestre septentrionale. Aux USA (sud-est) elle descend vers le sud jusqu'à 40° de latitude, et au Canada (ouest) jusqu'à 50°. En altitude (Montagnes Rocheuses) cette espèce peut monter jusqu'à 3000 m. Elle est rustique.

Provenances : New Hampshire et Québec. Sa croissance en pépinière peut être si élevée qu'il est nécessaire de rabattre la cime pour rétablir l'équilibre du plant. Mis en place sur sol très humide il a, au stade jeune, également une croissance particulièrement forte.

Remarque : Nous disposons, pour les différentes espèces et provenances citées, les origines précises des graines : altitude, longitude et latitude.

### 3 - LES TECHNIQUES FAVORISANT LA REPRISE DES REBOISEMENTS D'ALTITUDE

Nous avons vu que pour la réussite des reboisements en conditions difficiles, il était indispensable d'analyser les caractéristiques écologiques du site à reboiser (première partie) et de sélectionner rigoureusement les espèces et provenances (deuxième partie). L'ensemble des techniques doivent être également étudiées et perfectionnées, de manière à concourir à la réussite des boisements : culture des plants en pépinière ; transport ; conditionnement, conteneurs (godets) ; caractéristiques des plants d'altitude ; fertilisation ; mycorhization (Pin cembro) ; modes de plantation. Conditionnement, jauges, place du plant sur la banquette, mise ne place au coup de pioche et en potet, pralinage, groupement des plants, protection des plants par le paillage, godets - racines nues, types de jauge et mise ne jauge, plantation printanière et automnale ; banquettes et potets (caractéristiques) ; influence du sol (humidité, préparation), de l'enneigement, du vent et de l'époque de plantation.

#### 3.1 - Expérimentation

Nous avons réalisé diverses expériences qui permettent de répondre à certaines de ces questions.

##### 3.1.1 - Le pralinage

Expérimentation au Chazelet (Hautes-Alpes). Dispositif XIII. Orientation sud-ouest. 2000 m. Pente 25°. Mélange eau-terre argileuse. Mélèze - Pin à crochets. Amélioration statistiquement confirmée. Remarque : il faut secouer énergiquement le plant de manière à éviter que les racines ne

restent collées entre elles et ne forment un faisceau empêchant un développement harmonieux du système racinaire dans toutes les directions.

### 3.1.2 - Fertilisation

Font Romeu III (Pyrénées-Orientales). 2100 m. Terrain plat. Sud sud-est à sud. Epicéas communs en godets. Résultats significativement supérieurs. Remarque : pour le Mélèze la fertilisation est contre indiquée, en particulier sous forme de matière organique (voir paragraphe 3.1.4). L'apport d'azote, sous forme minérale est dangereux pour les conifères, car il diminue la résistance au froid.

### 3.1.3 - Mycorhization : Pin cembro

Col de Larches (Alpes-de-Haute-Provence). 2300 m. Sud-ouest. Pente faible. Les plants mycorhizés, en godets, sont significativement supérieurs. Les mycorhizes provenaient de champignons, de type bolets, récoltés en altitude dans des forêts de P. cembro. Remarque : la pérennité des mycorhizes, installées sur les racines, n'est pas garantie, car il y a concurrence avec les champignons déjà en place.

### 3.1.4 - Paillage

Il permet de diminuer les pertes en eau du sol et réduit les risques de gel des racines. La concurrence végétale et les fortes augmentations de température du sol (été) sont amoindries.

Chazelet (Hautes-Alpes). 2000 m. Sud-est. Pente 25°. Pour le Pin à crochets, l'Epicéa commun et l'Epicéa pungens, les résultats sont bons, mais non significativement meilleurs. Pour le Mélèze (Autriche) le paillage est significativement inférieur. Nous savons, par ailleurs, que l'apport de matière organique est défavorable pour cette espèce. Cette technique est conseillée (mais non démontrée) pour le Pin cembro.

### 3.1.5 - Barrière à neige

Une figure 9

Chazelet XVII (Hautes-Alpes). 1900 m. Sud-ouest. Pente 20°. Mélèzes à racines nues. L'augmentation de l'épaisseur du manteau neigeux protecteur diminue significativement le pourcentage de mortalité. La barrière augmente également, par ce fait, les réserves en eau du sol (automne, printemps). En été, la barrière provoque une diminution de la ventilation, ce qui amène une diminution de la perte en eau du plant et du sol (évapotranspiration) et une augmentation de la photosynthèse.

### 3.1.6 - Jauge d'altitude

La Salette II (Corps - Isère -). 2000 m. Sud. Pente 20°. Au printemps, les plants en pépinière, en moyenne altitude, débourent alors qu'en haute altitude les routes d'accès ne sont pas ouvertes et les sites souvent encore enneigés. En pépinière, on utilise une chambre froide pour atténuer ce problème. Expérimentation : on réalise une jauge en altitude où l'on met en place les plants en automne. L'Epicéa pungens donne des résultats significativement supérieurs avec la chambre froide, le Pin à crochets est indifférent, le Mélèze d'Autriche donne des résultats significativement supérieurs pour les plants issus de la jauge d'altitude. En effet, en chambre froide, le Mélèze commence à débouurer très tôt car une température de 0,5° est suffisante pour cette espèce. Il est donc conseillé d'utiliser une jauge d'altitude pour le Mélèze.

### 3.1.7 - Pépinière de repiquage d'altitude (une saison de végétation)

La Salette I (Corps - Isère -). 1800 m. Sud. Pente 20°. Le Pin à crochets, cultivé pendant un été en altitude et planté en automne (racines nues) est significativement supérieur à ceux cultivés en moyenne altitude. En altitude, le Pin à crochets a pu s'acclimater pendant une saison aux dures conditions climatiques rencontrées en altitude. On peut raisonnablement penser que si une espèce aussi plastique et résistante a bénéficié d'une amélioration, il en est de même pour les autres espèces. Cette méthode favorise également un aoûtement précoce en altitude et met le plant en équilibre avec le site à

reboiser. C'est particulièrement important pour le Mélèze qui est rarement aoûté quand il provient de la moyenne altitude (pépinière).

Remarque : les plants cultivés en altitude ont une croissance plus faible pendant leur séjour en altitude (repiquage) que ceux (témoins) cultivés en pépinière de moyenne altitude.

### 3.1.8 - Plantation automnale - Plantation printanière

En automne, l'accessibilité du lieu de reboisement est aisée, ce qui n'est pas toujours le cas pour la plantation printanière. Par contre, le plant mis en place en automne subit au cours du premier hiver l'ensemble des conditions défavorables (climatiques + dégâts mécaniques) rencontrées en altitude et ceci sans avoir pu développer son système racinaire, ni acclimater son appareil aérien au site.

3.1.8.1 - La Morte (- Isère - Matheysine). 1950 m. Nord. Pente 30°. Les Mélèzes, Pins à crochets, Epicéas pungens et E. Communs plantés au printemps donnent des résultats significativement supérieurs à ceux plantés en automne.

3.1.8.2 - Chazelet XII (Hautes-Alpes). Sud-est. 2000 m. Pente 20°. Orientation sud-est. Les Pins à crochets et Epicéas pungens plantés au printemps sont significativement supérieurs. On peut admettre que comme sur les versants nord, il est préférable de planter sur pente au sud au printemps, car les agressions climatiques hivernales sont beaucoup plus fortes encore au sud qu'au nord.

### 3.1.9 - Position du plant sur la banquette

Voir figure 5

L'enneigement est plus important en épaisseur et en durée au fond de la banquette (côté amont) que vers l'aval. Suivant l'orientation, l'effet sur les espèces est différent.

3.1.9.1 - Orientation sud-ouest, Chazelet XVI. 2000 m. Pente 25°. Les Epicéas pungens et les Mélèzes plantés en amont sont de bien meilleure venue que ceux plantés en aval (significatif).

3.1.9.2 - Orientation sud-est, Chazelet VIII (Hautes-Alpes). 2000 m. Pente 25°. Les Mélèzes (non significatif) et les Pins à crochets (significatif) sont supérieurs en position amont. (Enneigement plus élevé et de plus grande durée).

3.1.9.3 - Orientation sud-est, Chazelet X (Hautes-Alpes). 2000 m. Pente 30°. L'Epicéa commun et le Pin à crochets sont de meilleure venue (significatif) en position amont.

3.1.9.4 - Orientation nord, Lamorte (- Isère - Mathesyne). 2000 m. Pente 30°. Toutes les espèces : Epicéa commun, E. pungens, Mélèze et Pin à crochets sont de meilleure venue en position aval (significatif).

En conclusion, il faut planter en position amont toutes les espèces (surtout les Epicéas) en face sud et assimilée et en zone à faible enneigement. Au contraire, en face nord (ou en zone très fortement enneigée) il est conseillé de planter toutes les espèces en aval, car sinon les plants ne disposent pas d'une saison de végétation suffisamment longue et sont, par ailleurs, attaqués (sous la neige) pas le champignon Herpotrichia nigra.

### 3.1.10 - Auto-protection des plants : trois plants, à racines nues, groupés en triangle de 15 cm de côté

L'observation sur le terrain montre que la régénération naturelle se réalise plus aisément quand les très jeunes plants sont groupés en touffe. Expérimentation : groupement de trois plants dans un triangle de 10 à 15 cm de côté comparé à un plant à racines nues, égalité de prix avec un godet.

3.1.10.1 - Chazelet VIII (Hautes-Alpes). 2000 m. Sud. Pente 25°. Amélioration significative de la reprise pour les plants testés : Mélèze et Pin à crochets.

3.1.10.2 - Chazelet X. 2000 m. Sud-est. Pente 25°. Plants testés : Pin à crochets, Epicéa commun et E. pungens, Mélèze. Technique meilleure (significatif).

3.1.10.3 - Chazelet XVI. 2050 m. Sud-ouest. Pente 20°. Amélioration significative pour le Pin à crochets, le Mélèze et l'Epicéa pungens.

3.1.10.4 - Font Romeu I (Pyrénées-Orientales). 2000 m. Sud, sud-est. Pente faible. Plants testés : Mélèze, Epicéa commun, Pin cembro, Pin à crochets. Amélioration significative de la reprise pour le Mélèze, le Pin à crochets et l'Epicéa commun. Amélioration non significative pour le Pin cembro. Cette espèce doit être plantée en godets.

3.1.10.5 - Fond Romeu III. 2100 m. Sud, sud-est à sud. Pente très faible. Espèces testées : Mélèze et Epicéa commun. Technique significativement meilleure.

3.1.10.6 - Guillestre (Hautes-Alpes). 2150 m. Sud. Pente 15° à 20°. Espèces : Mélèze et Pin à crochets : significativement meilleures. Pin cembro : résultats significativement moins bons. Ici, sur un sol très pauvre et très sec il est probable qu'il y ait, pour cette espèce, une concurrence vis-à-vis de l'eau au niveau des appareils racinaires trop rapprochés.

La technique du groupement par trois est donc vivement conseillée (sauf pour le Pin cembro en terrain pauvre et très sec) car :

- elle améliore la bonne venue de la plupart des espèces (significatif) ;

- il reste sur le terrain toujours au moins un plant dans le potet et très souvent deux. Le problème des regarnis est ainsi éliminé et le reboisement reste de densité uniforme.

Remarque : cette technique, non expérimentée en face nord, y est probablement beaucoup moins utile quant à l'effet "auto-protection". Il garde néanmoins l'avantage en ce qui concerne la densité future du reboisement.

### 3.1.11 - Effet godet, comparaison avec un plant à racines nues : choc dû à la transplantation

Dans les différentes expériences réalisées, quelque soit l'orientation et le sol (même pour les sols riches), pour toutes les espèces, sauf le Mélèze (il craint la matière organique), la plantation en godet est significativement meilleure que la plantation à racines nues. Pour le Mélèze il serait intéressant de disposer de godets contenant très peu de matière organique. Si l'on compare la plantation en godet au groupement de trois plants à racines nues dans un triangle (auto-protection : paragraphe 3.1.10), le godet donne de meilleurs résultats, mais ultérieurement le terrain est occupé par un nombre bien moins important de plants. Les deux modes de plantation présentent un coût semblable.

Avantages et inconvénients du godet : La plantation peut avoir lieu toute l'année. Au printemps il faut mettre les godets très tôt en altitude, sinon les plants risquent de débousser en pépinière. La reprise des plants est fortement améliorée à condition que le godet ait un volume en rapport avec la taille du plant (au moins 0,5 l pour un plant de 20 cm). L'économie en eau est mieux assurée (arrosage avant plantation). L'apport d'un bon substrat et le cas échéant d'éléments fertilisants est favorable. Si le godet est suffisamment grand, on peut retarder d'une année la plantation. Les inconvénients majeurs sont : prix et poids élevés, obligation de mise en place soigneuse, risque d'interruption des liaisons hydriques avec le sol en place et évaporation au niveau des parois.

### 3.1.12 - Comparaison entre les types de godets

Font Romeu III. 2100 m. Pente très faible. Sud sud-est à sud. Espèces utilisées : Mélèze et Epicéa commun. On a comparé le godet type Robin (constitué de caisses à alvéoles en polystyrène expansé), le Fertil-pot (tourbe et carton comprimé), le sac en plastique perforé, le Melfert et le Paper-pot. Le godet Robin est significativement meilleur, puis vient le Fertil-pot, le sac en plastique, le Paper-pot et finalement le Melfert, significativement moins bon. L'inconvénient du Fertil-pot est le danger, si le godet n'est pas suffisamment enfoncé, de faire mèche à la partie supérieure et de se dessécher très rapidement. Le fond, très résistant, a tendance à empêcher la pénétration des racines. Le Paper-pot est fragile et de peu de durée.

Remarque : Nous rappelons qu'il serait intéressant de disposer pour le Mélèze d'un substrat peu organique et que le Pin cembro doit toujours être planté en godets.

### 3.1.13 - Comparaison de la plantation au coup de pioche et en potet

Deux expérimentations ont montré que la plantation en potet est significativement meilleure.

### 3.2 - Indications concernant les problèmes au sujet desquels nous ne disposons pas de résultats expérimentaux

#### 3.2.1 - La morphologie et la physiologie du plant destiné au reboisement d'altitude

Figure 14

Pour résister aux différentes agressions climatiques et aux dégâts mécaniques, le plant "d'altitude" doit présenter certaines caractéristiques. L'appareil aérien doit être trapu, touffu, les entre noeuds courts, les aiguilles nombreuses. Par rapport à sa hauteur, le tronc doit être court et le collet le plus épais possible. L'appareil racinaire sera important et dense, pourvu de nombreuses petites racines et radicules, réparties dans un volume dont la hauteur n'excédera pas 20 à 25 cm à partir du collet. En effet, à la plantation on doit raccourcir les racines et de les ramener à une longueur n'excédant pas 25 cm, de manière à éviter la constitution d'un système racinaire en crosse. Pour obtenir ces résultats on espace suffisamment les plants en pépinière. On réalise plusieurs repiquages. Si les plants doivent rester en pépinière plus longtemps que prévu, on soulève les plants à la machine de manière à briser les racines, ce qui permet d'éviter le développement exagéré de l'appareil aérien et souterrain. En pépinière, on évite les arrosages fréquents et on limite les apports en azote. (Résistance au froid). Si l'appareil aérien a pris un développement vraiment exagéré, il est préférable, malgré tout, de couper la dernière pousse à 2 cm au-dessus du verticille, ce qui aura pour effet de rééquilibrer le plant (Mélèze).

#### 3.2.2 - La hauteur des plants à la plantation

Deux cas sont à envisager :

- pour un reboisement "normal" en altitude, la hauteur des plants doit se situer entre 20 à 35 cm. Le Pin cembro ne doit en aucun cas être planté à une taille inférieure ;
- pour les plants à vocation paysagère ou destinés à la constitution de bandes "boisées" "anti congères", situations où l'on demande une action rapide, la taille peut aller jusqu'à 1 - 1,2 m. Le plant doit être cultivé en conteneurs (grands godets) dont la taille soit en rapport avec l'appareil aérien.

#### 3.2.3 - La banquette

Elle sera préférée au potet dans les cas suivants :

- danger de reptation du manteau neigeux sur les pentes ;
- excès de la concurrence végétale avoisinante et site à pluviosité réduite (infiltration des pluies rare). Dans les stations pourvues de sols riches et très riches, il est préférable de les construire un hiver avant les plantations. Si le sol est instable, ou trop érodé, il est préférable de réaliser la plantation sous forme de lignes de potets.

#### 3.2.4 - La densité de plantation

Il est nécessaire de faire une discrimination très nette entre les sites qui peuvent être effectivement reboisés et les autres : cols, sommets, crêtes, soumis au vent, combes enneigées, zones avalanches et à chutes de pierres (voir limite sylvestre).

3.2.4.1 - Plantation en plein : en station "facile" 5 000 plants/ha, en station "difficile" 10 000 voire 20 000 plants/ha.

3.2.4.2 - En conditions difficiles, après avoir sélectionné les meilleurs emplacements, il est préférable d'utiliser l'effet d'auto-protection des plants et de planter trois plants dans un triangle de 15 cm de côté. On "occupe" ainsi moins de terrain mais les chances de reprise sont bien meilleures. Si on ne peut disposer, pour une certaine surface, que d'un nombre limité de plants, on regroupera ces plants sur de faibles surfaces, choisies parmi les meilleures, de manière à constituer des groupes ou bouquets plus ou moins importants (collectifs). Dans les zones soumises à une forte ventilation, on réalise un reboisement en réseau constitué de mailles à forte densité.

#### 3.2.4.3 - Sur banquettes

Pour bénéficier au maximum de "l'effet banquettes", il est préférable de planter à forte densité sur ces dernières et laisser les inter banquettes vides.

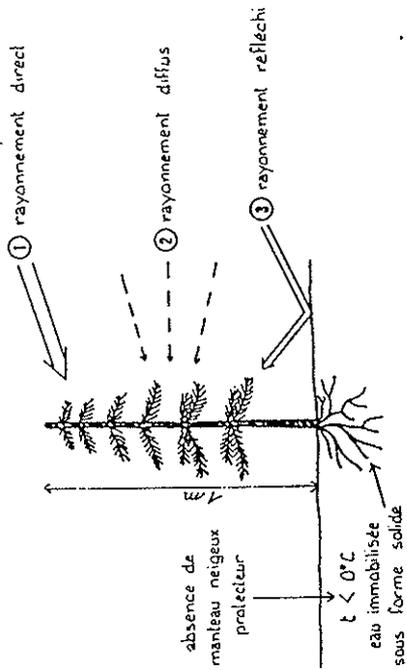
### 3.2.5 - Arrêts en "catastrophe" de chantiers de reboisement

Les conditions climatiques automnales ou printanières provoquent des situations où il est impossible de continuer la mise en place des plants. Il est donc impératif d'étudier, avant de commencer le reboisement, les solutions permettant de garder les plants en bon état : emplacement des jauges de "durée", transport des godets en pleine, ...

#### CONCLUSION

Si l'on veut améliorer la reprise et la bonne venue d'un reboisement en conditions difficiles il est absolument indispensable d'effectuer une analyse des conditions écologiques, caractéristiques et originale de la station à reboiser. L'utilisation de recettes n'est pas, à notre avis, à envisager, car les facteurs sont nombreux, interdépendants et leur importance est variable d'un site à l'autre. On recherche ensuite au niveau des espèces (provenances) les deux ou trois (au minimum) écotypes convenant le mieux. Puis, à l'aide de techniques éprouvées et convenant au site étudié, (culture en pépinière, conditionnement, substrat, transport, types de jauges, mise en place, soins culturaux), on réalise le reboisement.

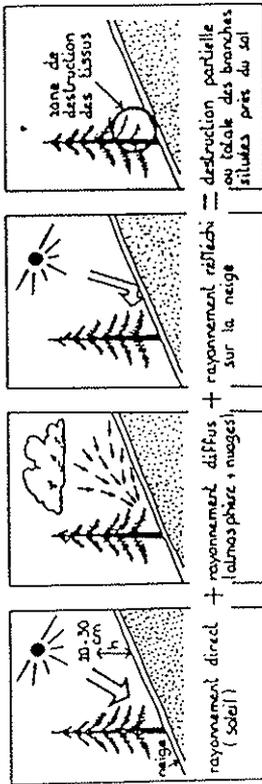
Sécheresse physiologique = déficit hydrique



Le rayonnement intense ①+②+③ provoque en hiver une légère perte d'eau au niveau des aiguilles et du tronc. L'eau fixée à l'état solide dans le sol et le très faible fondonnement racinaire ne peuvent compenser le déficit hydrique du plant.

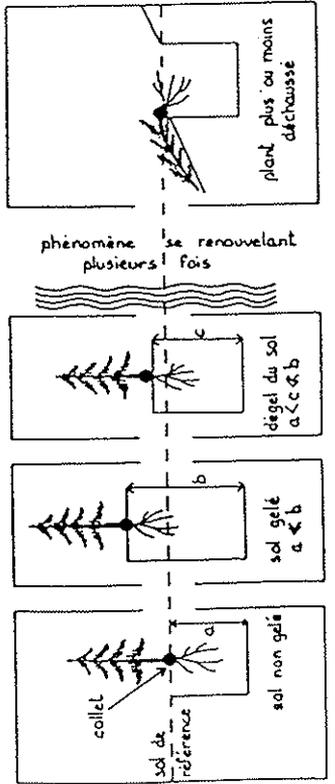
DESTRUCTION DES TISSUS DUE AU RAYONNEMENT INTENSE

(phénomène rencontré en orientation Sud ou assomilé)

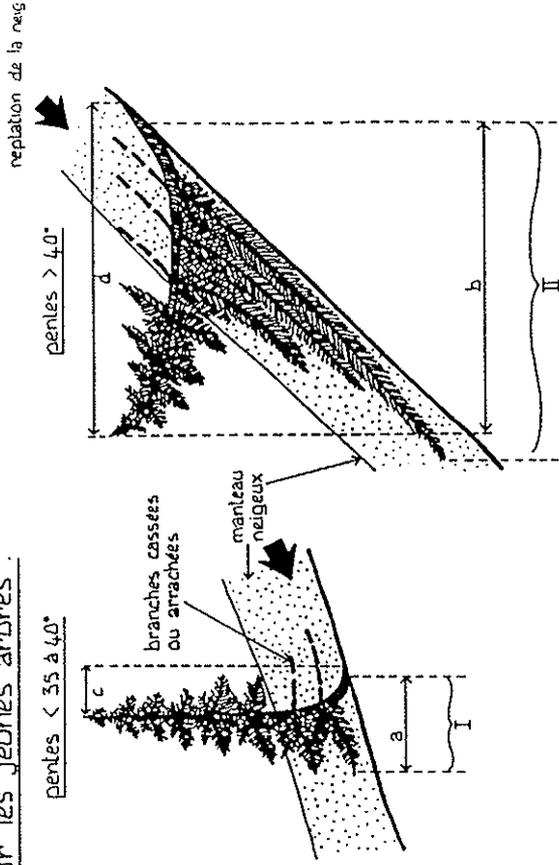


DECHAUSSEMENT

(phénomène intéressant les plants à faible enracinement - longueur des racines 5-15cm - situés en face Sud ou assomilé, sur des sols minéraux, schisteux, humides et non organiques)



Action du poids et de la reptation de la neige sur les jeunes arbres :

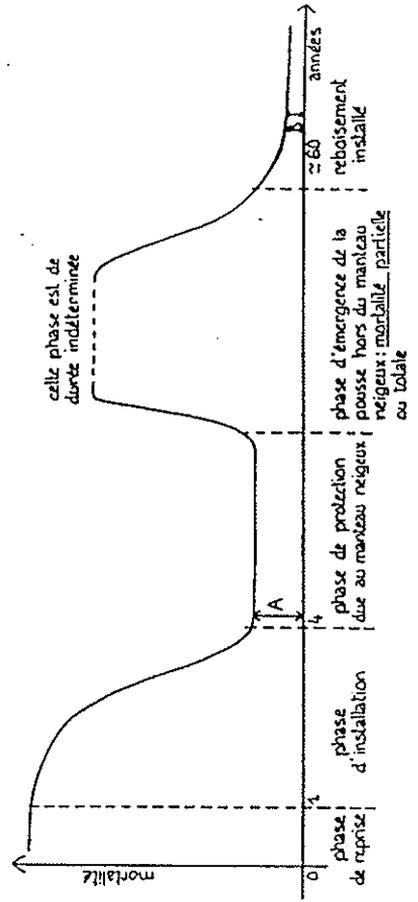


I et II : zones où les branches sont piégées dans le manteau neigeux (reptation) I <<< II

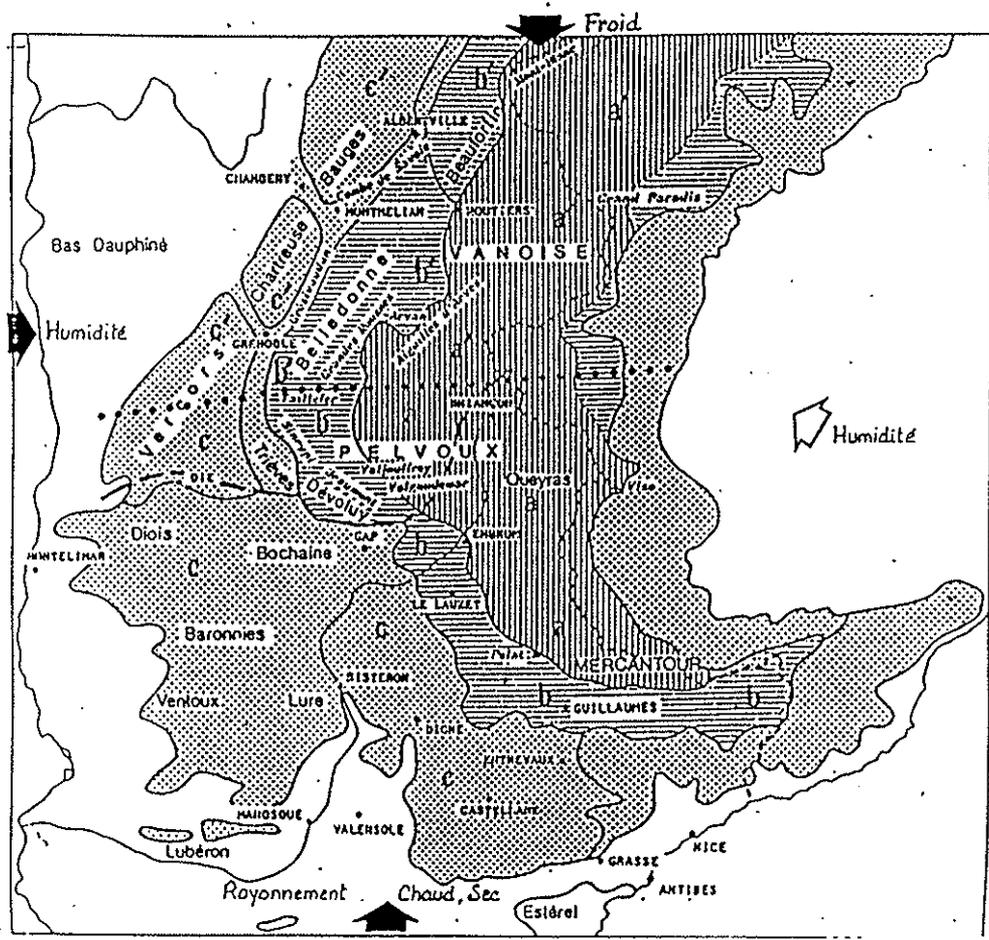
a et b : surface des cimes soumises au dépôt de la neige (écrasement) a << b

c et d : longueur des bras de levier c <<<< d

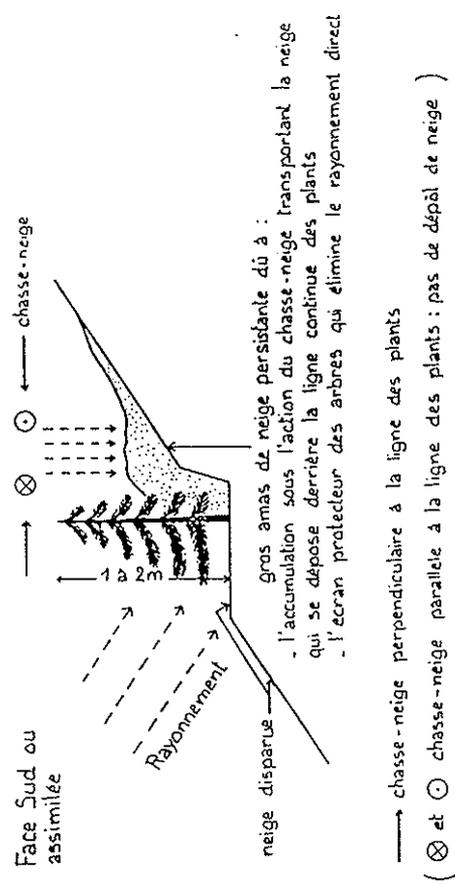
Schema de l'évolution de la mortalité au niveau d'un reboisement :



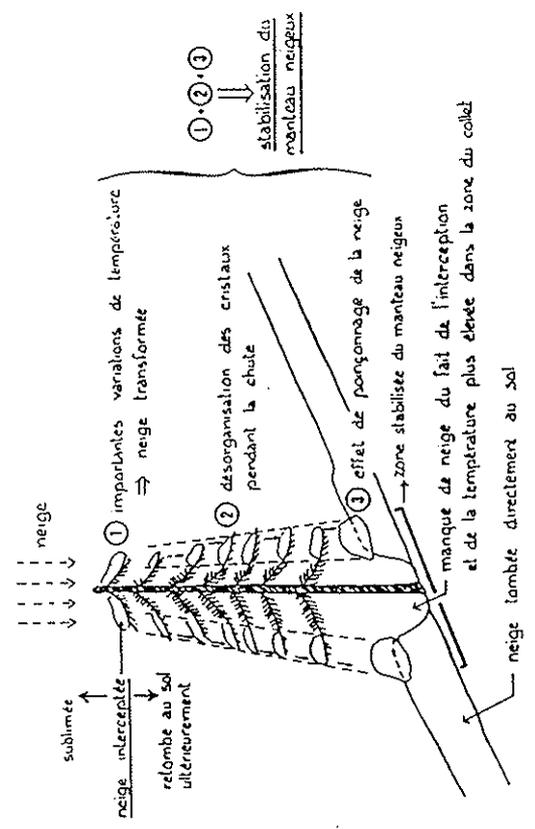
remarque: quelle que soit la phase considérée, la mortalité (même en diminuant les accidents, catastrophes) est toujours nettement au dessus de zéro (A et B).



Effet favorable pour le bilan hydrique des plants de l'accumulation de la neige sous le vent d'une ligne continue et contigue d'arbres



Stabilisation du manteau neigeux en forêt

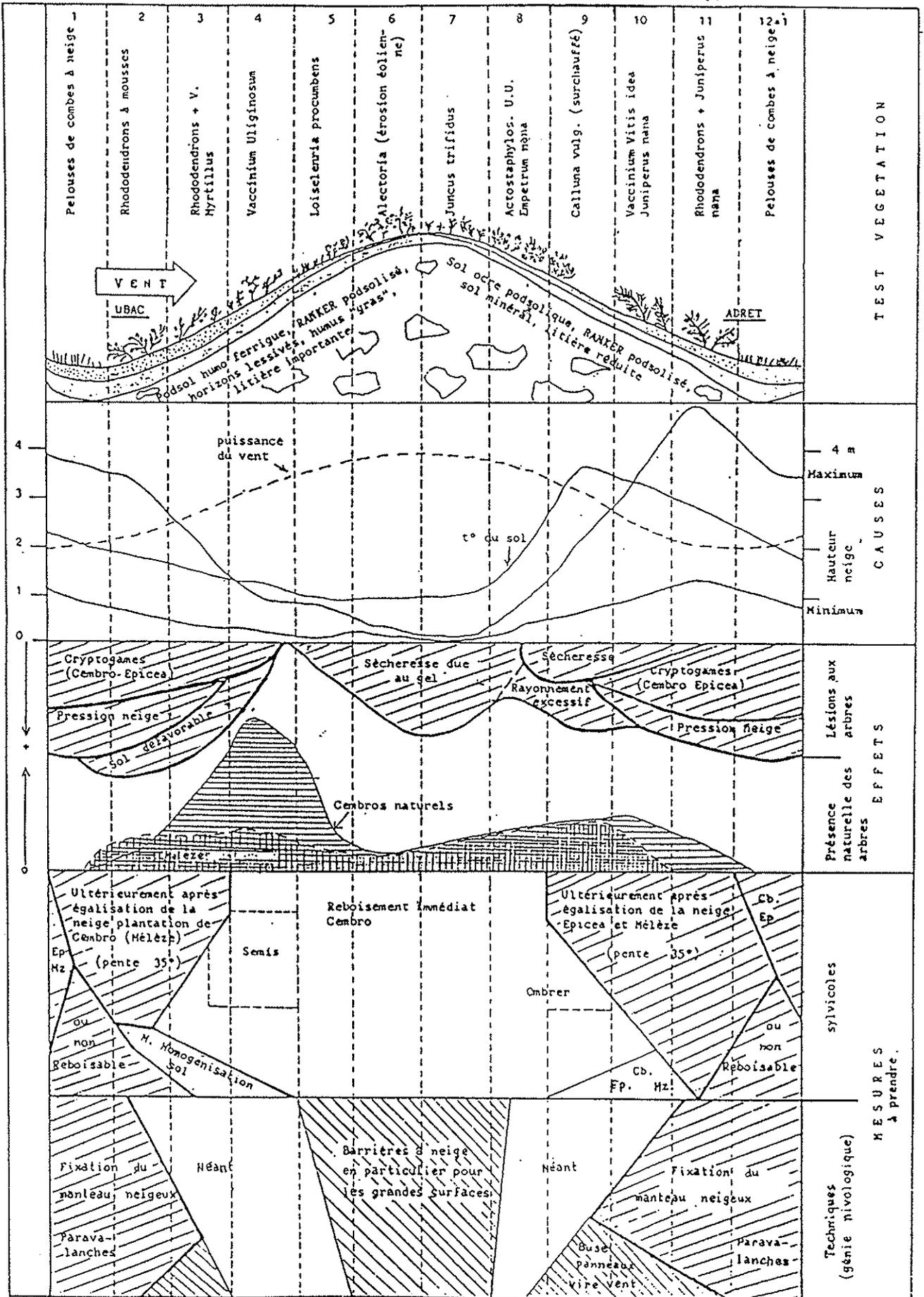


ECOGRAMME "NEIGE-VENT" destiné au REBOISEMENT D'ALTITUDE.  
 ANALYSE des CAUSES et EFFETS.  
 INTERVENTION des MESURES SYLVICOLES et du GENIE NIVOLOGIQUE  
 (pour les ALPES INTERNES d'AUTRICHE, d'après H.AULITZKY)

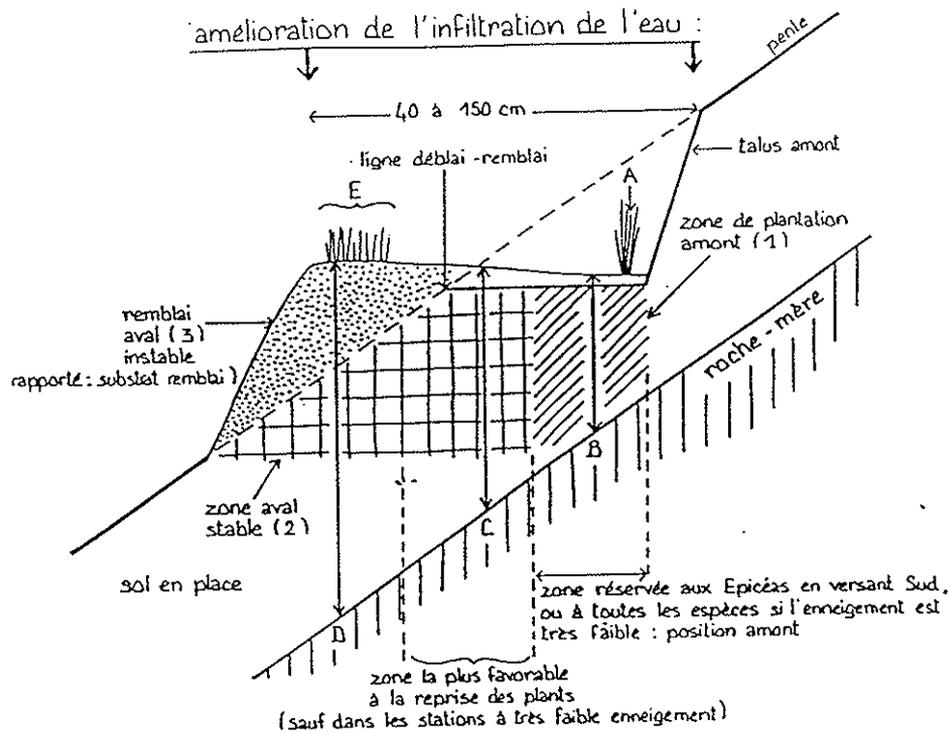
Traduction de M. MULLENBACH

Facteurs déterminants : Topographie )  
 Vent )  
 Neige Expositions )

Légende : \* : surtout pour le Mélèze  
 Cb : Cembro  
 Hz : Mélèze  
 Ep : Epicéas



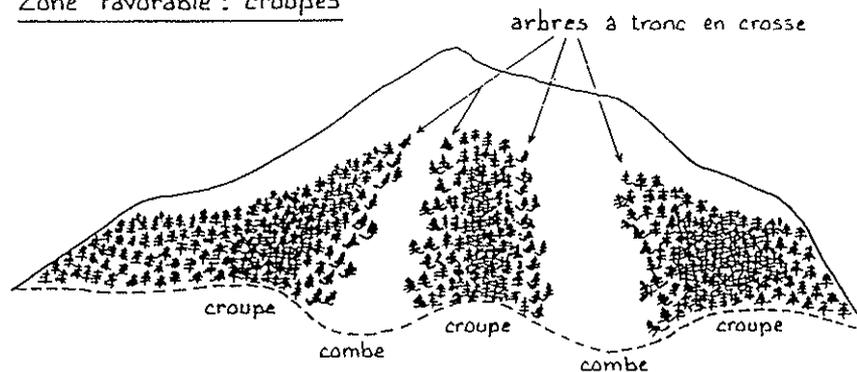
## Caractéristiques d'une station de type banquette:



3

## Répartition des boisements sur les croupes et dans les combes

### Zone favorable: croupes

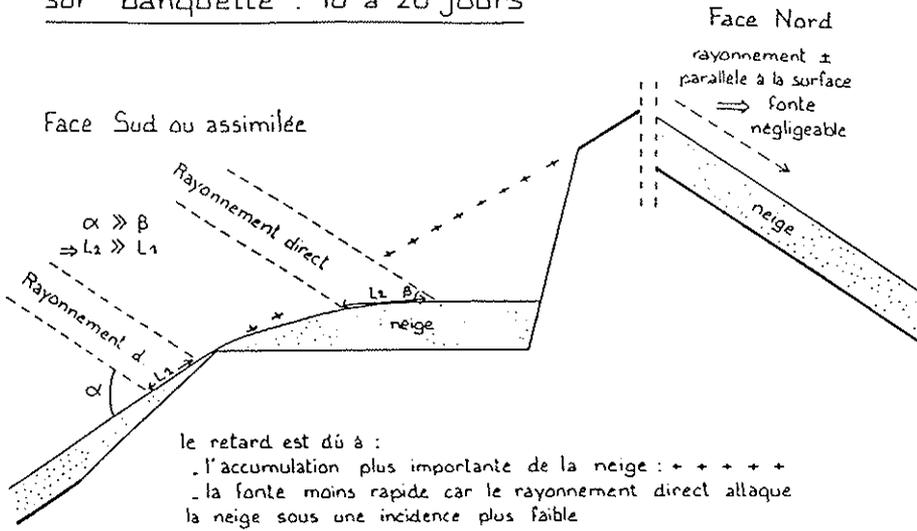


Les boisements sont défavorisés dans les combes par :

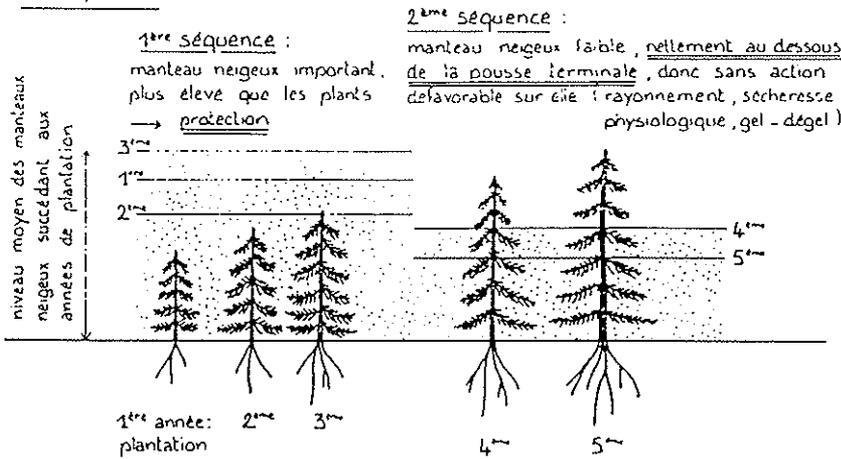
- Les avalanches (couloirs) ;
- Les chutes de pierres, érosion torrentielle (couloirs), mouvements de terrains, dépôts intempestifs correspondant aux cônes de dépôts avalancheux et torrentiels ;
- Les mouvements du manteau neigeux : arrachement des plants, cassure et éclatement des troncs à la base, rupture de la flèche dépassant la surface de la neige, arrachement des branches ;
- La diminution de la durée de la période de végétation (enneigement de longue durée) et les attaques des champignons pathogènes ;
- La diminution de la durée de l'ensoleillement et les températures plus basses (accumulation d'air froid).

Ces stations sont défavorables aux reboisements ; ces derniers ne doivent être entrepris que dans une deuxième phase, après la colonisation des zones favorables.

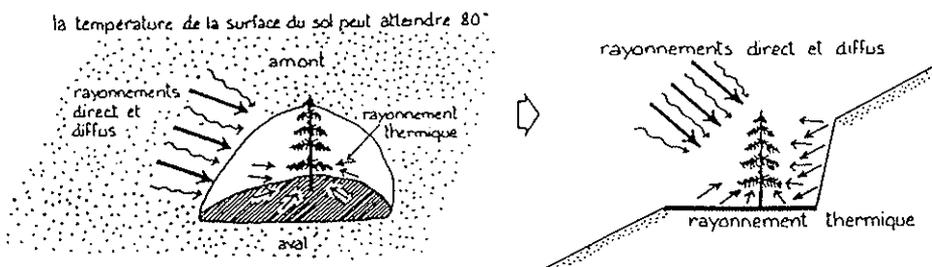
Retard en ce qui concerne la fonte de la neige sur banquette : 10 à 20 jours



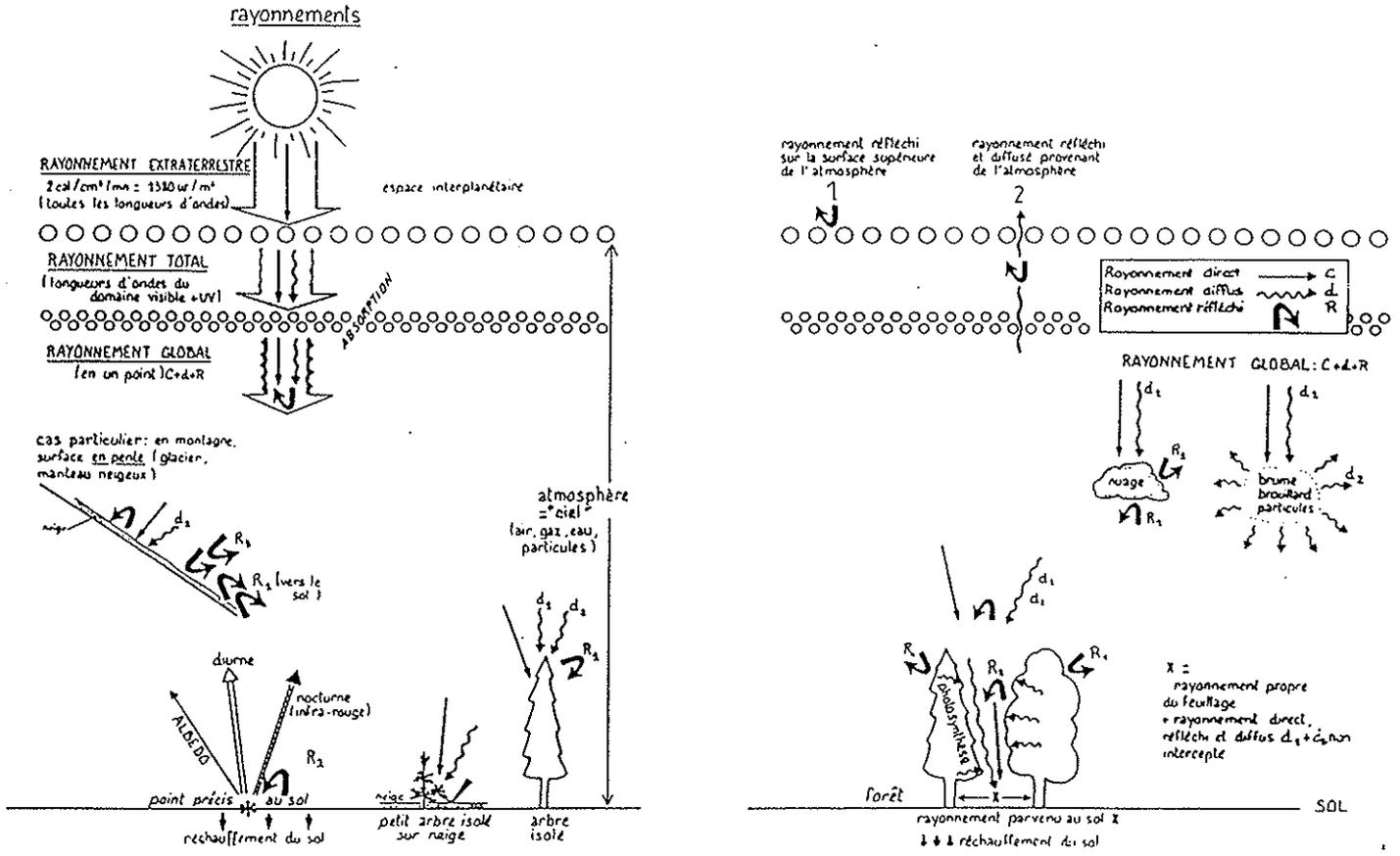
Type de séquences favorables à la bonne venue du plant :



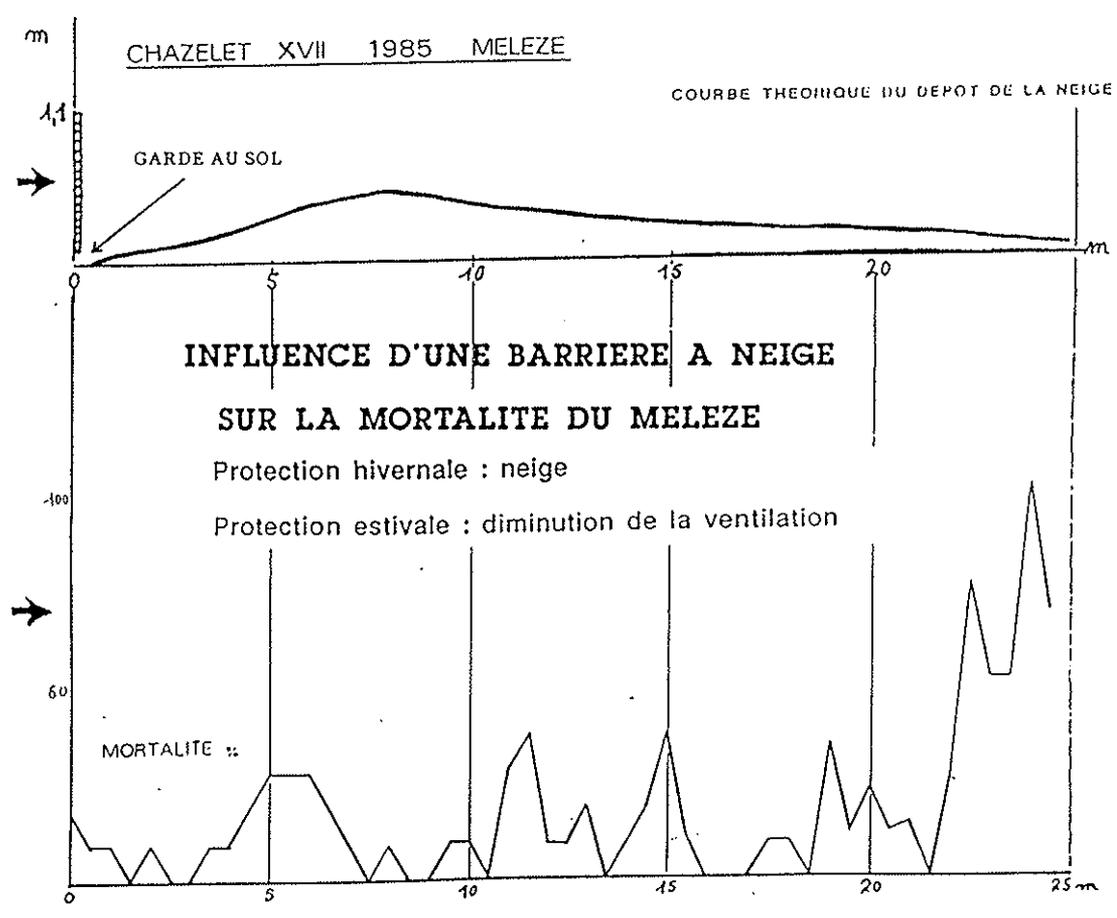
Station de "surchauffe" : potets réalisés dans des sols sombres et en adret



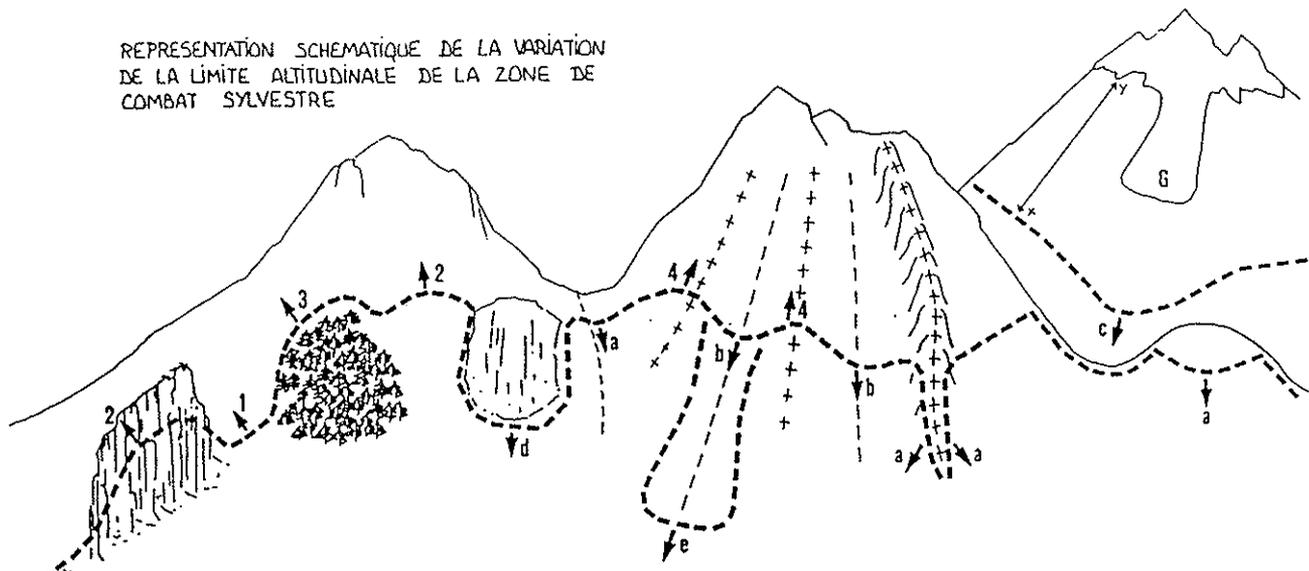
Conséquences et interactions des différents rayonnements



9



REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA VARIATION DE LA LIMITE ALTUDINALE DE LA ZONE DE COMBAT SYLVESTRE



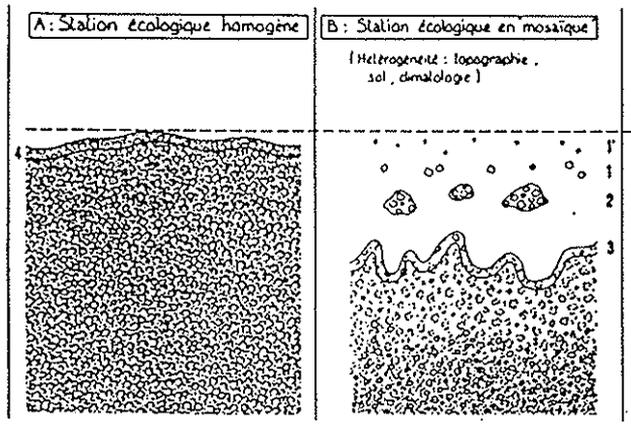
↑ limite remontée  
 ↓ limite abaissée  
 + + + + + arête  
 - - - - - fond de vallée ou combe  
 --- limite potentielle de la forêt

- 1 le long des flancs d'une vallée au fur et à mesure que l'on y pénètre
- 2 sur les parois rocheuses, dans les pentes et mini replats, en présence d'un sommet
- 3 près des zones à ambiance forestière aérienne et édaphique
- 4 sur les minis arêtes ou bombement des versants

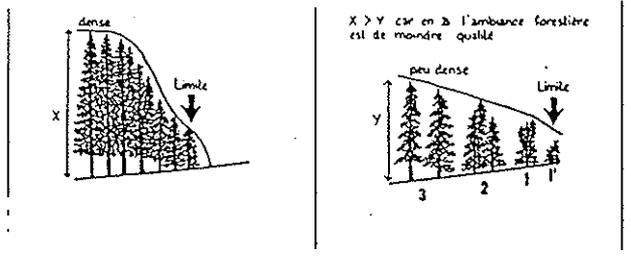
- a dans les cols, les arêtes ventées et les sommets
- b dans les combes, les terrains peu pentus et les trous à gal
- c près des glaciers (G langue de glacier): la limite forestière se situe, en général, 500 à 600 m en dessous des neiges éternelles (xy = 500m)
- d sur les sols minéraux humides et dans les stations dépourvues de sol même squelettiques
- e dans les couloirs d'avalanches, pierres, etc...

Limites sylvestres altitudinales : zone de combat

LIMITES NATURELLES (dues à la physiologie et aux accidents)

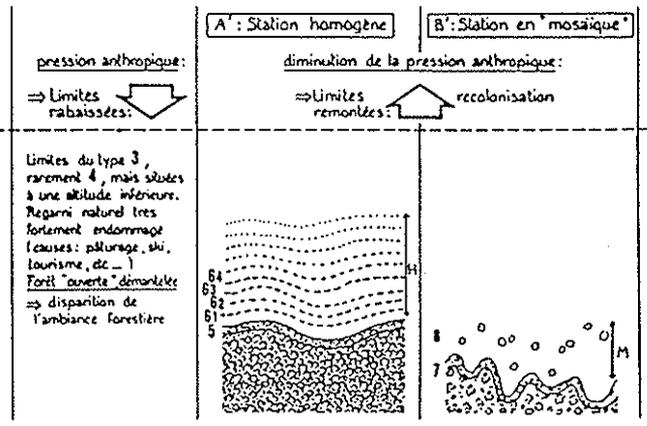


- 1 limite d'arbres rabougris
- 2 limite d'arbres isolés
- 3 limite de bosquets
- 4 limite sylvestre: la densité des arbres à la limite sylvestre et dans la forêt sous-jacente est faible: forêt ouverte sur différents types d'accrassons. cette limite (3) est située plus bas qu'en station homogène (4)
- 4 limite sylvestre: front forestier dense, forêt sous-jacente bien constituée

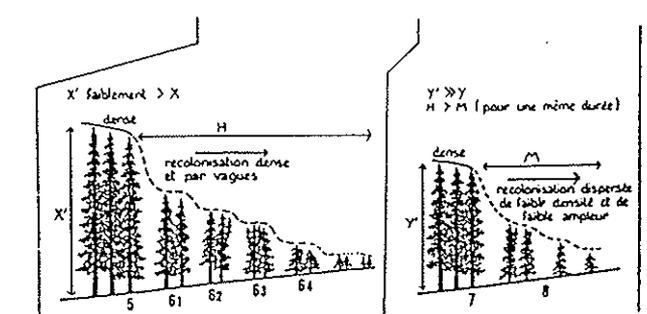


zone de démantèlement de la forêt

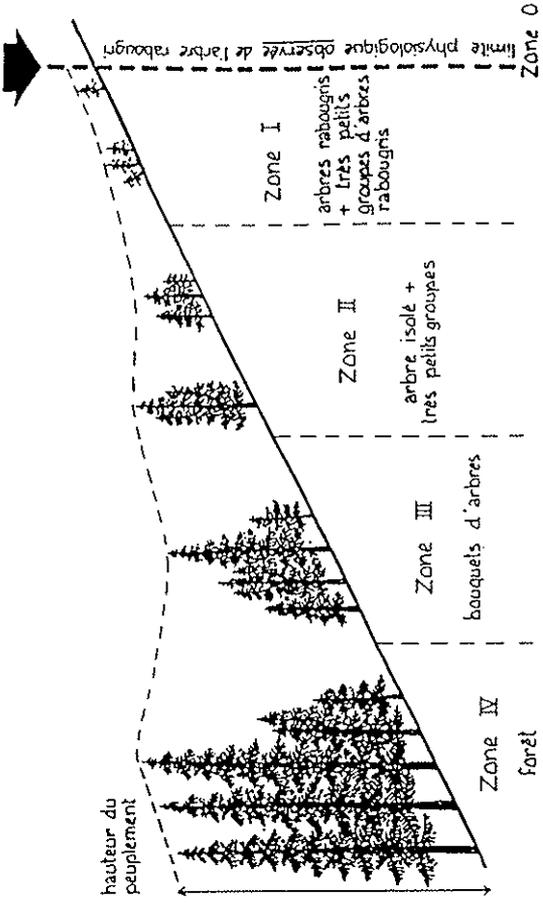
LIMITES ANTHROPIQUES



- 5 limite anthropique en station homogène
- 61, 62, 63, 64 avancée plus ou moins régulière de "vagues" de jeunes plants de densité assez forte
- 7 limite anthropique en station hétérogène
- 8 avancée dispersée des jeunes plants en fonction de micro-stations favorables: densité faible



Evolution des limites forestières (versant homogène):



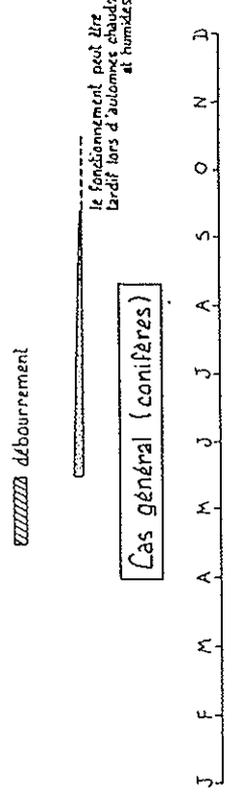
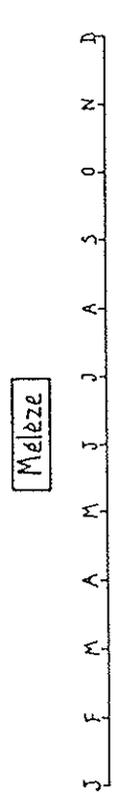
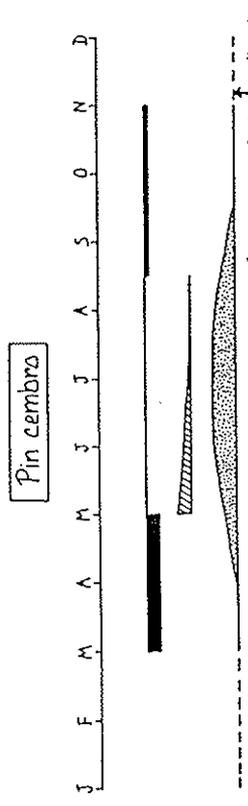
Si on effectue des reboisements en IV, III, II, I, il faut :  
 - du temps  
 - des techniques  
 - une sélection  
 Cela entraîne ultérieurement un déplacement des limites vers le haut :  
 limites  
 IV <math>\diamond</math> III <math>\diamond</math> II <math>\diamond</math> I <math>\diamond</math> 0  
 ... et une amélioration des qualités des zones forestières sous-jacentes.

Remarques :

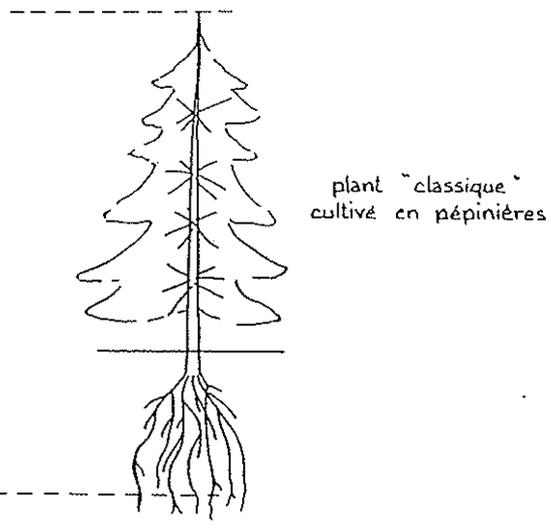
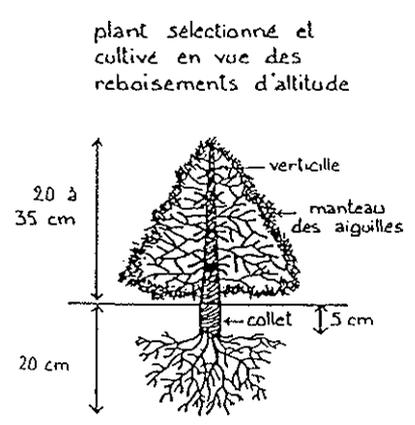
- En zones I et II, malgré leur petite taille, les arbres peuvent atteindre 100 ans, voire beaucoup plus
  - En zones I, II, III, et en bordure supérieure de la zone IV, les arbres se présentent presque toujours avec de multiples cimes.
  - En zones III, II, I, le reboisement de protection peut néanmoins être envisagé, car le plant de culture correspond à un "athlète" vigoureux (contrairement à l'énorme majorité des semis naturels).
- Condition : bouquets ou en plein à densité de plantation extrêmement élevée.
- En zone 0, dans certains cas, le reboisement (qui donnera une formation de camérites buissonnantes) peut être tenté sous certaines conditions (techniques, espèces, provenance, culture)

Représentations schématiques des rythmes de croissances observés chez les espèces

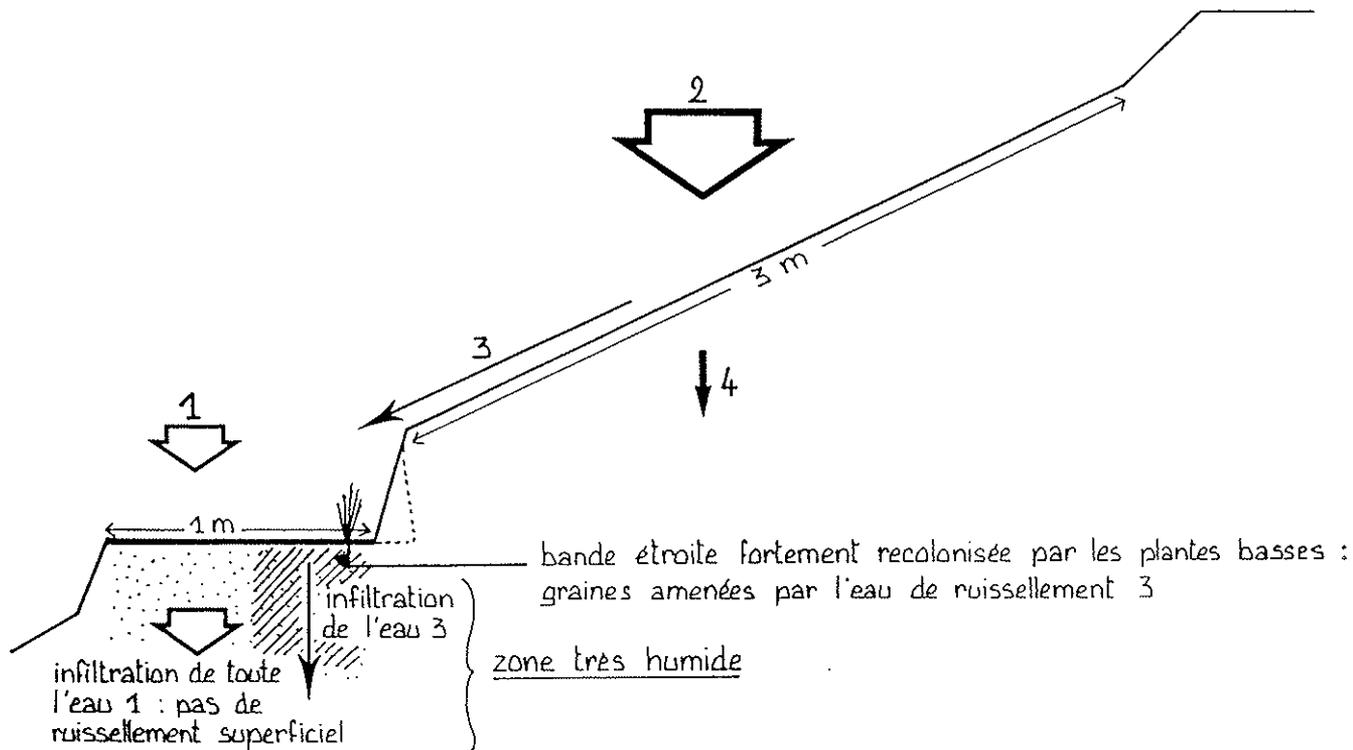
- Légende :
- croissance des racines
  - ▨ croissance de l'appareil aérien
  - ▤ fonctionnement de l'appareil aérien (photosynthèse et respiration)



- Épicea :
- ▨ croissance de la pousse de courte durée
  - ▤ pousse possible



## La banquette et l'amélioration de l'infiltration de l'eau :

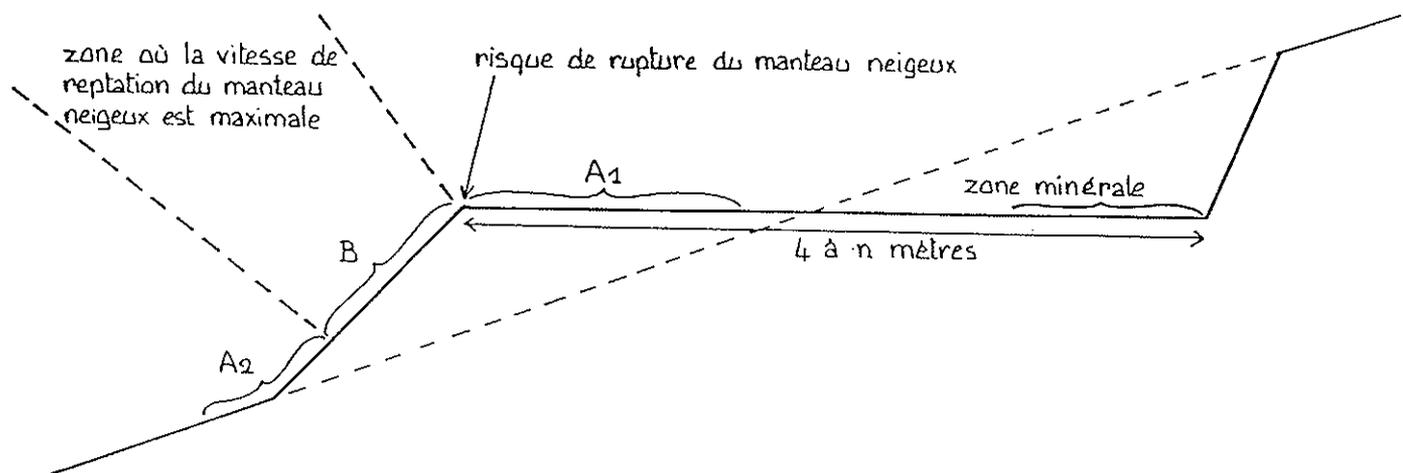


1 : eau tombant directement sur la banquette

2 : eau tombant sur l'inter-banquette = { 3 : eau de ruissellement superficiel  
4 : eau d'infiltration

## Choix de la position du plant sur le talus aval lors

### de gros terrassements :



Stations sèches, à faible enneigement : A1 et A2, positions favorables  
 B, position défavorable : rayonnement exagéré,  
 , sécheresse du sol,  
 manque de neige.

Stations humides, à fort enneigement : A1 (et B), positions favorables  
 A2, position défavorable : enneigement exagéré