



HAL
open science

Végétalisation des espaces dégradés en altitude

F. Dinger

► **To cite this version:**

F. Dinger. Végétalisation des espaces dégradés en altitude. Cemagref Editions, pp.144, 1997, 2-85362-484-6. hal-02577163

HAL Id: hal-02577163

<https://hal.inrae.fr/hal-02577163>

Submitted on 24 May 2023

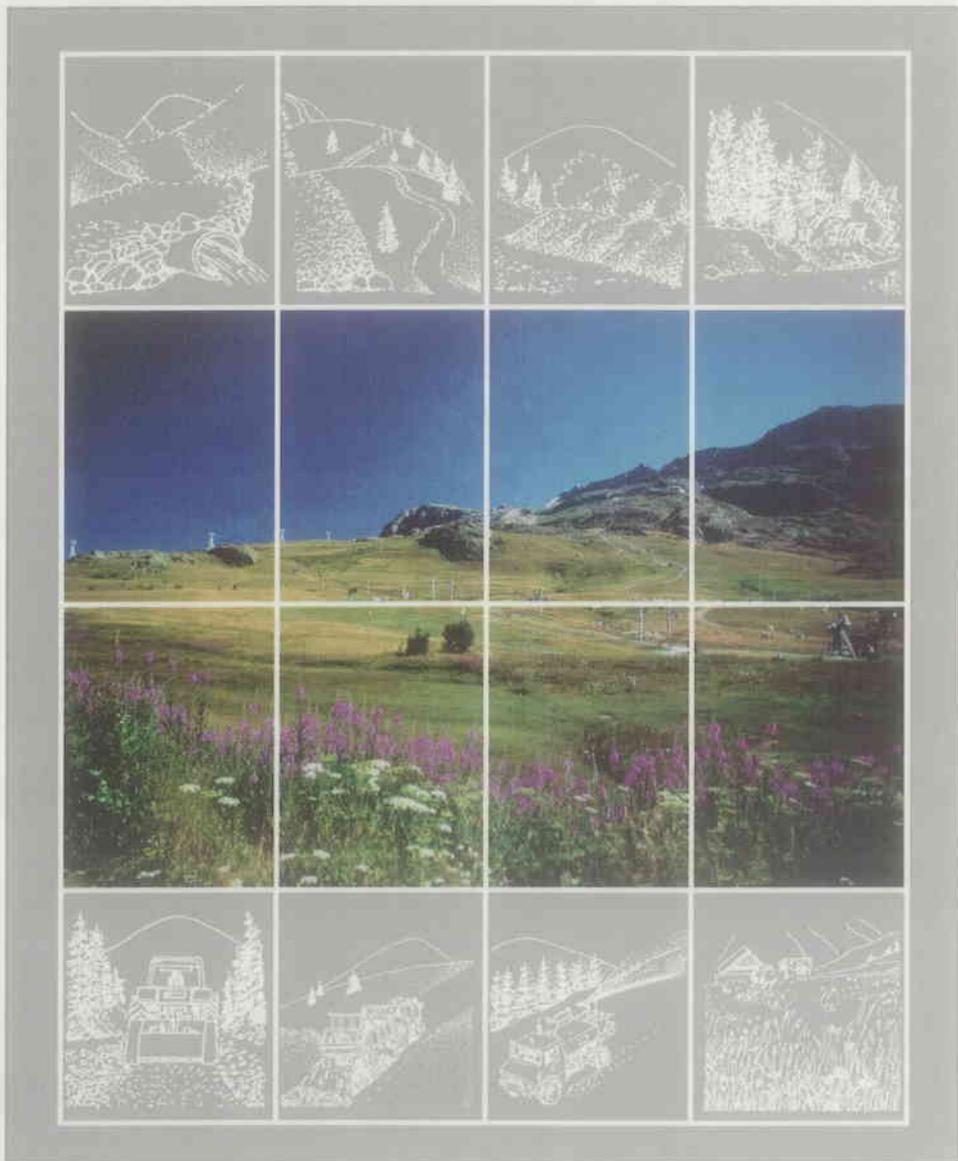
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

Françoise Dinger

PUB 0000 4149

Végétalisation des espaces dégradés en altitude



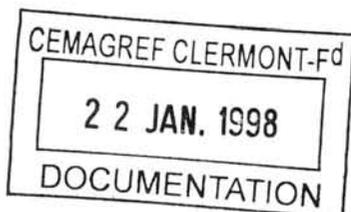
ÉMA GT 24

Cemagref
EDITIONS

VÉGÉTALISATION

des espaces dégradés en altitude

Françoise Dinger



REMERCIEMENTS

Cet ouvrage a bénéficié de la relecture attentive de messieurs :

Jean-Pierre Feuvrier (Cemagref)

Francis Lemaire (INRA)

Bertrand de Goyon (GNIS)

Frédéric Aubry (Agrestis)

Marcel Dénarié et Yves Guyon (SEATM).

Qu'ils en soient tous ici vivement remerciés.

Préface

La montagne, et plus particulièrement la haute montagne, telle qu'on la découvre en Savoie a toujours exercé une attraction très forte sur l'homme.

Le développement du tourisme de masse et l'avènement des sports d'hiver n'ont fait que renforcer cette attractivité pour les sommets et permettent aujourd'hui à la Savoie d'être au tout premier plan pour le tourisme d'hiver.

Économiquement, cette activité est bien entendu très positive mais l'afflux massif de skieurs (la population savoyarde peut plus que doubler en quelques heures) a aussi ses inconvénients.

Ainsi, il a fallu aménager les domaines skiables pour accueillir dans de bonnes conditions de sécurité et de "confort sportif" nos visiteurs et terrasser des hectares d'alpages dont on connaît la très grande fragilité du point de vue de leur équilibre écologique.

En contrepartie, il a fallu faire preuve d'imagination pour réhabiliter ces espaces par reconstitution du substrat et de la végétation, et la Savoie a été retenue par les équipes scientifiques du Cemagref comme terre d'expérimentation en ce domaine.

Cette action s'insère dans les stratégies développées depuis plus de dix ans en Savoie en faveur d'un environnement de qualité. Elle a notamment connu un prolongement opérationnel à travers la SEM Agriculture-Environnement, constituée autour du conseil général et de la chambre d'agriculture.

Ce document fait donc de façon tout à fait opportune le point des recherches scientifiques et des expérimentations, notamment savoyardes, réalisées depuis vingt ans sur ce sujet délicat. Il n'est qu'une étape et ouvre aussi la porte à de nouvelles recherches engendrées par les techniques innovantes qui ont été mises en œuvre.

Michel BARNIER

Président du conseil général de la Savoie



Édition et création graphique
Julienne BAUDEL

Couverture
Julienne BAUDEL
Marie-Laure MOYNE

Aquarelles
Nicole SARDAT
Dessins
Marie-Laure MOYNE

Photographies
Stéphane DUBOS, Françoise DINGER et Stéphane DINGER
Infographie
Françoise PEYRIGUER

AVANT-PROPOS

Le relief des Alpes de Savoie est par excellence celui de la haute montagne propice au développement d'activités touristiques qui se doivent cependant de respecter au mieux la beauté et la diversité des sites.

Les aménagements en altitude touchent en général des paysages et des biotopes alpins de qualité, où l'influence humaine est peu marquée, ils ont des impacts souvent forts qu'il faut réduire au minimum.

Des recherches étaient nécessaires pour réussir la réhabilitation des espaces dégradés, elles ont permis une meilleure connaissance du fonctionnement des écosystèmes d'altitude et ont montré que les actions de réhabilitation devaient suivre une logique d'intervention particulière pour espérer reconstituer au mieux les milieux détruits.

Ainsi, dès 1978, le Cemagref s'est intéressé aux pratiques qui avaient cours à l'époque en matière de végétalisation des domaines skiables. Puis il a engagé des recherches pertinentes sur les mélanges de semences à utiliser en mettant en particulier en évidence tout l'intérêt qu'il y aurait à employer des populations végétales alpines.

Il a fallu aussi se soucier de la reconstitution des substrats élément indispensable à la réussite de la végétalisation. Dans ce domaine, l'organisation des jeux Olympiques d'Albertville a été un moteur extrêmement important pour la recherche et le développement de filières de valorisation des boues de stations d'épuration.

Ce formidable élan donné à la Savoie a bénéficié aux équipes de recherche qui disposaient alors d'un laboratoire de terrain unique.

Associé à toutes les études engagées par le conseil général de Savoie, le ministère de l'Agriculture et l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, le Cemagref peut aujourd'hui présenter les résultats de près de vingt années de recherche sur les pratiques en matière de végétalisation en conditions extrêmes, sur les semences à privilégier et sur les substrats issus de la valorisation des boues à utiliser en altitude.

Sommaire

<i>Introduction</i>	11
<i>Historique des recherches</i>	13
<i>Les aménagements en altitude</i>	15
LA NÉCESSITÉ D'AMÉNAGER POUR LA PRATIQUE DU SKI	17
LES AVANTAGES D'UN COUVERT VÉGÉTAL ADAPTÉ	18
LES CONTRAINTES RENCONTRÉES	18
<i>La logique d'intervention des travaux en altitude</i>	25
RECONNAISSANCE DU SITE ET DRAINAGE PROFOND	27
MATÉRIALISATION DES ACCÈS AU CHANTIER	27
DÉCAPAGE ET STOCKAGE DE LA TERRE VÉGÉTALE	28
DÉBOISEMENT ET DÉBROUSSAILLEMENT	30

CONSTRUCTION DE PIÈGES À PIERRES	30
LE CHOIX DU MATÉRIEL UTILISÉ POUR LES TRAVAUX DE TERRASSEMENT EN ALTITUDE	30
<i>Les travaux de préparation du sol avant végétalisation</i>	33
LA LUTTE CONTRE LE RUISSELLEMENT SUPERFICIEL	35
RAMASSAGE, RATISSAGE OU CONCASSAGE DES PIERRES	36
LA RECONSTITUTION D'UN SUBSTRAT ADAPTÉ	37
<i>La reconstitution du substrat avant végétalisation</i>	41
HISTORIQUE DES RECHERCHES ENGAGÉES	43
MATURATION ET COMPOSTAGE DES BOUES DE STATIONS D'ÉPURATION D'ALTITUDE	48
L'EMPLOI DES BOUES ET DES COMPOSTS	52
LES RECHERCHES ENGAGÉES SUR LE COMPORTEMENT DE LA VÉGÉTATION SUR AMENDEMENTS ORGANIQUES	61
<i>Le choix du matériel végétal</i>	67
LE MATÉRIEL VÉGÉTAL ISSU DE LA SÉLECTION	69
LES ESPÈCES NATIVES	84
SEMENCES SAUVAGES OU SEMENCES CERTIFIÉES	93
LA RÉALISATION DES MÉLANGES DE SEMENCES	95

<i>La fertilisation</i>	99
LES ENGRAIS	101
LES BESOINS DES PLANTES	103
LE RÔLE DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS À APPORTER À LA PLANTE	105
LA PRATIQUE DE LA FERTILISATION	107
DOSES ET FORMES D'APPORT	107
<i>Le semis, sa protection, son entretien</i>	109
LE SEMIS ET SA PROTECTION	111
L'ENTRETIEN DES SURFACES VÉGÉTALISÉES	117
<i>Un exemple de réhabilitation de piste de ski</i>	119
LA PRÉPARATION DU SOL	121
ESTIMATION DES SURFACES DE PISTES	122
LA VÉGÉTATION SPONTANÉE	122
LE CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES	124
LA RÉALISATION DU CHANTIER	131
LE SUIVI DU CHANTIER	132
<i>Conclusion générale</i>	137
<i>Bibliographie</i>	142

Introduction

Depuis plus de deux cents ans, l'homme a pris conscience de l'importance des dégradations de l'environnement dues à ses propres activités et de la nécessité d'intervenir pour réhabiliter les terrains ainsi perturbés (Fabre 1797 - "*Essais sur la théorie des torrents et des rivières*").

Ainsi, les principaux acteurs de la restauration des terrains en montagne ont été les précurseurs d'actions efficaces de régénération végétale par le boisement ou le gazonnement pour lutter contre l'érosion des pentes mises à nu par la déforestation et le surpâturage.

Le souci de l'époque était essentiellement celui de la protection des biens et des personnes.

Aujourd'hui, la protection contre l'érosion n'est plus le seul objectif des interventions de végétalisation. La remise en état des milieux dégradés doit, au-delà de la protection des ouvrages, assurer leur bonne intégration écologique et paysagère.

En zone de montagne, les activités perturbantes qui inquiétaient à l'époque peuvent sembler bien dérisoires comparées aux premiers grands ouvrages qui plus tardivement ont bouleversé l'environnement. On peut citer dès 1962 les autoroutes, les carrières, les voies ferrées, les pistes de ski et maintenant les friches industrielles, les centres d'enfouissement techniques.

Si, dans les années 60-70, on tentait tant bien que mal de « boucher les trous » en appliquant des pratiques empiriques, sous la pression de l'opinion publique, des recherches ont été engagées pour permettre aujourd'hui de mener à bien de véritables opérations de restauration, voire de retour à la nature d'origine.

Les recherches entreprises ont mis en évidence qu'une certaine logique d'intervention était commune à tous les cas de figures, qu'il était indispensable d'avoir une bonne connaissance de l'écosystème de référence avant perturbation pour espérer reconstituer au mieux les milieux détruits.

Pour réussir dans cette démarche de réhabilitation des espaces dégradés, il fallait donc perfectionner nos connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes, engager des recherches pertinentes sur le matériel végétal, les techniques et produits à mettre en œuvre

C'est donc à travers l'exemple des travaux d'aménagement en altitude, essentiellement ceux qui ont été réalisés sur les domaines skiables, que nous allons faire le point sur les recherches engagées et sur les conditions d'application des résultats à d'autres cas concrets de terrain.

En effet, les conditions écologiques de la haute altitude sont telles que les techniques de réhabilitation mises au point et réussies dans ce contexte seront facilement transférables à des espaces aux contraintes moins fortes.

Historique des recherches



Les aménagements en altitude touchent en général des paysages et des biotopes alpins de qualité, où l'influence humaine est peu marquée, ils ont donc des impacts souvent forts qu'il faut réduire au minimum.

Pour accélérer la cicatrisation du couvert végétal fortement perturbé,

pour prévenir l'érosion et restaurer la qualité des paysages, les surfaces aménagées sont revégétalisées par ensemencement.

Celui-ci n'est que la phase finale d'une succession d'interventions destinées à maîtriser l'érosion et à créer un lit de semences de qualité, qui favorisera l'installation et le maintien d'un couvert végétal indispensable à la protection des aménagements et à leur intégration écologique et paysagère.

Le succès des opérations de réhabilitation dépend donc de plusieurs facteurs : **la préparation du sol, le bon choix du matériel végétal, la méthode d'ensemencement et le choix des produits d'accompagnement, enfin une gestion du couvert végétal adaptée.**

Il est généralement admis que le but de ces multiples interventions est de favoriser le rétablissement rapide d'une couverture végétale durable, ne nécessitant que peu d'entretien, et le plus rapidement conforme à la végétation d'origine.

Cet objectif s'avère très difficile à atteindre en haute altitude. Des recherches ont été entreprises pour remplir plusieurs objectifs : comprendre les processus de recolonisation, étudier les espèces autochtones colonisatrices susceptibles d'être réintroduites dans les milieux perturbés, améliorer toutes les techniques de construction des ouvrages et de préparation des sols avant semis ainsi que celles qui touchent à l'entretien ultérieur des domaines ainsi aménagés.

Dès 1978, une enquête a été lancée sur les pratiques qui avaient cours à l'époque en matière de végétalisation des espaces dégradés en altitude. Les réponses à notre enquête ont révélé en particulier que les semences utilisées, essentiellement des graminées à gazons ou fourragères, ne répondaient pas aux attentes des aménageurs. Au-delà de 1 800 m d'altitude, la végétalisation était souvent un échec et les sols non protégés devenaient rapidement sensibles à l'érosion.

Les premiers essais ont donc consisté à tester parmi les cultivars du commerce ceux qui semblaient pouvoir résister aux conditions extrêmes de la haute altitude.

Puis, l'observation du comportement des espèces sauvages de la pelouse alpine nous a incités à engager des recherches pour définir les conditions de leur multiplication et de leur production afin de les introduire dans les mélanges.

Enfin, il fallait aussi se soucier de la reconstitution des substrats car, même si les semences sont parfaitement choisies pour résister aux conditions climatiques, il faut leur apporter un support et un « garde-manger » suffisant pour espérer les voir s'installer et se pérenniser sur les espaces ayant fait l'objet de fortes dégradations.

Dès 1982, on a souhaité connaître les conditions d'utilisation des boues et composts de stations d'épuration en reconstitution de substrat avant végétalisation.

Les résultats de près de vingt années de recherche sur les pratiques, sur les semences et les substrats utilisés en altitude sont donc présentés dans cet ouvrage.

CHAPITRE I

Les aménagements en altitude



■ **Rappel historique sur la conception des domaines skiables**

La conception française des stations modernes de sports d'hiver a été élaborée au sortir de la Seconde Guerre mondiale. Ce concept nouveau est fondé sur la localisation des hébergements "au pied des pistes" et l'aménagement rationnel de domaines skiables où le skieur trouve tout naturellement sur son parcours les pistes correspondant à son niveau et les remontées mécaniques adaptées à ses besoins.

C'est donc à partir de 1954 que débute en France l'ère de l'aménagement et de l'entretien des pistes de ski, sous l'impulsion de précurseurs comme Jean Cattelin ou Émile Allais qui, cette année-là, revient des États-Unis avec la conviction que le ski allait devenir un sport de masse et qu'il faudrait rapidement offrir à la clientèle des pistes de ski enneigées de qualité.

Dès 1965, le SEATM (Service d'étude et d'aménagement touristique de la montagne) organise le premier concours de matériel de pistes à Vars, alors qu'au colloque d'Igls en Autriche on présente les premiers ensemencements et paillages faits à la main.

Comme l'avait supposé Émile Allais en 1954, le ski a connu dans toute l'Europe un développement important. On peut considérer aujourd'hui que les domaines qui pouvaient être aménagés le sont. Pourtant chaque été, d'importants travaux sont encore réalisés en altitude. Ces interventions sont étroitement liées d'une part au renouvellement de bon nombre de remontées mécaniques, remplacées par des appareils à fort débit et, d'autre part, aux problèmes posés par l'enneigement faible des dernières saisons, ce qui implique des travaux de pistes parfois importants.

En effet, l'ensemble des domaines skiables créés doit rester attractif en accueillant dans de bonnes conditions de "skiabilité" un nombre de skieurs important. Il faut donc le plus souvent élargir, corriger les profils et aussi créer parfois de nouvelles pistes pour qu'elles puissent absorber en toute sécurité ces nouveaux débits avec un enneigement minimal.

LA NÉCESSITÉ D'AMÉNAGER POUR LA PRATIQUE DU SKI

La neige est depuis de nombreuses années le support d'activités touristiques importantes que sont tous les sports de glisse.

Elle doit donc être gérée, entretenue et parfois produite pour répondre à la demande de la clientèle des stations de sports d'hiver. Les responsables des stations françaises se doivent d'offrir un produit fini, "la neige", avec toutes les qualités nécessaires pour une pratique du ski agréable et en toute sécurité.

Cette neige doit pouvoir être préparée le plus tôt possible dans la saison d'hiver, car elle est à ce moment-là très attendue comme un produit « primeur ». Il faut ensuite pouvoir la gérer et la conserver jusqu'au printemps, ce qui suppose donc que son support, la piste végétalisée, soit d'excellente qualité.

La création à proprement parler de la piste ne sera pas traitée dans ce document. Le SEATM a largement développé ce thème dans ses différentes plaquettes avec notamment une présentation des données réglementaires dont il faut impérativement tenir compte.

Les pistes étant implantées, les responsables des stations sont persuadés qu'une bonne gestion de leur domaine skiable passe par des travaux de finition et de végétalisation adaptés.

Ces travaux d'été sont d'autant plus nécessaires que les stations sont équipées d'unités de production de neige de culture. Fabriquer de la neige est une opération coûteuse en eau et en énergie, il faut donc un support parfaitement préparé pour que quelques centimètres de neige soient suffisants pour envisager le damage et l'ouverture des pistes au public.



L'ouverture de domaines de plus en plus variés pour une fréquentation mieux répartie conduit à des travaux importants à des altitudes où la remise en état des terrains devient particulièrement délicate.

Par ailleurs, la faiblesse de l'enneigement des dernières saisons, l'amélioration nécessaire des conditions de sécurité dans la pratique du ski et l'augmentation des débits des remontées mécaniques imposent des reprises ponctuelles des pistes existantes (élargissement de passages difficiles, rectifications de dévers et de profils).

Les stations sont donc amenées à concevoir et à réaliser d'importants travaux de remodelage, de reprofilage, d'élargissement de passage, des travaux de minage et de terrassement dont on imagine aisément les conséquences néfastes sur le paysage et les équilibres naturels si l'on n'engage pas immédiatement des travaux de stabilisation et de végétalisation des terrains ainsi bouleversés.



LES AVANTAGES D'UN COUVERT VÉGÉTAL ADAPTÉ

On a tout d'abord rapidement perçu les avantages d'une couverture végétale adaptée pour la pratique des sports d'hiver: Avec un recouvrement suffisamment dense et un enracinement profond, cette couverture répond à un objectif de stabilisation superficielle du terrain et permet donc un damage précoce des pistes, dès les premières chutes, ou dès les premiers centimètres fabriqués, la neige pouvant être piégée dans le tapis végétal sans difficulté.

Ce travail précoce et efficace peut se faire sans risque pour les engins de damage, tous les obstacles ayant été enlevés au cours des phases de préparation de la piste préalablement à sa végétalisation.

Enfin, ce premier compactage contribue à ralentir sa fonte et permet ainsi de rallonger d'autant la période de ski.

Mais aujourd'hui, l'aspect hivernal n'est plus le seul à devoir être pris en compte. Il faut aussi veiller à ce qu'en été les sites aménagés soient attractifs car une fréquentation estivale des domaines skiables est absolument indispensable pour l'équilibre économique des stations.

L'intégration écologique et paysagère des pistes de ski est une nécessité réglementaire et économique : les stations ne peuvent envisager l'accueil des touristes l'été dans un environnement dénaturé.

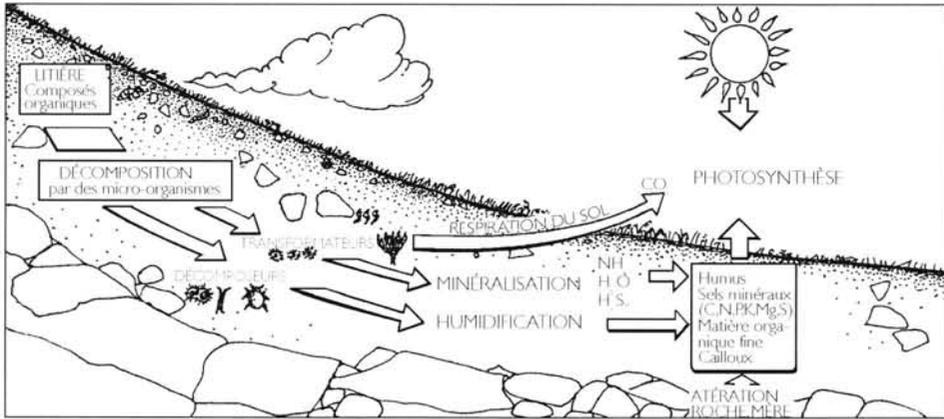
LES CONTRAINTES RENCONTRÉES

La mise en place d'une végétation efficace et adaptée va devoir s'envisager malgré les contraintes fortes du milieu qui devront être prises en compte dès le début du projet car elles permettront de définir les moyens à mettre en œuvre pour réussir la phase finale de végétalisation.

Les contraintes du milieu

Le substrat

Le sol est un "mélange de substances minérales résultant de la décomposition des roches par les agents physiques et chimiques, et de matières organiques particulières produites par la décomposition des résidus végétaux par les agents biologiques" (Duvigneaud).



Le sol, support, réservoir d'eau et de nourriture pour les plantes

L'accumulation de débris végétaux (racines, feuilles mortes), de déchets et de cadavres d'animaux à la surface du sol constitue la litière, matière organique fraîche, dans laquelle vivent des organismes minuscules au rôle très important : ces micro-organismes décomposent en effet la matière organique fraîche en humus (matière organique humifiée) en libérant du gaz carbonique (CO₂) et des substances minérales comme le carbone (C), l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le magnésium (Mg) et le soufre (S), qui permettront par la photosynthèse la fabrication d'une nouvelle matière organique fraîche.

La matière organique joue un rôle fondamental dans l'évolution du sol. Elle ne représente que 10 % du poids sec, et pourtant elle constitue une grande partie du "complexe absorbant" (capacité à stocker les réserves minérales). Elle est source d'azote pour le sol et en augmente la capacité de rétention en eau.

Le substrat est donc la couche de matériau qui sert de support, de réservoir d'eau et de nourriture pour les plantes.

Dans les conditions naturelles, c'est le sol qui joue ce rôle, en altitude son épaisseur et sa fertilité sont très variables.

Les sols de montagne sont de type varié suivant la roche mère, le climat et la végétation, ils sont souvent squelettiques, acides et peu évolués (humus bruts).

Les contraintes de chantier liées au substrat géologique



En sites calcaires lapiazés (Vercors, Bauges, Jura, certains sites pyrénéens...), la couche de terre est souvent très faible, et les reliefs sont tels que, quel que soit l'aménagement projeté, les terrains nécessitent de nombreux travaux de terrassement et de minage. Cependant, ils présentent l'avantage d'être perméables et stables.



Les roches siliceuses résistantes (quartzites, gneiss) forment souvent des barres rocheuses.

Toute intervention nécessitant, outre le décapage de la terre végétale, d'importants travaux de terrassement, elle est extrêmement difficile à intégrer dans le paysage environnant.

En revanche sur **terrains schisteux**, les problèmes hydriques doivent conditionner la façon d'intervenir sur les sites. Il faut tenir compte aussi du pendage des strates géologiques et des risques d'instabilité morphodynamiques.



Cargneules et gypses sont les substrats les moins résistants, les terrassements dans ces terrains d'aspect ruiniforme peuvent être à l'origine d'affaissement, de ravinement.



Les substrats après terrassement

Les sols de montagne ont une genèse très longue, la matière organique se dégrade très lentement, ils sont peu épais et donc très sensibles à toute perturbation.

Si la végétation est détruite au cours des travaux, le sol n'est plus protégé, il est soumis à toutes les contraintes du milieu, sa dégradation est alors difficile à arrêter. L'érosion se développe d'autant plus que très souvent les sites sont en forte pente, le sol perd alors sa fertilité, sa cohésion, et ses éléments sont entraînés par le ruissellement, le vent...

À la fin des travaux, on a donc le plus souvent des sols bruts constitués par les couches géologiques sous-jacentes.

L'aptitude des sols à être végétalisés dépend alors :

- de leur pente,
- de leur texture (un sol fin est plus favorable à la germination des graines),
- de leur structure (il est préférable d'avoir un sol décompacté et granuleux),
- de leur perméabilité, il faut que les substrats soient bien drainés mais qu'ils conservent aussi une capacité de rétention de l'eau à mettre à la disposition des plants.

Ces sols bruts se caractérisent aussi par leur déficit en éléments nutritifs et leur pauvreté en matière organique. Il est, de ce fait, peu utile de procéder à des analyses chimiques et physiques poussées, dans bien des cas seuls le pH et la granulométrie seront de bons indicateurs pour définir la méthode à employer.

Si on peut utiliser sur ces sols bruts de la terre végétale (qui est souvent un mélange d'horizons superficiels et meubles, plus ou moins humifères provenant de décapage avant travaux), il conviendra de veiller à la qualité de ce matériau.

Elle sera fonction de la valeur agronomique des horizons décapés, des conditions de décapage, de la durée et des conditions de stockage...

Le climat

Les paramètres climatiques ont une influence déterminante en altitude sur les possibilités de végétaliser les terrains dégradés.

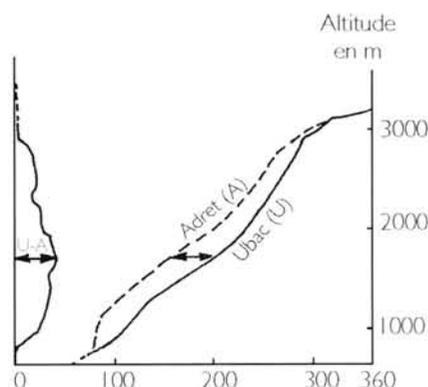
La France est partagée en neuf zones bioclimatiques, les secteurs d'altitude appartiennent à la zone 8 : "montagnes françaises" ; climat montagnard sous influence océanique, semi-continentale ou méditerranéenne suivant les sites : hiver très froid à rigoureux, été frais à chaud.

On sait d'ores et déjà que, dans cette zone, on aura très peu de temps pour intervenir : la période de végétation se réduisant souvent à quelques semaines.

Mais on s'attachera plus aux informations méso-climatiques (à caractère local), voire micro-climatiques (propres à chaque site), qu'au macroclimat (à caractère régional).



Carte bioclimatique



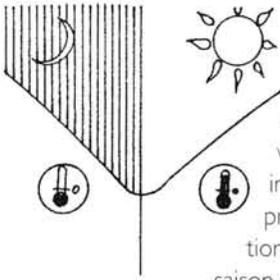
Par exemple, en ce qui concerne les durées d'enneigement, elle sera fonction de l'exposition du chantier:

En versant adret, la durée d'enneigement en altitude est inférieure à celle de l'ubac, on pourra donc commencer à intervenir plus tôt sur ce versant.

Moyenne des durées annuelles du manteau neigeux pour la période 1960-1969 - Gapillout A. 1975.

Par ailleurs, les conditions de vie des plantes sont sous l'influence de nombreux facteurs négatifs : l'air en altitude est moins dense, il joue moins son rôle de frein thermique car il ne s'oppose plus au rayonnement solaire qui est alors direct et intense, il chauffe les plantes et augmente ainsi leur perte en eau. La période d'intervention devra donc être judicieusement choisie et de toute façon en dehors de la période estivale.



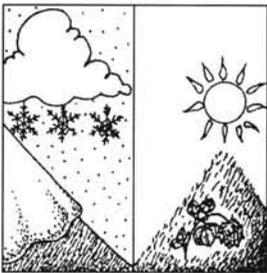
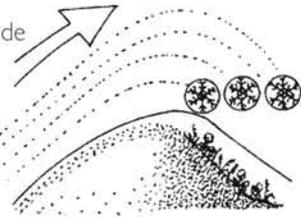


Les écarts thermiques sont extrêmes entre l'air/le sol, le jour/la nuit, l'adret/l'ubac. Dans ce dernier cas, l'écart peut être de 40 °C sur un même site présentant les deux expositions.

Le froid intense est accentué par le vent au sommet des cols. Ce vent impose ses contraintes plus par les courants locaux liés aux inversions thermiques que par les courants généraux d'altitude. Il provoque l'accumulation de la neige et donc une meilleure protection de la végétation, mais un déneigement plus tardif et donc une saison de végétation plus courte.

À l'inverse, si la neige a été soufflée, la végétation est soumise de façon plus intense au gel, mais le déneigement est plus rapide.

Enfin, la neige protectrice du sol et des plantes pérennes imbibe le sol d'eau de fusion au moment du démarrage de la végétation.



La végétation doit aussi être adaptée au paradoxe des précipitations importantes et de la sécheresse excessive. En effet, la pluviosité augmente avec l'altitude mais dans bien des cas, toute l'humidité tombe sous forme de neige et l'on constate une sécheresse estivale importante. Contraignante pour les semis, la sécheresse excessive au moment où la croissance de la plante est la plus active est un handicap certain pour le développement des espèces allochtones non adaptées.

Le couvert végétal en place

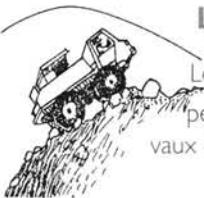
Il est impératif d'avoir une bonne connaissance de l'écologie des espèces, des différents groupements végétaux et de leur dynamique naturelle pour comprendre le fonctionnement du milieu sur lequel on va intervenir:

On peut ainsi être en mesure de choisir les végétaux les mieux adaptés au milieu de l'on souhaite recréer; prévoir son évolution et les conditions d'installation d'un couvert végétal pérenne et stable. Ce choix judicieux aura une influence sur l'entretien du milieu ainsi recréé.



Les contraintes techniques

Le relief et la pente qui sont les éléments du milieu permettant le développement des activités touristiques rendent les accès difficiles et le coût des travaux élevé.



Par ailleurs, tout chantier de végétalisation par semis hydraulique nécessite de l'eau en quantité importante (il faut en effet un litre d'eau par m² végétalisé). Il faudra s'être assuré de cette disponibilité sur le chantier ou à proximité pour une bonne organisation des opérations.

Enfin, en zone de haute altitude, les périodes où la végétalisation est possible sont courtes. Il faut intervenir dès la fonte des neiges, au printemps, une fois que les sols sont bien ressuyés, ou dès la fin de la période de sécheresse estivale (du 15 août à la fin septembre) selon l'altitude. On voit que cette contrainte est forte, elle est étroitement liée aux conditions extrêmes de la zone bioclimatique concernée. Il faudra aussi, avant tout chantier de végétalisation, tenir compte des contraintes d'approvisionnement des semences et des produits, surtout si le chantier est d'importance.

D'autre part, les produits utilisés autres que les semences sont nombreux (amendements, engrais, fixateurs...). Il faudra les stocker et les protéger:

Si l'on ne connaît pas la disponibilité sur le marché des semences choisies, il faudra prévoir suffisamment tôt dans la proposition de mélange la possibilité d'utiliser certaines espèces ou variétés de remplacement qui conviennent au site. Cette recommandation est d'autant plus nécessaire que l'on souhaite utiliser des espèces natives qui devront faire l'objet d'un contrat de culture.



Alpe d'Huez : pâturage

Dès sa conception, l'opération de végétalisation devra tenir compte du mode de gestion ultérieur du couvert végétal.

Par exemple pour les pistes de ski, où l'on doit maintenir un couvert strictement herbacé, deux types d'entretien de ce couvert sont alors possibles : le fauchage régulier et l'ouverture au pâturage. Dans ce cas, le choix des espèces devra tenir compte des exigences des alpagistes

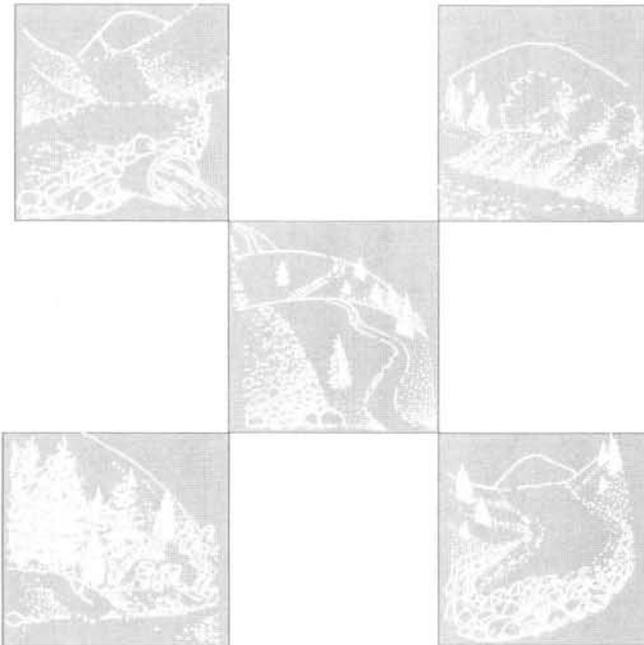
Bien qu'il soit nécessaire de véritablement construire certaines pistes de ski, les interventions en altitude doivent tenir compte des enjeux écologiques et des contraintes climatiques fortes.

Elles doivent aussi prendre en considération les contraintes propres à chaque réalisation pour que la mise en place de l'opération de végétalisation soit une réussite.

Ainsi, nous allons voir que la réalisation même de l'ouvrage puis la préparation particulière du substrat doivent suivre une logique d'intervention stricte et indispensable pour redonner aux milieux les qualités nécessaires pour une parfaite intégration de l'ouvrage à l'environnement.

CHAPITRE II

La logique d'intervention des travaux en altitude



L' intégration à l'environnement de tout type d'aménagement est fortement liée à la façon dont les travaux de création de l'ouvrage ont été conduits.

En effet, et tout particulièrement en altitude, les travaux de terrassement doivent respecter un certain nombre de consignes pour que la phase finale du chantier que constitue la végétalisation soit réalisée dans les meilleures conditions.

Nous n'aborderons pas les détails de la construction d'une piste de ski, mais il convient de rappeler les éléments qui peuvent conditionner la réussite de la végétalisation.

RECONNAISSANCE DU SITE ET DRAINAGE POFOND

Bien que beaucoup d'informations descriptives du site soient contenues dans les différents dossiers : études d'impact, permis de construire, demande d'autorisation d'aménager..., il convient de faire une reconnaissance fine du terrain avant l'intervention des engins pour la construction de la piste.

En particulier, il faut détecter les secteurs humides et les sources même intermittentes. Cette reconnaissance doit se faire plutôt au printemps, on repère ainsi la totalité des venues d'eau et on peut le plus précisément possible évaluer les dimensions adaptées des canalisations nécessaires.

Ce drainage en profondeur avec des drains et des exutoires corrects garantira les aménagements contre les risques de glissement ou divers processus d'érosion plus ou moins profonds qui ne manqueraient pas de se produire si ce préalable n'était pas respecté.

MATÉRIALISATION DES ACCÈS AU CHANTIER

Les travaux en altitude concernent des espaces ouverts qui se prêtent facilement à la divagation des engins de chantier. Il est donc conseillé de créer des itinéraires particuliers pour accéder en tout point au chantier.

Au moment de leur réalisation, il faut veiller à ce que ces accès au chantier s'inscrivent le mieux possible dans l'environnement du domaine skiable. S'ils doivent couper les pistes de ski, il faut que ce soit dans les secteurs les moins en pente.

Lors de la construction de ces itinéraires, il conviendra de veiller à leur drainage (rigoles superficielles, busages éventuellement) et, en fin de chantier, la végétalisation de la bande de roulement et des talus s'imposera.

Ce réseau sera maintenu après la réalisation des aménagements du domaine skiable s'il doit servir ensuite à son entretien estival, à son entretien hivernal pour faciliter l'accès des engins de damage au sommet du domaine aménagé, ou comme boulevard réservé aux skieurs dans les secteurs à forte pente. On veillera alors à effacer les talus amont et aval souvent réalisés pour des raisons de sécurité pendant le chantier.

Ces accès seront aussi utilisés l'été pour différentes pratiques, comme la promenade à pied ou en VTT. Il faudra donc, pour ces usages estivaux, que la pente de la piste reste raisonnable, d'autant plus que ce sont des itinéraires non revêtus ; la pente ne devrait pas dépasser 12 %. Au-delà, les orages et la fréquentation les rendraient rapidement impraticables et inciteraient les éventuels usagers à passer outre et à dégrader le milieu environnant.

En revanche, si après les travaux d'aménagement ce réseau ne se justifie plus, il sera soigneusement effacé du site et végétalisé.

DÉCAPAGE ET STOCKAGE DE LA TERRE VÉGÉTALE

Pour intégrer les ouvrages à l'environnement (pistes, talus, urbanisation...), on cherche bien sûr à recréer un « sol », favorable à l'installation et au maintien de la végétation.

Avant toute intervention de terrassement en altitude, il est donc fortement recommandé de récupérer la terre végétale qui est, en altitude plus qu'ailleurs, un matériau précieux.

En effet, si elle peut être décapée et réutilisée dans de bonnes conditions, elle permet de s'affranchir en partie des conditions édaphiques hostiles propres à l'altitude ou apparues à la suite des travaux de terrassements. Se passer de terre végétale revient à un entretien plus long et donc plus contraignant et coûteux des semis (apport d'engrais...).

Définition de la terre végétale

La terre végétale ne peut être assimilée qu'à la couche superficielle du sol, enrichie en matière organique et dénommée en pédologie : horizon A.

Profil de sol en altitude



L'épaisseur de cette couche utile est variable, si en plaine pour des sols évolués elle peut atteindre de 25 à 35 cm, en altitude pour des sols peu évolués elle ne représente que quelques centimètres.

Les rankers alpins sur roche mère acide manquent de profondeur; et donc de réserves nutritives et de réserves en eau.

Par exemple le Ranker à moder est superficiel et pauvre, avec un horizon Ao peu décomposé de quelques centimètres surmonté d'un A1 noir; mélange de matières organiques et minérales sans agrégats reposant directement sur la roche mère peu ou pas altérée. Ce mélange de terre et de fragments de roche mère ne facilite pas un décapage très sélectif.

Le décapage

Il faut effectuer le décapage de la terre et toutes manipulations ultérieures par temps sec. Il faut bien sûr éviter de la contaminer par incorporation de matériaux étrangers ou de terre provenant du sous-sol. Cette recommandation a ses limites en altitude, de même celle qui consisterait à préconiser un décapage sélectif, pour ne pas mélanger les horizons différents.

En effet, comme on vient de l'évoquer; on trouve rarement au niveau de la pelouse alpine une couche de terre épaisse. On décavera alors le plus de matériau possible, sur quelques centimètres sans trop se soucier de la présence de cailloux. Des techniques de préparation ultérieure du lit de semences permettront d'améliorer la finesse ou la richesse du substrat.

Enfin, il ne faut pas pousser la terre sur des distances importantes, des phénomènes de tassements la rendraient difficile à réutiliser.

Le stockage

Une terre mal stockée se détériore. La cause essentielle de détérioration est le manque d'oxygène dû à la compression du sol (passages de véhicules, tas trop hauts).

Il faut donc à la fois limiter la hauteur des andains (de 1 à 2 mètres) et si possible limiter la durée du stockage, enfin il ne faut pas circuler avec des engins sur les tas.

Pour un dépôt de courte durée (moins de six mois), la hauteur du dépôt peut être égale à la hauteur de déversement des engins utilisés.



Andain de terre végétale

Si la terre doit rester plus de six mois en tas, il faut limiter la hauteur des andains à 1,50 m et leur largeur à 3 m. Une fois les andains réalisés, il faudra les ensemercer rapidement avec un mélange rustique de graminées et de légumineuses. Au moment de la réutilisation de la terre, il faudra la décompacter et au besoin l'enrichir par des engrais adaptés qui ranimeront les fonctions biologiques du sol.

DÉBOISEMENT ET DÉBROUSSAILLEMENT

S'il est besoin de déboiser ou de débroussailler, plusieurs techniques peuvent être employées. Soit on peut éliminer les souches au bulldozer; puis on les enfouit, soit les arbres sont coupés à ras et les souches sont couvertes de terre.

Pour les broussailles, lorsque cela est possible (site accessible, engin approprié), on peut conseiller de broyer les produits de la coupe et les laisser sur place. On évite ainsi une perte inutile de biomasse et d'éléments minéraux tout en enrichissant le sol en matière organique à décomposition lente.

CONSTRUCTION DE PIÈGES À PIERRES

Parmi les travaux à réaliser au moment des terrassements, lorsque l'aménagement se situe en forte pente, figure la construction de "pièges à pierres". Ce sont des tranchées ou bourrelets de matériaux grossiers mis en travers de la pente pour maîtriser la chute des blocs. En effet, en fonction de la pente, les engins utilisés ne peuvent pas toujours retenir les gros blocs qu'ils sont souvent contraints d'extraire du chantier. Ainsi pour éviter tout dégât, en particulier si on se trouve dans un environnement boisé, il est recommandé de réaliser ces pièges à pierres qui seront bien sûr effacés au fur et à mesure de l'avancement du chantier.

LE CHOIX DU MATÉRIEL UTILISÉ POUR LES TRAVAUX DE TERRASSEMENT EN ALTITUDE

Autant que celle des engins, la compétence des conducteurs est la meilleure garantie de la bonne exécution des travaux en altitude.

Si les entreprises spécialisées dans les travaux de terrassement peuvent assurer la présence d'un personnel compétent, il n'en demeure pas moins qu'il est nécessaire que les conducteurs d'engins soient sensibilisés aux problèmes particuliers du milieu montagnard pour intervenir avec une précision garantissant un minimum de dégâts.

Si l'on a interdit dans certains chantiers l'usage du bulldozer, c'est que son emploi abusif avait causé des dégâts importants. Compte tenu de l'évolution dans son utilisation, on peut actuellement reconnaître qu'il peut intervenir avec un minimum de risques s'il est utilisé prudemment.



Le bulldozer

Il permet de réaliser correctement les opérations qui engagent des cubatures importantes sur de faibles distances. Mais lorsque le déplacement des matériaux excède quelques dizaines de mètres, le recours au chargeur et au transporteur est indispensable.

Le chargeur à chenille peut également avoir une tâche polyvalente de transport de matériaux pour sa répartition, puis de régalage. Il convient bien pour la remise en place de terre végétale. Les engins actuellement utilisés sont extrêmement performants et la qualité du travail rendu est étroitement liée à la qualité du chauffeur.



Pelle mécanique

Il est donc fréquent de rencontrer dans des situations de pente et de dévers extrêmes des pelles mécaniques sur chenille réalisant des déplacements de gros blocs sans qu'il soit nécessaire de les miner.

Ces engins permettent aussi la remise en place relativement fine de la terre végétale.

Différents modèles de "pelles-araignées" sont actuellement très souvent utilisés en altitude.

Pour des travaux de faible ampleur, cet engin permet souvent de faire l'économie d'une ouverture de piste d'accès au chantier. Lorsque les aménagements concernent des substrats rocheux, il convient très souvent de procéder à des opérations de minage.



Pelle-araignée



Le perforateur

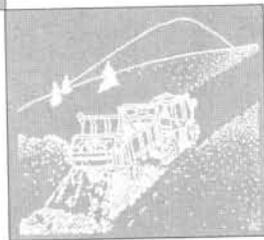
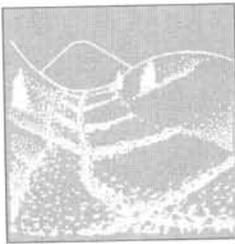
Le perforateur doit aussi être utilisé avec beaucoup d'attention pour bien maîtriser les éventuelles projections de blocs qui pourraient être préjudiciables à l'environnement.

Toutes les recommandations que nous venons d'évoquer ont un double objectif : réaliser un aménagement quel qu'il soit dans les meilleures conditions et préparer au mieux son intégration et sa protection vis-à-vis des risques d'érosion.

On ne peut encore pas, à ce stade du chantier, envisager la réalisation du semis, il faut aborder encore les étapes nécessaires à la préparation fine du substrat et procéder au bon choix des techniques et produits.

CHAPITRE III

Les travaux de préparation du sol avant végétalisation



La piste étant réalisée, profilée, on aborde alors les phases de préparation à la végétalisation. Ces opérations préalables ainsi que le choix des techniques de semis et celles de leur protection sont tout aussi importants que le choix des espèces et des variétés utilisées pour la végétalisation.

Ces travaux de finition contribuent à réaliser un lit de semences riche, suffisamment fin et bien drainé. Ces qualités sont indispensables pour assurer une germination optimale des semences et une bonne installation des plantes.

LA LUTTE CONTRE LE RUISSELLEMENT SUPERFICIEL

On a vu que, dès la conception de la piste, l'assurance de sa stabilité passait par une bonne connaissance et maîtrise des écoulements profonds et superficiels. Compte tenu des contraintes de l'altitude, tant que la végétation n'est pas réinstallée, il subsiste un risque de ravinement du substrat et donc d'érosion des sols nus.

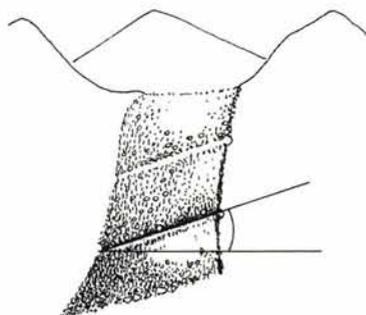
Après les opérations de drainage en profondeur, il faut aussi éliminer systématiquement l'eau de surface par un « drainage superficiel ».



La construction des revers d'eau en travers des pentes doit s'accompagner de la modification des collecteurs et des exutoires, car il faut que ces ouvrages soient capables d'absorber correctement les apports d'eau supplémentaires, sans déplacer vers l'aval les risques d'érosion.

La présence de ces revers d'eau est temporaire. Dès que le couvert végétal est reconstitué, il absorbe une partie des précipitations et répartit les écoulements entre ruissellement superficiel et eaux d'infiltration.





Dessin sur pente en travers du drain

Ces rigoles plus ou moins profondes pourront donc être "effacées" une fois le site végétalisé.

Leur pente en travers de la piste doit se situer aux alentours de 4 %, au-delà, il peut y avoir des processus d'érosion dans la rigole même et donc un affouillement qu'il sera difficile de combler:

L'écartement des drains entre eux est fonction de la largeur et de la surface à drainer et aussi de la granulométrie : si le terrain comporte une proportion importante d'éléments grossiers les drains pourront être plus écartés.

Largeur de la piste	Écartement
25 - 40 m	35 m
45 - 50 m	30 m
55 - 60 m	25 m
65 - 70 m	20 m

SEATM 1990

RAMASSAGE, RATISSAGE OU CONCASSAGE DES PIERRES

Le sol étant considéré comme sain, il faut qu'il puisse accueillir les semences et doit donc être suffisamment fin et riche.

L'épierrage manuel a été pendant longtemps la seule solution pour donner à la plante un maximum de surface à coloniser et obtenir ainsi un tapis végétal le plus dense possible. Par ailleurs, cette méthode traditionnelle réalisée à la griffe ou au râteau permettait d'ameublir le sol, facilitant d'autant l'ancrage des racines. Aujourd'hui, le ramassage des pierres est de plus en plus remplacé par l'emploi du concasseur.

Cette technique de préparation du substrat est plus rapide et moins coûteuse que l'épierrage manuel. Au début réservé au substrat calcaire, le concassage est maintenant assez largement répandu sur tous les types de roches.

Le concassage présente de multiples avantages, il permet en cas de récupération et de réutilisation de la terre végétale d'être moins exigeant sur sa qualité.

En effet, on peut avec cette technique réutiliser de la terre même fortement chargée en pierres. Le concassage permet aussi d'en utiliser moins, puisque la terre est alors incorporée dans le substrat en place.



Broyeur de pierres

Les exemples les plus anciens nous viennent du Vercors, ainsi au stade de neige de Lans-en-Vercors, il a été possible à une année d'intervalle (1983 et 1984) de comparer les techniques de création de pistes de ski en site calcaire (calcaire urgonien) avec épierrage ou concassage du substrat avant végétalisation.

EXEMPLE DE LANS-EN-VERCORS

<p>1983 : 3 ha ont été réalisés selon le schéma classique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - récupération de la terre, - matérialisation des voies d'accès aux pistes, - profilage des pistes, - remise en place de la terre végétale, - épierrage, - semis, - paillage bitumé. 	<p>Il a fallu 25 jours pour réaliser ce chantier avec 40 personnes en permanence (utilisation de l'armée), surtout employées pour la phase d'épierrage..</p> <p>Près de 1 000 m³ de terre par hectare ont été nécessaires pour assurer la réussite de la végétalisation.</p>
<p>1984 : 3 ha de pistes ont été réalisés selon le nouveau schéma :</p> <ul style="list-style-type: none"> - récupération de la terre végétale, - matérialisation d'accès aux pistes, - profilage des pistes, - remise en place de la terre, - broyage, - semis, - paillage. 	<p>Il a fallu 10 jours pour réaliser ce chantier avec 30 personnes uniquement pour l'opération de paillage.</p> <p>Seulement 400 m³ de terre par hectare ont été nécessaires pour obtenir le même résultat.</p>

Plusieurs types d'appareils existent sur le marché. Après une première génération d'engins dont la largeur de travail variait de 1 m à 2,35 m, une nouvelle génération est proposée maintenant : il s'agit d'appareils à marteaux fixes, plus puissants, ayant une largeur de travail de 1,50 m à 2,50 m. Ces engins sont capables de broyer les blocs, les arbustes et sont particulièrement efficaces en situations difficiles. Ils peuvent aussi éliminer les têtes de roche en place.

L'utilisation du broyeur de pierres nécessite un tracteur très puissant (plus de 150 ch), équipé d'une vitesse d'avancement très lente. Cette vitesse d'avancement est déterminante pour la qualité du broyage. Il faut conserver une certaine hétérogénéité au substrat pour faciliter l'accrochage et la protection des jeunes plants. On ne recherche donc pas une granulométrie très fine qui rendrait le substrat trop sensible à l'érosion (ruissellement et vent).

Le coût des opérations de concassage varie entre 3 et 8 F HT le mètre carré selon la nature du matériau à concasser.

LA RECONSTITUTION D'UN SUBSTRAT ADAPTÉ

La dernière étape avant le semis est la constitution du "garde-manger" indispensable pour qu'au-delà de la germination la plantule s'installe et trouve dans le sol tous les éléments nécessaires à sa nutrition.

Mais, après les travaux de terrassement en altitude, le sol n'a plus toutes les qualités requises pour jouer pleinement son rôle : donner à la plante la possibilité de s'ancrer, lui fournir une réserve d'eau suffisante, d'oxygène et de nourriture.

En effet, la fraction vivante du sol constituée de micro-organismes (bactéries, champignons...) et de macro-organismes (vers de terre...) a complètement disparu. Il faut donc modifier le support de la plante par un apport de terre végétale ou de tout autre amendement.

La terre végétale

Au cours de la construction de la piste, toutes les recommandations ont été faites pour que le décapage, le stockage et la remise en place de la terre végétale soient faits dans les meilleures conditions de façon à préserver tout son potentiel agronomique.

La terre végétale, grâce à l'humus, est un milieu vivant : la présence et l'activité de ses organismes sont indispensables aux plantes. La préservation d'un équilibre et d'une structuration favorable entre les matières organiques, les particules fines (limons et argiles) et les éléments nutritifs permettent au substrat de proposer : un bon ancrage pour les racines, une bonne rétention de l'eau, une bonne alimentation minérale des plantes. On peut ainsi espérer une meilleure couverture du sol, une meilleure vigueur des espèces végétales introduites.

S'il n'a pas été possible de récupérer la terre avant les travaux, des amendements existent. Ils peuvent participer largement au succès de la végétalisation s'ils sont bien choisis et judicieusement dosés. Ils sont utilisés pour modifier favorablement certaines propriétés du sol. On peut préconiser :

- les amendements calcaires qui corrigent l'acidité du sol et en améliore la structure,
- les amendements organiques qui agissent sur la structure, la texture, en fournissant des substances humiques indispensables à la formation du complexe argilo-humique. Ils apportent des éléments nutritifs majeurs et des oligoéléments et contribuent à entretenir la vie microbienne des sols. Ils sont à base de fumier, de composts, de tourbes...

Ce sont essentiellement les amendements organiques qui intéressent la végétalisation en altitude.

Les amendements organiques

Ils sont destinés à augmenter le taux de matière organique du sol, ils sont ainsi définis par la réglementation comme des matières fertilisantes composées principalement de combinaisons d'origine végétale, fermentées ou fermentescibles, destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de matière organique du sol. La décomposition de cette matière organique en humus contribue à la formation du complexe argilo-humique qui stabilise la structure du sol. L'humus ainsi produit favorise l'action des engrais minéraux, il sert d'aliment à la population microbienne et aux vers de terre qui redonnent ainsi un peu de vie au sol.

Les amendements organiques issus de la valorisation des déchets

C'est volontairement que nous ne développerons que l'exemple de l'utilisation des boues issues du traitement des eaux usées domestiques et ayant fait l'objet d'opérations de compostage ou de maturation. Si d'autres produits sont utilisés : composts d'ordures ménagères, fumiers, purins, lisiers..., ils le sont de façon relativement anecdotique en zone de montagne et n'ont pas fait,

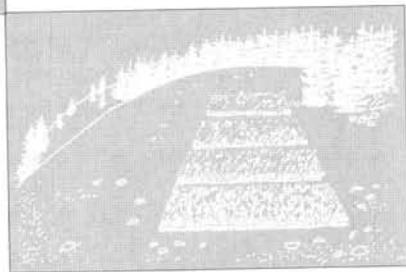
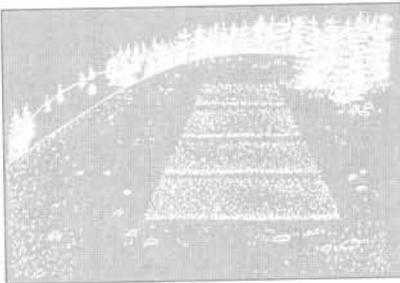
comme les composts de boues de stations d'épuration des eaux usées, l'objet d'essais et de suivis expérimentaux en altitude.

Un chapitre particulier va être consacré à la reconstitution du substrat avant végétalisation, en effet la valorisation des boues va devenir une obligation économique, puisque de nouvelles réglementations vont rendre leur mise en décharge interdite à partir de 2002.

Nous avons pu constater que ces produits apportent la matière organique qui a disparu au cours des travaux de terrassement et avec le temps une relative fertilité, mais il convient d'être prudent dans leur emploi et des recherches sont encore nécessaires à la bonne définition des conditions de leur utilisation qui doivent respecter l'homme et son environnement.

CHAPITRE IV

La reconstitution du substrat avant végétalisation



HISTORIQUE DES RECHERCHES ENGAGÉES

Dès 1982, des essais très simples, utilisant des boues et des composts de boues, ont été mis en place dans quelques stations de ski en Savoie, dans l'Isère et les Hautes-Alpes, pour aider à une meilleure revégétalisation des pistes de ski.

L'exemple de Montgenèvre

Les boues mises en essai provenaient de la station d'épuration de Briançon. À l'époque, il s'agissait de boues obtenues par procédé physico-chimique, elles étaient chaulées puis passées dans un filtre-pressé (siccité finale 32 %). L'essai en reconstitution de substrat concernait deux parcelles de 200 m², chacune installée à environ 1900 m d'altitude, sur une piste de ski. La première parcelle témoin a été ensemencée sur terrain naturel, une partie étant fertilisée. L'autre parcelle a reçu un apport de 10 cm de boues, elle a été ensemencée et pour partie aussi fertilisée.

Au bout de deux mois, la végétation de la parcelle ayant reçu les boues est particulièrement dense : le recouvrement végétal est de 80 % en moyenne sur boues contre 15 % en moyenne sur sol nu, avec dans les deux cas aussi un effet supérieur sous engrais.

Au bout d'un an, le pourcentage de recouvrement sur sol nu est d'environ 50 %. Sur boues, ce pourcentage est de 90 %.

Déjà à l'époque, l'efficacité des boues en végétalisation était évidente, mais l'essai n'a pas été suivi de réalisation en vraie grandeur. Il s'est avéré d'une part que le coût de la réalisation de plusieurs hectares de pistes avec cette technique serait élevé. En effet, les quantités de boues à mettre en œuvre seraient très importantes compte tenu de leur forte teneur en eau. D'autre part, le stockage des boues n'était pas parfaitement organisé et des débris divers interdisaient l'emploi sans risque de dégradation d'épandeur à fumier classique. En effet, il n'existait pas à l'époque d'outil d'épandage adapté pour les pentes et dévers. Enfin, la stabilité des boues n'était pas optimale et des odeurs s'étant développées pendant la manipulation, les riverains ont craint le développement de nuisances et la pollution éventuelle de la Durance à cet endroit.

En conclusion, pour poursuivre il fallait donc : améliorer la qualité des boues, apporter la matière organique sous la forme la plus concentrée possible, ajuster au mieux les doses nécessaires à une bonne installation de la végétation et améliorer les conditions de stockage, reprise et épandage des produits.

L'exemple de la Tarentaise

Le contexte

L'organisation des jeux Olympiques d'Albertville a été un moteur extrêmement important pour la recherche et le développement de filières de valorisation des boues de stations d'épuration. De nombreuses recherches ont été engagées par le ministère de l'Agriculture (FNDAE), le conseil général de Savoie, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse.

Avant l'organisation des jeux, la capacité d'épuration en Tarentaise était de 120 000 équivalents-habitants. Pendant la préparation des jeux (1990-1992), elle est passée à 311 500 équivalents-

habitants par l'extension de quatre stations d'épuration existantes et la construction de six nouvelles stations.

Dans la même période, le parti de la valorisation partielle des boues étant pris, deux constructions ont été réalisées : celle de l'usine de compostage de boues et de fumier à Aime et celle de l'unité de déshydratation des boues à Valezan sur l'usine d'incinération des ordures ménagères.

Les recherches engagées

À partir de 1987, des essais au col de Forcle à La Plagne ont été réalisés pour définir les conditions de végétalisation sur compost de boues avant même que la décision de construire l'unité d'Aime soit prise.

Les essais du col de Forcle à La Plagne

À l'époque de la mise en place de cet essai, il n'y avait pas encore d'unité de fabrication de compost dans la vallée, le compost testé a été fabriqué à la station d'épuration de Pau, réalisée par l'entreprise CGEE ALSTHOM.

Les boues sont issues d'un traitement biologique simple des eaux usées, elles sont ensuite concentrées par un épaisseur puis déshydratées sur une bande presse. On a alors un produit d'une teneur en matière sèche de 26 %. Les boues sont ensuite traitées selon la technique du compostage en tas aérés (procédé de Betsville). Elles sont mélangées à un support carboné (déchets divers : petites plaquettes de bois, rafles de maïs, feuilles mortes...).

Le compostage en tas et à l'air libre, avec un système d'aération interne, dure trois semaines. Ensuite les tas sont démolis pour faciliter le séchage, puis tamisés pour récupérer la fraction grossière du support carboné. Le compost est alors mis à maturer sur une aire pendant quarante jours. Le produit final a une teneur élevée en matière sèche d'environ 70 %.

Les analyses de ce compost (INRA de Bordeaux) lui confèrent une valeur d'amendement organique. La teneur en matière organique varie, suivant les mois où ont été effectuées les analyses (été 1986) entre 45,84 % et 52,44 % de matière sèche.

Les teneurs en éléments fertilisants sont satisfaisantes (analyses INRA) :

– azote total : 2,22 à 2,39 %, phosphore (P_2O_5) : 1,90 à 2 %, potassium (K_2O) : 0,22 à 0,24 %.

En revanche, les teneurs en métaux lourds sont élevées, du fait de l'origine en partie industrielle des eaux usées. Ce compost ne pourrait, au-delà de l'essai, avoir une utilisation ni en agriculture ni en reconstitution de substrat. De cet essai, nous retenons aussi qu'il faudrait, pour chaque type de compost, plusieurs années d'essais agronomiques pour quantifier précisément leurs caractéristiques et conditions d'utilisation.

Les essais ont été réalisés sur une zone terrassée depuis plus de cinq ans et non végétalisée, au col de Forcle dans la station de ski de La Plagne à 2 245 m d'altitude. L'exposition est nord-ouest et la pente est d'environ 30 %. Le substrat est la quartzite, terrain suffisamment filtrant, ce qui limite les risques de ravinement et de glissement du compost et impose cependant d'être vigilant car la lixiviation y est accrue.

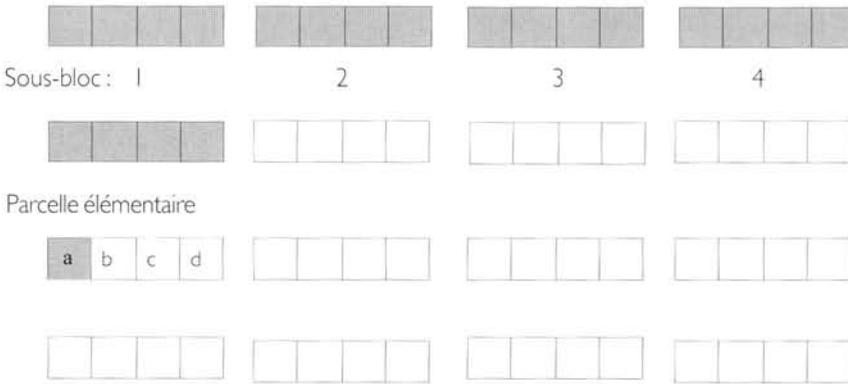
La végétation environnante est caractéristique de la pelouse alpine sur silice.

Le matériel végétal testé est le suivant :

la fétuque rouge traçante <i>Rubina</i>	la fléole des prés <i>Climax</i>
le trèfle blanc nain <i>Huia</i>	les trois espèces en mélange

La fertilisation minérale sur certaines parcelles a été réalisée par un ternaire NPK : 12 12 17. Le dispositif expérimental mis en place, usuel en agronomie, est le "split-plot" à deux facteurs pour étudier les deux facteurs simultanément : la végétation, le compost.

Bloc



Sous-blocs :

- 1 - sol nu
- 2 - + boues compostées (1 cm d'épaisseur)
- 3 - + boues compostées (5 cm d'épaisseur)
- 4 - idem 3 + NPK

Parcelles élémentaires :

- a - mélange fétuque 50 % + fléole 40 % + trèfle 10 %
- b - fétuque seule
- c - fléole seule
- d - trèfle seul

Le dispositif ainsi installé occupait environ 260 m². Les observations ont concerné le comportement de la végétation :

- comptage du nombre de pieds pour 10 cm²,
- estimation des taux de recouvrement,
- description des stades de végétation (nombre de feuilles, présence de talles, état sanitaire, enracinement...).



Le dispositif un mois après le semis

Il a pu ainsi être défini qu'en reconstitution de substrat le compost devait être utilisé sur 5 cm d'épaisseur pour jouer efficacement ce rôle, en fertilisation d'entretien 1 à 2 cm suffisaient.

Il convient donc d'utiliser le compost de boues à raison de 100 à 150 t/ha, pour la reconstitution de substrat, et de 30 à 50 t/ha pour les opérations ultérieures en fertilisation d'entretien.

FERTILISATION D'ENTRETIEN AVEC DES COMPOSTS DE BOUES :	UTILISATION DES COMPOSTS DE BOUES EN RECONSTITUTION DE SUBSTRAT :
Dose d'utilisation : de 30 à 35 t/ha.	Dose d'utilisation : 150 t/ha.
Coût de l'opération (achat, transport et épandage du produit) : 295 F/m ³	Coût à l'hectare : 88 500 F soit 8,85 F /m ² .
Coût à l'hectare environ 19 500 F soit 1,95 F/m ² .	

Il est vivement recommandé d'établir un plan d'épandage précisant les zones où ce type d'utilisation est possible ainsi que les doses à épandre et la périodicité d'emploi. La mission de valorisation agricole des déchets (MVAD) mise en place à la chambre d'agriculture de Savoie depuis 1987 élabore avec les hydrogéologues de l'université de Savoie les plans d'épandage particuliers pour les stations de ski souhaitant utiliser les boues en revégétalisation de pistes de ski.

L'étude du marché potentiel dans les domaines skiables (1988-1989)

Pour qu'une véritable filière puisse être organisée entre producteurs de composts et utilisateurs, il convenait d'estimer le plus justement possible le marché potentiel de la végétalisation dans les stations de ski.

Ila été établi un bilan des surfaces en attente de végétalisation pour les stations olympiques. Il y avait à l'époque près de 500 ha de pistes en attente de végétalisation dont 150 pouvaient accueillir des composts de boues.

Stations	Surfaces à réhabiliter (surfaces à entretenir) en ha	Surfaces à réhabiliter avec des boues stabilisées en ha
Les Menuires - Val-Thorens	89	15
Méribel	24 (27)	4
Courchevel	16 (8)	5
Pralognan-la-Vanoise	17	10
La Plagne	56	19
Les Arcs	34	20

Val d'Isère	67	16
Tignes	138	50
La Rosière-Montvalezan	10 (17)	13
Peisey-Nancroix	10	5
Valmorel	10	0
Les Saisies	10	0
Arèches-Beaufort	29	0
Total	510 ha (52 ha)	157 ha

Ces surfaces disponibles correspondaient à plusieurs années de production envisagée pour l'unité de compostage d'Aime.

Mais d'autres problèmes restaient à résoudre, qui sont en particulier, ceux liés à la technique d'épandage.

Le matériel d'épandage

L'utilisation d'amendement en altitude, à des doses importantes comme c'est le cas pour les boues compostées, nécessite que des outils performants soient mis au point.

Des études se sont avérées nécessaires pour la mise au point d'engins porteurs spéciaux et d'épandeurs adaptés et pouvant évoluer sans risque sur de fortes pentes.

Il s'agissait de réaliser un ensemble tracteur et remorque permettant de travailler en totale sécurité sur les pistes, dans des pentes de l'ordre de 40 à 45 % à pleine charge et dans les conditions les plus difficiles.

Le tracteur seul peut être utilisé à d'autres tâches en dehors des périodes d'épandage (débardage, déneigement, travaux publics).

Trois saisons et un premier prototype de la remorque RED, construit en 1993, ont été nécessaires pour la conception, les essais et la mise au point définitive de l'ensemble à six roues motrices SACMI FLC 150/RED terminé en 1996. Ce matériel, qui a fait l'objet de nombreux brevets, a été livré au SIGP (La Plagne). Cet engin permet d'épandre très précisément le compost aux doses recommandées en accord avec les contraintes écologiques des sites à réhabiliter et avec les contraintes financières.

Plusieurs stations ont utilisé cet engin pendant toute les phases de sa mise au point, en particulier La Plagne qui épand par été environ 1000 m³ de boues compostées (en 1995 : 1500 m³ de compost d'Aime ont été utilisés à La Plagne et aux Arcs).



La remorque RED

Dans la plupart des cas, on accède à la piste de ski pour pratiquer l'épandage directement avec ce système tracteur-remorque d'épandage. Il existe cependant de nombreux aménagements qui n'offrent pas de possibilités d'accès directs : tous les aménagements engendrant des talus importants (parkings, voies de circulations, abords de bâtiments, carrières....).

Une machine existe actuellement en un seul exemplaire : elle permet de projeter des matières solides à distance sur des développés de pente importants. Très utilisée sur les talus routiers, autoroutiers ou ferroviaires, cette machine permet une rapidité de mise en œuvre du compost et donc une diminution notable du coût de ce mode de végétalisation.

L'efficacité du produit observé au col de Forcle, l'existence de surfaces importantes en attente de végétalisation, les techniques d'épandage mises au point ont encouragé la création d'unités de compostage ou de maturation des boues.



La machine à projeter

MATURATION ET COMPOSTAGE DES BOUES DE STATIONS D'ÉPURATION D'ALTITUDE

Deux types de transformation des boues ont été mis en place en Tarentaise à l'occasion de l'organisation des jeux Olympiques d'Albertville en 1992 : le compostage et la maturation.

Les boues maturées

L'opération de maturation des boues consiste à stocker pendant une période assez longue (de deux à trois ans) sur une faible épaisseur (de 50 à 80 cm) des boues déshydratées pour les laisser évoluer.

Pour assurer une qualité constante du produit, il convient de ménager une aire de stockage, si possible bitumée pour éviter que des pierres ou d'autres déchets soient repris au moment du transport et soient à l'origine de la détérioration des appareils d'épandage. Cette technique nécessite beaucoup d'espace qu'il convient de trouver éloigné des habitations ; elle ne peut être conseillée que pour de petites stations d'épuration.

Les boues maturées : l'exemple de Bellentre

La station d'épuration de Bellentre est de type physico-chimique. Ce procédé est particulièrement adapté aux fortes variations de charge. Les boues produites sont déshydratées mécaniquement à l'aide d'une centrifugeuse et de polyélectrolytes. La siccité sortie usine est de 20-25 %, la teneur en métaux lourds est très inférieure aux valeurs de la norme NFU 44-041. Les boues sont alors nauséabondes, collantes et deviennent rapidement noires.

La maturation :

Les boues sont disposées en couches minces de 50 à 80 cm d'épaisseur sur leur aire de stockage, elles subissent une évolution assez rapide :

* une perte d'eau qui fait passer leur siccité à 40-50 % de MS en un an ou un an et demi.

Le séchage a lieu sous l'influence du climat. L'été, cette évaporation est d'autant plus efficace que la couche est mince et fissurée au court du séchage (fentes de retrait). Elle est aussi favorisée par le développement de la végétation herbacée sur le stockage.

* un changement de structure et d'aspect, lié à l'évolution biologique de la matière organique sans odeur notable, lié aussi à l'alternance gel-dégel qui favorise la désagrégation de la masse et contribue à rendre le produit "pulvérulent".

Après deux ans dans ces conditions, les boues ainsi maturées se présentent comme un terreau inodore d'aspect brunâtre, facile de mise en œuvre par les engins courants : chargeur frontal, épandeur à fumier. L'épaisseur de la couche est alors d'environ 30 cm. La maturation augmente fortement la teneur en matière sèche (de 25 à plus de 50 %), cette perte d'eau est intéressante car elle conduit à un produit final plus concentré, le rapport C/N passe de 13 à 8,5. Cette bonne stabilisation est confirmée par l'absence d'odeur; l'azote est présent sous forme organique essentiellement. Enfin, les teneurs en éléments traces sont nettement inférieures aux valeurs de référence de la norme.

Ces boues peuvent être utilisées à raison de 150 t/MS/ha en reconstitution de sol et à raison de 30 t/MS/ha en entretien.

Il convient de noter que, compte tenu des besoins en surface pour cette technique, elle est à réserver aux petites unités de traitement des eaux usées : de 3 000 à 4 000 m² sont nécessaires pour stocker les boues pendant trois ans pour une station d'épuration de 4 000 équivalents-habitants en moyenne sur l'année et qui produit de 400 à 500 m³ de boues par an.

Les boues compostées

Le compostage constitue une part infime de l'utilisation des boues. En effet près de 50 % de celles-ci sont utilisées en agriculture, entre 30 et 35 % sont mises en décharge et 15 % sont incinérées. La valorisation indirecte par le compostage ne représente qu'à peine 2 % des boues en tonnes de matières sèches (source ADEME juin 1995).

Le compostage est un traitement biologique de stabilisation aérobie qui permet la transformation des matières organiques fraîches en humus et en éléments minéraux. Les réactions d'hydrolyses qui ont lieu lors du compostage produisent notamment de l'énergie. Cela se traduit par une forte élévation en température permettant l'assèchement et l'hygiénisation des boues.

Après une phase de maturation qui doit durer plusieurs mois, le produit final est suffisamment stable et humifié pour apporter instantanément au sol les éléments essentiels dans les équilibres biologiques naturels. Le risque polluant des composts mûrs est bien inférieur à celui des boues fraîches, s'il est bien mis en œuvre en suivant des règles strictes vis-à-vis des sensibilités du milieu naturel.

La réussite du compostage demande :

– une humidité entre 40 et 65 % (siccité de 45 à 50 %),

– une aération suffisante (taux d'oxygène de 5 à 15 % du volume des espaces lacunaires),

– le rapport des teneurs en azote total et en carbone permettant la multiplication des micro-organismes (C/N entre 20 et 50),

Ces conditions doivent permettre une élévation spontanée de température au-dessus de 60 °C pendant quelques jours. Or, les boues sont en général trop humides (siccité dépassant rarement 30 % après déshydratation), et elles contiennent trop peu de carbone pour être compostées seules. La solution la plus courante consiste donc à mélanger les boues avec d'autres déchets ou sous-produits suffisamment secs et carbonés. Le support carboné aura également un rôle de structurant du mélange.

Le compostage va permettre ainsi :

- une diminution de la fraction volatile,
- une baisse de la teneur en eau par élévation de la température,
- une hygiénisation du produit par destruction des germes pathogènes,
- la production d'un produit stable et riche en composés humiques.

Au terme de l'opération de compostage, on obtient un produit fin, ayant l'aspect d'un terreau qui présente aussi l'avantage d'être inodore. Enfin, le temps de fabrication de ce produit est extrêmement court par rapport à la maturation : quelques mois suffisent. La qualité du compost peut être appréciée en fonction du rapport C/N. Un rapport inférieur ou égal à 15 laisse préjuger une bonne minéralisation, donc une maturation suffisante du produit.

Les risques de "fonte du semis" peuvent être importants si le compost n'a pas subi une maturation correcte. En effet, la forte teneur en ammoniac et en certains acides organiques (acétique, propionique, isobutyrique...) dans le compost frais peut le rendre très phytotoxique. C'est le facteur essentiel à déterminer pour caractériser son niveau de maturation.

Des méthodes biologiques telles que le test de germination (« test cresson » de Spohm - 1968) permettent de définir cette phytotoxicité.

Le compost ainsi obtenu améliore la qualité des sols sous trois aspects :

- **physique** ➤ porosité et aération, stabilité et résistance à l'érosion, capacité de stockage d'eau disponible pour les plantes, résistance à la sécheresse.
- **chimique** ➤ régulation de la libération des éléments minéraux, action des engrais mieux maîtrisée.
- **biologique** ➤ enrichissement en une flore active microbienne, vie du sol activée.

Une unité de compostage des boues a été construite à Aime (Savoie), elle permet la valorisation de trois types de déchets : les boues de station d'épuration, les fumiers, les sciures.

Les boues compostées : l'exemple d'Aime (Savoie)

À la faveur de l'organisation des jeux Olympiques d'Albertville, de nombreuses études et recherches ont permis de valoriser différents "déchets" (boues, fumier; sciure) par la production d'un compost de qualité. Ce compost végétal à base de sciure (40 % de la matière sèche totale), de fumier de bovin (de 20 à 30 % de la matière sèche totale), de matière organique d'eaux résiduaires (de 30 à 40 % de la matière sèche totale) a une teneur en matière organique de 60 % sur produit sec, une teneur en matière sèche de 40 %, avec 1 % de la matière brute d'azote total, un rapport C/N de 20 et un pH autour de 6,8, sa densité moyenne est de 0,6.

Les trémies situées en face des boxes de stockage sont remplies avec un tracto-chargeur de 2 m³. Le mélange se fait dans un malaxeur à axe horizontal, alimenté par trois tapis venant de chacune des trémies. Le mélange obtenu est composé approximativement de :

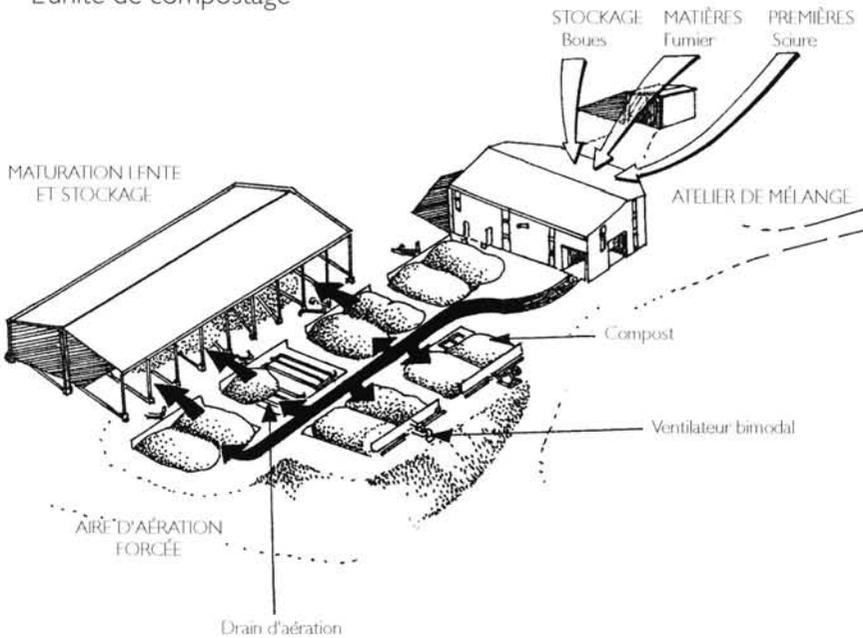
- 1 volume de boues ;
- 1 volume de fumier ;
- 2 volumes de sciure.

Ce sont là des bases théoriques, fonction de la disponibilité du fumier; par exemple en 1995 le compostage a mis en œuvre :

- (1/3) 4 000 m³ de boues à 20 % de matière sèche (densité de 1)
- (1/6) 2 000 m³ de fumier à 25 % de matière sèche (densité de 0,8)
- (1/2) 6 000 m³ de sciure à 55 % de matière sèche (densité de 0,25).

Le compost est placé sur une aire en deux andains qui sont aérés par ventilateur bimodal (aspiration/soufflage). L'aération dure de trois à cinq semaines. Il y a sur l'unité de fabrication six aires qui permettent de traiter jusqu'à 200 m³ du mélange par semaine. Après la phase d'aération, le compost est stocké environ deux mois pour sa maturation.

L'unité de compostage



Le temps de fabrication du compost est d'environ trois mois et demi, il est en priorité utilisé sur les pistes de ski des stations de Tarentaise, mais ce produit n'est toujours pas homologué.

Le classement en amendement organique et la commercialisation d'un tel produit doivent suivre des démarches réglementaires complexes que nous allons aborder. Pour l'instant, le produit essentiellement utilisé dans les stations de ski proches est décrit dans une fiche technique.

FICHE TECHNIQUE

Conformité à la norme NFU 44051*
"Amendement organique" Compost
végétal à base de :

- Sciure 40 % de la matière sèche totale
- Fumier de bovin 35 % de la matière sèche totale
- Matière organique d'eaux résiduaires 25 % de la matière sèche totale

* Homologation en cours.

Teneur en matière organique
60 % du produit sec

- Teneur en matière sèche : 40 %

Azote total 1 %

- Rapport C/N = 20 - pH = 6,8

- Densité moyenne de 0,45 à 0,55

Usine conforme aux dispositions prévues par la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relatives aux installations classées pour la protection de l'environnement.

L'EMPLOI DES BOUES ET DES COMPOSTS

Les aspects réglementaires

Le devenir des boues d'épuration s'inscrit dans le cadre de la loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. Elle fixe les objectifs de principe suivants :

- la priorité est donnée si possible à la valorisation du déchet plutôt qu'à sa stricte élimination ;
- il faut éviter que la gestion, élimination ou valorisation, des déchets ne porte préjudice à l'environnement ;
- la responsabilité à ce titre est au producteur ou au détenteur du déchet.

De nouvelles règles sur la mise en décharge de produits comme les boues sont mises en application (Code permanent de l'environnement et des nuisances, décret 92-646 du 13 juillet 1992).

Dès 2002, aucune décharge ne pourra accueillir des déchets encore susceptibles d'être valorisés. Ces décharges ne devront contenir que des déchets ultimes. C'est donc, en partie, en prévision de l'application de ces nouvelles règles que de nombreuses études sur la valorisation des boues et autres déchets sont menées.

La législation concernant l'utilisation des boues et des composts

Le compost à base de boues de stations d'épuration est une « matière fertilisante comme définie dans la loi n° 79-595 du 13 juillet 1979, relative à l'organisation et au contrôle des matières fertilisantes et des supports de culture.

Le décret 80-477 du 16 juin 1980 porte application de cette loi.

- " Les matières fertilisantes regroupent les engrais, les amendements, et d'une manière générale tous les produits dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols."

- " Les supports de culture sont des produits destinés à servir de milieu de culture à certains végétaux ".

Toute "matière fertilisante " présente sur le marché doit faire l'objet de l'une des procédures suivantes :

- homologation (dossier à déposer au ministère de l'Agriculture),
- autorisation provisoire de vente,
- autorisation provisoire d'importation.

Ne sont pas soumis à ces procédures :

- les produits dont la normalisation (normes AFNOR) a été rendue obligatoire,
- les produits dont la commercialisation est prévue par les directives de la communauté européenne,
- les rejets, dépôts, déchets ou résidus dont l'évacuation, le déversement ou l'épandage sont réglementés par ailleurs,
- les produits organiques bruts et supports de culture d'origine naturelle sans traitement chimique.

Les normes AFNOR existantes mettent en évidence quatre grandes catégories de produits :

- les engrais minéraux : norme NFU 42-001,
- les amendements organiques : norme NFU 44-051,
- les supports de cultures : norme NFU 44-551 (en cours de révision),
- les boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines : norme NFU 44-041.

On pourrait considérer que le compost de boues concerne la norme NFU 44-051 car c'est elle qui touche le plus à la production de compost. Elle définit l'état de maturité des composts et leur granulométrie. Cependant, cette norme concerne surtout les produits ayant une origine unique, elle ne considère pas les nouveaux types de compost résultant de mélange ou de procédés particuliers comme les composts de boues + support carboné, le lombri-compost, les composts de déchets verts.

De plus, elle ne réglemente pas la qualité du compost (teneur en métaux, en pathogènes, en polluants organiques). Ces risques liés à l'utilisation des boues appellent à un cadre réglementaire plus précis qui n'est pas encore défini. En attendant d'avoir une réglementation plus appropriée, la norme NFU 44-041 complétée par les règlements sanitaires départementaux est alors utilisée.

La norme NFU 44-041 spécifie que « les boues destinées à l'épandage sur sol doivent être stabilisées ». Les boues stabilisées sont les « boues d'épuration dont le pouvoir fermentescible a été réduit par un traitement approprié ». Les traitements pour la stabilisation sont classés en trois types : « la stabilisation biologique aérobie, biologique anaérobie ou par un réactif minéral ».

Le compostage des boues est un procédé de stabilisation biologique aérobie. Il serait donc possible de se conformer aux règles prescrites par la norme NFU 44-041 pour les spécifications et les conditions de mise en œuvre du compost. Ainsi la procédure d'homologation ne serait pas obligatoire.

Cependant, prochainement la norme NFU 44-041 doit être abrogée, un décret et un arrêté en cours d'élaboration doivent fixer plus précisément le cadre de la valorisation des boues d'épuration issues du traitement des eaux usées. Un chapitre concernera d'ailleurs la revégétalisation des sites.

Il faut aussi signaler la création, à l'initiative de la France, du Comité technique européen TC 308 au sein du Comité européen de normalisation pour définir un cadre normatif et réglementaire cohérent, réaliste et homogène d'un pays à l'autre et aborder dans sa globalité le problème des boues.

Les aspects risques

Il existe trois types de risques concernant l'utilisation des boues :

- ceux qui sont liés aux éléments-traces métalliques,
- ceux qui sont liés aux germes pathogènes,
- ceux qui sont liés aux polluants organiques.

Le problème des éléments traces métalliques

Entre 60 et 90 % des métaux contenus dans les effluents sont retenus dans les boues au cours du traitement des eaux usées (concentration par précipitation, complexation, absorption et métabolisation). Ces éléments-traces métalliques, toxiques au-delà d'un certain seuil, ont des origines diverses.

Leur utilisation non contrôlée, en agriculture et en revégétalisation, comporte trois types de risques :

- risque de phytotoxicité, et impossibilité dans ces conditions de constituer une couverture végétale protectrice pour les sols ;
- accumulation métallique dans le végétal et contamination de la chaîne alimentaire ;
- entraînement vers les horizons profonds et contamination des ressources en eau potable (nappes phréatiques).

Les éléments traces métalliques sont des toxiques majeurs des écosystèmes au-delà d'un certain seuil. Ce sont des toxiques cumulatifs qui agissent à faible dose ("éléments-traces") et qui, de ce fait, nécessitent une surveillance technologique notamment sur le plan alimentaire. Les problèmes toxicologiques liés aux boues de station d'épuration sont pris en compte par des contrôles réguliers et des obligations de gestion.

En zone de montagne, le risque pour l'homme est d'autant plus faible que le degré d'industrialisation des agglomérations desservies est bas et que l'eau provient de nappes profondes.

Métaux	Origines de leur présence dans les boues urbaines
Cadmium	Industries de traitement de surface des métaux et de la stabilisation des matières plastiques ; fabrication des accumulateurs et des radiateurs d'automobiles ; fabrication de caoutchouc ; colorant ; eau de ruissellement des voies de circulation.
Cuivre	Canalisation d'eau ; fabrication de fils électriques, radiateur d'automobiles, appareils de chauffage ; traitement de surface.
Zinc	Produits pharmaceutiques ou domestiques; conduites d'eau ; fabrication de peinture, caoutchouc, piles, galvanisation ; eaux de ruissellement (toitures et voiries).
Nickel	Fabrication d'acier et d'alliage spéciaux, de recouvrement de surfaces métalliques par électrolyse ; hydrogénation des huiles et substances organiques ; fabrication de peintures, laques, produits cosmétiques.
Mercuré	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; production et utilisation d'antifongiques ; fabrication d'appareils électriques ; production électrolytique du chlorure et de la soude ; fabrication de peintures, pâte à papier ; fabrication de chlorure de vinyle et d'uréthane.
Chrome	Tannerie ; fabrication d'alliages spéciaux ; industries de traitement de surface.
Plomb	Canalisations d'eau ; fabrication de bacs de batteries, peintures, additifs pour l'essence ; eaux de ruissellement sur les voies de circulation.
Sélénium	Fabrication de peintures et colorants, verres, industries des semi-conducteurs, insecticides, alliages.

Les teneurs maximales admissibles (doubles des teneurs de référence) dans les boues sont données dans la norme NFU 44-041 (pour tout type d'épandage) où dans son équivalent européen, la directive CEE n° 86-278 (en épandage agricole seulement).

	Teneurs limites(NFU 44-041) en mg/kg de matière sèche de boues	Teneurs limites (CEE 86-278) en mg/kg de matière sèche de boues
Cd	40	de 20 à 40
Cr	2 000	de 1 000 à 1 750
Cu	2 000	de 1 000 à 1 750
Hg	20	de 15 à 25
Ni	400	de 300 à 400
Pb	1 600	de 750 à 1 200
Se	200	--
Zn	6 000	de 2 500 à 4 000
Cr+Cu+Ni+Zn	8 000	--

Mais il faut aussi tenir compte des doses de boues apportées par hectare de sol et de la fréquence de ces apports.

Les calculs sont faits sur la base d'apport de 30 tonnes de matière sèche sur dix ans qui est un commentaire non homologué de la NFU 44-041.

Exemple de calcul : $x = k \times 30$

x = quantité maximale de boues à apporter en 10 ans (tonne de matière sèche par ha pour 10 ans).

k = valeur de référence / teneur déclarée.

Pour le cadmium, la valeur de référence est de 20 mg/kg de matière sèche. Si la teneur déclarée est inférieure à 20 mg, k sera supérieur à 1, la quantité maximale de boues à apporter sera supérieure à 30 tonnes de matière sèche par ha pour 10 ans, jusqu'à concurrence du flux limite en éléments-traces métalliques admis par la directive CEE 86-278.

Si la teneur déclarée est supérieure à la valeur de référence, k sera inférieur à 1, la quantité de boues à apporter sera inférieure à 30 tonnes de matière sèche par ha et pour 10 ans.

Dans le cas où k est inférieur à 0,5, l'épandage est impossible puisque la teneur déclarée dépasse la teneur limite.

	Flux limite calculé (NFU 44-041) en kg/ha/an	Flux limite donné (CEE 86-278) en kg/ha/an
Cd	0,06	0,15
Cr	3,00	4,50
Cu	3,00	12,00
Hg	0,03	0,10
Ni	0,60	3,00
Pb	2,40	15,00
Se	0,30	--
Zn	9,00	30,00

Enfin, les boues ne doivent pas être épandues sur des sols dont le pH conduit à une forte mobilité des éléments-traces. Le pH ne doit pas être inférieur à 6. De plus, les boues ne doivent pas être épandues sur des sols contenant des teneurs en éléments traces supérieures aux teneurs limites suivantes :

	Teneurs limites (NFU 44-041) en mg/kg de matière sèche	Teneurs limites (CEE 86-278) en mg/kg de matière sèche
Cd	2	de 1 à 3
Cr	150	de 100 à 200
Cu	100	de 50 à 140
Hg	1	de 1 à 1,5
Ni	50	de 30 à 75
Pb	100	de 50 à 300
Se	10	--
Zn	300	de 150 à 300

Le problème des germes pathogènes

Cela concerne des bactéries (coliformes et streptocoques fécaux, salmonelles...), des virus (entérovirus, poliovirus), des œufs de parasites (nématodes, cestodes et trématodes) et des champignons.

Ils peuvent se retrouver concentrés dans les boues brutes à la suite de processus de sédimentation et d'adsorption. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), ce sont les risques parasitologiques qui posent le plus de problèmes.

Il peut y avoir des traitements (facultatifs) de désinfection qui remédient à ce problème. La désinfection peut comprendre plusieurs étapes :

- pasteurisation à 70 °C,
- traitement aérobie thermique,
- chauffage (200 °C),
- séchage,
- pressage,
- centrifugation,
- chaulage.

Mais, parfois, ces traitements ne sont pas effectués car on considère que les chances de survie et la prolifération de ces germes pathogènes, après épandage des boues, sont faibles (UV, compétition). Le tableau ci-dessous tiré d'une publication scandinave indique l'influence semi-quantitative de l'origine ou du traitement subis par la boue.

Teneur en pathogènes	Boue urbaine fraîche	Boue digérée aérobie	Boue digérée anaérobie	Boues chaulées	Boues pasteurisées
Parasites (œufs de vers)	++	+	+	(+)	(+)
Virus	++	+	+	(+)	-
Salmonelles	++	+ (+)	+	-	-

Légende : ++ se présente en abondance ; + se présente relativement couramment ; (+) pouvant être mis en évidence dans certains cas ; - ne pouvant pas être mis en évidence.

On peut remarquer que ni la directive européenne (CEE 86-278), ni la norme française (NFU 44-041), ne se préoccupent du problème des germes pathogènes. En revanche, la réglementation américaine s'intéresse aux risques encourus par les différentes populations à ce sujet. Elle a accordé une place importante aux germes pathogènes (juillet 1993).

En Europe, seules l'Italie et la Suisse ont émis des seuils limites de non-présence d'organisme et des recommandations (cultures particulières, délais à respecter, contraintes sur les techniques et l'époque d'épandage, le traitement des boues). Ils n'obligent pas à une analyse microbiologique des boues.

L'ensemble des recherches engagées sur ce thème donne la prépondérance au risque parasitologique plutôt qu'aux risques bactériologique, virologique, ou physico-chimique. Il est par ailleurs important de considérer les voies et les probabilités de transmission de ces agents jusqu'à l'homme ou l'animal en fonction de l'usage donné aux boues.

Des différentes recherches effectuées sur les boues de stations d'épuration de montagne font état de caractéristiques plus favorables que les boues de stations urbaines. La charge parasitaire est notablement inférieure aux références connues pour les stations urbaines, elle leur confère une qualité tout à fait acceptable pour l'épandage sur piste de ski.

Le problème des polluants organiques (détergents, pesticides, hydrocarbures chlorés...)

Des travaux scandinaves, réalisés dans les années 70, ont révélé la présence dans des boues urbaines de DDT, lindane, PCB, à des niveaux de concentration de 0,1 à 3 mg/kg de matière sèche.

La recherche sur les micropolluants organiques pose des difficultés supplémentaires par rapport aux métaux lourds : complexité de l'analyse, manque de bases de données, mécanismes de contamination incomplètement compris. Pour le moment, seuls l'Allemagne et les États-Unis disposent d'une réglementation à ce sujet. Ce type de pollution n'a pas, à ce jour, été évoqué pour les boues produites en altitude.

Les aspects commerciaux

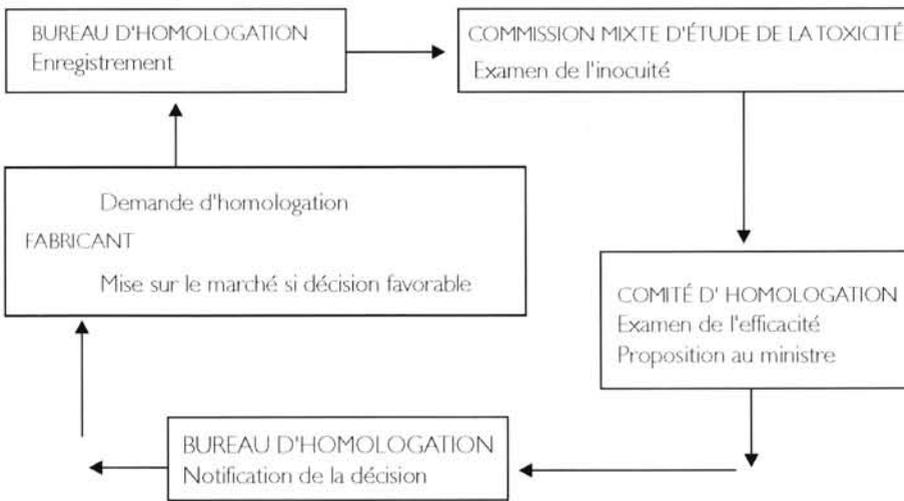
La loi n° 79-595 du 13 juillet 1979 est le texte de base concernant la réglementation en matière de mise en vente et utilisation de ces produits. Cette loi précise aussi quels sont les produits qui sont soumis à une homologation, une autorisation provisoire de vente ou d'importation ou dont

la normalisation est obligatoire.

Cette loi a été complétée par deux décrets, n° 80-477 et n° 80-478 du 16 juin 1980. Le premier décret fixe les modalités d'instruction des dossiers de l'homologation. En application de ce texte, trois organismes ont été créés qui interviennent aux différentes phases de la procédure : la Commission des matières fertilisantes et des supports de culture, le Comité d'homologation, et enfin la Commission d'étude de la toxicité des produits antiparasitaires à usage agricole, des matières fertilisantes et des supports de culture. Le deuxième décret fixe les modalités techniques pour respecter la dénomination du produit en ce qui concerne les documents d'accompagnement, l'étiquetage, l'emballage...

Cette demande d'homologation du compost peut faciliter l'écoulement du produit en donnant une garantie de qualité pour les acheteurs. L'imprimé de cette demande d'homologation doit être adressé au Service de la protection des végétaux (Bureau de l'homologation des matières fertilisantes et des supports de culture) accompagné des originaux des bulletins d'analyse précisant les teneurs en métaux lourds et les paramètres bactériologiques, ainsi qu'un projet d'étiquetage.

La procédure est relativement longue :



La décision peut être l'homologation définitive, l'autorisation provisoire de vente, le maintien en étude sans autorisation provisoire de vente, le refus d'homologation (donc un retrait provisoire de vente), le retrait d'homologation. Aujourd'hui, il n'y a pas encore d'exemple de compost qui soit homologué.

Les précautions d'emploi

La norme NFU 44-041 fixe les conditions d'emploi des "boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines" utilisées en tant que "matières fertilisantes". Elle concerne des effluents à dominante domestique et éventuellement agro-alimentaire.

Elle fixe les doses maximales de boue, les fréquences d'apport, et les caractéristiques que le sol récepteur doit avoir. Cette norme impose des restrictions d'emploi uniquement sur une base toxicologique.

En ce qui concerne les précautions sanitaires (agents pathogènes pour les hommes et animaux, substances phytotoxiques), elle invite les utilisateurs à se conformer à la réglementation en vigueur (arrêtés du ministère de l'Agriculture, arrêtés préfectoraux et municipaux, règlement départemental). Elle se contente d'inciter les stations à faire des analyses microbiologiques et à limiter les boues dans certaines de leurs utilisations en tenant compte de leur procédé d'obtention.

Cependant, elle interdit directement l'épandage de boues sur terrains affectés à des cultures maraîchères, ou qui le seront dans un délai d'un an, et à toute culture susceptible d'être fournie à l'état cru aux consommateurs. La norme comporte en plus une partie non homologuée qui apporte des précisions quant à l'aspect sanitaire de l'utilisation des boues en rapport avec des analyses microbiologiques (microbiennes et parasitaires), la stabilisation et l'épandage des boues.

La Directive européenne n°86-278 du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture : c'est une loi européenne équivalente à la norme française NFU 44-041.

Des recommandations plus précises peuvent être édictées :

- respect des distances minima en l'absence de plan d'épandage approuvé par la DDASS :
 - * 100 m pour les maisons, immeubles, zones de loisirs, campings,
 - * 200 m pour les cours d'eau si la pente est supérieure à 7 % (boues liquides),
- respect des périmètres de protection immédiate et rapprochée des sources et captages ;
- mesures d'hygiène lors de l'épandage (tenue de travail, gants, nettoyage du matériel).

Des mesures plus spécifiques peuvent aussi être précisées :

- chaulage des boues, ce qui limite efficacement le risque bactérien à condition d'avoir une parfaite homogénéisation et un pH en boues fraîches de 12 ;
- stabilisation de la matière organique par maturation naturelle prolongée ou compostage provoqué, l'action sur la charge pathogène n'est cependant efficace qu'à des conditions très précises : aération active, maîtrise de l'élévation de température ;
- épandage des boues à l'automne avant la neige et interdiction de pâturage avant le printemps suivant ;
- contrôle systématique dans un laboratoire compétent de la charge parasitaire des boues à épandre, afin d'ajuster éventuellement la quantité à déposer.

EXEMPLE

Les recommandations du conseil général de la Savoie en ce qui concerne l'usage des boues de STEP de montagne en reconstitution de sols pour pistes de ski donnent des éléments sur :

- * le choix des filières de traitement des boues : les boues utilisées sur des terrains voués à du pastoralisme nécessiteraient au préalable des traitements thermiques, tels la digestion, le compostage thermophile avec contrôle de la température, la pasteurisation, le procédé Porthaus.

Pour un assainissement convenable sans pastoralisme, le chaulage (avec parfaite homogénéisation de la chaux et des boues) semble convenir. Il faut noter ici que le chaulage ne résout pas complètement le problème de la charge parasitaire, d'où la nécessité d'un traitement autre en cas de pastoralisme :

* les dates d'épandage : "la meilleure période, conciliant les contraintes de tourisme et d'élevage, avec la sécurité sanitaire apportée par le vieillissement, est l'automne, en prenant toutes dispositions pour qu'aucun ruminant ne vienne séjourner avant le printemps suivant". Il faut exclure l'exploitation fourragère à la suite d'un épandage avant le passage d'un hiver.

On peut préciser ici que ces périodes d'épandage sont raisonnées en fonction des cycles de développement des cultures (besoin en éléments fertilisants), du climat (minéralisation potentielle) et des caractéristiques des boues (capacité à libérer plus ou moins rapidement des éléments assimilables).

À propos de ce dernier point, les boues liquides ont des éléments très vite assimilables, l'épandage peut se faire à différentes périodes de l'année, au contraire des boues déshydratées qui ont une minéralisation plus lente (notamment en ce qui concerne l'azote).

Il faut prendre en compte également l'état hydrique des sols (éviter les sols déjà saturés en eau soit à capacité au champ ; le déficit doit correspondre environ à 40 mm). On rappelle ici que l'épandage est interdit en périodes de gel ou de fortes pluies ;

* les contrôles spécifiques : ils peuvent être faits en complément des contrôles réglementaires. Cela concerne la charge parasitaire avant épandage en cas de pastoralisme, les analyses bactériologiques qui peuvent servir pour évaluer l'efficacité du conditionnement des boues.

LES RECHERCHES ENGAGÉES SUR LE COMPORTEMENT DE LA VÉGÉTATION SUR AMENDEMENTS ORGANIQUES

Utilisées comme fertilisant en agriculture, les boues sont épandues à doses relativement faibles et espacées dans le temps. En reconstitution des sols, les boues compostées doivent contribuer à recréer un support riche et vivant sur une matrice inerte, elles sont donc utilisées à des doses bien plus importantes.

L'objectif final des opérations de végétalisation des surfaces terrassées en altitude est le retour rapide des principales composantes de la pelouse alpine. En effet seul le retour des espèces autochtones, en équilibre avec les contraintes du milieu, permet de conclure à une véritable réhabilitation de l'espace.

L'observation du comportement des engazonnements anciens révèle qu'effectivement on note un retour plus ou moins rapide des populations de la pelouse alpine, ce retour est fonction de l'utilisation ou non d'amendements organiques.

Nous avons suivi cette dynamique de retour des plantes natives sur deux sites à La Plagne et aux Ménuires.

Le suivi de l'essai du col de Forcle

Pour l'année d'installation du couvert végétal par semis il y a par rapport au témoin :

- un gain de recouvrement par la végétation semée de 10 % sur 1 cm de compost,
- un gain de recouvrement de 40 % avec 5 cm de compost.

Sur l'essai avec 5 cm de compost, l'apport d'engrais permet un démarrage plus rapide de la végétation, mais, en fin de saison, les taux de recouvrement sont très comparables sur les parcelles avec ou sans engrais.

Enfin, les espèces testées réagissent un peu différemment : le trèfle germe plus rapidement, puis stagne, alors que les graminées se comportent très bien, la fléole étant légèrement favorisée.

- au bout de 6 ans sur ces mêmes sites, l'apport de matière organique à forte dose ne favorise pas particulièrement le retour des espèces de la pelouse alpine. Il y a peu de différence entre les deux épaisseurs de compost quant au nombre d'espèces natives colonisatrices.

Le témoin comparativement est bien colonisé mais les 11 espèces présentes n'assurent que 3 % de couverture du sol six années après le début de l'essai, ce qui est bien évidemment insuffisant pour protéger le sol de l'érosion.

EXEMPLE DE RÉSULTATS OBTENUS EN 1990 SUR LES ESSAIS DU COL DE FORCLE

Parcelles	Recouvrement moyen	Recouvrement maximal	Recolonisation par les plantes natives (moyenne)
Témoin	< 5%		1 ou 2 espèces
Compost 1 cm	15%	25%	6 ou 7 espèces
Compost 5 cm	35%	55%	6 espèces
Idem + engrais	40%	>55%	4 ou 5 espèces

COMPARAISON DES OBSERVATIONS 1990/1993

Parcelles	Recouvrement moyen		Recouvrement maximal		Plantes natives : maximum observé	
	1990	1993	1990	1993	1990	1993
Témoin	<5%	<1%		3%	2	11
Compost 1 cm	15%	21%	25%	35%	7	17
Compost 5 cm	35%	47,5%	55%	80%	6	15
Idem + engrais	40%	40,4%	>55%	85%	5	14

LES ESPÈCES COLONISATRICES DES PARCELLES D'ESSAIS DU SITE DU COL DE FORCLE

	Sol nu	Compost 1cm	Compost 1cm	Compost 5 cm + engrais
<i>Agrostis alba</i>	*	*	*	*
<i>Alchemilla alpina</i>		*		
<i>Anthyllis vulneraria</i>		*		
<i>Arabis alpina</i>		*	*	*
<i>Artemisia sp.</i>	*			
<i>Campanula scheuchzeri</i>	*	*	*	*
<i>Deschampsia flexuosa</i>	*	*	*	
<i>Epilobium angustifolium</i>	*	*	*	*
<i>Gnaphalium sylvaticum</i>		*		
<i>Hieracium alpinum</i>	*	*	*	*
<i>Hieracium intybaseum</i>	*	*	*	*
<i>Hieracium pilosella</i>			*	*
<i>Leontodon hispidus alpinus</i>		*	*	*
<i>Peucedanum ostruthium</i>	*		*	
<i>Phyteuma hemisphaericum</i>				*
<i>Plantago alpina</i>		*		
<i>Plantago lanceolata</i>			*	
<i>Poa alpina</i>	*	*	*	*
<i>Rumex acetosella</i>	*	*	*	*
<i>Sempervivum montanum</i>		*		*
<i>Taraxacum officinale</i>			*	
<i>Trifolium badium</i>		*		
<i>Tussilago farfara</i>	*	*	*	*
<i>Veronica fruticulosa</i>				*

Les essais de végétalisation sur fumier aux Ménuires

Sur ces engazonnements artificiels anciens réalisés avec une forte utilisation de fumier, les observations sur le comportement du couvert végétal mettent en évidence qu'un enrichissement trop important du milieu favorise le recouvrement par les espèces semées au détriment des espèces natives.

Sur la piste du rocher noir, on observe dix ans après l'opération de végétalisation qu'en moyenne trois ou quatre espèces du mélange artificiel semé se maintiennent (le mélange comportait neuf espèces), et que près de 30 espèces autochtones colonisent cette piste.

On constate donc que près de 91 % des espèces sont autochtones, mais la diversité ne suffit pas pour conclure à une parfaite cicatrisation du site.

	Espèces du mélange	Espèces colonisatrices
Nombre d'espèces observées	3	30
Pourcentage	9	91
Taux de recouvrement	90	10

En effet, si l'on considère la contribution de chaque espèce au recouvrement du sol, on constate que les indices d'abondance-dominance sont très largement en faveur des espèces assurant la quasi-totalité du recouvrement. C'est-à-dire que les 3 ou 4 espèces semées qui se maintiennent ne représentent que 9 % de la totalité des espèces observées mais participent à plus de 90 % dans le recouvrement du sol.

	Espèces du mélange	Espèces autochtones
Station 1	3	15
Station 2	4	20
Station 3	4	10
Station 4	4	12
Station 5	4	22
Station 6	3	8
Station 6 bis	3	0
Station 7	3	20
Station 8	4	8
Station 9	3	13

Il faut bien reconnaître que les terrassements, le drainage, le concassage sont à l'origine de modifications importantes de la pédogenèse des substrats qui ne retrouveront sans doute jamais les conditions de milieu favorables au retour de la totalité des espèces végétales autochtones et cela quel que soit l'apport de matière organique. Cependant, l'apport de matière organique reste le meilleur moyen d'engager une dynamique globale favorable à la végétation, mais il faut que des

recherches soient engagées pour mieux connaître les besoins des plantes natives en qualité et quantité de matière organique à apporter pour favoriser leur réinstallation après travaux, avec un pourcentage de recouvrement par population supérieur à ce que l'on observe actuellement.

En conclusion

Les stations de ski qui utilisent le compost de boues en reconstitution de substrat appliquent des doses d'environ 100 à 150 T/ha en une seule opération. L'expérience montre que plusieurs années après, l'effet amendement/engrais est encore important et qu'il n'est pas utile de remettre du compost ou de fertiliser.

Ces constatations ont été utilisées pour encourager économiquement l'utilisation du compost.

La réalisation d'un engazonnement utilisant les boues compostées est toujours supérieure à 10 F/m² sur piste de ski, elle est de 6 à 10 F/m² pour les talus routiers. La comparaison avec un engazonnement traditionnel à 2,5 F/m² doit tenir compte de cette économie d'entretien ultérieur, puisqu'il n'est pas nécessaire de fertiliser pendant deux, voire trois années, comme il est souvent indispensable de le faire après un engazonnement simple.

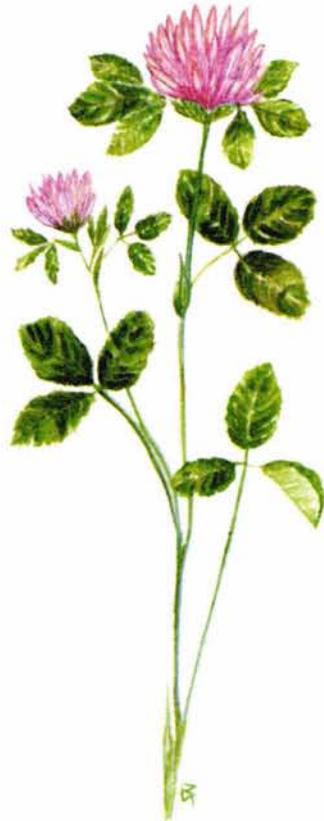
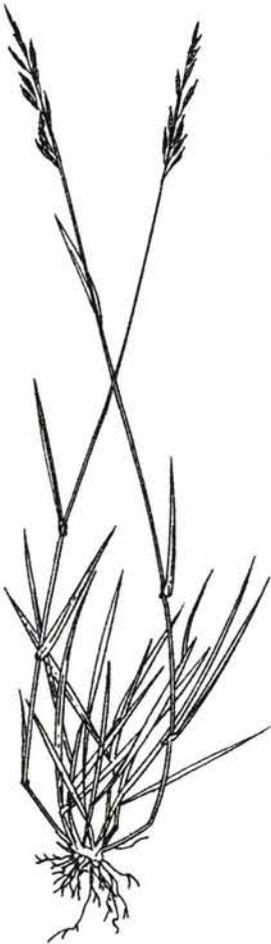
Il ne faut pas opposer les deux méthodes de réhabilitation des surfaces terrassées en altitude, elles sont complémentaires. En effet, il faut réserver l'utilisation des boues compostées aux surfaces minérales et stériles pour lesquelles une reconstitution totale du substrat s'impose avant végétalisation.

Toutes les étapes préalables de préparation du lit de semences ont été menées à bien, il faut maintenant choisir, installer, nourrir et protéger un matériel végétal adapté, et ce n'est pas chose facile.

Dans un premier temps : comment faire le bon choix des espèces et mélanges pour réussir la phase finale de la végétalisation ?

CHAPITRE V

Le choix du matériel végétal



Les espèces végétales utilisées sur les pistes de ski sont uniquement des herbacées. La couverture végétale souhaitée étant un tapis ras, dru, capable de retenir la neige. Cette couverture est conçue aussi pour s'opposer aux processus d'érosion.

Les espèces sont également choisies pour préparer le retour des populations autochtones qui seront les seules à garantir l'intégration écologique et paysagère des sites aménagés.

Ces espèces doivent présenter une bonne capacité d'implantation sur sol très pauvre. Elles doivent résister au froid, aux contrastes thermiques, à un enneigement prolongé et donc avoir une période de végétation courte. Elles doivent présenter une bonne capacité à retenir le sol par un enracinement profond et colonisateur et, si possible, une multiplication naturelle suffisante pour couvrir rapidement le terrain.

Lorsque dans les années 80 cet aspect de la végétalisation a été abordé, les seules espèces disponibles dans le commerce étaient essentiellement celles de la famille des graminées et de la famille des légumineuses.

C'est donc avec ce matériel végétal que les premiers essais ont été conduits. On a d'abord dressé un bilan des pratiques en matière de végétalisation de pistes de ski, puis on a analysé les caractéristiques des variétés à gazon inscrites pour ne retenir que celles qui étaient facilement disponibles et qui apparaissaient comme les mieux adaptées aux contraintes de l'altitude.

LE MATÉRIEL VÉGÉTAL ISSU DE LA SÉLECTION

Les espèces herbacées les plus utilisées se classent botaniquement en :

Famille	Genre	Espèce	Sous-espèce	Variété
Graminées	Fétuque	rouge	gazonnante	Enjoy
Légumineuses	Lotier	comiculé		
Composées				

Dans la pratique, seules sont utilisées à grande échelle les graminées et les légumineuses.

Deux principales sources d'approvisionnement sont disponibles pour l'enherbement d'espaces dégradés :

- les espèces fourragères (graminées, légumineuses) ;
- les espèces à gazon (graminées).

Ces espèces commercialisées ne constituent pas forcément le matériel végétal le mieux adapté. En effet, si nous connaissons bien leur comportement en plaine et en semis pur, des recherches n'ont pas véritablement été engagées pour faire progresser la connaissance de leur comportement en altitude et en association.

Actuellement près de 97 % des mélanges sont faits avec seulement six espèces (données 95/96).

Ray grass anglais	Fétuques rouges	Fétuque élevée	Pâturin des prés	Fétuque ovine	Agrostide commune
37,2 %	45%	9,4%	2,3%	2,0%	<1%
82,2%					
93,9%					
96,6%					

Sur les trois sous-espèces de fétuques rouges, les traçantes sont choisies en priorité (75 %), les gazonnantes et demi-traçantes représentant à elles deux 25 % des choix.

Les autres espèces pouvant présenter un intérêt dans la préparation des mélanges sont cependant assez nombreuses :

Agrostide stolonifère,
Crételle,
Brome inerme,
Fétuque ovine durette,

Pâturin commun,
Fléole des prés,
Fétuque des prés,
Dactyle,

ainsi que les légumineuses : trèfle blanc, lotier, minette, sainfoin...

Tout ce qu'il faut savoir sur les semences commerciales

La provenance des semences

La France avec ses atouts climatiques, pédologiques et techniques, a développé depuis de longues années une production de semences fourragères prairiales. La production de semences à gazon est plus jeune, elle assure néanmoins une part non négligeable de l'approvisionnement du marché français des semences à gazon.

Quatre espèces sont produites en France, par ordre d'importance :

- le ray-grass anglais ;
- la fétuque rouge ;
- la fétuque élevée ;
- la fétuque ovine.

Mais l'origine des variétés est essentiellement de sélection étrangère.

	Total	Pays-Bas	RFA	Danemark	Grande-Bretagne	USA	Autres	France
Ray-grass anglais	69	24	13	6	-	17	1	8
Fétuques rouges								
Total	49	30	1	5	1	3	1	8
- demi-traçante	13	7	1	-	1	-	-	4
- traçante	11	6	-	2	-	2	1	3
- gazonnante	25	17	-	2	-	2	1	3
Pâturin commun	2					2		
Pâturin des prés	20	14	3	1	-	1	1	-
Agrostide	10	3	-	-	-	5	1	1
Fétuque ovine	9	6	-	-	-	1	-	2
Fétuque élevée	29	5	2	-	1	18	-	4
Fléole bulbeuse	2	1	-	-	-	-	-	1
TOTAL	190	83	19	12	3	43	4	24

(Catalogue français gazon 1995)

Le marché français est donc traditionnellement dominé par les importations.

	Campagne 1991 - 1992		Campagne 1991 - 1992	
Pays exportateurs	Danemark	50%	Danemark	33%
	Pays-Bas	29%	Pays-bas	52%
	Allemagne	13%	Allemagne	12%
	CEE autres	4%	CEE autres	1%
	USA	3%	USA	1%
Espèces importées	Fétuque rouge	44%	Fétuque rouge	38%
	Ray-grass anglais	39%	Ray-grass anglais	40%
	Pâturin des prés	6%	Pâturin des prés	
	Mélange espaces verts	5%	Mélange espaces verts	15%
Espèces par pays	Danemark		Danemark	
	Fétuque rouge	64%	Fétuque rouge	75%
	Ray-grass anglais	32%	Ray-grass anglais	23%
	Pays-Bas		Pays-Bas	
	Fétuque rouge	16%	Fétuque rouge	19%
	Ray-grass anglais	45%	Ray-grass anglais	45%
Mélange espaces verts	17%	Fétuque élevée	4%	
		Mélange espaces verts	28%	

L'essentiel des importations provient de la CEE et plus particulièrement du Danemark et des Pays-Bas.

Les principales importations concernent le ray-grass anglais et les fétuques rouges.

Contrôle et réglementation

La réglementation française fait une distinction entre les mélanges déclarés, fabriqués à partir des cultivars du catalogue gazon et les compositions spéciales utilisant, outre les espèces et variétés précédentes, d'autres non inscrites au catalogue ainsi que des espèces non gazon (légumineuses) : les gazons de végétalisation entrent dans cette deuxième catégorie.

C'est le SOC (Service officiel de contrôle) qui est chargé par le ministère de l'Agriculture de s'assurer de la conformité de fabrication à la réglementation.

Il y a une réglementation du conditionnement, une réglementation de la qualité du produit qui s'appliquent aussi aux mélanges.

Le conditionnement

Des règles strictes s'appliquent en matière d'emballage et d'étiquetage (extrait de l'*Encyclopédie des gazons*).

Emballages : les semences doivent être vendues en emballage dans une gamme prévue par la réglementation française :

- * Semences en mélanges : 0,5 - 1 - 2 - 3 - 5 - 10 - 25 et 50 kg.
- * Semences de graminées pures : 1 - 2 - 3 - 5 - 10 - 25 kg.
- * Autres espèces : 1 - 2 - 2 - 5 - 10 - 25 et 50 kg.

Au-dessus de 5 kg, le poids peut être brut ou net. S'il est brut, la mention doit être portée sur les étiquettes ou sur les emballages.

À 5 kg et en dessous, le poids est obligatoirement net. Il faut rappeler également que les emballages doivent rester fermés à tous les stades de la commercialisation par un système inviolable.

Étiquetage : les mentions suivantes doivent figurer sur les étiquettes ou directement sur les emballages :

– le nom ou la raison sociale et l'adresse du vendeur.

Ces mentions peuvent être remplacées par une marque conventionnelle agréée par les services de la répression des fraudes.

- la destination : "mélange de semences pour espaces verts",
- le nom ou la référence du mélange,
- le pourcentage en poids des espèces composant le mélange,
- le nom des variétés pour les espèces dont la certification est obligatoire,
- le numéro de référence du lot,
- le poids avec mention net ou brut,
- la date de fermeture des emballages.

À partir de 1 kg, une vignette ou un certificat officiel pouvant reprendre certaines des indications ci-dessus (poids, composition ...) doit être apposé sur les emballages. Pour les sacs ou les boîtes d'un

pois inférieur à 1 kg, la vignette est facultative. Ces vignettes ou étiquettes sont de couleur verte. L'étiquetage est dans une certaine mesure la concrétisation de la réglementation. Il permet de retrouver le fabricant, le lot et les composants du mélange et, en cas d'incident, d'en déterminer les causes.

Il faut retenir en ce qui concerne les gazons de végétalisation que les sacs doivent être fermés jusqu'au moment de l'application et que sur chaque étiquette doivent figurer : le poids du sac, le mois d'ensachage, la composition du mélange avec mention des espèces incorporées et, lorsqu'elles sont à certification obligatoire, la mention de la variété, ainsi que les pourcentages en poids de chacun des constituants.

La qualité du produit

La qualité des semences pour gazon se définit par :

- la faculté germinative,
- la pureté spécifique,
- le dénombrement des espèces indésirables.

La *faculté germinative* est contrôlée sur les semences d'espèces pures. Suivant les espèces et les conditions de récolte et de conservation, elle peut varier de 75 à 95 %. Lorsque la germination des lots purs est inférieure aux normes de commercialisation qui leur sont applicables, ces lots ne peuvent pas être incorporés dans les mélanges.

La *pureté spécifique* est exprimée par le pourcentage en poids de l'espèce considérée. Les semences renferment en plus ou moins grande quantité des déchets inertes (pailles, poussières...) et parfois aussi des graines d'autres espèces. La réglementation précise la pureté minimale au-dessous de laquelle la commercialisation est interdite.

Le *dénombrement des espèces indésirables* est réalisé sur un échantillon de 25 000 graines et a pour objet de rechercher les espèces indésirables comme le chiendent, le vulpin, le rumex, la folle avoine et la cuscute pour les légumineuses.

Réglementation qualitative des variétés intéressant la végétalisation

	Faculté germinative	Pureté spécifique
Fétuque élevée	80%	95%
Fétuque ovine	75%	85%
Fétuque rouge	75%	90%
Fléoles	80%	97%
Pâturins	75%	85%
Ray-grass anglais	80%	97%

La composition des mélanges

Les mélanges déclarés sont composés de variétés inscrites au catalogue officiel français. À ce titre, elles sont obligatoirement certifiées. Cependant, par dérogation du ministère de l'Agriculture,

peuvent être introduites dans les mélanges déclarés des espèces qui ne sont pas à certification obligatoire (voir tableau ci-dessous).

Espèces à certification obligatoire de la variété (1)	Espèces à certification obligatoire de la variété (2)	Espèces à certification obligatoire de la variété (3)
Ray-grass anglais gazon	Cynodon dactylon	Crételle
Fétuque rouge		
Pâturin des prés		
Fétuque élevée gazon		
Fléole bulbeuse		
Agrostide		
Pâturin commun		
Pâturin des bois		

(1) "semences certifiées" (2) "semences germinatives" (3) "semences"

Ces différentes catégories de semences doivent être conformes aux normes technologiques prévues par la réglementation.

Les compositions spéciales utilisées en végétalisation peuvent contenir d'autres espèces et variétés. Elles sont faites spécialement pour des utilisateurs directs à leur demande et pour une utilisation bien particulière. Elles ne peuvent pas faire l'objet de publicité, de vente par catalogue, ni être en vente libre dans le commerce.

Les mélanges réalisés comprennent des semences à gazon, des semences fourragères, éventuellement des semences florales. Toutefois chaque composant du mélange doit respecter la réglementation de sa catégorie.

Par ailleurs, la composition du mélange (pourcentage, espèce, variété) est vérifiée par l'organisme qui certifie les semences des variétés (le SOC). Un certificat ou une vignette officiel apposé sur l'emballage matérialise ce contrôle.

Les critères de sélection

Les variétés du catalogue français des espèces à gazon font l'objet, avant leur inscription, d'une étude approfondie sur trois ans, en vue d'apporter la garantie aux utilisateurs qu'elles sont bien adaptées à un usage gazon.

Pourquoi la végétalisation ne se satisfait-elle pas de ces espèces ?

C'est en considérant les critères de leur sélection que nous avons constaté qu'ils ne correspondaient pas à notre attente pour répondre aux contraintes de l'altitude et donc avoir un usage de fixation des sols et non pas simplement un emploi : «gazon à destination sportive», «gazon d'ornement » ou « gazon d'agrément».

Les variétés subissent avant leur inscription sur deux années d'implantation successives l'épreuve de distinction, d'homogénéité et de stabilité (DHS). Il faut faire la preuve par l'examen d'une série de caractères morphologiques que la variété est bien différente de toute autre variété connue, que les plantes qui la composent sont homogènes, et qu'elle conserve bien à l'issue de la multiplication ses caractères essentiels.

Les variétés subissent aussi l'épreuve d'utilisation, les critères généraux retenus ne sont pas ceux qui intéressent l'utilisation en gazon de végétalisation, les variétés sont testées en semis purs, elles sont soumises à deux traitements : la tonte et le piétinement.

Les critères généraux de valeur d'utilisation sont les suivants :

- *l'aspect esthétique global*, appréciation générale du comportement du couvert végétal ;
- *l'aspect du feuillage* noté pour la finesse et la couleur ;
- *la densité du gazon* : c'est l'état du recouvrement du sol par le tapis végétal apprécié un an après le semis ;
- *la résistance au piétinement* est estimée à partir d'essais piétinés artificiellement ;
- *la résistance aux maladies* (fil rouge, fusarioses, helminthosporioses, hétérosporioses) ;
- *le comportement en été* mesure la capacité à rester vert sous l'action de la sécheresse et de la chaleur, il est jugé en l'absence d'arrosage ;
- *le comportement en hiver* mesure la capacité du tapis végétal à rester « vert » sous l'effet du froid ;
- *la facilité d'adaptation* est appréciée d'après l'importance de la végétation deux mois et six mois après le semis ;
- *la pérennité* est notée d'après l'état du tapis au terme de l'expérimentation.

Or les critères qui nous intéressent sont :

- la capacité à s'installer sur sols pauvres ;
 - la résistance à l'enneigement prolongé ;
 - la résistance au froid ;
- l'adaptation à des périodes de végétation courte ;
 - la pérennité (aptitude au tallage, multiplication sexuée) ;
 - le développement d'un enracinement profond ...

Dans les années 1980, on a donc réalisé un certain nombre d'essais, utilisant des variétés du commerce pour des tests d'installation et de comportement en altitude.

Les contraintes liées au marché des semences

L'inscription d'une nouvelle variété est valable dix ans. Elle peut être renouvelée par période successive de cinq ans à la demande de l'obteneur et sur proposition du CTPS (Comité technique permanent de la sélection), dans la mesure où la variété présente encore un intérêt pour l'utilisateur.

Il convient donc, avant de proposer une variété, de s'assurer qu'elle n'est pas en cours de radiation.

Une variété reste commercialisable trois ans après la radiation ; au-delà elle ne doit plus figurer dans les propositions de mélanges.

Parmi les variétés testées en 1980, beaucoup sont radiées aujourd'hui.

Variétés testées radiées	
	Fétuque rouge traçante Agio
	Fétuque rouge traçante Echo
	Fétuque rouge traçante Rubina
	Fétuque rouge gazonnante Lirouge
	Fétuque rouge gazonnante Koket
	Dactyle Prainal
	Ray-grass anglais Vigor
	Ray-grass anglais Manhattan

Il faut tenir compte aussi de la disponibilité des semences sur le marché français dominé par les importations.

Les approvisionnements fluctuent en quantité et en prix dans des proportions qui peuvent être très importantes. Les prix sont très sensibles aux disponibilités du marché mondial : si l'espèce a été beaucoup produite, les prix chutent ; inversement, on peut avoir, à la suite d'incidents climatiques ayant compromis la production, une envolée des cours.

Il faut comme pour les radiations s'informer des coûts des variétés souhaitées, ne pas imposer ou s'imposer une seule variété par espèce mais plusieurs équivalentes, pour se réserver la possibilité de faire varier le choix du mélange sans en compromettre la qualité.

Les recherches engagées sur les espèces du commerce

Historique : qu'utilisait-on dans les années 60-70 ?

En 1978, le Cemagref faisait le bilan des pratiques de végétalisation dans un grand nombre de stations.

Les fournisseurs de semences de l'époque proposaient par exemple :

Altitude de 1 000 à 1 800 m	%	Altitude de 1 000 à 1 800 m	%
Ray-grass anglais	30	Ray-grass anglais	20
Pâturin des prés	15	Fléole des prés	20
Fétuque rouge traçante	15	Fétuque des prés	15
Fléole des prés	10	Fétuque rouge traçante	15
<i>Agrostis tenuis</i>	5	Pâturin des prés	10
Lotier comiculé	10	Lotier comiculé	10
Minette	5	Minette	5
Trèfle blanc nain	5	Trèfle blanc nain	5
Trèfle violet	5		

À l'époque, près de 20 graminées et 10 légumineuses étaient utilisées. La fléole des prés était l'espèce la plus employée (de 5 à 80 % dans les mélanges), le ray-grass anglais employé systématiquement jusqu'à 40 %, les fétuques rouges entraient dans de nombreuses compositions avec essentiellement des variétés traçantes.

Les conclusions des observations réalisées sur le comportement des espèces semées sur les pistes étaient les suivantes :

- l'influence de l'exposition n'apparaissait pas fondamentalement ;
- l'influence du sous-sol ne se manifestait que par le plus fort pourcentage de présence de fétuques des prés, de pâturin des prés, de minette et de trèfles sur sols neutres ou acides ;
- l'influence de l'altitude était plus notable : dactyle aggloméré, fétuque élevée, fétuque des prés, pâturin des prés, les légumineuses en général, sauf le Lotier, disparaissaient des relevés lorsqu'on s'élevait en altitude ;
- dans toutes les situations la fléole des prés et la fétuque rouge prédominaient.

Ces premières observations nous ont guidés dans le choix des espèces qu'il convenait de tester pour proposer des mélanges moins complexes et mieux adaptés à la haute altitude.

Les essais mis en place dans les années 80

En 1980, 27 variétés ont été testées dans trois stations différentes : Auron, Val-d'Isère, Courchevel. On a retenu ces variétés en fonction des informations données dans les catalogues d'inscription des variétés, en particulier la résistance au froid et la pérennité, qu'il convenait de confirmer par des tests en altitude.

Les 27 variétés ont été testées en semis purs, en petites planches de 1 m sur 2. Les semis ont été répétés trois fois, tirés au sort, pour permettre une étude statistique élémentaire (le dispositif est l'essai en blocs Fischer avec répétition).

1	<i>Agrostis tenuis</i>	Agrostide commune	
2		Agrostide traçante	
3	<i>Agrostis stolonifera</i>	Brome inème	
4	<i>Bromus inermis</i>		
5	<i>Bromus catharticus</i>	Dactyle aggloméré	Praïnal
6	<i>Dactylis glomerata</i>	Dactyle aggloméré	Phyllox
7	<i>Dactylis glomerata</i>	Fétuque élevée	Clarine
8	<i>Festuca arundinacea</i>	Fétuque élevée	Ludion
9	<i>Festuca arundinacea</i>	Fétuque des prés	Senu pajbjerb
10	<i>Festuca pratensis</i>	Fétuque des prés	SK 6
11	<i>Festuca pratensis</i>	Fétuque ovine	Mecklemburger
12	<i>Festuca ovina</i>	Fétuque rouge traçante	Agio
13	<i>Festuca rubragenuina</i>	Fétuque rouge traçante	Echo
14	<i>Festuca rubra genuina</i>	Fétuque rouge traçante	Rubina
15	<i>Festuca rubra genuina</i>	Fétuque rouge gazonnante	Highlight

16	<i>Festuca rubra commutata</i>	Fétuque rouge gazonnante	Koket
17	<i>Festuca rubra commutata</i>	Fétuque rouge gazonnante	Ludivine
18	<i>Festuca rubra commutata</i>	Fétuque rouge gazonnante	Lirouge
19	<i>Festuca rubra commutata</i>	Fétuque rouge gazonnante	Climax
20	<i>Phleum pratense</i>	Fléole des prés	Piccolo
21	<i>Phleum bertolinii</i>	Fléole noueuse	Arina
22	<i>Poa pratensis</i>	Pâturin des prés	Aguila
23	<i>Poa pratensis</i>	Pâturin des prés	Baron
24	<i>Poa pratensis</i>	Pâturin des prés	Nugget
25	<i>Poa pratensis</i>	Ray grass anglais	Vigor
26	<i>Lolium perenne</i>	Ray grass anglais	Verna
27	<i>Lolium perenne</i>	Ray grass anglais	Manhattan

Trois observations ont été faites :

- au bout de quinze jours : rapidité d'installation ;
- au premier automne : recouvrement ;
- l'été suivant : résistance au froid.

Au-delà de cet essai, des relevés ont été effectués pendant plusieurs années permettant de mieux cerner le comportement des variétés semées en mélange sur des secteurs terrassés. Les résultats confortent ceux qui sont obtenus en semis purs.

Comportement par espèce

D'une façon générale, les *ray-grass* se sont installés les premiers, en particulier Vigor et Manhattan, ainsi que la *fléole noueuse* et les *dactyles*. Présent encore après deux ans, le *ray-grass* chute brutalement en troisième année.

Les *agrostides*, *pâturins* et *fétuques rouges gazonnantes* ont été plus longs à s'installer :

Après une année, ce sont les *fétuques rouges* qui ont un meilleur comportement avec la *fléole des prés Climax*.

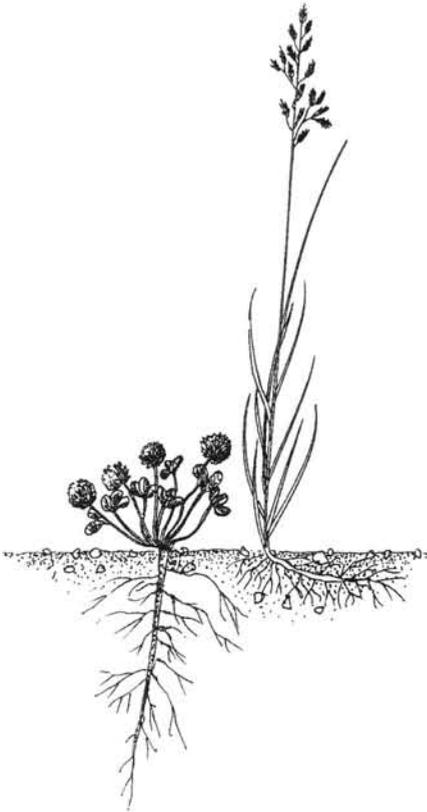
Les *fétuques rouges* occupent une part croissante dans la composition du tapis végétal avec un maximum lors de la disparition du *ray-grass*, elles en seraient les principales bénéficiaires.

La *fléole des prés* a tendance à diminuer au bout de quelques années, sauf dans les secteurs humides.

Les observations faites à l'époque de l'essai sont résumées dans le tableau suivant par intérêt décroissant :

Après 15 jours	Ray-grass anglais Vigor et Manhattan Fléole noueuse Piccolo Dactyle aggloméré Prainal et Phyllox puis Agrostides Pâturin des prés Fétuque rouge gazonnante
A l'automne	Mêmes conclusions avec une supériorité des fétuques rouges traçantes
Après un an	Fétuque rouge gazonnante Ludivine et Lirouge Fétuque rouge traçante Echo et Rubina Fétuque rouge gazonnante Highlight Fléole des prés Cimax Ray-grass anglais Vigor Fétuque ovine Mecklemburger Fétuque des prés SK 6

Nous ne les avons pas testées à l'époque, mais très vite, compte tenu de la stérilité des sols, l'emploi des légumineuses s'est imposé.



L'intérêt principal des légumineuses réside en leur capacité à fixer l'azote atmosphérique et d'en faire bénéficier les graminées. Des relations s'établissent d'ailleurs entre les deux familles et l'on constate une complémentarité de recouvrement et d'enracinement :

– graminées en touffes + légumineuses occupant les vides = bon recouvrement ;

– graminées (enracinement superficiel) + légumineuses (racines plus profondes) = meilleure protection du sol et meilleur ancrage de la végétation - meilleure tenue des pentes.

Leur système racinaire étendu et puissant assure une bonne fixation du sol et limite les processus érosifs.

Trèfles et lotiers s'installent lentement mais s'étendent de façon appréciable entre la deuxième et la quatrième année, puis ils régressent.

Les critères généraux de valeur d'utilisation des espèces, complétés par les résultats de nos propres essais en altitude, nous donnent des informations importantes sur les principales espèces disponibles dans le commerce et susceptibles de satisfaire aux exigences de l'altitude. On tiendra compte dans la composition des mélanges de leur comportement par rapport au type de sol, de leur résistance à la sécheresse et de leur résistance au froid.

Comportement /type de sol	Très bon	Bon
Sol calcaire (basique)	Fléole noueuse Lotier comiculé Minette Sainfoin	Brome inerne dactyle Fétuque ovine durette Fétuque rouge Ray-grass anglais Trèfle blanc
Sol acide	Fétuque ovine Agrostide commune	Agrostide stolonifère Crételle Fétuque des prés Fétuque rouge Fétuque des prés Pâturins Trèfle blanc

Résistance à la sécheresse		Résistance au froid	
Très bonne	Bonne	Très bonne	Bonne
Brome inerne Fétuque élevée Lotier comiculé	Dactyle Fétuque ovine Fétuque rouge gazonnante Fétuque rouge demi-traçante Pâturin des prés Trèfle blanc nain Minette Sainfoin	Brome inerne Fétuque élevée Fétuque rouge gazonnante Fétuque rouge demi-traçante Fléole des prés Fléole noueuse	Fétuque ovine Fétuques rouges Fétuque des prés Pâturin commun Lotier comiculé Luzerne Sainfoin Trèfle blanc

La synthèse de ces informations permet de mieux adapter le choix des espèces aux différentes contraintes des milieux à végétaliser.

Voici ce que l'on peut dire des principales espèces utilisées :

Fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Schreb.)

Espèce rustique, d'implantation assez rapide, elle est très compétitive une fois installée. C'est une espèce pérenne supportant bien le froid, la sécheresse et l'excès d'eau. Elle présente en outre un fort enracinement.

La fétuque élevée n'apprécie pas les sols acides, il lui faut un sol profond et une fumure azotée copieuse. Son exigence vis-à-vis du sol limitera son utilisation en altitude sur terrain terrassé et particulièrement stérile.

Fétuque ovine (*Festuca ovina* L.)

Cette espèce s'établit lentement. Elle est donc sensible à la concurrence des autres espèces. Sa croissance est faible et elle ne nécessite qu'un entretien limité.

Elle supporte bien les sols acides secs. Son enracinement est bon mais ses parties aériennes forment un tapis peu protecteur vis-à-vis de l'érosion.

On l'utilisera donc sur sols acides et secs en veillant à ce que son pourcentage dans le mélange lui permette de s'exprimer s'il y a d'autres espèces agressives.



Fétuque élevée



Fétuque ovine

Fétuque rouge (*Festuca rubra* L.)

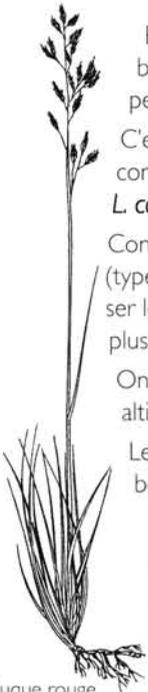
Espèce rustique, dont la facilité d'installation est moyenne à bonne, elle supporte un entretien limité. Sa croissance est assez lente et elle est peu exigeante vis-à-vis des sols.

C'est une espèce dont la pérennité est très bonne mais qui n'apprécie pas les conditions extrêmes de sécheresse ou d'humidité (le type gazonnant *Festuca rubra* L. *commutata* Gaud se défend bien en se mettant en dormance).

Connue pour sa bonne résistance au froid, elle peut monter très haut en altitude (type gazonnant). Les fétuques rouges sont intéressantes par leur aptitude à coloniser les espaces vides (type traçant : *Festuca rubra* L. *rubra*). Ce sont les espèces les plus performantes dont on dispose.

On les introduira donc en quantité importante dans les mélanges pour la haute altitude. Elles seront à utiliser dans tous les cas comme base de mélange.

Le choix parmi les types et les variétés est important pour une bonne adaptation au milieu.



Fétuque rouge

Fléole des prés (*Phleum pratense* L.)

Cette espèce s'installe rapidement. Elle est assez agressive mais donne un gazon peu fourni sensible à la sécheresse.

Elle présente une bonne pérennité et ne nécessite qu'un entretien très limité. Très intéressante en montagne en exposition nord et sur terrain frais, elle peut être utilisée jusqu'à 2000 m d'altitude.



Fléole des prés

Fléole noueuse - ou bulbeuse (*Phleum bertonii* D.C.)

Elle est intéressante pour son implantation facile et assez rapide et sa bonne pérennité. On peut la classer dans les espèces agressives. Elle résiste à la sécheresse mais elle craint l'excès d'humidité. Comme elle résiste bien au froid, on peut la proposer en altitude sur terrains secs.



Ray-grass anglais (*Lolium perenne* L.)

C'est son implantation facile et rapide qui fait que cette espèce est très largement employée. Elle résiste assez bien au froid, à l'acidité du sol. Elle craint la sécheresse et surtout la chaleur.

Elle est peu pérenne, ce qui lui confère un rôle de plante abri mais elle est très agressive, il faudra donc la mettre en quantité faible dans les mélanges.

Ray-grass anglais

Lotier corniculé (*Lotus corniculatus* L.)

Le lotier ne s'installe pas rapidement, mais il convient bien à tous les substrats. Son comportement est meilleur sur sol calcaire. Il résiste bien en altitude à la sécheresse, mais craint les excès d'eau. Sa pérennité est bonne, il est donc très intéressant sur sol sec et ensoleillé en montagne. Il devrait faire partie de tous les mélanges dans ces conditions de milieu.



Lotier corniculé



Trèfle blanc (*Trifolium repens* L.)

Ce trèfle est très utilisé dans les mélanges d'altitude. Il assure une couverture rapide de tous les sols (acide et calcaire, humide et ensoleillé). Il présente une bonne pérennité et il est agressif vis-à-vis des autres espèces. Il résiste bien au froid (jusqu'à 2500 m), mais il a cependant du mal à tenir sur des pentes extrêmes.

Trèfle blanc

Sainfoin (*Onobrychis vicifolia* Scop.)

Cette espèce est peu exigeante. Elle présente un bon enracinement et un très bon comportement sur sol calcaire. Elle résiste bien au froid et au sec. Les sols acides et humides ne lui conviennent pas. Son installation est rapide et sa pérennité est bonne. Elle maintient bien les talus grâce à son enracinement profond, elle recouvre moins le sol que le lotier, on peut les associer dans les mélanges.

Après avoir étudié le comportement des espèces du commerce, nous avons engagé une recherche sur les plantes pionnières des zones terrassées en altitude car force était de constater les nombreux échecs pour les engazonnements situés au-dessus de 2000 m d'altitude.



Sainfoin

LES ESPÈCES NATIVES

Étude de leur dynamique de retour sur les espaces dégradés

Dès les années 80, on a réalisé de nombreuses observations sur des sites ayant fait l'objet de travaux de terrassement non suivis d'opérations de végétalisation et les espèces les plus fréquemment rencontrées sur tous les sols et à toutes les altitudes sont : *Poa alpina* (46 % des relevés) ; *Alchemilla vulgaris* (30 % des relevés) ; *Alchemilla alpina* (24 %) ; *Festuca rubra* (28 %) ; *Festuca violacea* (13 %) ; *Anthoxanthum alpinum* (26 %) ; *Arabis alpina* (25 %).

D'autres espèces présentes dans 10 à 25 % des relevés peuvent se révéler intéressantes pour la végétalisation : *Plantago alpina* (20 %) ; *Phleum alpinum* (20 %) ; *Agrostis vulgaris* (17 %) ; *Achillea millefolium* (16 %) rencontré dans les endroits secs ; *Trifolium alpinum* (11 %), uniquement sur terrains acides. Ces espèces sont parmi les premières à s'installer sur les terrains dénudés jusqu'aux altitudes extrêmes et dans les conditions les plus difficiles. Elles sont généralement assez abondantes sur les sites qu'elles colonisent, sauf la flouve (*Anthoxanthum alpinum*).

Des variantes existent suivant l'altitude et le sous-sol, par exemple, sur terrains calcaires *Poa alpina*, *Arabis alpina*, *Saxifraga aizoides* dominant, alors que sur terrains neutres ou acides on rencontre préférentiellement *Poa alpina*, *Alchemilla vulgaris* et *alpina*, *Anthoxanthum alpinum*, *Plantago alpina*, *Silene rupestris*.

À partir de 1984, les recherches conduites dans le vallon de l'Iseran (thèse Marie-Paule BUSSERY) confirment et enrichissent les listes des espèces colonisatrices les plus fréquemment rencontrées.

Les espèces les plus fréquentes sur les terrassements du vallon de l'Iseran.

Espèces	Altitudes extrêmes de présence	Nombre de présences dans les 45 relevés
<i>Poa alpina</i>	Totalité des altitudes à réhabiliter	42
<i>Cerastium arvense</i>	de 2 325 à 2 700 m	39
<i>Minuartia verna</i>	de 2 375 à 2 750 m	36
<i>Festuca violacea</i>	Totalité des altitudes à réhabiliter	33
<i>Phleum alpinum</i>	Totalité des altitudes à réhabiliter	33
<i>Hutchinsia alpina</i>	Totalité des altitudes à réhabiliter	29
<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Totalité des altitudes à réhabiliter	27
<i>Polygonum viviparum</i>	Totalité des altitudes à réhabiliter	24
<i>Alchemilla vulgaris</i>	de 2 375 m à 2 650 m	24
<i>Alopecurus gerardii</i>	de 2 375 m à 2 700 m	23
<i>Plantago serpentina</i>	de 2 325 m à 2 650 m	23
<i>Arabis alpina</i>	de 2 325 m à 2 650 m	22
<i>Alchemilla pentaphylla</i>	de 2 400 m à 2 800 m	20

Enfin, en complétant par les observations faites en 1993 et en 1994 sur le retour des espèces locales sur les pistes de ski revégétalisées, il ressort que les espèces colonisatrices suivantes mériteraient d'être introduites dans les mélanges semés en altitude.

<i>Alchemilla vulgaris</i>	<i>Deschampsia flexuosa</i>	<i>Plantago alpina</i>
<i>Alchemilla alpina</i>	<i>Dryas octopetala</i>	<i>Poa alpina</i>
<i>Anthoxanthum alpinum</i>	<i>Festuca rubra</i>	<i>Phleum alpinum</i>
<i>Arabis alpina</i>	<i>Festuca violacea</i>	<i>Polygonum viviparum</i>
<i>Alopecurus gerardii</i>	<i>Festuca pumila</i>	<i>Plantago serpentina</i>
<i>Alchemilla pentaphylla</i>	<i>Hutchinsia alpina</i>	<i>Pedicularis verticillata</i>
<i>Agrostis vulgaris</i>	<i>Luzula spadicea</i>	<i>Saxifraga aizoides</i>
<i>Achillea millefolium</i>	<i>Lotus alpinus</i>	<i>Silene rupestris</i>
<i>Achillea nana</i>	<i>Minuartia verna</i>	<i>Saxifraga oppositifolia</i>
<i>Anthyllis montana</i>		<i>Trifolium alpinum</i>
<i>Campanula scheuchzeri</i>		<i>Trifolium badium</i>
<i>Chrysanthemum alpinum</i>		
<i>Cerastium arvense</i>		
<i>Cerastium strictum</i>		
<i>Cerastium latifolium</i>		

On choisira bien sûr, parmi les espèces les plus fréquemment rencontrées, celles qui possèdent une grande amplitude écologique (extension géographique et extension en altitude).

Il convient de ne pas oublier d'introduire quelques légumineuses intéressantes pour leur complémentarité d'enracinement et de couverture aérienne avec les graminées et surtout pour leur aptitude à utiliser directement l'azote atmosphérique qui leur confère un rôle enrichissant pour le sol. Il est ainsi apparu nécessaire de tout mettre en œuvre pour définir les conditions de multiplication de certaines espèces de la pelouse alpine.

Les études préalables à la mise en culture des plantes natives

La première étape concerne la germination. En effet, il convient de maîtriser les conditions de germination d'une espèce pour espérer pouvoir l'étudier en vue de sa production. Une approche générale sur la germination a donc été nécessaire pour en comprendre toutes les étapes.

Approche générale sur la germination

Quelques rappels :

La graine est souvent un organe de survie capable d'attendre très longtemps à l'état inerte les conditions qui lui permettront d'entrer en activité et de donner naissance à une jeune plante ; cette reprise d'activité aboutissant à une nouvelle génération qui s'appelle la germination.

La semence comprend un embryon entouré ou non par un tissu de réserve enfermé dans des enveloppes diverses. Ces enveloppes protègent l'embryon, elles le maintiennent en état de déshydratation, ont un rôle physiologique important et contrôlent très souvent la germination.

La germination débute par une absorption rapide d'eau par les semences et par une forte augmentation de l'intensité respiratoire. Une deuxième étape est marquée par l'interruption de la prise d'eau cependant que l'intensité respiratoire atteint un palier. C'est la phase de la germination *stricto sensu*. Puis la croissance débute avec une nouvelle absorption d'eau et se traduit par l'allongement de la radicule et par une augmentation du métabolisme respiratoire. Mais ce processus ainsi décrit est variable. En effet, les semences d'un même lot ne sont pas toutes dans le même état physiologique, elles ne germeront donc pas en même temps.

L'origine de cette hétérogénéité peut être héréditaire, mais plus généralement les facteurs d'environnement sont susceptibles de modifier considérablement les phases de la germination. Ces facteurs sont les conditions climatiques dans lesquelles sont produites les semences, les conditions de la conservation des semences, les conditions de germination. Ils sont importants à cerner, ils aideront à définir par population les conditions de récolte, de séchage, de stockage des graines.

Les conditions de germination

Les études de comportement des espèces végétales herbacées des milieux froids ont montré que de nombreux taxons produisaient *in situ* des graines viables issues d'une véritable reproduction sexuée ou de phénomènes d'apomixie.

Ces travaux ont remis en cause les conceptions antérieures selon lesquelles la rigueur des conditions climatiques ne permettait pas l'accomplissement de cycle biologique chez ces espèces. On pensait alors que la multiplication végétative devait prévaloir dans ces milieux.

Quelques chercheurs ont étudié la germination des semences d'altitude dans une optique fondamentale, mais, depuis quelques années, certaines publications abordent ce problème dans un cadre plus opérationnel de réhabilitation des sites perturbés d'altitude.

L'aptitude à la germination des semences d'une espèce donnée dépend en premier lieu du patrimoine héréditaire qui peut déterminer l'expression de mécanismes régulateurs. Beaucoup d'espèces viables ne germent pas, même si toutes les conditions sont réunies : humidité, température, oxygénation. On dit alors qu'elles sont dormantes. La dormance constitue théoriquement une adaptation de la germination à la variabilité des conditions climatiques. Grâce à ce mécanisme, les semences germent au moment où toutes les conditions pour un maximum de survie des plantules sont réunies. Cette adaptation indispensable pour la survie des espèces est bien évidemment un handicap à la production massive de ces semences. Il faut donc trouver le moyen de faire germer les semences en même temps pour qu'elles soient récoltables au même moment.

De 20 à 40 % des semences d'altitude présentent des mécanismes de dormance. Il y a deux grandes catégories d'inaptitude à la germination :

- l'embryon isolé est incapable de germer : on parle alors de dormance embryonnaire ;
- l'embryon isolé germe bien : ce sont les structures qui l'entourent qui s'opposent à son démarrage, cette opposition est mécanique ou chimique. Il s'agit alors d'une inhibition tégumentaire. La scarification (destruction de l'intégrité des téguments externes des semences par des procédés physiques, chimiques ou biologiques) est le mécanisme de levée de l'inhibition tégumentaire le plus

répandu pour les graines de haute altitude.

Il existe cependant un contingent important d'espèces pour lesquelles les dormances sont plus complexes et donc beaucoup plus difficiles à déterminer (dormances embryonnaires associées à des inhibitions tégumentaires).

Les phénomènes de dormances qui dépendent des facteurs de l'environnement doivent être identifiés. Les conditions climatiques et édaphiques du milieu qui déterminent les états physiologiques des individus porte-graines ayant un effet sur la germination devront être parfaitement connus pour se mettre dans les conditions de milieu les plus propices à la mise en production de l'espèce.

Mise en place des tests de germination

En conformité avec les règles internationales, adoptées par le XX^e Congrès international pour les essais de semences (Canada 1983), applicables au 1^{er} juillet 1985, les essais mis en place portent sur des échantillons de 200 graines réparties en 4 lots de 50 graines.

Ces 50 graines sont disposées sur deux épaisseurs de papier filtre rond Whatmann n° 15 placé dans une boîte de pétri. On ajoute 5 ml d'eau (additionnés d'un fongicide de benlate), puis on ferme le couvercle sur la boîte en ceinturant l'ensemble avec une bande de parafilm. Les boîtes sont ensuite mises dans un germinateur à durée d'éclairage et à température contrôlables.

Les premiers essais ont été réalisés à température constante de 24 °C en alternant 15 h de jour et 9 h de nuit.

Les résultats suivants ont été obtenus :



germinateur

Nom de l'espèce	Conditions de germination particulières	Pourcentage de germination après 15 jours
<i>Achillea nana</i>		5
<i>Alchemilla alpina</i>	scarification, froid	0
<i>Anthyllis vulneraria</i> <i>ssp. Vulnerarioïdes</i>	scarification	70
<i>Anthyllis alpestris</i>	scarification	100
<i>Ameria alpina</i>		20
<i>Artemisia glacialis</i>		5

<i>Dryas octopetala</i>		7
<i>Doronicum grandiflorum</i>		5
<i>Festuca violacea</i>		10
<i>Festuca spadicea</i>		80
<i>Plantago alpina</i>		80
<i>Trifolium alpinum</i>	scarification	70
<i>Trifolium badium</i>	scarification	75
<i>Trifolium nivale</i>	scarification	55
<i>Lotus alpinus</i>	scarification	70

Pour une population donnée, les tests de germination ont été réalisés sur différents lots récoltés à des altitudes différentes ou réalisés après des temps de stockage plus ou moins longs.

De ces essais on peut retenir que le pourcentage de germination dépend assez fortement de la qualité de la récolte et du triage des semences. La présence des glumelles et des enveloppes florales s'oppose souvent à la germination. La présence d'adventices pour les récoltes réalisées trop bas en altitude, la date de récolte et donc l'aptitude de conservation des semences ont une influence sur les résultats. Toutes ces informations sont importantes à rassembler; elles aideront à la définition des conditions de collecte, de mise en culture et de récolte des plantes alpines.

Le comportement en petites parcelles

Pour un certain nombre de populations ayant donné des résultats de germination intéressants, l'étude du comportement des jeunes plantules est engagée.

Semées dans des bacs à germination garnis d'un terreau maraîcher et mis en chambre de culture, les plantules sont au bout de deux mois repiquées en godets et maintenues en chambre de culture un mois encore. Puis elles sont mises quelques semaines à l'extérieur pour un début d'acclimatation, avant d'être transférées sur des parcelles expérimentales en altitude. Leur comportement est alors suivi très précisément, car il fournit des indications indispensables à la définition des conditions de mise en culture de l'espèce. Croissance végétative et production grainière sont donc étudiées en altitude.

Le développement floral est important à observer : la longueur des tiges florales est une indication qui aidera à adapter le type de récolte (hauteur de la lame de la moissonneuse, nécessité ou pas d'un peigne releveur...). Il convient aussi de reconnaître les indicateurs de maturité des graines pour organiser la récolte dans la période optimale. La production grainière doit être estimée le plus justement possible. Le comptage du nombre moyen d'épis par touffe, la proportion d'épis mûrs et d'épis verts, la proportion de graines vaines et de graines matures sont autant d'informations à recueillir pour estimer la productivité de chaque espèce.

La parfaite connaissance des populations pouvant intéresser la production massive de semences passe donc par une succession de recherches et d'expérimentations illustrées par les exemples suivants.

Anthyllis vulneraria

Appartenant au groupe des légumineuses de la famille des papilionacées, l'*Anthyllis* est une plante vivace de 15 à 20 cm de haut à plusieurs tiges ramifiées.

C'est une plante d'une amplitude extrêmement vaste : Europe, sud-ouest de l'Asie, nord de l'Afrique et naturalisée dans quelques parties de l'Amérique du Nord. Elle est presque partout en France où elle se rencontre jusque dans l'étage alpin. Elle se comporte parfois comme une plante pionnière. Elle est réputée précieuse pour les pâturages, les crêtes et pentes raides et pour former un gazon de protection. Elle préfère les sols plutôt calcaires mais on la rencontre aussi sur sols granitiques. Cette espèce est autogame, c'est-à-dire que l'autofécondation est le mode de reproduction systématique.

L'étude consistait à chercher dans quelles conditions de milieu la production grainière de l'*Anthyllis* serait optimale. Trois types de milieux ont été étudiés :

- Prapoutel : massif de Belledonne à 1700 m d'altitude sur terrain d'éboulis acides en pente, exposition nord qui se rapproche des conditions d'origine de la plante.
- Autrans : massif du Vercors, 1200 m d'altitude, terrain plat bien drainé, de la terre ayant été rapportée sur calcaire fissuré, l'exposition est là aussi nord.
- Villelonge qui préfigure les conditions d'une culture agricole : contrefort ouest du massif de l'Oisans, terre de jardin, terrain plat bien drainé à 1200 m en exposition sud.

Le taux de survie des plants ainsi installés a été de : 80 % à Prapoutel, 97 % à Autrans, 100 % à Villelonge. Il est d'autant plus élevé que l'altitude est basse. À Villelonge, le développement floral a commencé à la fin du mois d'avril, à Autrans, il a commencé à la fin du mois de mai.

Cette espèce fleurit précocement, la maturité des graines se produisant deux mois après le début du développement floral et trente jours après le stade fleur épanouie.

Des observations sur la répartition des plants, en fonction du nombre d'inflorescences et le nombre de fleurs par inflorescence, ont montré que l'espèce était très plastique et que son développement floral était précoce. Il y a une faible variation de l'état de maturité des graines au moment de la récolte. Cette homogénéité de développement est un caractère important pour la production. Près de 75 % des inflorescences sont en même temps au stade de floraison (24 % sont en fin de développement floral et 1 % au stade de fleurs fanées). La production grainière à l'hectare estimée sur chaque site donne : 55 kg pour Autrans, 290 kg pour Prapoutel, de 300 à 340 kg pour Villelonge.

Le taux de germination de cette première génération, après passage au froid (4 °C pendant quinze jours) et stratification des graines à l'acide sulfurique, mises à 20 °C sur substrat mi-tourbe mi-terre, était de 72 %.



Anthyllis vulneraria



Trifolium badium

Légumineuse à fleur jaune doré, vivace poussant en altitude, sa taille varie de 10 à 25 cm.

Les essais en basse altitude ont révélé que cette espèce était extrêmement sensible à l'attaque des champignons pathogènes. Il faudra restreindre sa culture à des zones plutôt froides et développer malgré tout des moyens de lutte pour contenir les attaques éventuelles des champignons pathogènes.

Comme pour l'Anthyllis, le facteur cultural de la première année (richesse du sol, humidité, éclaircissement) détermine la production florale de la deuxième année.

La floraison est, pour cette espèce aussi, homogène. Cependant, un phénomène observé de déhiscence des fleurs laisse à craindre des pertes non négligeables à la récolte. Un élément est cependant très favorable à sa mise en culture : son port dressé, les inflorescences se situant en majorité entre 11 et 20 cm au-dessus du sol.

Dans les conditions de l'essai, la production serait de 250 à 300 kg/ha.

Trifolium nivale

Le *Trifolium nivale* est lui aussi très intéressant.

Cette légumineuse forme de grosses touffes à tiges ramifiées, terminées par des groupes de fleurs ovoïdes de couleur rose terne à rose foncé.

Cette race de *Trifolium pratense* prospère en haute altitude où elle a été observée jusqu'à 2800 m en conditions très variables, mais elle préfère les sols riches.

Mis en expérimentation, le *Trifolium* a un taux de survie de 93 % à Villelonge et Autrans, les plants présentant par ailleurs un excellent état sanitaire sur les deux sites.

Le nombre de fleurs par tête florale est d'environ 60 à 80, une plante produit en moyenne 4 700 graines.

De nos différents essais il ressort une estimation grainière de 290 kg/ha.



Lotus corniculatus

Cette légumineuse présente de nombreuses espèces et sous-espèces.

Pour l'instant, les systématiciens s'accordent sur l'existence de cinq types. L'étude porte sur le type 4 que l'on rencontre en Grande-Bretagne et dans les montagnes d'Europe centrale. Il peut supporter des conditions de froid et d'acidité des sols prononcées. L'inflorescence est un capitule de deux à sept fleurs de couleur jaune, souvent teintées d'orange ou de rouge. On rencontre ce type jusqu'à 2 600 m dans les Alpes maritimes et les Pyrénées et 3 100 m dans les Alpes suisses. La culture de ce lotier se justifie car cette variété peut vivre à des altitudes très supérieures et dans des conditions d'existence plus rigoureuses que la variété d'Europe continentale dont sont issus les lotiers commercialisés. Cependant, un des handicaps à la culture est son port prostré qui nécessitera des outils de récolte adaptés. Par ailleurs, les gousses s'ouvrent très vite à maturité et les pertes à la récolte avoisineraient 30 %. Le taux de survie de l'espèce est de 85 % à Villelonge et de 93 % à Autrans. Son état sanitaire est bon sur les deux sites. En deuxième année la production grainière à l'hectare serait de l'ordre de 165 kg.

Poa alpina

Cette graminée est une espèce particulièrement intéressante qui a fait l'objet de recherches plus approfondies. Il s'agit du *Poa alpina*.

En 1979-1980, dans son analyse des espèces colonisatrices des pistes de ski, Brigitte MASSON considère *Poa alpina* comme l'une des espèces les plus performantes dans la revégétalisation des terrassements. Dans ce même temps, quelques tests de germination sont effectués ; ils montrent que les graines de *Poa alpina* germent en forte proportion, rapidement et sans traitement particulier. En 1984-1985, Odile PERRUSSEL étudie la culture et la production de semences de *Poa alpina* en parcelles semées de 1 m², à 1400 et à 1800 m d'altitude. Les semis sont effectués à raison de 15 ou 30 g/m², c'est-à-dire à la dose des engazonnements d'altitude, soit une dose trente fois supérieure à celle du semis d'un champ de production. Les meilleurs rendements, établis dans des conditions culturales optimales (arrosages fréquents, fertilisation organique), sont d'environ 60 g de graines au m² (600 kg/ha) à 1800 m d'altitude.

En 1986-1987, Marie-Paule BUSSERY étudie l'optimisation de cette production de semences en faisant varier les conditions de culture, mais en utilisant le matériel



végétal obtenu dans les essais précédents. Dans ce même travail qui a fait l'objet d'une thèse, une expérimentation "in vitro" de production d'individus a également été développée.

Les essais ont permis de définir un milieu de culture qui favorise le tallage du *Poa alpina*. Ce milieu permet d'obtenir un taux de multiplication minimal de 6 talles par pied en cinq semaines de culture. L'estimation de la productivité annuelle d'un individu de *Poa alpina* est alors de 6³, soit 10 millions de plantes. *Poa alpina* constitue un matériel végétal de premier ordre pour une production de semences destinées à la végétalisation des terrassements des pistes de ski. Cultivée à moyenne altitude (1200 m), cette espèce a un comportement conforme à celui qui est observé dans son milieu d'origine. La croissance végétative et la production de graines, favorisées par les conditions écologiques moins sévères, sont plus importantes.

La productivité grainière estimée entre six (production réellement récoltée ne tenant pas compte des pertes à la récolte) et quinze quintaux par hectare (production totale calculée en ajoutant le poids des pertes) est conforme aux normes commerciales. C'est à 1200 m d'altitude, en situation de forte insolation et sur un sol agricole, que la production de semences est la plus importante. Le taux de germination des graines dépasse les 80 %, et la germination des semences est possible peu de temps après la récolte sans traitement particulier. Cependant, cette espèce particulièrement intéressante n'est pas encore produite en France, des essais sont en cours. En revanche, elle est produite au Canada ; la variété est déposée et commercialisée en Allemagne où la certification n'est pas obligatoire.

La conduite agronomique des productions

Les essais réalisés en petites parcelles ont permis de préciser la qualité des zones potentielles de culture : altitude moyenne (1000 m environ), sol riche et bien drainé (puisque bon nombre de légumineuses testées sont sensibles aux maladies cryptogamiques), en exposition sud.

Pour les zones retenues, il faudra limiter le plus possible les risques d'invasion par des plantes adventices, car les variétés d'altitude bonnes colonisatrices sont cependant tardives à la germination et le risque principal de leur mise en culture à basse altitude est qu'elles soient envahies très vite par des plantes indésirables avant même d'avoir pu germer. Le terrain sera donc désinfecté avant semis. Puis, un suivi sérieux sera indispensable pour définir à temps le mode de fertilisation adapté, le suivi prophylactique indispensable à toute culture productive. Viendront ensuite les problèmes de mécanisation de la récolte. Les essais sur petites parcelles sont souvent mis en place à partir de plants et non de semis.

Avant de passer à la production, des parcelles de pré-production seront mises en place chez des agriculteurs pour déterminer la dose optimale à semer. C'est sur ces parcelles que seront testés les différents produits phytosanitaires. Avant la production massive, il conviendra aussi de bien maîtriser les conditions de récolte, nettoyage, triage et stockage pour chaque espèce. L'ensemble des informations ainsi recueillies, du laboratoire (tests de germination) à la parcelle expérimentale (comportement de l'espèce, production grainière) à la parcelle de pré-production (conduite agronomique et mode de récolte et stockage), sera consigné dans la fiche de culture établie par espèce.

Cette démarche qui va de la collecte à la production massive de semences sauvages est novatrice. Elle intéresse exclusivement des populations natives n'ayant fait l'objet d'aucune sélection ni modification génétique, comme c'est le cas pour les variétés inscrites commercialisées.

Des recherches importantes sont encore nécessaires pour définir précisément la place que peuvent occuper les semences natives dans les mélanges pour la végétalisation.

3 - SEMENCES SAUVAGES OU SEMENCES CERTIFIÉES

Quelle place pour les semences sauvages ?

Le marché des semences pour la végétalisation ne constitue qu'un faible pourcentage (de 7 à 10 %) du marché global des semences à gazon (9 % en 95/96), ce qui explique qu'il n'y ait pas eu de recherches comme pour les semences à gazon. Pourtant les domaines d'utilisation des gazons de végétalisation sont vastes :

- **infrastructures linéaires** : talus de routes et autoroutes, talus de voies ferrées, berges des voies d'eau ;
- **stocks des déchets de l'industrie** : terrils de stériles et terres de découverte ;
- **surfaces particulières diverses** : anciennes carrières, décharges contrôlées, dunes, digues et barrages en terre, remblais, aérodrome, autodrome, terrains de camping, zones incendiées, coupe-feu, friches industrielles ;
- **et enfin les aménagements touristiques en montagne** : pistes de ski, accès aux stations, merlons de protection paravalanches.

Le marché spécifique de la montagne est faible, mais les enjeux économiques (érosion-risques) et environnementaux sont considérables. L'intérêt local évident a motivé un certain nombre d'organismes qui ont engagé les études nécessaires à la définition des conditions de production des semences sauvages adaptées à la réhabilitation d'espaces dégradés en conditions extrêmes.

Mais actuellement l'utilisation des plantes natives produites en altitude souffre du manque de reconnaissance juridique de ces productions. Les règles concernant les variétés inscrites ne peuvent s'appliquer aux espèces natives. Les semences de plantes sauvages ne font l'objet d'aucun contrôle et l'on constate donc que sont introduites dans les mélanges de végétalisation, avec l'argument écologique, des populations végétales venant de l'étranger sans qu'il soit possible de vérifier l'origine des graines, leur qualité, leur comportement dans les mélanges.

Une démarche réglementaire devrait être engagée qui tiendrait compte des règles communautaires, pour une reconnaissance des gazons de végétalisation et la mise au point de critères d'appréciation des espèces sauvages produites permettant le contrôle de leur origine (origine géographique de l'écotype – lieu et date de production des semences ou de collecte), leur faculté germinative, leur pureté spécifique... dans l'intérêt des utilisateurs.

Semences sauvages complémentaires ou concurrentes ?

En altitude, compte tenu des conditions écologiques des espaces à réhabiliter, le problème posé aux aménageurs est celui de la reconstitution à terme des groupements végétaux dont les caractéristiques sont les plus proches possibles des phytocénoses naturelles.

Si on résume l'opération de végétalisation des pistes de ski telle qu'elle est conduite dans l'essentiel des stations, elle se divise en trois phases.

Dans un premier temps, on va par semis constituer un groupement végétal "artificiel". Les situations climatiques des espaces à reconquérir étant incontrôlables et variées, les techniques et produits mis en oeuvre, que nous avons précédemment développés, vont permettre :

- d'améliorer le niveau de fertilité des substrats ;
- de constituer des mélanges les plus adaptés possibles aux rigueurs de l'altitude ;
- d'améliorer les conditions microstationnelles en favorisant l'accrochage, la germination et la croissance des plantules par l'utilisation de différents types de "colles", conditionneurs de sols, mulchs ...

Ce groupement ainsi installé sera maintenu par des apports de fertilisants, voire de semis complémentaires pendant quelques années. Cependant, les pistes étant de fins rubans artificiels au milieu d'un environnement végétal souvent riche, les diaspores issues des groupements végétaux qui bordent la piste vont se répandre plus ou moins vite, en quantité plus ou moins importante dans la végétation artificiellement installée. D'ailleurs, cette dernière se fragilise avec les années par la disparition de certaines de ces espèces, en particulier le ray-grass anglais. Cette disparition est un élément favorable à l'arrivée des espèces autochtones de première installation.

Il convient cependant qu'il y ait un bon synchronisme pour que les espaces libérés par le départ des espèces du mélange semé soient occupés par les espèces autochtones, sinon les risques d'érosion et de dégradation des pistes sont à craindre.

Ce processus de recolonisation est complexe, et le couvert végétal qui en résulte mérite d'être parfaitement identifié, en particulier en ce qui concerne son recouvrement et sa richesse spécifique. Actuellement et compte tenu des efforts de recherche faits sur les mélanges utilisés en altitude, les recouvrements observés sur des engazonnements anciens vont de 10 à 90 % avec une moyenne de 59 %. On peut considérer que pour une station sur neuf la végétalisation n'a pas abouti aux résultats escomptés.

L'étude de la richesse floristique des milieux en cours de réhabilitation est un élément important de diagnostic de la stabilité de la végétation et de son dynamisme. En effet, compte tenu que, dans la plupart des cas, le nombre des espèces introduites lors du semis est de l'ordre de cinq ou six, ce sont les espèces autochtones qui contribuent à l'obtention de richesse spécifique élevée. On trouve souvent dans des engazonnements relativement anciens plus de 30 espèces spontanées.

Des études récemment engagées sur des engazonnements anciens (plus de dix années) montrent qu'on peut avoir des groupements à valeur de recouvrement faible (inférieur à 40 %) mais qui contiennent un nombre d'espèces s'échelonnant entre 15 et 25. Ces formations végétales ouvertes qui manifestent un dynamisme à faible vitesse sont riches mais très sensibles à l'érosion.

On a observé une autre classe de groupements avec des valeurs de recouvrement plutôt élevées (supérieures à 60 %) et à richesse spécifique forte (25 espèces et plus). Il s'agit là de formations végétales fermées à fort dynamisme de reconquête, peu sensibles à l'érosion. Ces pistes de ski sont en passe d'être parfaitement intégrées au milieu naturel.

On a reconnu aussi des pistes ayant un fort recouvrement, mais une richesse spécifique faible, essentiellement constituée par les espèces semées. La dynamique de reconquête est faible et ces milieux sont très sensibles : si un incident climatique venait à compromettre le maintien des espèces et des variétés issues de la sélection, le sol mis alors à nu ne résisterait pas à l'érosion. L'ensemble de ces observations met l'accent sur la nécessité de trouver les moyens de favoriser le retour des espèces autochtones qui sont les seules à garantir la richesse spécifique des milieux réhabilités et donc leur stabilité. Il convient donc, soit de les introduire dans les mélanges semés, soit de raisonner la fertilisation de façon que les milieux en cours de réhabilitation ne soient pas trop riches, car l'excès d'engrais bénéficie exclusivement aux espèces artificiellement semées. En considérant toutes les informations ainsi recueillies sur le comportement des différentes espèces utilisées en altitude, comment réaliser un mélange adapté ?

LA RÉALISATION DES MÉLANGES DE SEMENCES

Comme nous l'avons vu, les mélanges utilisés en altitude doivent comporter des espèces de base soigneusement sélectionnées en fonction des contraintes bien particulières des zones à réhabiliter :

Les critères de choix

Les mélanges à utiliser seront composés essentiellement de *graminées* et de *légumineuses* pérennes, s'installant rapidement et peu exigeantes quant à la richesse du sol.

On retrouve d'ailleurs ces espèces par affinité par 2, 3, voire 4 : ainsi le lotier accompagne souvent la fétuque rouge, alors que les trèfles se rapprochent plus de la fléole.

La réussite dépend de la juste proportion entre les espèces. Il faut tenir compte de l'agressivité, de la vitesse d'installation, de la couverture du sol et de la pérennité.

VITESSES D'INSTALLATION	RAPIDE	MOYENNE
	Crételle Ray grass anglais	Fétuque élevée Brôme inerme Fétuque des prés Fléole des prés Pâturin commun Trèfle violet Trèfle blanc Luzerne Sainfoin

AGRESSIVITÉ	FORTE	MOYENNE
	Ray grass anglais	Fétuques rouges Fétuque élevée Fléole Trèfle blanc Luzerne Agrostide Dactyle
COUVERTURE DU SOL	TRÈS BONNE	BONNE
	Agrostides Fétuque rouge gazonnante Trèfle blanc nain	Fétuque ovine Fétuque élevée Fléole noueuse Fétuque rouge traçante
PÉRENNITÉ	TRÈS BONNE	BONNE
	Fétuques rouges Fétuque élevée Fléole noueuse Trèfle blanc nain Fétuque des prés Fétuque ovine	Agrostides Fléole des prés Pâturin des prés Lotier comiculé

Il faudra aussi tenir compte du poids des graines, donc du nombre apporté par gramme, car les pourcentages exprimés dans les mélanges sont pondéraux.

ESPÈCES	NOMBRE DE GRAINES POUR 1 g	PROPORTION EN MÉLANGE
Agrostide stolonifère Agrostide commune	de 15 à 20 000 15 000	Les semences sont extrêmement fines et l'espèce une fois installée est agressive, il faut en mettre moins de 5 % dans le mélange.
Fétuque élevée	de 400 à 500	Les graines sont grosses, l'espèce est lente à s'installer et elle manque d'agressivité, il faudra donc, si le mélange comporte du ray-grass, la mettre en proportion très supérieure à celui-ci.
Fétuque ovine Fétuques rouges	2 500 1 000	Malgré la finesse des graines, il faut les apporter en proportion importante, notamment si le mélange comporte du ray-grass qui s'installe vite, qui est agressif et qui les étoufferait.
Fléole des prés Fléole noueuse	2 500 4 000	Semences fines : pas plus de 10 % dans les mélanges, d'autant plus qu'une fois installées, elles sont agressives.
Pâturin des prés Pâturin commun	3 500 5 500	Ces graines fines sont plus lentes à s'installer et moins agressives que le ray-grass. Il faut donc mettre plus de 20 % dans les mélanges.

Ray grass. anglais	470 à 600	Il s'installe rapidement, il a un rôle de plante abri mais il ne faut pas l'utiliser à plus de 10% pour qu'il ne gêne pas l'installation des autres espèces.
Lotier corniculé	1 000	Espèces souvent très couvrantes, elles ont un rôle de fixation racinaire et d'amélioration du sol. Il faut les mettre en complément du mélange à raison de 5 à 15 %
Trèfle blanc nain	1 500	
Sainfoin		

Composition

Depuis quelques années, une évolution importante est notée dans la façon de composer un mélange de végétalisation.

Les espèces qui composent la base d'un mélange restent celles issues de la sélection, mais de plus en plus, des semences sauvages complètent la composition des mélanges.

On observe différents niveaux de complexité dans les mélanges utilisés. En suivant nos recommandations, les premiers mélanges dits « pistes de ski » étaient composés de 4 à 6 espèces commerciales : 10 % de fléole des prés, 50 % de fétuques rouges, 15 % de fétuque ovine, 15 % de ray-grass anglais, 10 % de trèfle blanc nain.

Progressivement, les mélanges sont devenus plus complexes, la contribution des légumineuses est plus importante et des espèces sauvages sont introduites, comme dans ce mélange utilisé dans une station des Alpes-Maritimes : 5 % d'agrostide Highland, 10 % de dactyle Lutetia, 14 % de fétuque ovine Bornito, 15 % de fétuque rouge demi-traçante Dawson, 15 % de fétuque rouge traçante Sunset, 5 % de fléole des prés Climax, 5 % de pâturin des prés Entopper, 10 % de ray-grass anglais Jewel, 8 % de trèfle blanc nain Grasslands huia, 10 % de lotier corniculé Mailand, 3 % d'autres espèces (*Achillea Millefolium*).

En résumé, on peut proposer



Doses de semis

De nos différents essais il ressort que l'on peut faire une économie notable sur les semis en faisant un meilleur choix des espèces, des fertilisants et techniques de protection de semis.

On peut passer de 500 kg/ha, dose utilisée dans les années 80 à 200/250 kg/ha. On limite ainsi la concurrence des jeunes plants entre eux, et l'épuisement trop rapide des ressources nutritives disponibles dans le sol.

Presque arrivé au terme de la démarche le substrat est dans bien des cas reconstitué, les sementes sont choisies.

Mais si l'on n'a pas pu reconstituer un substrat de qualité par apport de terre végétale ou d'amendement organique, il faudra au moment du semis apporter une bonne fertilisation et envisager de renouveler cette opération parfois pendant plusieurs années pour pérenniser le couvert végétal.

La fertilisation est pour l'essentiel des chantiers de végétalisation une opération importante et obligatoire.

CHAPITRE VI

La fertilisation



On a évoqué dans les chapitres précédents le rôle que doit avoir le sol : support et "garde-manger" pour la plante, mais on ne pouvait pas parler de véritable sol pour les sites ayant fait l'objet de travaux intenses en altitude.

En effet, les différents constituants d'un sol, argile, limons, sables ne sont ni présents, ni organisés pour former le complexe argilo-humique stable donnant au sol sa structure et une possibilité de stockage des éléments nutritifs et d'échange de ses éléments pour les mettre ainsi à disposition des racines sans trop de perte par lessivage.

Nous avons vu précédemment qu'il était indispensable de réutiliser la terre végétale sur les sols terrassés en altitude ou d'utiliser des amendements organiques qui vont agir comme le complexe argilo-humique et modifier l'état structural du sol.

Il faut maintenant apporter suffisamment d'aliments pour les plantes, essentiellement de l'azote, du potassium et du phosphore si l'on veut réussir l'opération de végétalisation en pérennisant la végétation installée.

Lorsque l'on souhaite créer un espace engazonné en plaine, la fertilisation se conçoit classiquement en trois étapes : lors de la préparation du lit de semences, au moment du semis, en entretien. On apporte une fumure de fond à la préparation du lit de semences qui a pour but de préparer ou de rehausser le stock des éléments nutritifs indispensables pour le démarrage de la végétation. En altitude et compte tenu du terrain, cette première opération n'est jamais réalisée. En effet, on ne peut intervenir sur le lit de semences en enfouissant les apports de fertilisants qui devraient avoir lieu un mois avant le semis. Mais l'emploi des amendements organiques joue en partie ce rôle et évite les carences. De plus, il faut très souvent limiter le nombre des interventions toujours difficiles du fait de la pente et des délais de réalisation des chantiers toujours très courts en été. On insistera donc sur les deux étapes suivantes : la fertilisation au semis et celle d'entretien.

La fertilisation que l'on apporte au moment du semis permet la mise à un niveau suffisant des réserves du sol pour assurer une bonne alimentation de la végétation. La fertilisation d'entretien est nécessaire lorsque la couverture végétale souffre, elle permet de compenser les pertes en N, P, K dues à des prélèvements de parties aériennes (tonte, fauche, pâturage) et à des pertes par drainage ou lessivage.

LES ENGRAIS

Définition

Les engrais sont des matières fertilisantes dont la fonction principale est d'apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition (éléments fertilisants majeurs, éléments secondaires et oligo-éléments).

La législation française n'autorise le nom d'engrais que pour un produit qui garantit un dosage en l'un des trois éléments fertilisants qu'elle reconnaît, N, P ou K : l'azote est exprimé en élément azote N ; le phosphore est exprimé en P_2O_5 , appelé couramment acide phosphorique (en réa-

lité anhydride phosphorique) ; le potassium est exprimé en potasse K_2O (en réalité oxyde de potassium).

Pour les autres éléments sont pris en compte : la teneur en CaO (chaux) pour le calcium, la teneur en MgO (magnésie) pour le magnésium, la teneur en S ou SO_3 pour le soufre.

Les doses d'engrais

Elles sont souvent exprimées en unités fertilisantes. Ces unités sont à rapporter à la proportion de chaque élément dans la composition de l'engrais commercialisé. Elles sont exprimées en pourcentages d'éléments (contenus dans 100 kg d'engrais).

Exemple : un engrais composé 12.12.17 contient 12 % de N, 12 % de P_2O_5 et 17 % de K_2O . Pour apporter 30 unités d'azote, il faudra apporter $(30 \times 100) : 12$, soit 250 kg de ce type d'engrais. On apporte alors en même temps $(250 \times 12) : 100$, soit 30 unités de P_2O_5 et $(250 \times 17) : 100$ soit 42,5 unités de K_2O .

Classification et nomenclature des engrais

Les engrais sont distingués d'après leur origine en engrais organiques provenant de la transformation de déchets animaux ou végétaux et en engrais minéraux d'origines variables (roches, sels, synthèses ou transformations industrielles).

Ils sont aussi classés en engrais simples (n'apportant qu'un élément) ou composés (apportant au moins deux éléments majeurs).

Les engrais organiques proviennent de matières végétales ou animales, on peut les subdiviser en organo-minéraux et en organiques de synthèse.

Les engrais organiques d'origine végétale participent à la synthèse de l'humus dans le sol à partir de substances issues de la décomposition de la cellulose et de la lignine.

Les déchets animaux seuls sont incapables de fournir l'humus au sol, mais ils participent à l'humification lorsqu'ils sont ajoutés à une masse végétale à C/N élevé.

Les éléments fertilisants des engrais organiques sont constamment protégés du lessivage ou de la "fixation irréversible" : tant que la plante n'en a pas besoin, ces éléments restent combinés sous des formes organiques facilement utilisables par les microbes et les racines. Les éléments (N, P, K) des engrais organiques n'agissent jamais seuls mais en synergie avec d'autres éléments minéraux (S, Mg, Ca, oligo-éléments) et avec les micro-substances de croissance directement assimilables.

Les unités fertilisantes des engrais organiques ne freinent pas la prolifération des microbes comme le font souvent les engrais minéraux solubles, mais au contraire l'intensifient à condition que l'emploi des engrais organiques s'accompagne des techniques favorisant la stimulation microbienne (amendements humifères abondants et réguliers, régulation de l'humidité et de l'acidité...).

L'action des engrais organiques n'est pas immédiate. La minéralisation ne se fait pas forcément au moment où la plante en a le plus besoin. De plus, sur sols stériles, il faut utiliser des doses élevées d'engrais, ce qui peut faire courir un risque de colmatage ou de fermentations anaérobies. Les racines risquent aussi de rester en surface. Pour éviter ces inconvénients et bien que le nombre d'interventions en altitude doive toujours être le plus réduit possible, on préconisera un

fractionnement des apports (printemps et automne) et on poursuivra ces apports pendant plusieurs années (de trois à cinq ans).

Dans ces conditions, les fumures organiques stimulent dans le sol le développement de la microflore associée aux racines, ce qui s'avère particulièrement intéressant en restauration d'espaces dégradés.

Dans la pratique et compte tenu des conditions particulières des milieux à réhabiliter, on associera l'emploi d'engrais minéraux, pour l'apport d'azote indispensable à l'implantation des espèces, à l'emploi d'engrais organiques, pour l'entretien à plus long terme.

On préférera l'utilisation des formules d'engrais toutes prêtes, en particulier les engrais ternaires (ils apportent en même temps N, P_2O_5 et K_2O), en choisissant ceux qui contiennent du soufre (il augmente la résistance au froid des graminées) et de la magnésie (elle stimule la croissance, la résistance au sec, au froid et aux maladies).

LES BESOINS DES PLANTES

Pour s'installer et pour se développer, une plante doit trouver dans le sol les éléments minéraux indispensables. Les trois éléments principaux ou macro-éléments sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K).

D'autres éléments sont aussi indispensables à la vie des plantes. Ce sont les mésoéléments : soufre, calcium et magnésium ainsi que les oligo-éléments : fer, manganèse, zinc, bore, molybdène. Les besoins pour ses éléments sont cependant réduits.

Il est bien évident qu'en altitude, compte tenu de l'état des sols après travaux, il faut apporter ces éléments sous forme d'engrais à la plante si on veut qu'elle s'installe de façon durable.

Les exigences des plantes de reverdissement varient bien sûr d'une espèce à l'autre. Comme on l'a vu pour les amendements organiques, les doses d'engrais utilisées sont susceptibles de faire varier la composition de la couverture végétale mise en place.

Les graminées

Elles sont les bénéficiaires essentielles des apports d'azote, puisque les légumineuses sont capables d'utiliser l'azote atmosphérique grâce aux bactéries qui vivent dans leur tissu racinaire. Ces bactéries ont la capacité de capter l'azote de l'air que la plante ne peut utiliser sous cette forme, et de le transformer en ions ammonium qui sont assimilables par les végétaux. Cela permet aux légumineuses de s'affranchir totalement de la présence d'azote dit "combiné" dans le sol.

Les graminées sont aussi exigeantes en potasse qu'elles puisent facilement dans le sol. Elles absorbent également beaucoup de phosphore.

Selon les espèces, les besoins sont différents : ainsi le ray-grass anglais est exigeant, les fétuques rouges sont rustiques, la fléole se distingue par des exigences modérées en calcium et en phosphore.

Exigences des graminées

Les légumineuses

	ESPÈCES PRAIRIALES	ESPÈCES à GAZON
Espèces exigeantes	Ray-grass Fléole Dactyle Pâturin des prés Fétuque des prés	Fléole Fétuque élevée Ray-grass anglais Agrostide menue Ray-grass d'italie
Espèces rustiques	Agrostides Fétuques	Fétuques rouges Pâturin des prés

Ce sont des plantes enrichissantes exigeantes en calcium et en magnésium. Elles pourraient se passer de fumure azotée, elles profitent mieux que les graminées des apports d'acide phosphorique et de potasse, car elles ont du mal à extraire ces éléments du sol.

La fertilisation a donc une action importante sur l'installation des espèces sur substrat remanié. Elle a aussi une importance considérable sur l'équilibre, parties aériennes et parties souterraines des plantes artificiellement installées. Il faut retenir que pour l'installation de la couverture végétale les apports d'azote défavorisent les légumineuses, que la fumure phospho-potassique influence favorablement l'installation des plants, l'acide phosphorique favorisant mieux les légumineuses. Pour l'entretien, la fertilisation peut modifier la flore, elle bénéficie généralement plus aux graminées. Les trois éléments : N, P, et K ont un effet différent selon la pluviométrie et le mode d'entretien de la couverture végétale (fauche ou pâturage).

Différences de comportement des espèces en fonction des principaux éléments minéraux

■ Espèces favorisées □ Espèces défavorisées ○ Espèces indifférentes

Légumineuses	Acide phosphorique	Potasse	Azote
Trèfle blanc	■	■	□
Trèfle violet	■	■	□
Trèfle hybride	■	■	□
Lotier comiculé	■	■	□

Pâturin des prés	■	■	■
Pâturin commun	■	■	■
Fétuque des prés	■	■	○
Fétuques rouges	□	□	○
Fétuque ovine	□	□	○
Fléole des prés	○	■	■
Dactyle aggloméré	□	■	■
Agrostide vulgaire	□	□	■
Crételle des prés	□	■	○

LE RÔLE DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS À APPORTER À LA PLANTE

L'azote (N)

L'azote est présent dans le sol sous deux formes :

– l'azote organique qui ne peut être absorbé tel quel. Il doit passer par les étapes de la minéralisation (azote ammoniacal NH_4 , puis nitrique NO_3).

La minéralisation sera en altitude lente puisqu'elle est liée à la température du sol, au pH, à l'humidité, à la structure du sol, à l'activité microbienne... Il est alors difficile de prévoir quand l'azote va se minéraliser et en quelle quantité il sera disponible pour la plante.

– l'azote minéral :

* la forme ammoniacale NH_4 est une forme transitoire avant transformation en nitrate. C'est sous la forme NH_4 que l'azote est retenu dans le complexe absorbant et les risques de lessivage sont faibles,

* la forme nitrique NO_3 est soluble dans l'eau, donc facilement lessivable.

C'est la forme minérale (nitrique ou ammoniacale) qui est absorbée par la plante.

L'azote favorise la pousse aérienne des plantes et les tissus fabriqués sont de couleur vert foncé. On reconnaît d'ailleurs facilement sur les pistes l'emploi parfois excessif d'azote par cet aspect vert gazon qui contraste avec la pelouse environnante.

L'excès d'azote est d'ailleurs préjudiciable en altitude puisqu'il sensibilise les plants à la sécheresse, au froid et aux maladies.

Lorsque l'apport d'azote est insuffisant on constate en revanche une coloration vert-jaune des plantes par manque de chlorophylle et une période végétative fortement raccourcie.

L'azote minéral présente l'inconvénient d'être facilement lessivable, son utilisation devra respecter un certain nombre de conditions (période d'utilisation et dosage).

Le phosphore (P)

Sa teneur est généralement exprimée en anhydride phosphorique P_2O_5 , la plante absorbant les ions PO_4^{3-} issus de l'acide phosphorique. Comme l'azote, l'acide phosphorique participe à la fabrication des tissus, la plante en a donc besoin dès la germination. Il a par ailleurs un rôle très important dans le développement racinaire. Les plantes carencées en acide phosphorique ont des feuilles de dimension réduite et rapidement le bout des feuilles jaunit puis devient pourpre et nécrosé.

Le sol doit contenir des réserves en phosphore suffisantes pour que la plante le puise dans la solution du sol. Il n'est pas soumis au lessivage, il a donc tendance à rester en surface et à favoriser le développement racinaire superficiellement. L'idéal serait de l'enfouir avant semis, mais cette incorporation est impossible sur les sites terrassés en altitude.

Le potassium (K)

Sa teneur dans les engrais est exprimée en K_2O , la plante absorbant les ions K^+ . Cet élément est important pour nos semis d'altitude puisqu'il facilite la résistance des plantes au froid, à la sécheresse et aux maladies.

Les carences en potassium s'expriment aussi par un jaunissement du bord des feuilles et une nécrose marginale.

Les engrais potassiques apportent au sol le cation K^+ qui se fixe sur le complexe argilo-humique, il n'est donc pas entraîné par l'eau et diffuse faiblement. Le sol doit en être saturé pour qu'il soit accessible aux plantes. Il faut donc l'apporter en quantité importante. Comme l'acide phosphorique, le potassium ne descend pas dans le sol, il diffuse lentement sur les premiers centimètres, il prédispose donc la plante à faire un enracinement superficiel.

Le calcium (Ca)

Le calcium est à la fois un aliment et un amendement.

Il a un rôle déterminant à tous les stades de vie du végétal de la germination à la maturité des graines. Il assure une meilleure résistance des tissus végétaux.

Il améliore les propriétés physiques du sol. Il permet le maintien du complexe argilo-humique à l'état floculé, c'est donc un bon régénérateur du sol. De plus, le calcium permet de neutraliser l'acidité du sol.

Le magnésium (Mg), le soufre (S)

Le magnésium (exprimé le plus souvent en MgO) et le soufre (S) agissent sur la formation de la chlorophylle. Le soufre favorise la résistance des plantes au gel.

Le magnésium en outre intervient dans l'utilisation par la plante des engrais phosphatés.

Les carences en magnésium affectent par priorité les feuilles les plus âgées, car, en cas de manque, le magnésium migre vers les feuilles les plus jeunes. Les feuilles se décolorent, des nécroses de couleurs variées (du jaune au brun) apparaissent ensuite.

Les oligoéléments

Fer, manganèse, zinc, bore, cuivre et molybdène, bien qu'absorbés en quantité infinitésimale, sont indispensables au bon fonctionnement des réactions chimiques de la plante.

LA PRATIQUE DE LA FERTILISATION

La fertilisation d'établissement cherche à ramener en un apport important les réserves du sol à un niveau suffisant pour assurer une bonne alimentation de la végétation.

L'azote est l'élément minéral le plus important à prendre en compte pour l'implantation et l'entretien des gazons. Cependant, comme on l'a déjà évoqué, une quantité excessive d'azote entraîne des risques :

- lessivage de l'azote soluble apporté au semis si la période est trop humide ;
- diminution de la résistance à la sécheresse pour un semis de fin de printemps ;
- diminution de la résistance au froid pour un semis de fin d'automne.

L'apport minéral d'azote le plus recommandé est l'ammonitrate, si l'on choisit un engrais simple. Cependant les pratiques les plus courantes sont les apports d'engrais composés ternaires (N, P, K).

Pour l'acide phosphorique, l'apport sera sous forme de scories pour les sols acides ou en voie de décalcification, sous forme de superphosphates concentrés pour les sols calcaires très pauvres en soufre.

Pour la potasse, si on a utilisé un amendement organique à base de fumier ou de lisier, il est inutile d'en apporter sous forme minérale. Si on utilise un engrais ternaire, il faudra choisir celui dont la potasse est à base de sulfates et qui apporte en même temps de la magnésie.

La fertilisation d'entretien compensera les pertes en N, P et K dues aux prélèvements des parties aériennes (fauche, pâturage) et aux pertes par drainage ou lessivage.

En résumé, si l'on souhaite utiliser des engrais simples associés à des amendements organiques, il faut apporter de l'azote sous forme d'ammonitrate, de l'acide phosphorique sous forme de scories (sols acides) ou de superphosphates concentrés (sols calcaires) et de la potasse sous forme de sulfate de potasse (avec les scories), ou de patenkali.

Dans la pratique, il est plus simple d'utiliser les formules d'engrais ternaires toutes prêtes. Il faut alors préférer celles qui contiennent du soufre et de la magnésie, et celles qui contiennent de l'azote à solubilisation lente.

DOSES ET FORMES D'APPORT

Les recommandations qui suivent concernent la mise en place d'une couverture végétale sur sol brut. En effet, lorsqu'il y a apport de matière organique (compost de boue par exemple) avant

semis, la fertilisation est inutile dans la plupart des cas, le compost se comportant comme un engrais à libération lente.

La fertilisation d'établissement

La fumure azotée doit être importante et si possible fractionnée : 60 unités par hectare au semis. Si elle est réalisée au printemps, un deuxième apport identique sera fait à l'automne (mais pas trop tard pour ne pas rendre les plantes plus sensibles au gel). Si le semis a eu lieu à l'automne, le deuxième apport aura lieu au printemps suivant. La dose la plus couramment utilisée en fertilisation d'installation pour la fumure phosphatée est de 80 à 120 unités, et de 60 à 120 unités par hectare pour la potasse.

N	P ₂ O ₅	K ₂ O
de 60 à 120 U/ha	Sols pauvres Avec légumineuses : de 80 à 120 U/ha Sans légumineuses : de 40 à 80 U/ha	Sols pauvres : de 60 à 120 U/ha Sols très pauvres : de 120 à 180 U/ha
Si on préfère un engrais ternaire, on utilisera les formules (10, 10, 10 ou 15, 15, 15)		

La fertilisation d'entretien

Les apports devraient être de deux ou trois par an, mais compte tenu des difficultés d'intervention, on privilégiera une intervention dès la fonte des neiges, au printemps, et une deuxième intervention dès la fin de l'été, après la période de sécheresse. On apportera pour chacun des deux passages de 30 à 60 unités d'azote.

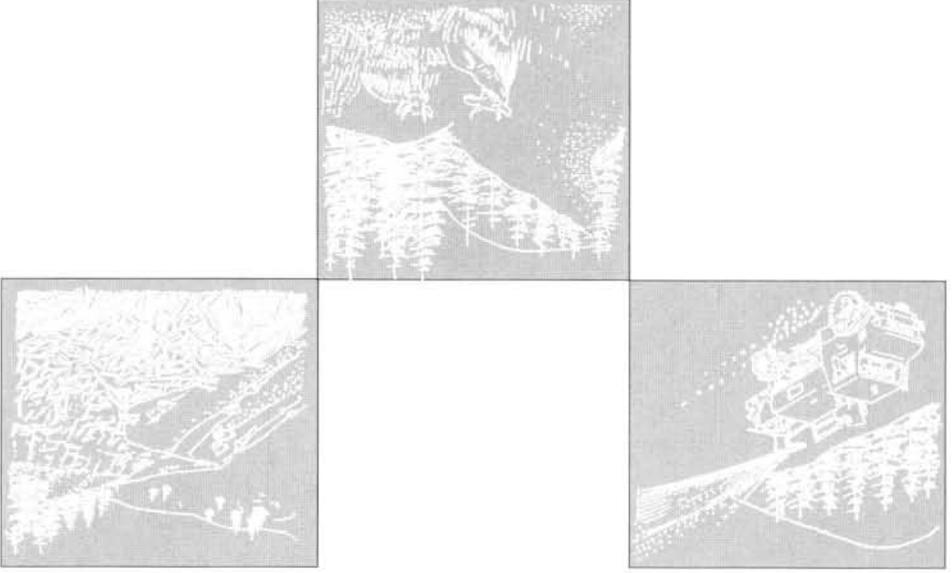
Les apports phosphatés et potassiques seront du même ordre. Ce qui fait que l'utilisation d'engrais ternaires (10, 10, 10 ou 15, 15, 15) est facile à mettre en œuvre.

Si la fertilisation est faite tardivement à l'automne, on appliquera plutôt une formule du type 4, 20, 20, faible en azote pour ne pas sensibiliser les plantes au gel, mais forte en P₂O₅ et K₂O pour favoriser la croissance racinaire et la résistance des plants au gel. La fertilisation d'entretien est à appliquer de trois à cinq ans après le semis dans les proportions citées, puis il conviendra de réduire à un apport au printemps, puis tous les deux ans jusqu'à l'autonomie du couvert végétal.

Nous voilà au terme de l'ensemble des opérations qui ont permis une bonne préparation du substrat et le choix des semences et des produits d'accompagnement le plus judicieux possible.

On peut maintenant envisager :

- le semis à proprement parler,
- sa protection,
- l'entretien ultérieur des surfaces ainsi végétalisées.



Le semis, sa protection, son entretien

CHAPITRE VII

Lorsqu'on envisage enfin le semis, il faut le réaliser dans les meilleures conditions. En altitude, la période d'intervention est toujours très courte. On peut envisager deux possibilités : le printemps, dès la fonte des neiges, mais après que le sol eut été suffisamment ressuyé, ou l'automne, et l'on considère souvent que dès le 15 août les conditions sont à nouveau très favorables. Il faut bien évidemment éviter l'été, où la sécheresse provoque autant de dégâts sur les semis que le gel.

On constate que dans l'essentiel des cas les semis se font plutôt à l'automne, dès la fin des chantiers de terrassements, ce qui est une bonne chose, car on ne court pas le risque de voir le peu d'éléments fins restant sur les pentes après travaux être emporté par les pluies de fin d'automne et la fonte des neiges si on attend le printemps suivant.

LE SEMIS ET SA PROTECTION

Le semis manuel et sa protection

Lorsque les surfaces à traiter sont peu importantes, le semis manuel est plus économique. Il convient cependant de procéder par gestes croisés de façon à obtenir une bonne répartition des semences qui sont de poids différents et avoir ainsi à terme une couverture végétale homogène.

Ce semis manuel doit dans bien des cas être protégé, et des stations de ski comme celles du Vercors ou des Alpes du Sud mettent en place une protection par paillage manuel.

Utilisée à raison de deux à quatre tonnes par hectare, la paille présente les avantages suivants : elle apporte fraîcheur et humidité au semis ; elle protège contre l'impact mécanique des gouttes de pluie et contre le ruissellement, le gel, l'ensoleillement ; elle aide à la constitution de l'humus.

On choisit une paille à brins longs qui peut préalablement être mouillée pour renforcer son rôle protecteur.

Cependant, il faut tenir compte d'un certain nombre de contraintes dans son utilisation :

– la paille par l'apport d'éléments carbonés augmente le rapport C/N du substrat. Les micro-organismes chargés de dégrader son carbone utilisent pour ce faire l'azote. Il faudra donc dans les cas d'utilisation de paille augmenter l'apport d'azote pour ne pas pénaliser la croissance aérienne des plantes.

– la paille peut s'envoler par vents forts ou glisser sur les fortes pentes, il faut donc éviter de l'utiliser dans les zones de cols ou envisager de la fixer avec du bitume.

– Enfin, si elle est apportée en trop grande quantité, elle peut devenir un obstacle mécanique à la levée des plantules ou maintenir un milieu trop humide favorisant plutôt les moisissures et les mousses que la germination des semences, on évitera donc d'utiliser de la paille en exposition nord. Elle peut aussi faire écran et gêner le développement des plantules qui ne reçoivent pas suffisamment de lumière.

Le semis mécanisé

Pour les surfaces supérieures à 1 ha, on aura recours au semis hydraulique ou "hydroseeding". Cette mécanisation du semis est très répandue en station, à telle enseigne que beaucoup ont acquis leur propre matériel.

L'hydroseeder se compose d'une cuve de volume plus ou moins important de 2 000 à 10 000 litres. Cette cuve est équipée d'une lance en poste fixe ou sur une rallonge souple. A l'intérieur de la cuve, un système d'agitation permet une bonne homogénéité de l'ensemble des composants du semis :

- l'eau à raison de 1 litre par m²,
- les graines à raison de 150 à 200 kg par hectare en fonction du nombre de passages,
- un amendement organique à raison de 800 kg à 1 tonne par hectare,
- un engrais à raison de 60 à 80 unités d'azote par hectare,
- un fixateur, la cellulose, à raison de 500 à 800 kg par hectare.

L'amendement organique utilisé dans l'hydroseeding est un produit commercial composé de matière organique enrichi.

Le fixateur sera soit une cellulose mécanique de pins à fibres longues, soit un fixateur chimique. Dans les situations difficiles, après l'hydroseeding, on peut envisager la projection de paille fixée au bitume par un mulcheur.

L'émulsion bitumeuse active la germination en « échauffant » la paille (effet de corps noir), elle en active la décomposition.

Cette technique freine l'évaporation et protège le semis et le paillage contre le vent, l'effet de la pente et éventuellement des oiseaux ou du gibier.

La technique de l'ensemencement hydraulique associée à la technique du paille-bitume peut dans certain cas ne pas suffire pour protéger le semis et les plantules, en particulier sur les talus à forte pente.

Dans ce cas, il faut assurer la fixation du sol en attendant que la végétation soit suffisamment bien installée, pour éviter que des processus d'érosion ne viennent compromettre la stabilité des ouvrages.

On envisage alors de couvrir le sol avec un matériau protecteur le temps que la végétation s'installe et soit efficace dans son rôle de protection contre l'érosion superficielle.

Un certain nombre d'essais ont donc été réalisés sur des matériaux composites biodégradables sur des terrains à forte pente.

La fixation des sols par utilisation de matériaux composites biodégradables

Les caractéristiques du matériau naturel choisi

La toile de jute a été choisie. C'est un filet qui forme une structure maillée et ouverte laissant un ratio d'espace ouvert d'environ 65 % ; espace facilement colonisable par la végétation. Sa masse

surfacique est de 600 g/m².

Le jute est composé de 80 à 87 % de cellulose et de 11 à 13 % de lignine, il est biodégradable. Il se décompose spontanément dans le cycle biologique et apporte ainsi de la matière organique au sol.

Le filet ainsi posé joue un rôle important contre l'érosion, il protège environ 40 % du sol et absorbe une partie de l'énergie cinétique des gouttes de pluie.

Il contribue efficacement au stockage des précipitations grâce aux mini-retenues formées par les fils de chaîne le long du profil. On estime à environ 0,45 l d'eau retenue par m² pour une pente de 1/2. La toile elle-même peut retenir environ 5 fois son poids d'eau. Ce stockage interne est considérable par rapport à celui d'une nappe synthétique. La toile retient donc près de 3 l d'eau de ruissellement par m².

La toile de jute réduit le transport des matériaux détachés. Elle constitue des mini-terrasses qui freinent l'écoulement et réduisent le taux d'érosion.

L'humidité stockée est lentement libérée, ce qui est fortement bénéfique pour la germination des semences et la croissance des plants.

Le filet a une incidence modératrice sur la température au sol. Sa structure maillée ouverte laisse aux plantes une liberté et une lumière suffisantes pour leur germination et leur croissance.

Le filet protège les graines contre les déprédations animales (oiseaux) et contre leur entraînement par l'eau.

Essais comparatifs sur talus sableux

Description

Les essais mis en place en 1992 concernent deux talus, face à face, le long d'une route. Après la pose de la toile, le semis est réalisé à l'hydroseedeur. Les talus sont exposés l'un au nord, l'autre au sud. La pente moyenne est de 80 % pour une longueur variant de 3 à 12 m. Le versant exposé au sud est divisé en 5 parcelles (un témoin et quatre tests), celui qui est exposé au nord en quatre parcelles (pas de témoin). Certaines des parcelles sont divisées en deux.

Description des parcelles du dispositif mis en place sur les talus

Parcelles							
1	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5
témoin semis	filet "oiseau" semis sans colloïde bitume 30%	filet "oiseau" semis	toile de jute terreau colloïde semis	terreau colloïde toile de jute semis	toile de jute semis sans colloïde bitume 30 %	toile de jute semis	toile de jute semis bitume 30%

Résultats

La parcelle témoin

La surface est rapidement ravinée. Les quelques plants qui se développent le font à la faveur de micro-reliefs plus abrités et plus humides.

L'utilisation du filet "oiseau"

Ce fin filet plastique, avec ou sans bitume, ne présente pas une grande efficacité ; à la suite aux violents orages les parcelles sont fortement érodées.

La toile de jute et le terreau

L'efficacité de protection de la toile de jute contre l'érosion superficielle du sol est significative, que le terreau soit mis sur ou sous la toile.

Les différences de recouvrement sont dues à l'opposition de versant : 25 % en première année en exposition sud et 50 % en exposition nord. Le développement plus rapide de la végétation en exposition nord bloque le terreau sur le versant, alors qu'en exposition sud on note un glissement du terreau sur les deux parcelles 3a et 3b. Un an après la mise en place de l'essai, le recouvrement par la végétation est de 40 à 45 % en exposition sud et de 50 à 60 % pour la parcelle 3a et de 60 à 70 % pour la parcelle 3b en exposition nord.

La toile de jute et le bitume

La toile protège le sol, aucune rigole ne s'est formée. La germination des plants est excellente, la végétation est ensuite moins dense que sur les parcelles avec terreau. Un an après la mise en place de l'essai, on constate un recouvrement de 20 à 25 % en versant sud et de plus de 50 % en versant nord pour la partie haute des parcelles (les parcelles 5 ayant une longueur de pente importante de plus de 12 m).

La toile de jute assure une bonne protection du sol, l'emploi supplémentaire de bitume ou de terreau n'améliore pas le rôle de protection du procédé. La toile s'imprègne petit à petit dans le sol et constitue une trame qui assure la cohésion des premiers centimètres du sol.

Concernant la fixation et le développement de la végétation, les résultats sont plus efficaces avec l'emploi du terreau.

À la suite de ces essais, un procédé nommé *VERTOILE* a été mis au point associant l'utilisation de la toile de jute, produit dégradable qui disparaît au bout de trois à cinq ans, et une technique de végétalisation adaptée.

La toile de jute est actuellement très utilisée plus particulièrement sur talus à fort développement de pente. En effet, si l'on considère que la végétalisation des pistes de ski ne pose actuellement plus de véritables problèmes, il n'en est pas de même pour les talus en bord de pistes ou le long des voies d'accès aux stations. Les talus aval surtout sont très difficiles à coloniser et à intégrer dans l'environnement.

Exemples d'utilisation

La tourne paravalanche Barral à Saint-Colomban-des-Villards

Après un épierrage fin de la surface, le filet de jute a été mis sur la tourne. L'engazonnement manuel a été réalisé juste après la pose.

Un mois après le semis, la levée des graines était parfaitement homogène.

Un an après la pose, le recouvrement par la végétation avoisinait 100 % avec des plantes fortement enracinées dont les parties aériennes mesuraient plus de 50 cm.

Toirne paravalanche



Toile de jute en cours de pose



Végétation installée après le semis

Talus en altitude



Pose de la toile



Végétation un an après

Les talus de la piste de ski des Chamois (Chamonix - Les Grands Montets)

La végétalisation par semis d'herbacées était la seule technique de réhabilitation des pistes de ski pour les talus bordant les pistes ou les divers itinéraires d'accès aux stations. Cette technique a ses limites.

Sur cet exemple, on voit que la pente est forte et que les semis auront beaucoup de mal à s'installer. Il a donc été décidé de faire précéder le semis par la pose de toile de jute.

Pour mesurer l'efficacité de la toile, nous avons procédé à des mesures comparatives de biomasse aérienne et souterraine sous toile et hors toile.

On a donc mesuré 6 fois plus de biomasse souterraine et 3,5 fois plus de biomasse aérienne pour la végétation semée sur toile de jute par rapport à celle qui a été semée sans protection préalable du substrat.

L'ENTRETIEN DES SURFACES VÉGÉTALISÉES

Quelques mois, voire quelques années, après la réalisation du semis, il est encore difficile de se prononcer quant à sa réussite. En effet, un orage violent peut toujours compromettre la couverture végétale, une période de sécheresse, des problèmes de carences nutritives peuvent conduire à un échec.

Au titre de l'entretien, plusieurs actions peuvent donc s'envisager :

- La surveillance et l'entretien des rigoles de drainage la première année après le semis permettent de vérifier que les revers d'eau ne sont pas bouchés soit par de la paille, soit par des effondrements de rives, car il faut que ces ouvrages jouent pleinement leur rôle pour l'évacuation des eaux de ruissellement. Au bout de quelques années, la végétation installée absorbera une partie des précipitations et les rigoles pourront être comblées.
- Parfois un épierrage complémentaire est à organiser car les premières années, par l'alternance gel-dégel, le sol se tasse et des cailloux apparaissent. Cet épierrage est nécessaire pour libérer le maximum d'espaces susceptibles d'être colonisés par les plantes.
- Une deuxième opération de semis au printemps suivant la première intervention est maintenant souvent prévue dans le cadre des engazonnements réalisés en deux passages. Il faut en effet veiller à ce que la couverture ne soit pas trop clairsemée, car les zones de pelade trop importantes peuvent être à l'origine d'une reprise d'érosion.
- L'apport d'engrais dans les opérations n'ayant pas mis en œuvre l'utilisation de terre végétale ou d'amendement organique pendant trois, voire cinq ans après le semis, est indispensable. Cette fumure d'entretien permet le maintien de la couverture végétale et son amélioration.
- Lorsque l'on est assuré de la parfaite installation de cette nouvelle prairie, il faut la faucher ou la faire pâturer.

Rappelons que, dans le cas des pistes de ski, il faut que cette couverture végétale permette une bonne préparation de la neige, le mieux possible et le plus tôt dans la saison. Il faut donc en fin d'automne avoir un tapis végétal dense, court et dru pour piéger les premières neiges et faciliter le travail des engins de damage. On peut donc envisager avant les premières chutes de neige un fauchage tardif si l'on n'a pas choisi la solution de l'ouverture au pâturage.



Piste pâturée

Si l'on envisage de faucher en laissant les déchets sur place, on favorise la reconstitution de l'humus, de plus les graines mûres tombées à terre peuvent germer et coloniser les places vides.

Si l'on envisage le pâturage, il faut attendre que le tapis soit solidement enraciné (minimum trois années) avant d'amener le bétail et de veiller à une bonne répartition de la charge pour éviter que des processus d'érosion ne se déclenchent.

Il faudra aussi tenir compte des conditions d'application de la garantie de reprise par l'entreprise ayant réalisé le semis avant de faire pâturer les espaces végétalisés.

Voilà toutes les informations nécessaires à la mise en place d'une couverture végétale efficace et pérenne, elle va s'opposer aux phénomènes d'érosion et favoriser progressivement l'intégration paysagère et écologique des aménagements réalisés dans des milieux à fortes contraintes.

Un exemple concret de réalisation d'un chantier de végétalisation va permettre de replacer dans la logique d'intervention, l'ensemble des recommandations et donner les éléments de rédaction des documents nécessaires à la consultation des entreprises et au suivi efficace de réalisation des travaux.

CHAPITRE VIII

Un exemple de réhabilitation de piste de ski



En 1994, des travaux importants de remise en état des pistes partiellement détruites en 1993 par un glissement de terrain ont été engagés sur le domaine skiable de Vaujany dans le département de l'Isère. Sur ce cas particulier, nous avons mis en application le savoir-faire acquis en matière de réhabilitation de zones perturbées.

On a repéré les caractéristiques principales du secteur et ses contraintes avant de procéder à l'analyse du couvert végétal et à l'estimation des surfaces à réhabiliter:

Nous avons ainsi recherché les informations géologiques dans la mesure où elles pouvaient orienter le choix des techniques ou du matériel végétal, le domaine skiable étant essentiellement sur roche acide (granit, gneiss) et éboulis.

Ensuite le couvert végétal existant a été analysé de façon précise pour rédiger un cahier des clauses techniques particulières de végétalisation (CCTP), adapté aux conditions du milieu.

Lorsque le cahier des charges sera présenté, nous insisterons par certaines recommandations sur les informations qui sont essentielles.

LA PRÉPARATION DU SOL

Lutte contre le ruissellement superficiel

L'eau est omniprésente sur l'ensemble du site et, du fait de la géologie, elle s'écoule en superficie essentiellement sur l'ensemble du domaine avec des points de concentration importante qui peuvent être à l'origine de fortes instabilités pour les secteurs qui ont été remaniés.

Les travaux préalables à l'opération de végétalisation ont donc été essentiellement liés à la maîtrise du ruissellement superficiel :

- * construction de masques drainants,
- * construction de revers d'eau (cunettes) enrochés et bétonnés selon les cas au bord et en travers des pistes,
- * construction de radiers bétonnés.
- * pose d'un linéaire important de buses enterrées.



Masque drainant sur talus de piste

La réutilisation de la terre végétale

Bien que présente en faible quantité, la terre végétale a été réutilisée sur tous les secteurs où elle avait pu être récupérée.

ESTIMATION DES SURFACES DE PISTES

Trois grands secteurs étaient concernés par des travaux :

- La piste de l'Edelweiss allant de 1670 à 1970 m d'altitude, dont la largeur varie de 8 à 60 m avec une pente maximum à 50 %.
- La piste de la Vaujaniate faisant suite à la précédente allant de 1400 à 1670 m d'altitude, sa largeur varie de 10 à 70 m et sa pente de 30 à 50 %.
- Le stade de slalom.
- Les abords de l'unité de fabrication de neige de culture.

L'ensemble des surfaces à réhabiliter était estimé à 13 ha en début d'été, en fin de chantier; à l'automne il y avait en réalité plus de 18 ha à réhabiliter.

LA VÉGÉTATION SPONTANÉE



La végétation spontanée du domaine skiable

1970 m *Alchemilla alpina*, *Veratrum album*, *Vaccinium myrtillus*, *Rhododendron ferrugineum*, *Lotus corniculatus*, *Trifolium alpinum*, *Luzula campestris*, *Poa alpina*, *Campanula* sp., *Trillium europaeus*, *Dryopteris filix-mas*, *Sempervivum arachnoideum*, *Nigritella nigra*, *Phyteuma orbiculare*, *Paridisia liliastrum*, *Geum montanum*, *Rhinantus minor*, *Taunseeteneera glabrosa*, *Gallium mollugo*, *Epilobium angustifolium*, *Alchemilla vulgaris*, *Achillea millefolium*, *Ranunculus aconitifolius*, *Ainus virdis*, *Hieracium* sp., *Festuca spadicea*, *Anthaxanthum odoratum*, *Deschampsia flexuosa*.

1920 m *Silene vulgaris*, *Viola tricolor*, *Trifolium pratense*, *Phyteuma nigrum*, *Centaurea montana*, *Sempervivum montanum*, *Thymus serpyllum*, *Cerastium montanum*, *Hypericum maculatum*, *Ranunculus acris*, *Geranium pratense*, *Allium victorialis*, *Antennaria dioica*, *Linum catharticum*, *Potentilla* sp., *Carex* sp., *Juniperus nana*.

1920 m	<i>Veronica chamaedrys, Ajuga pyramidalis, Phleum pratense, Festuca ovina, Agrostis capillaris, Briza media, Arnica montana, Trifolium repens, Tussilago farfara, Leucanthemum vulgare, Picea abies.</i>
Gare des Vallonnets	<i>Veratrum album, Rumex alpinus, Trifolium badium, Silene dioica, Petasites albus, Phalaris arundinacea, Plantago major, Carex officinale, Lathyrus pratensis, Lilium bulbiferum, Anthyllis vulneraria.</i>
Zone humide	<i>Carex michelii, Eriophorum sp., Geum rivale, Orchis maculata, Ranunculus acronitifolius, Trollius europeus.</i>
Piste du slalom	<i>Silene nutans, Rumex acetosa, Platanthera bifolia, Dactylorhiza fuschii, Gymnadenia conopsea, Geranium pratense, Carduus sp., Capsella sp., Lilium martagon, Gentiana campestris.</i>
Au bas de la Vaujaniate	<i>Gentiana lutea, Matricaria inodora.</i>

On a étudié le couvert végétal en place et on a ainsi pu constater que la végétation était riche et qu'elle pourrait développer une dynamique naturelle forte de reconquête des espaces aménagés, dès lors que l'on aura réussi à stabiliser les sols.

Au fur et à mesure de notre progression sur les pistes (du point le plus haut au point le plus bas), on a noté toutes les espèces rencontrées.

Nous avons constaté sur ce domaine skiable la présence d'espèces particulièrement intéressantes puisqu'elles peuvent développer une aptitude à la recolonisation forte. Il s'agit des espèces suivantes :

<i>Alchemilla alpina</i>	<i>Epilobium angustifolium</i>	<i>Antennaria dioica</i>
<i>Lotus comiculatus</i>	<i>Alchemilla vulgaris</i>	<i>Festuca ovina</i>
<i>Trifolium alpinum</i>	<i>Deschampsia flexuosa</i>	<i>Trifolium repens</i>
<i>Luzula campestris</i>	<i>Trifolium pratense</i>	<i>Trifolium badium</i>
<i>Poa alpina</i>	<i>Centaurea montana</i>	<i>Plantago major</i>
<i>Campanula sp.</i>	<i>Thymus serpyllum</i>	

LE CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES

Les informations recueillies sur le milieu physique et biotique ont permis de rédiger le cahier des clauses techniques particulières pour la consultation des entreprises.

PREMIÈRE PARTIE : DESCRIPTION DES TRAVAUX

Objet du marché - Localisation des ouvrages

Il convient de préciser le lieu et le type de prestation souhaité ; préciser s'il s'agit de déblais, de remblais, si le semis doit être hydraulique ou autre.

Dans le cas des pistes de ski, fournir un plan précis des pistes concernées.

Les travaux à exécuter au titre du présent marché concernent :

– la végétalisation par semis hydraulique de pistes de ski, d'un stade de slalom, des abords de la retenue d'eau à proximité de l'installation d'enneigement artificiel et de différents talus bordant l'ensemble de ces ouvrages.

Le marché est donc composé d'un seul lot : piste de l'Edelweiss, piste de la Vaujaniate, stade de slalom, abords de la retenue d'eau.

Description des terrains à végétaliser - Dispositions générales

Préciser :

- la qualité du substrat en place,
- la déclivité,
- la longueur de la piste,
- l'exposition générale,
- la présence ou non de terre végétale,
- la localisation des points d'eau : les informations concernant les points d'eau près des pistes sont importantes car si la distance d'approvisionnement est importante le coût de l'intervention sera différent.

La base géologique du secteur concerné par les travaux est essentiellement composée de roches acides (granite, gneiss, lephynite), avec quelques rares poches de roches carbonatées et glaciaires.

Le secteur a été entièrement terrassé et reprofilé, il est constitué de matériaux grossiers avec peu de terre végétale.

Il y a sur le site de nombreuses possibilités d'approvisionnement en eau.

– **La piste de l'Edelweiss** est située entre 1670 m et 1970 m, la pente varie de 0 à 50 % avec une majorité de zones allant de 25 à 35 %.

Cette piste a une largeur moyenne de 25 m, les largeurs extrêmes étant de 8 et de 57 m, sa longueur

étant d'environ 1550 m. Il convient aussi de signaler que cette piste est bordée par endroits de talus à forte pente. La surface à végétaliser est d'environ 4,2 ha.

– **La piste de la Vaujaniate** qui lui succède s'étend de 1400 m à 1670 m.

Elle présente une largeur moyenne de 25 m, les valeurs extrêmes étant 10 et 70 m.

Sa longueur est d'environ 2050 m, avec une fin d'itinéraire de plus de 800 m de long sur 10 m de large relativement plate.

La pente de cette piste varie de 0 à 50 %, avec une forte majorité de secteur à 30 %. La surface à végétaliser est d'environ 4,3 ha.

– **Le stade de slalom** débute à 1940 m, il a une longueur d'environ 900 m pour une largeur d'environ 25 m avec des passages à 50 et à 70 m de large.

La pente varie de 30 à 55 %, avec un talus au fond de la plate-forme de départ de 120 %.

Il faut noter que ce secteur est particulièrement minéral et qu'il conviendra d'en tenir compte dans la proposition. La surface à végétaliser est d'environ 3 ha.

– **Les abords de la retenue d'eau** concernent environ 2 ha de superficie à revégétaliser, ne présentant pas de difficultés particulières.

L'ensemble représente environ 13,5 ha de surfaces à réhabiliter.

Le domaine concerné s'étend entre 1250 m et environ 2000 m. Nous avons établi les bases d'un mélange unique comportant la gamme des espèces adaptées aux différentes situations altitudinales.

Nature des travaux

Au besoin préciser les travaux exclus du marché :

- l'étude préalable du milieu physique et du milieu biotique,
- le contrôle des fournitures,
- l'expertise des résultats.

Les travaux à exécuter par l'entreprise au titre du présent marché sont les suivants :

- fourniture des semences, fertilisants, fixateurs, etc.,
- semis par projection hydraulique,
- fourniture des pièces justificatives de la bonne exécution des travaux (étiquettes SOC, enveloppe des sacs d'engrais et des différents produits utilisés),

- exécution du semis en deux passages,
- interventions complémentaires (semis, fertilisation) pendant le délai de garantie.

DEUXIÈME PARTIE : SPÉCIFICATION DES TRAVAUX

Généralités

Tous les matériaux entrant dans les opérations de végétalisation (semences, fertilisants, fixateurs) sont fournis par l'entreprise.

Fournitures

Les semences

Si l'entretien des pistes végétalisées passe par leur ouverture au pâturage, il convient de le préciser, le mélange sera alors constitué avec une base importante de variétés fourragères.

* Dose de semis

La dose globale à l'hectare ne devrait pas dépasser 250 kg (150 kg/ha au premier passage, 100 kg/ha au deuxième).

* Formulation des mélanges d'herbacées

Pour chaque espèce du mélange, le cultivar ou la provenance géographique (culture ou récolte), s'il s'agit d'une espèce sauvage, devra être mentionné.

Selon la qualité écologique des sites à réhabiliter, on peut proposer :

- un mélange composé en totalité de cultivars,
- un mélange composé de cultivars et d'espèces sauvages.

Il convient alors d'exiger l'utilisation d'espèces sauvages cultivées ou récoltées dans des zones à mêmes caractéristiques écologiques que le site à réhabiliter.

Pour les espèces à sélection variétale, l'entreprise devrait retenir dans son offre l'un ou l'autre des cultivars proposés.

Espèces	Cultivar	Pourcentage
Fétuque rouge traçante	Pemille Ensylva Cindy	25 %
Fétuque rouge gazonnante	Cibel Enjoy Koket	25 %
Fléole des prés	Erecta Climax	15 %
Trèfle blanc nain	Huia	10 %
Lotier comiculé		10 %
Agrostide tenue	Highland Bardot	8 %

Espèces sauvages		Pourcentage
Anthyllis vulnéraire		5 %
Achillée millefeuille		2%

Les engrais

La fertilisation simultanément à l'opération de végétalisation sera réalisée à partir d'engrais organiques et minéraux.

* **Pour la fertilisation minérale**, l'engrais ternaire employé par l'entreprise sera de type 4.20.20 pour les interventions automnales, de type 15.15.15 pour les interventions printanières.

L'azote sera majoritairement sous forme ammoniacale. Au moins 80 % de l'anhydride phosphorique sera soluble dans l'eau. L'oxyde de potassium sera intégralement soluble dans l'eau.

* **L'amendement organique** sera d'origine végétale et sa composition devra respecter globalement les règles suivantes :

- * teneur en matières organiques égale ou supérieure à 50 %,
- * taux d'humidité inférieur à 20 %,
- * azote organique compris entre 4 et 6 %,
- * présence d'oligo-éléments : Fe, Cu, Zn, Mn, B, Mo...
- * pH proche de la neutralité (de 6,5 à 7),
- * anhydride phosphorique voisin de 5 %,
- * oxyde de potassium voisin de 5 %.

L'entreprise peut proposer d'autres produits à ajouter ou pour remplacer ceux qui ont été prévus par le maître d'œuvre, à condition qu'elle puisse fournir les documents techniques et les références permettant de justifier de leur intérêt.

Si des apports de fertilisants (amendements et/ou engrais) sont nécessaires au moment des semis complémentaires à faire en application de la garantie, ils seront à la charge de l'entreprise. Leur formulation et leur dosage seront normalement identiques aux spécifications du CCTP.

Le semis étant prévu en deux passages, on conseillera par exemple :

À l'automne :

- une fertilisation minérale : 4.20.20 à 200 kg/ha
- un amendement organique à 1000 kg/ha.

Au printemps :

- une fertilisation minérale : 15.15.15 à 200 kg/ha
- un amendement organique à 500 kg/ha.

Les fixateurs

Si l'entreprise utilise habituellement de la cellulose, il faut que ce soit de la cellulose à fibres longues (pâte mécanique vierge). Les celluloses provenant de déchets de papeteries sont prohibées.

L'entreprise peut proposer d'autres produits (colloïdes à base d'alginate...), il faudra qu'elle fournisse les pièces et références justificatives de leur intérêt. Leur emploi devra recevoir l'agrément du maître d'œuvre avant l'application.

Autre protection

Si l'entreprise juge utile l'emploi du paillage avec ou sans bitume, elle peut l'inclure dans sa proposition.

L'eau

L'eau pour la constitution du mélange hydraulique sera une eau douce aux caractéristiques chimiques compatibles avec le développement des graines.

TROISIÈME PARTIE : EXÉCUTION DES TRAVAUX

Généralités

Il est actuellement très courant de demander l'exécution des travaux en deux passages.

La végétalisation des surfaces terrassées devra être réalisée entre le 29 août et le 23 septembre. Il faudra cependant tenir compte des conditions climatiques, la végétalisation sera effectuée en deux passages.

Les travaux

Le métré des ouvrages à réaliser

La superficie des terrains à végétaliser est estimée à 13,5 ha. Il n'y a pas de documents cartographiques disponibles sur cet aménagement.

Cette estimation pourra faire l'objet, notamment à l'occasion de la visite de chantier, d'un métré contradictoire, avant que l'entreprise ne formule son offre.

Le semis

Calendrier des interventions

Si on est assuré de la finition des travaux de terrassement et de préparation du substrat suffisamment tôt au printemps, on peut imposer que le premier semis soit réalisé à la fin du printemps (avant la fin juin) et de toute façon en dehors de la période de sécheresse estivale.

On préférera dans l'essentiel des cas recommander un semis d'automne en premier passage. En altitude, il sera organisé dès le 15 août et ne devrait pas dépasser le 15 septembre.

Pour un semis tardif (après le 15 octobre) prendre les dispositions nécessaires pour que les graines ne germent pas et qu'elles ne soient pas entraînées par le ruissellement à la fonte des neiges (insister sur les fixateurs).

Les travaux seront réalisés impérativement en présence du maître d'œuvre ou de son représentant.

Le semis sera réalisé en deux passages. Une garantie sera demandée, elle sera de deux ans après le second passage. Entre le premier et le deuxième passage, une visite contradictoire aura lieu entre l'entreprise et le maître d'œuvre. Deux ans après le second passage, une visite correspondant à une réception définitive sera organisée de la même façon. Pour chaque passage, l'entreprise sera tenue d'intervenir au plus tard deux semaines après la sollicitation écrite du maître d'œuvre, sous réserve de conditions météorologiques favorables. Dans le cas où l'entreprise interviendrait en dehors des périodes préconisées pour la zone, elle engage systématiquement sa responsabilité en cas d'échec de la colonisation végétale sauf si elle répond à la demande du maître

d'œuvre. Dans ce second cas, la clause d'intervention devra être mentionnée dans l'ordre de service.

Mode d'exécution

L'entreprise doit prendre toutes les disponibilités nécessaires à la bonne exécution des travaux, quelle que soit la difficulté du terrain (déclivité, utilisation de rallonge, disponibilité ou non de

points d'eau à proximité...). Dans le cas de très forte pente, le semis sera privilégié par le sommet de la piste. En outre, les travaux ne pourront être réalisés en cas de fortes intempéries (précipitations, vents).

Contrôle des fournitures et de l'exécution des travaux

Les travaux seront réalisés sous contrôle du maître d'œuvre ou d'un représentant habilité.

Le chantier étant d'importance, un local sera mis à la disposition de l'entreprise pour stocker les fournitures (semences, fertilisants, fixateurs) ; ce qui facilitera aussi le contrôle *a priori*. Le contrôle des fournitures et des travaux se fera au démarrage et à la fin de chaque phase de chantier.

L'entreprise collectera l'ensemble des pièces justificatives (étiquettes certificatives du SOC, sacs d'engrais, d'amendements, étiquettes des fixateurs...), à remettre au maître d'œuvre.

En cas de non conformité, les fournitures seront refusées, et devront être évacuées sous 48 heures. Les travaux seront suspendus en l'attente de fournitures conformes. L'entreprise ne pourra prétendre à aucune indemnité.

* Les semences

Avant le début des travaux, l'entreprise devra fournir, à la demande du maître d'œuvre, les doubles des bons de livraison des semences. Les mélanges seront conditionnés en sacs portant, à l'extérieur et à l'intérieur, les étiquettes du Service officiel de contrôle (SOC) du ministère de l'Agriculture. Les sacs de semences seront ouverts sur le chantier, au moment de l'application.

Le contrôle des fournitures portera sur :

- la conformité entre le mélange utilisé pour les travaux et celui spécifié qui est dans le marché ;
- les quantités de semences épanchées par l'entreprise, en liaison avec la dose normalement prévue et la superficie des zones à végétaliser.

Outre les références du lot et du certificat, chaque étiquette extérieure devra porter les informations suivantes : le poids du sac, le mois d'ensachage, la formulation du mélange, avec mention des cultivars utilisés pour les espèces à sélection variétale et l'origine de culture ou de récolte des espèces sauvages.

L'entreprise devra fournir au maître d'œuvre un certificat (étiquette SOC externe) par sac.

En outre, le maître d'œuvre pourra procéder inopinément à des prélèvements d'échantillon, destinés à une vérification des facultés germinatives des semences.

* Les engrais et amendements

Les engrais et amendements seront livrés en sacs fermés sur lesquels devra figurer la composition chimique.

L'entreprise devra remettre les sacs vides au fur et à mesure de l'avancement du chantier, ainsi que les bons de livraison en fin de travaux.

Le contrôle des fournitures portera sur les caractéristiques des fertilisants et leurs doses d'application à l'hectare.

* Les fixateurs

Le contrôle portera sur les caractéristiques et les doses du produit fixateur. À la demande du maître d'œuvre les bons de livraison devront être fournis par l'entreprise.

* Les travaux

Le contrôle des travaux aura trait aux modalités d'exécution mentionnées précédemment. Le maître d'œuvre se réserve le droit d'interrompre les travaux, s'il juge que les clauses du marché ne sont pas respectées ou si les conditions d'application, notamment climatiques, ne sont pas optimales. L'entreprise ne pourra alors prétendre à aucune indemnité.

QUATRIÈME PARTIE : GARANTIE DES RÉSULTATS

Généralités

Les modalités de la garantie s'appuient à la fois sur la vérification, au cours du chantier, du respect par l'entreprise des spécifications du CCTP (fournitures, exécution des travaux) et sur des objectifs de recouvrement définis à la suite de l'étude préalable ou au cours de la première visite sur le terrain entre l'entreprise et le maître d'œuvre.

L'entreprise ayant répondu à l'offre et ayant accepté les termes du marché (spécifications des fournitures, agrément des additifs ou substitutifs aux fournitures spécifiées dans le C.C.T.P; calendrier d'intervention, modalités d'exécution des travaux, modalités et durée de la garantie), peut être tenue, à la demande du maître d'œuvre, d'intervenir à nouveau au titre de la garantie au cas où la colonisation végétale ne serait pas conforme aux termes de la garantie.

Les reprises de surfaces pendant la durée du chantier

Pendant l'exécution des travaux de végétalisation, les reprises de surfaces consécutives à des terrassements nouveaux ne sont pas à la charge de l'entreprise. Par contre, l'entreprise est tenue d'intervenir, pendant la durée du chantier, sur les surfaces récemment semées, sur lesquelles la couverture végétale est insuffisante. Cette obligation s'impose, sauf cas de force majeure, quelles que soient les causes de cette insuffisance.

Les modalités des différentes interventions (inventaire des surfaces endommagées, dosage des fournitures à utiliser) seront définies par le maître d'œuvre, à la suite d'une visite de chantier effectuée avec l'entreprise.

La clause du marché relative aux reprises de surfaces pendant la durée du chantier devient caduque avec l'achèvement du chantier.

La garantie des résultats

Durée de la garantie

Elle est fixée à deux ans après la réception clôturant l'intervention. Pendant ce délai, l'entreprise s'engage à réaliser, en cas d'échec, des semis et des fertilisations complémentaires jusqu'à la réussite de la végétalisation.

En contrepartie seront exclues de la garantie les conséquences de remarques non prises en compte par le maître d'œuvre dans le certificat de visite préalable aux travaux, ainsi que les interventions non prévues lors du marché (travaux de terrassement...).

Modalités de la garantie

Deux expertises annuelles (un an après les travaux, puis au terme de la garantie) seront réalisées sous la responsabilité du maître d'œuvre.

C'est dans l'étude préalable du site que devraient être définis les objectifs de couverture végétale, de la fin de la première et de la seconde année de garantie.

S'il n'y a pas d'étude préalable, c'est au cours de la première visite du site que les pourcentages de couverture végétale seront établis.

À la suite de l'une ou de l'autre des expertises annuelles, l'entreprise devra, à la demande du maître d'œuvre, réaliser des semis et des fertilisations complémentaires si la couverture végétale est inférieure d'au moins 20 % par rapport à l'objectif initialement fixé.

LA RÉALISATION DU CHANTIER

Le semis a eu lieu à l'automne, les produits utilisés ont été conformes aux propositions du marché.

Les semences

Le mélange a été réalisé par la société Phytosem de Gap, lot numéro F0296E330103, numéro de conditionnement 01758, fermeture du sac 09/94, certificat de l'organisme de contrôle le SOC numéro 813809 lot numéro 0296 F0296

La première phase de semis devant se dérouler en dehors de la période optimale, le mélange a été modifié en ajoutant 5 % de ray-grass.

Cette espèce à installation rapide pourra, si les conditions climatiques le permettent, créer un début de couverture du sol avant l'hiver; elle jouera aussi un rôle de plante abri pour les autres espèces plus longues à s'installer. L'*Anthyllis vulneraria*, issue de productions locales, a été livrée en sac séparé et ajoutée au mélange dans la cuve au moment du semis.

25 %	Féтуque rouge traçante	Pemille
25 %	Féтуque rouge gazonnante	Enjoy
15 %	Fléole des prés	Erecta
10 %	Trèfle blanc	Grasslands Huia
10 %	Lotier comiculé	Leo
8 %	Agrostide	Highland
5 %	Ray-grass anglais	Juventus
2 %	<i>Achillea millefolium</i>	
5 %	<i>Anthyllis vulneraria</i>	

Les fertilisants et amendements

L'engrais utilisé pour le semis d'automne a été un engrais NPK 4-20-20 : 4 % d'azote ammoniacal, 20 % d'anhydride phosphorique (P_2O_5), 20 % d'oxyde de potassium (K_2O). La dose utilisée pour ce premier passage a été de 200 Kg/ha.

L'amendement employé à raison d'une tonne par hectare au premier passage est duVERTPISTES. Sa composition est la suivante :

* Matière organique	55 %
* N organique	6 %
* P_2O_5	5 %
+ oligoéléments	

Le fixateur utilisé a été leVERTCOL à raison de 10 kg/ha au premier passage. C'est un produit dérivé d'algues brunes, caractérisé par une très faible teneur en calcium, en tant que fixateur il remplace la cellulose.

LE SUIVI DU CHANTIER

Au printemps 1995, une visite contradictoire a eu lieu entre l'entreprise et le maître d'œuvre, pour définir les conditions de la deuxième intervention (produits, doses, date d'intervention...).

La stabilité du substrat

Au cours des premières visites du site en juillet 1995, on a constaté que le déneigement était relativement tardif. Le deuxième passage à effectuer en 1995 avec engrais et semences essentiellement ne pouvait être programmé que pour l'automne.

Il convenait de laisser s'implanter le semis réalisé tardivement en 1994 avant d'intervenir.

Au cours de ces visites, on a par ailleurs constaté que :

- l'ensemble des pistes, la reprise de la végétation était bonne, mais qu'en de nombreux points il était indispensable que le service des pistes réalise un épierrage des zones reverdiées,
- l'ensemble des revers d'eau avait bien fonctionné,
- les masques drainants mis en place avaient bien joué leur rôle, le talus à forte pente semblait stabilisé, aucune venue d'eau n'était à signaler dans ce versant.

Le couvert végétal

Pendant l'été 1995, on a donc réalisé un certain nombre de relevés de végétation pour estimer le taux de recouvrement et la qualité de l'implantation du mélange choisi.

On a étudié 36 zones homogènes du point de vue écologique et, dans chaque zone, on a effectué 7 relevés de végétation, chaque relevé étant un comptage de toutes les espèces présentes dans une placette carrée de 20 cm de côté. Chaque zone a été caractérisée par son altitude, sa pente, son exposition et sa granulométrie.

On a procédé à des relevés de végétation en bordure du domaine aménagé afin de caractériser la biodiversité naturelle du site et d'avoir ainsi une idée précise de la dynamique de retour des

Près de la piste de la Vaujaniate	Près de la gare du télésiège	Piste du slalom
<i>Artemisia vulgaris</i> <i>Convolvulus arvensis</i> <i>Echium vulgare</i> <i>Gentiana lutea</i> <i>Geranium sylvaticum</i> <i>Heracleum</i> sp. <i>Matricaria inodora</i> <i>Medicago lupulina</i> <i>Myosotis arvensis</i> <i>Papaver rhoeas</i> <i>Phleum alpinum</i> <i>Phyteuma orbiculare</i> <i>Poa trivialis</i> <i>Polygonum aviculare</i> <i>Verbascum</i> sp.	<i>Anthyllis vulneraria</i> <i>Carex</i> sp. <i>Lathyrus pratensis</i> <i>Lilium bulbiflorum</i> <i>Petasites albus</i> <i>Phalaris arundinacea</i> <i>Plantago major</i> <i>Rumex alpinus</i> <i>Silene dioica</i> <i>Trifolium badium</i> <i>Veratrum album</i> Zone humide : <i>Carex michelii</i> <i>Eriophorum</i> sp. <i>Geum rivale</i> <i>Orchis maculata</i> <i>Ranunculus aconitifolius</i> <i>Trollius europeus</i>	<i>Bromus hordeaceus</i> <i>Capsella</i> sp. <i>Carduus</i> sp. <i>Doctylorhiza fuschii</i> <i>Galium lucidum</i> <i>Gentiana campestris</i> <i>Geranium pratense</i> <i>Gymnadenia conopsea</i> <i>Juncus articulatus</i> <i>Lilium martagon</i> <i>Platanthera bifolia</i> <i>Ranunculus bulbosus</i> <i>Rumex acetosa</i> <i>Silene nutans</i> <i>Valeriana officinalis</i>
1900 m : <i>Agrostis capillans</i> <i>Ajuga pyramidalis</i> <i>Allium schoenoprasum</i> <i>Arnica montana</i> <i>Festuca ovina</i> <i>Lepidium densiflorum</i> <i>Leucanthemum vulgare</i> <i>Phacelia tanacetifolia</i> <i>Phleum pratense</i> <i>Picea abies</i> <i>Potentilla grandifolia</i> <i>Sempervivum montanum</i> <i>Trifolium repens</i> <i>Tussilago farfara</i> <i>Veronica chamaedrys</i> 1920 m : <i>Allium victorialis</i> <i>Antennaria dioica</i> <i>Carex</i> sp.	<i>Centaurea montana</i> <i>Geranium pratense</i> <i>Hypericum maculatum</i> <i>Juniperus nana</i> <i>Linum catharticum</i> <i>Phyteuma nigrum</i> <i>Potentilla</i> sp. <i>Sempervivum montanum</i> <i>Silene vulgaris</i> <i>Thymus serpyllum</i> <i>Trifolium pratense</i> <i>Viola tricolor</i> 1970 m : <i>Achillea millefolium</i> <i>Alchemilla alpina</i> <i>Alchemilla vulgaris</i> <i>Alnus viridis</i> <i>Anthoxanthum odoratum</i> <i>Campanula</i> sp. <i>Deschampsia flexuosa</i>	<i>Dryopteris filix-mas</i> <i>Epilobium augustifolium</i> <i>Festuca spadicea</i> <i>Galium mollugo</i> <i>Geum montanum</i> <i>Hieracium</i> sp. <i>Lotus comiculatus</i> <i>Luzula campestris</i> <i>Nigella nigra</i> <i>Paradisio liliastrum</i> <i>Phyteuma orbiculare</i> <i>Poa alpina</i> <i>Ranunculus aconitifolius</i> <i>Rhinantus minor</i> <i>Rhododendron ferrugineum</i> <i>Sempervivum arachnoideum</i> <i>Traunsteinera globosa</i> <i>Trifolium alpinum</i> <i>Trifolium repens</i> <i>Trollius europaeus</i> <i>Veratrum album</i> <i>Verbascum</i> sp.

espèces natives dans la pelouse artificiellement constituée.

De la même façon, les espèces spontanées présentes sur les pistes aménagées et végétalisées artificiellement ont été relevées en tenant compte de la date de semis. En effet, certaines parties de la piste de la Vaujaniate, végétalisées en 1993, n'avaient pas été touchées par le glissement de terrain de l'automne. On a ainsi pu constater un bon comportement de ces engazonnements et une augmentation de la biodiversité sur les pistes en fonction de la date de semis.

Liste des espèces natives relevées sur les pistes végétalisées

Année 1 (1 an après semis)	<i>Matricaria inodora</i>
	<i>Poa alpina</i>
<i>Arnica montana</i>	<i>Poa trivialis</i>
<i>Alchemilla vulgaris</i>	<i>Polygonum aviculare</i>
<i>Campanula</i> sp.	<i>Potentilla grandiflora</i>
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	<i>Stellaria</i> sp.
<i>Galium lucidum</i>	<i>Trifolium badium</i>
<i>Hieracium</i> sp.	<i>Veronica chamaedrys</i>

Année 2 (*):	<i>Leucanthemum vulgare</i>
<i>Achillea millefolium</i>	<i>Lotus comiculatus</i>
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	<i>Myosotis arvensis</i>
<i>Alchemilla vulgaris</i>	<i>Phleum pratense</i>
<i>Anthyllis vulneraria</i>	<i>Plantago major</i>
<i>Campanula</i> sp.	<i>Ranunculus acris</i>
<i>Cerastium montanum</i>	<i>Rumex alpinus</i>
<i>Festuca rubra</i>	<i>Salvia pratensis</i>
<i>Galium lucidum</i>	<i>Trifolium badium</i>
<i>Galium mollugo</i>	<i>Trifolium repens</i>
<i>Geranium sylvaticum</i>	<i>Veratrum album</i>
<i>Hieracium</i> sp.	<i>Viola tricolor</i>

*(2 ans après semis réalisé par le service des pistes).

Pour le semis de 1994 : 14 espèces natives étaient présentes en juillet 1995, alors que pour le semis de 1993 : 23 espèces ont été recensées.

Ce retour progressif à la composition d'origine de la pelouse est bien évidemment fonction de la qualité des sols après travaux, de la richesse spécifique des abords du site aménagé, qui est, comme nous l'avions constaté l'an dernier, particulièrement intéressante.

Enfin, on a noté le comportement des espèces semées en 1994. Toutes les plantules observées présentent un enracinement relativement efficace et un appareil végétatif bien développé compte tenu de la période d'étude (juste après la fonte des neiges).

L'anthyllis, à quelques rares exceptions près, n'est pas très bien représentée parmi les plantules apparues.



Piste végétalisée 1 an après le semis

L'agrostide : on ne compte pas plus de quatre ou cinq individus par placette (il est même parfois absent), sa présence diminuant avec l'altitude. Son recouvrement est négligeable.

Le lotier, comme *l'agrostide*, ne participe pas au recouvrement des sols, mais il est néanmoins présent à toutes les altitudes.

Le trèfle apparaît surtout dans des zones bénéficiant d'un microclimat (proximité d'un torrent), mais il est toujours présent, sauf à plus de 1850 m.

Le ray-grass apparaît partout, même à haute altitude, et c'est l'une des rares plantes à supporter une «grosse» granulométrie. Son recouvrement est de 5 % en moyenne.

L'achillée se comporte bien, sauf à haute altitude. Son recouvrement va de 5 % à 10 %.



Piste végétalisée et pâturée 3 ans après le semis

Fétuque et *fléole* constituent à elles deux l'essentiel du recouvrement, avec une très légère prédominance de la *fléole*.

Le recouvrement de la *Fétuque* va de 40 à 50 %, celui de la *fléole* de 40 à 65 %.

De l'ensemble de nos constats, on a défini les surfaces sur lesquelles le deuxième passage était nécessaire :

** Sur la partie basse de la piste de la Vaujaniate, sur environ 1 ha, il n'était pas nécessaire d'intervenir à nouveau.

** Sur la partie intermédiaire de la piste de l'Edelweiss, sur 1 ha environ, seule la fertilisation et l'apport d'amendement sont nécessaires.

** Pour le reste du site traité en 1994, soit environ 15 ha, le deuxième passage devait être effectué comme prévu au marché.

Enfin, au printemps 1997, une visite contradictoire identique à la précédente définira les conditions éventuelles d'application de la garantie.

Conclusion

En 1997, trois années après la première campagne de végétalisation, les constats sur le comportement du couvert végétal sont bons, et l'ouverture au pâturage du domaine skiable a été décidée : 88 génisses sont arrivées sur le site au début de l'été et semblent apprécier les Anthyllis, Achillées et autres fléoles...

Il est cependant important de poursuivre les observations sur l'évolution de ces nouveaux pâturages pour élaborer les recommandations nécessaires à ce type de gestion du site : fertilisation d'entretien, apports d'amendements dans les secteurs à forte charge minérale, fauche des refus avant l'arrivée des premières neiges.



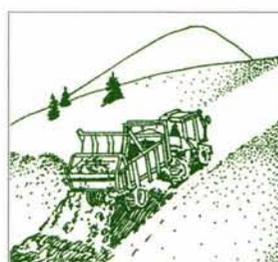
La gestion par le pâturage

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le contexte
environnemental



Les amendements



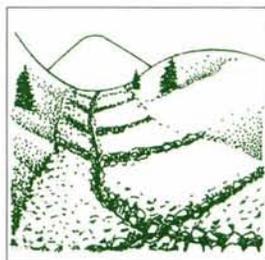
Les engins



Les semences



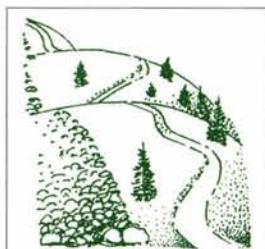
Le drainage



Les techniques



Les accès



La gestion



Cet ouvrage avait pour objectif de faire le bilan des recherches engagées par le Cemagref depuis près de vingt années pour la mise au point de techniques et de produits adaptés à la lutte contre l'érosion des sols et à l'intégration écologique et paysagère des aménagements touristiques en altitude.

Des premiers essais, mis en place en 1978 sur les pistes de ski, aux dernières thèses soutenues au groupement de Grenoble, les pratiques de terrain ont beaucoup évolué. Pour lutter contre l'érosion et réussir l'intégration de leurs aménagements, les responsables des services des pistes devaient disposer d'un certain nombre d'éléments, que nous avons essayé de fournir; tout au long de ces recherches.

Ce document avait pour but aussi de rassembler et de mettre l'accent sur les recherches originales que nous avons engagées et qui nous ont permis de bâtir des principes d'action maintenant largement appliqués.

Il nous semble bon de souligner dans cette conclusion la **logique d'intervention** qui est à la base de la réussite des chantiers en conditions extrêmes. Cette logique reste la même quel que soit l'aménagement à réaliser et à réhabiliter : pistes de ski, routes, autoroutes, voies ferroviaires, talus de toutes sortes...

- *Procéder à une analyse de l'environnement, en particulier bien décrire le contexte végétal du site.*
- *Concevoir l'aménagement selon les critères techniques souhaités mais en tenant compte aussi des caractéristiques naturelles du site pour avoir toutes les chances de réussir sa parfaite intégration.*
- *Utiliser les engins les mieux adaptés à sa réalisation et sensibiliser les équipes de terrain aux contraintes naturelles du site (altitude, pente, sécheresse ...).*
- *Avoir en permanence le souci de la protection du site aménagé contre les risques d'érosion, traiter le problème en profondeur lors de la création de l'ouvrage, puis en surface au moment de la préparation du chantier de végétalisation.*
- *Matérialiser les accès au chantier pour ne pas perturber plus qu'il est nécessaire l'environnement immédiat.*
- *Préparer un lit de semences parfaitement drainé, fin et riche, par une utilisation raisonnée des amendements actuellement proposés sans faire courir de risque à l'environnement.*
- *Faire un choix judicieux des semences, des produits d'accompagnement (engrais fixateur) et des techniques de semis.*
- *Réaliser un couvert végétal le mieux adapté à la gestion ultérieure de la zone ainsi réhabilitée mais aussi et surtout le mieux adapté à l'environnement naturel.*

Au terme de cet ouvrage, il convient d'insister sur des pratiques récentes, mais dont il faudra sans doute de plus en plus tenir compte dans les opérations de réhabilitation de sites : l'utilisation des amendements issus de la valorisation des boues de stations d'épuration.

Ils sont actuellement utilisés par les stations de ski, les sociétés autoroutières, les carrières. Il faut en faire un usage raisonné, car, en la matière, nous n'avons pas encore le recul suffisant pour être assuré qu'au-delà de leur rôle bénéfique sur la végétation semée ils n'aient pas d'effets négatifs sur la végétation naturelle et l'environnement en général. Sur ce thème, des recherches s'imposent.

Nous souhaitons insister tout particulièrement sur la végétation. Si les premiers essais réalisés ont concerné le matériel végétal du commerce, nous avons très vite observé que seul le maté-

riel autochtone pouvait assurer la réussite totale et durable d'un aménagement en conditions extrêmes.

Seule une végétation bien implantée couvre parfaitement le sol et assure une protection efficace contre l'érosion. Cette protection, si elle est réalisée par les espèces natives, peut défier le temps car elle possède un pouvoir de renouvellement et d'enrichissement incomparable.

Elle permet en outre d'envisager à moyen terme le retour à un système végétal en équilibre, une certaine biodiversité et l'intégration écologique et paysagère des aménagements.

Des recherches sont encore indispensables pour cerner parfaitement les conditions agronomiques de la production des plantes natives, leur description et leur commercialisation.

De ces recherches, on peut attendre une amélioration dans la qualité des mélanges semés, une plus grande diversité, une meilleure adaptation aux contraintes écologiques des sites à réhabiliter.



Piste reverdie et pâturée

QUELQUES ADRESSES POUR EN SAVOIR PLUS

Sur les procédures d'autorisation de travaux en altitude :

Service d'études et d'aménagement touristique de la Montagne (SEATM)

Tour de contrôle

73190 CHALLES-LES-EAUX

Sur l'utilisation des boues et composts de boues :

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

27, rue Louis-Vicat

75015 PARIS

Dans votre département :

La Direction départementale de l'action sanitaire et sociale (DDASS),

La Direction départementale de l'agriculture (DDA),

La chambre d'agriculture,

Le Service d'assistance techniques aux exploitants de stations d'épuration (SATESE)

Sur les techniques de végétalisation :

Syndicat national des entreprises d'engazonnement par projection (SNEEP)

10, rue Saint-Marc

75001 PARIS

Sur les semences :

Société française des gazons (SFG)

10 rue Henri-Martin

92700 COLOMBES

Groupement national interprofessionnel des semences et plants (GNIS)

44, rue du Louvre

75001 PARIS

Groupe d'étude et de contrôle des variétés et semences (GEVES)

La Minière

78285 GUYANCOURT cedex

INRA de Lusignan

86600 LUSIGNAN

Cemagref

Groupement de Grenoble

Division EPM

38402 St-MARTIN-D'HÈRES

Sur le matériel d'épandage :

GIE Alpage et Forêt

10, chemin de la Mavéria-Chavoires

74290 VEYRIER-DU-LAC



BIBLIOGRAPHIE

- ACTA., 1967 - *Plantes des prairies permanentes* (série graminées) par R. DELPECH et L. BERTOLETTI.
- BAIZE D., 1988 - *Guide des analyses courantes en pédologie*. INRA, 172 p.
- BARBIER D., PERRINE D., GEORGES P., DOUBLET R., 1989 - Évaluation du risque parasitaire lié à l'utilisation agricole des boues et résiduaire, *Journal français d'hydrologie*, 1989, fascicule 1, p. 103-111.
- BEDECARRATSA. DINGER F., 1994 - Étude de la dynamique de reconquête des espaces terrassés en altitude, Cemagref Grenoble, étude, 37 p.
- BOURGOIN B., ARNAL G., DINGER F., 1989 - Paysage, occupation et protection des sols : rôle de la prairie, matériel végétal disponible et à créer: *Revue Fourrages* n° 119, p. 321-331.
- BRUNET J-C., 1987 - Filières de traitement et de destination des boues de station d'épuration - Adaptation aux zones de montagne - ENITRTS, mémoire de troisième année, 266 p. + annexes.
- BUSSERY M.P, 1989 - Bases écologiques pour l'utilisation de *Poa alpina* L. dans la revégétalisation des terrains perturbés de l'étage alpin, Cemagref Grenoble, thèse, 196 p.
- CARRE C., 1995 - Le marché du compost - Utilisation en agriculture, *Techniques Sciences Méthodes* n°2 février 1995, p. 107-109.
- Cemagref, DDAF de Savoie, 1989 - Valorisation des boues de station d'épuration de montagne - description, évaluation technico-économique d'une filière de valorisation : la maturation naturelle des boues : le cas de la commune de Bellentre (73) - rapport de synthèse, 28 p.
- Cemagref, DDAF de Savoie, 1989 - Valorisation des boues de station d'épuration de montagne en revégétalisation de pistes de ski : évaluation des risques de transfert par lessivage des principaux éléments biogènes, rapport de synthèse, 18 p.
- Cemagref, 1989 - Essais d'engazonnement sur boues compostées - La Plagne (Savoie) - Bilan de trois saisons d'observations 1987-1988-1989, rapport 22 p.
- Cemagref, DDAF de Savoie, Conseil général de Savoie, 1991 - Valorisation des boues de station d'épuration de montagne : risque sanitaire lié à l'épandage en revégétalisation des pistes de ski - Évaluation et recommandations, rapport de synthèse 39 p.
- COILLARD J., LE HY J.B., 1988 - Valorisation des boues de stations d'épuration sur pistes de ski : l'exemple des Gets. *Revue Génie rural* n°5-6.
- COILLARD J., LE HY J-B., 1988 - *Les boues de stations d'épuration - solutions en montagne*. *Revue Génie rural* n° 11.
- CROSAZY., DINGER F., 1990 - Comportement de la végétation des engazonnements sur substrats amendés en altitude, Cemagref Grenoble, étude 28 p.
- CROSAZY., 1995 - Lutte contre l'érosion des terres noires en montagne méditerranéenne - Connaissance du matériel végétal herbacé, quantification de son impact sur l'érosion, Cemagref, thèse, 243 p.

- CROSAZ Y, DINGER F., 1995 - Protection de talus et fossés de forte pente par toile de jute avant végétalisation, Actes des Rencontres 95 Géotextiles géomembranes, tome 1, p. 43-54.
- DABURONA., 1989 - La réhabilitation des surfaces dégradées des domaines skiables : une nouvelle conception de l'aménagement des stations - cas de l'Isère et de la Savoie, Cemagref Grenoble, thèse, 310 p.
- DINGER F., 1983 - Revégétalisation des pistes de ski : le point sur l'expérimentation actuelle, étude Cemagref, n° 190, 83 p.
- DINGER F., 1987 - L'insertion paysagère et le reverdissement des pistes de ski, communication au VI^e Congrès international des transports à câbles, 12 p.
- DINGER F., DABURONA., 1989 - Réhabilitation des domaines skiables : utilisation des boues de station d'épuration, exemple de la Tarentaise, étude n° 231, Cemagref Grenoble, 50 p. + 14 fascicules.
- DOREE A., 1995 - Flore pastorale de montagne, tome 1 : les graminées, Cemagref, 207 p.
- DUVIGNEAUD, 1980 - *La synthèse écologique*, 2^e édition, PARIS, Doin, 380 p.
- GEVES., 1993-1995 - *Bulletin des variétés* - Graminées à gazon. GEVES. - INRA, La Minière-Guyancourt.
- GILLOUX P., 1995 - *Les finalités du compostage*, Techniques Sciences Méthodes, n°2 février 1995 p. 111-115.
- GROSA., 1979 - *ENGRAIS – Guide pratique de la fertilisation*, La maison rustique, 383 p.
- JOMIERY., 1995 - Le compostage : une voie de traitement, un mode de production, « l'expérience d'Arc-en-Ciel », *Techniques Sciences Méthodes* n°2 février 1995 p. 123-127.
- MORGAN R.P.C, RICKSON R.J., 1995 - Slope stabilization and erosion control : A bioengineering approach, E et FN Spon London 274 p.
- MORVAN B., CARRE J., 1995 - Oligo-éléments et micropolluants dans les composts, *Techniques Sciences Méthodes* n°2 février 1995 p. 138-140.
- MUSTIN M., 1987 - Le compost - gestion de la matière organique, Paris Édition F. DUBUSC 954 p.
- SCHWARTZBROD J., STIEN J-L, THEVENOT M-T., STRAUSS S., 1990 - Contamination parasitaire des boues résiduelles composts et sédiments marins - *Journal français d'hydrologie*, 1990, fascicule 2 p. 285-295.
- SEATM, 1974 - L'aménagement des pistes de ski, plaquette, 59 p.
- SEATM, 1985 - Aménagement des pistes de ski alpin - Compléments techniques, 76 p.
- SEATM, 1990 - Aménagement des pistes de ski alpin, plaquette 40 p.
- Seed science and technology - Comptes rendus de l'Association internationale d'essais de semences, vol XIII, suppl. 2, 1985, 236 p.
- Semences et progrès n°85, Octobre-novembre-décembre 1995
- Société française des gazons, 1990 - L'Encyclopédie des gazons, Paris SEPS 360 p.
- URBANSKA K.M, GRODZINSKA K., 1995 - Restoration ecology in Europe, geobotanical Institute SFIT Zürich, 137 p.
- VILLESSOT D., FERY G., 1994 - Le compost de boues de stations d'épuration - Aspects techniques, réglementaires et commerciaux, *Techniques Sciences Méthodes*, n° 12, février 1995, p. 722-728.



FRANÇOISE DINGER

Docteur en écologie appliquée

Ingénieur de recherche au Cemagref, l'auteur est spécialiste des opérations liées à la réhabilitation des domaines skiables et d'autres espaces sensibles.

Elle conduit des recherches sur la mise en culture de variétés adaptées pour la végétalisation de sites en conditions extrêmes.

Elle est chargée de missions d'expertise pour la réhabilitation de sites perturbés à forte valeur patrimoniale.

Elle anime des sessions de formation et de conseil sur les actions de revégétalisation auprès des responsables des services des pistes.

LOUIS - JEAN
avenue d'Embrun, 05003 GAP cedex
Tél. : 04.92.53.17.00
Dépôt légal : 1016 — Décembre 1997
Imprimé en France



et ouvrage constitue la première synthèse sur les éléments clés de la végétalisation des espaces dégradés d'altitude : connaissance de l'écosystème de référence avant la dégradation du site ; techniques de préparation du sol ; choix du matériel végétal ; reconstitution du substrat et fertilisation ; gestion appropriée du couvert végétal. Pour favoriser le retour à une plus grande biodiversité et stabilité des milieux réhabilités, cette synthèse propose des recommandations nouvelles pour l'utilisation des déchets organiques en reconstitution de substrat et l'introduction d'espèces végétales locales dans les mélanges de semences. La logique d'intervention présentée fait de cet ouvrage un outil pratique pour tous ceux qui conduisent des opérations de végétalisation de sites en conditions extrêmes mais également d'aménagement de routes, autoroutes, voies ferroviaires, carrières, etc...

Il est destiné aux opérateurs, maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage qui réalisent des projets de végétalisation sur des espaces sensibles.

