RÉAMÉNAGEMENT FORESTIER DES CARRIÈRES DE GRANULATS

Sylvie VANPEENE-BRUHIER

Avec la participation de Christian PIEDALLU, Isabelle DELORY



Cemagref EDITIONS

RÉAMÉNAGEMENT FORESTIER DES CARRIÈRES DE GRANULATS

Réaménagement forestier des carrières de granulats. *Sylvie Vanpeene-Bruhier,* avec la participation de *Christian Piedallu, Isabelle Delory*. © Cemagref Éditions 2002, tous droits réservés. ISBN 2-85362-574-5. Dépôt légal 3ème trimestre 2003. PAO Maurice Merlin, dessins Marie-Laure Moyne, infographie Françoise Peyriguer. Impression JOUVE. Vente par correspondance PUBLI-TRANS ZI Marinière 2, rue Désir Prévost, 91080 Bondoufle ; tél. : 01 69 10 85 85. Diffusion aux libraires TEC et DOC, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan, cedex ; tél. : 01 47 40 67 00.

Composition du comité de pilotage de l'étude

Cet ouvrage est l'édition, cofinancée par le Cemagref et la Charte Professionnelle de l'Industrie des Granulats, d'un rapport réalisé par le Cemagref dans le cadre de la taxe parafiscale sur les granulats. Le rapport a été suivi et validé par un comité de pilotage interministériel et de professionnels du secteur des granulats.
Ce comité était composé de la manière suivante

Mme Michèle PHELEP, Ministère de l'Agriculture et de la forêt – DERF
Philippe BEAUCHAUD, Ministère de l'Environnement
Jean-Jacques BRUN, Cemagref
Jean FERAUD, BRGM
Corentin JANOT, Morillon-Corvol
Louis de MAUPEOU, UNPG
René MOURON, BRGM
Pierre de PRÉMARE, Lafarge granulats
Jacques LAMBOTTE, Secrétariat d'Etat à l'industrie / DGEMP/DIMAH/S3M
Jean-Paul PEREZ, Secrétariat d'Etat à l'industrie / DGEMP/DIMAH/S3M

La Charte Professionnelle de l'industrie des granulats

Pour une prise en compte accrue de la dimension environnementale de son activité, l'Union nationale des producteurs de granulats (UNPG) a défini en 1992 des règles de bonne conduite et des engagements volontaires spécifiques à son industrie et formalisés dans une Charte Professionnelle écrite.

Statut de la Charte

Le «Comité National de la Charte de l'Industrie des Granulats» a ainsi été créé pour assurer le suivi et le contrôle du bon respect des engagements de la Charte Professionnelle de l'Industrie des granulats.
Le Comité National de la Charte est une association à but non lucratif régie par la loi du 1er juillet 1901.

Objectifs et actions

L'association a pour objet la mise en œuvre de la politique de l'UNPG, exprimée dans sa Charte Professionnelle. Pour contribuer à la réalisation de ces objectifs, diverses actions sont menées, tant au plan national que régional.

• **La mise en œuvre d'un programme d'études** permettant, notamment en matière de production, d'aménagement, d'utilisation de matériaux et de réduction des impacts :
– de mener des recherches expérimentales de solutions pilotes ou nouvelles ;
– de développer les connaissances techniques et scientifiques ;
– de promouvoir des solutions innovantes ;
– d'élaborer des guides pratiques utilisables sur le terrain ;
– de former le personnel.

Les études menées dans le cadre de la Charte portent sur 3 thèmes principaux :

- la maîtrise des nuisances liées à l'extraction (bruit, poussières, paysage ...) ;
- l'écologie (techniques de réaménagement) ;
- la protection des eaux surfaciques et souterraines.

Toutes ces études sont tournées vers les préoccupations pratiques des adhérents de la Charte. Elles sont destinées à leur fournir des outils pour assurer la maîtrise de la qualité environnementale de leurs sites.

• **La résorption de «points noirs»** issus d'anciennes exploitations de carrières de granulats, c'est-à-dire le financement de la remise en état de sites d'exploitations passées et leur insertion dans l'environnement. Les critères justifiant la dénomination de points noirs sont, d'une façon générale, l'atteinte au paysage, la sécurité du site, la présence d'anciennes installations et le présence de déchets. Le traitement des points noirs est mis en œuvre après un inventaire préalable et un choix des sites à réhabiliter.

• **La réalisation d'audits environnementaux : programme DACEN (Diagnostic-Audit-Conseil en Environnement).**
Le programme DACEN est destiné à apporter une assistance technique directe aux industriels en établissant un diagnostic et en donnant des conseils aux signataires de la Charte pour leur permettre de situer leur exploitation par rapport aux préoccupations d'environnement, tout en les aidant à définir des plans d'actions à développer au regard des exigences de l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994.

Les adhérents de la Charte
En janvier 2002, la Charte de l'UNPG comptait 412 entreprises signataires, totalisant 70 % du tonnage total de granulats extraits en France.

Sommaire

Introduction 15
PARTIE 1 : GENERALITES

CHAPITRE 1 : UN SOL FORESTIER
I - CARACTERISTIQUES D'UN SOL FORESTIER 25
1 - Un sol profond 25
2 - Un sol bien aéré et à bonne réserve en eau 28
3 - Un sol à forte activité biologique 28

II - LES BESOINS DES ARBRES 32
A - LES BESOINS PHYSIOLOGIQUES DES ARBRES 32
1 - Un espace racinaire important 32
2 - Une aération et une alimentation en eau suffisantes 33
3 - Une fertilité suffisante 35
4 - Des essences à besoins variables 36
B - LA SUCCESSION VEGETALE VERS LA FORET 41
1 - Les essences pionnières 41
2 - Les essences de transition et matures 41

III - LES CONSEQUENCES SUR LE REAMENAGEMENT 42
1 - Les caractéristiques nécessaires au sol réaménagé 42
2 - L'accélération de la succession végétale 44

CHAPITRE 2 : PREPARATION DE L'EXPLOITATION
I - LE DEFRICHEMENT 49
1 - La récolte du bois 49
2 - La destruction des souches 50

II - LE DECAPAGE SELECTIF DES HORIZONS HUMIFERE ET MINERAL 51
1 - Les horizons humifère et minéral 51
2 - La pratique du décapage sélectif 53

III - LE STOCKAGE SELECTIF DES HORIZONS HUMIFERE ET MINERAL 55
1 - Les effets du stockage 55
2 - Les conditions optimales de stockage 56

CHAPITRE 3 : LES PLANTS FORESTIERS
I - SEMIS DIRECT OU PLANTATION 63
1 - Les avantages du semis direct 63
2 - Les inconvénients du semis direct 63
3 - Avantages et inconvénients des plantations 64
4 - Bilan 65

II - LES DIFFERENTS TYPES DE PLANTS 66
1 - Les plants à racines nues 66
2 - Les plants en conteneurs 68
3 - Les plants inoculés 73

III - LE CAHIER DES CHARGES POUR L'ACQUISITION DES PLANTS 77
1 - Les conditions de culture en pépinière 78
2 - Les conditions d'arrachage, de conditionnement et de transport 79
3 - Les conditions de stockage sur le site avant plantation et contrôle 80

PARTIE 2 : RÉAMÉNAGEMENTS DES FONDS DE FOUILLE ET DES CARREAUX

CHAPITRE 4 : PREPARATION DE LA REHABILITATION
I - LE PHASAGE DES OPERATIONS 89
1 - Respect des écoulements d'eau 89
2 - Ecrans boisés et voies de desserte 89
3 - Phasage de l'exploitation 90

II - ACCESSIBILITE DE LA PARCELLE REAMENAGEE 94
1 - Les carrières en fosse 94
2 - Les carreaux d'exploitation 95
3 - Les bassins de décantation 96

CHAPITRE 5 : METHODE DE REMISE EN ETAT DES SOLS
I - PREPARATION DE LA REMISE EN ETAT 102
1 - Détermination des différents niveaux des matériaux de comblement 102
2 - Nivellement et drainage du fond de fouille 105

II- QUALITE ET QUANTITE DES MATERIAUX 106
1 - Choix des matériaux 106
2 - Epaisseur de matériaux 113

III - MISE EN PLACE ET ASSAINISSEMENT DES MATERIAUX DE COMBLEMENT 115
1 - Mise en place des matériaux de comblement 115
2 - Le nivellement du toit du remblai 117
3 - Le drainage 117

IV - MISE EN PLACE DU SOL PROSPECTABLE PAR LES RACINES 118
1 - Conditions de manipulation de la terre 118
2 - Mise en place de l'horizon minéral 120
3 - Mise en forme de la surface du sol reconstitué 122
4 - Choix et utilisation des engins 124
5 - Epierrage 130
6 - Travail du sol 130

CHAPITRE 6 : AMELIORATION DU SUBSTRAT
I - AMELIORATION BIOLOGIQUE DES SOLS 138
1 - Les engrais verts 138
2 - Le bois raméal fragmenté 142
3 - L'utilisation de lombriciens 143

II - AUTRES AMENDEMENTS 145
1 - Les boues de papeterie 145
2 - Les boues de sucrerie 146

III - LES PRATIQUES CULTURALES 146
1 - Relever le pH 146
2 - Utilisation d'une fertilisation de fond 147

CHAPITRE 7 : TECHNIQUES DE PLANTATION ET CHOIX DES ESPECES
I - LE CHOIX DU MATERIEL VEGETAL 151
1 - Sélection des essences adaptées 151
2 - Choix du type de plants 152

II - LES TECHNIQUES DE PLANTATION 153
1 - Epoque de plantation 153
2 - Densité et disposition des plantations 155
3 - Mode opératoire 158
4 - Dispositifs particuliers 164

III - L'ENTRETIEN DE LA PLANTATION 166
1 - Protection des arbres contre le gibier 166
2 - Limitation de la concurrence herbacée et arbustive 169
3 - Le regarnissage 170
4 - les techniques sylvicoles appliquées 172

CHAPITRE 8 : INTEGRATION DU REAMENAGEMENT
I - LE CAS PARTICULIER DU BOISEMENT DES BASSINS DE DECANTATION 181
1 - Les bassins de décantation de lavage de granulats 181
2 - Les bassins de décantation de terres de sucrerie 182
3 - Boiser ou ne pas boiser 182

II - INTEGRATION ECOLOGIQUE ET PAYSAGERE 183
1 - Maintien de la biodiversité 183
2 - Intégration paysagère 184

Conclusion de la partie 2 185

PARTIE 3 : RÉAMÉNAGEMENTS DES BANQUETTES, TALUS ET MERLONS

CHAPITRE 9 : CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES
I - CARACTERISTIQUES DU FRONT DE TAILLE 191

II - CARACTERISTIQUES DES BANQUETTES 192

III - CARACTERISTIQUES DES TALUS 194

IV - CARACTERISTIQUES DES MERLONS 197

CHAPITRE 10 : METHODE DE REMISE EN ETAT DES SOLS
I - PREPARATION DE LA REMISE EN ETAT 201
A - LES CARRIERES DE ROCHES MASSIVES A FLANC DE COTEAU 201
1 - Préparation de la topographie définitive 201
2 - Préparation des banquettes 203
B - LES TALUS ET MERLONS 205
1 - Pente des talus et merlons 205
2 - Actions pour stabiliser les pentes 208
3 - Drainage 210

II - QUALITE ET QUANTITE DES MATERIAUX 212
1 - Choix des matériaux 212
2 - Epaisseur de matériaux 212

III - MISE EN PLACE ET ASSAINISSEMENT DES MATERIAUX 213

CHAPITRE 11 : AMELIORATION DU SUBSTRAT
I - L'AMELIORATION BIOLOGIQUE DES SOLS 219
1 - Les engrais verts 219
2 - Le bois raméal fragmenté 221
3 - L'utilisation de lombriciens 221

II - LES COMPOSTS 222
1 - Les composts de déchets verts 225
2 - Les composts urbains 226
3 - Les composts de fraction fermentescible d'ordures ménagères 227
4 - Les composts de déchets agricoles 227
5 - Les composts mixtes 227

III - LES AUTRES AMENDEMENTS 228
1 - Les boues de papeterie 228
2 - Les boues de station d'épuration 228
3 - Les ordures ménagères broyées 233
4 - Apport d'amendements organiques sur talus 234

IV - RECONSTITUER UN SOL OU PLANTER SUR STERILES ? 236
1 - Reconstituer un sol autosuffisant ? 236
2 - Planter sur stériles ? 237

CHAPITRE 12 : LES TECHNIQUES DE PLANTATION ET CHOIX DES ESPECES
I - PREPARATION DU SOL 243

II - LE CHOIX DU MATERIEL VEGETAL 243
1 - Sélection des espèces adaptées 244
2 - Age, taille et conditionnement des plants 245
3 - Mycorhization des plants 245

III - TECHNIQUES DE PLANTATION 246
1 - Epoque de plantation 246
2 - Mode opératoire 247

IV - L'ENTRETIEN DE LA PLANTATION 247
1 - Protection des arbres contre le gibier 247
2 - Limitation de la concurrence herbacée 247
3 - Arrosage 248
4 - Les techniques sylvicoles appliquées 248

Conclusion 249

Glossaire 251

Bibliographie 255

Annexes 265

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des carrières à réaménagement forestier visitées 19
Figure 2 : Structure d'un sol forestier 26
Figure 3 : Facteurs de réduction de l'espace racinaire 27
Figure 4 : Photos de racines mycorhizées 29
Figure 5 : Une racine nodulée par Rhizobium 30
Figure 6 : Nodule actinorhizien chez l'aulne glutineux 31
Figure 7 : Schéma d'un appareil racinaire 32
Figure 8 : Différentes profondeurs d'appareils racinaires 33
Figure 9 : Effet de la concurrence herbacée sur la croissance de plants 35
Figure 10 : Les régions climatiques sylvicoles 36
Figure 11 : Incompatibilité du système d'enracinement et du sol 37
Figure 12 : Tableau de synthèse d'essences utilisables 38
Figure 13 : Caractéristiques à respecter dans la reconstitution des sols forestiers 43
Figure 14 : Photographie d'un sol forestier 52
Figure 15 : Schéma d'un profil de sol 53
Figure 16 : Préparation d'un site de stockage sur un sol imperméable 56
Figure 17 : Schéma d'un stock de terre végétale 57
Figure 18 : Signification des catégories d'âge 68
Figure 19 : Déformations racinaires graves sur des plants de résineux 69
Figure 20 : Godets anti-chignon 70
Figure 21 : Influence du volume du conteneur sur le taux de reprise 71
Figure 22 : Différences de prix entre plants à racines nues et en godet 72
Figure 23 : Exemple de couples arbre/mycorhize 74
Figure 24 : Espèces fixatrices d'azote ayant montré de bons résultats 76
Figure 25 : Incidence de l'exposition des plants au soleil 80
Figure 26 : Mise en jauge de plants à racines nues 81
Figure 27 : Liste des points à contrôler pour vérifier la qualité des plants livrés 82
Figure 28 : Planification d'une exploitation pour limiter les mouvements de sol 91
Figure 29 : Schéma d'un réaménagement forestier à l'avancée 92
Figure 30 : Schéma de décapage pour faciliter les manœuvres 93
Figure 31 : Orientation des lignes de plantation et des voies de desserte 94
Figure 32 : Schéma d'un profil de sol reconstitué 101
Figure 33 : Battements de la nappe d'eau entre 1979 et 1983 105
Figure 34 : Comparaison des hauteurs des plants selon le sol remis en place 112
Figure 35 : Schéma d'un remblayage en terrasse 116
Figure 36 : Réalisation d'un collecteur sur un remblai imperméable 117
Figure 37 : Modelage d'un toit de remblai plat 118
Figure 38 : Détection de la limite de plasticité d'un sol 119
Figure 39 : Mise en place du sous-sol de haut en bas 120
Figure 40 : Modelé du terrain en billons 123
Figure 41 : Schéma de mise en place du sol avec scraper et pelle 125
Figure 42 : Schéma de décapage avec dumpers et pelles 126
Figure 43 : Schéma de régalage avec pelle à chenille 127
Figure 44 : Schéma de régalage avec pelle à chenille (suite) 128

Figure 45 : Schéma de régalage avec chargeur 129
Figure 46 : Comparaison de la résistance à la pénétration du sol 131
Figure 47 : Légumineuses utilisables en couvert végétal 139
Figure 48 : Effet d'un couvert de légumineuse sur la croissance de plants forestiers 140
Figure 49 : Comparaison d'une plantation sur paillage plastique et sur bande de mélilot inoculé 141
Figure 50 : Constitution d'une lisière en bordure de peuplement de rapport 158
Figure 51 : Habillage d'un plant à racines nues 159
Figure 52 : Plantation au coup de pioche ou en fente 160
Figure 53 : Plantation en potet 161
Figure 54 : Plantation d'un plant en conteneur en potet 163
Figure 55 : Façonnage en cuvette d'une plantation 163
Figure 56 : Perchoir à rapaces au milieu d'un reboisement 167
Figure 57 : Echelle de préférence du chevreuil vis-à-vis de l'abroutissement 169
Figure 58 : Taille de formation d'un feuillu 172
Figure 59 : Hauteurs pour commencer l'élagage 173
Figure 60 : Réalisation des élagages 175
Figure 61 : Végétalisation d'une banquette en cours d'exploitation 192
Figure 62 : Réduction de la pente d'un talus et perte en matériau 195
Figure 63 : Ecrêtage d'un front de taille 195
Figure 64 : Profils rectifiés par écrêtage de gradins 195
Figure 65 : Talutage depuis le haut par déversement 196
Figure 66 : Effet bénéfique du boisement d'un merlon 197
Figure 67 : Banquette en léger dévers amont 203
Figure 68 : Protection contre les chutes de pierre du front de taille 203
Figure 69 : Banquette en préparation avec merlon aval et tranchée amont 205
Figure 70 : Exemples de talutage 206
Figure 71 : Modelé du profil du talus et comblement par de la terre végétale 206
Figure 72 : Dispositions pour assurer une stabilité des talus 208
Figure 73 : Variation du taux de recouvrement 3 ans après le semis 210
Figure 74 : Fossé d'assainissement en tête de talus 211
Figure 75 : Réalisation des drains en galets à flanc de pente 211
Figure 76 : Composition granulométrique optimale d'un talus 213
Figure 77 : Déversement gravitaire 214
Figure 78 : Calendrier des opérations d'épandage de compost et de plantation 223
Figure 79 : Effet de l'apport de boue sur la capacité de rétention en eau 230
Figure 80 : Comparaison des hauteurs et des taux de survie à Marchaux 231
Figure 81 : Effet d'apport de matière organique sur la végétation d'un talus 234
Figure 82 : Adéquation condition de milieu et type de matière organique 235
Figure 83 : Végétalisation mixte légumineuses arborescentes et plants forestiers 238
Figure 84 : Colutea arborescens 2 ans après sa plantation 238
Figure 85 : Réalisation de petits gradins sur une pente 243

LISTE DES PLANCHES-PHOTOS

Planche 1 : Un exemple d'utilisation de plants mycorhizés 75
Planche 2 : Comparaison de plantations fixatrices d'azote et non fixatrices 77
Planche 3 : Zone de mouillère dans un réaménagement forestier 104
Planche 4 : Des moyens de lutte contre la concurrence herbacée 164
Planche 5 : Les manchons de protection contre les dégâts du gibier 168
Planche 6 : Illustration de la concurrence pour l'eau et l'espace 171
Planche 7 : Couvert de résineux élagués 174
Planche 8 : Exemples de plantations forestières de qualité 177
Planche 9 : Bassin de décantation encore en activité 182
Planche 10 : Importance de l'exposition sur les banquettes de roche massive 193
Planche 11 : Exemple d'un talus reboisé 196
Planche 12 : Exemples de banquettes difficiles à réaménager 202
Planche 13 : Un réaménagement d'un front de taille de qualité 204
Planche 14 : Problème d'érosion sur des talus à pente trop forte 207
Planche 15 : Manque d'entretien et de suivi sur une banquette de roche massive 232

INTRODUCTION

Dans les années 1970, face à la multiplication des ouvertures de carrières, la question de leur réaffectation s'est posée. Quand le site était auparavant boisé, la solution la plus fréquente était de s'orienter vers un réaménagement forestier.

Les vocations de tels réaménagements sont multiples :
- production forestière (bois) ;
- intégration paysagère des sites réaménagés (en particulier des fronts de taille des carrières de roches massives) ;
- vocation écologique ou cynégétique.

Selon ces objectifs[1], les caractéristiques de la reconstitution du sol et des boisements seront différentes.

Afin de permettre la croissance des arbres dans de bonnes conditions et durablement, le sol doit assurer l'installation des espèces végétales et leur croissance grâce à une potentialité suffisante de réserve hydrique et de fixation des éléments nutritifs. A la différence des réaménagements agricoles, où des actions de correction sont possibles dans les années qui suivent le réaménagement (sous-solage, drainage, apports d'amendements) et où les cultures sont fertilisées chaque année, le réaménagement forestier a peu de possibilité de rattrapage. Une fois la plantation faite, il sera très difficile voire impossible[2] d'intervenir sur le sol en place et celui-ci devra assurer la croissance des arbres pendant plusieurs décennies.

La question de la faisabilité technique de tels réaménagements s'est donc posée. De 1974 à 1990, des expérimentations de réaménagement forestier après extraction ont été réalisées avec l'aide des financements du comité de gestion de la taxe parafiscale. Ces études ont permis la mise en place d'essais grandeur nature sur un certain nombre de sites. Elles ont principalement concerné des carrières de roches massives avec pour objectif de favoriser la réintégration paysagère du front de taille par différentes espèces végétales :
- plantes grimpant ou retombant directement sur le front de taille ;
- arbres plantés sur les banquettes ou les merlons devant le front de taille.

Elles ont permis aussi de dégager quelques principes et méthodes devant guider les carriers dans la conduite des travaux. Ces principes ont été publiés sous forme de différentes brochures et documents techniques (liste dans la bibliographie). Cependant, il convient de noter que de nombreux sites réaménagés avec le concours de la taxe parafiscale étaient des sites qui avaient été laissés tels quels après l'exploitation, et n'avaient pas fait l'objet d'une

1 Qui peuvent être combinés sur un même site.
2 Les conditions de compaction du sol et de drainage ne pourront plus être modifiées après plantation, des corrections de fertilité peuvent être faites.

remise en état. Les conditions pour la reconstitution du sol y étaient donc globalement très mauvaises (site non nettoyé, absence de terre végétale utilisable, exploitation jusqu'à la nappe, compactage des terrains...). Actuellement, la plupart des remises en état se font à l'avancement[3], ce qui permet de se placer dans des conditions beaucoup plus favorables. Cependant, les réaménagements actuels ne sont plus expérimentaux, mais intégrés aux pratiques de l'exploitation ce qui peut poser d'autres contraintes : coût, intégration dans le phasage de l'exploitation...

Ce document est une analyse synthétique des réaménagements forestiers des carrières de granulats. Cette analyse est issue de trois sources d'information :

- les dossiers concernant les expérimentations mises en place dans les années 1974-1990 dans le cadre de la taxe parafiscale ;
- les articles et rapports issus d'une analyse bibliographique sur les méthodes récentes de réaménagement forestier de carrières pratiquées dans les différents pays européens, ainsi qu'au Canada et aux Etats-Unis (liste des articles et documents dans la bibliographie) ;
- une phase d'enquête de terrain concernant des réaménagements réalisés dans les années 1974-1990 dans le cadre de la taxe parafiscale, mais aussi des réaménagements récents ou en cours. Ces enquêtes de terrain ont consisté en un entretien avec le carrier responsable du réaménagement, et éventuellement, un entretien avec le gestionnaire forestier[4], éventuellement un entretien avec un responsable environnement de la société et une visite de la parcelle pour repérer des éventuelles anomalies de croissance de la végétation en place.

• *Les sources d'information de la taxe parafiscale sur les granulats :*
Le comité de la taxe parafiscale sur les granulats a financé des cas concrets de réaménagements de carrières «orphelines[5]», des recherches expérimentales pour améliorer les connaissances techniques et des documents de synthèse (la liste des documents utilisés dans cette présente étude figure dans la bibliographie). Ces documents sont identifiés par un code [TPG n°].

Les expériences de réhabilitation forestières financées par la taxe parafiscale sur les granulats, citées dans ce rapport sont les suivantes :

- Chateauneuf-les-Martigues (13) [TPG 7]
- Gourdon (06) [TPG 8]
- Jablines (77) [TPG 9]
- Le Puix Gy (90) [TPG 10]
- Marchaux (25) [TPG 11]

---

3 Quand on décape une parcelle pour l'exploiter, la terre découverte est tout de suite employée pour réaménager une parcelle dont le gisement a été extrait.
4 Dans certains cas c'est le carrier lui-même qui gère son boisement, dans d'autres situations, cela peut être l'ONF.
5 Carrière qui avait été abandonnée sans remise en état après l'exploitation et dont il n'était plus possible de retrouver le carrier pour lui faire faire *a posteriori* le réaménagement.

- Saint Tronc (13) [TPG 12]
- Sierentz (68) [TPG 13]
- Sündhoffen (68) [TPG 14]

• *Les sources d'information bibliographiques françaises et étrangères :*

Les articles et études consultés (130 documents analysés) sont issus d'une recherche bibliographique sur différentes bases de données[6]. Il s'agit soit d'articles scientifiques soit de rapports, de documents de synthèse ou de guides techniques. Les sources ont été cherchées dans le domaine du réaménagement de carrières, mais aussi dans le domaine de la revégétalisation de sols dégradés, ou de manière plus générale, dans celui de la biologie des sols et de la sylviculture.

Les documents proviennent de :

- France :	52
- Grande-Bretagne :	23
- USA :	19
- Canada :	10
- Espagne :	6
- Europe : (Allemagne, Italie)	4
- Suisse :	6
- Australie :	7
- autres pays : (Haïti, Israël, Vénézuéla)	3

Leurs sujets se répartissent[7] de la manière suivante :

- le réaménagement de carrières :	44
- la réhabilitation de sols miniers :	19
- la réhabilitation d'autres espaces dégradés :	11
- la revégétalisation :	31
- la forêt et les techniques sylvicoles :	29
- l'utilisation d'amendements et de boues pour reconstituer un sol :	20
- la pédologie et la vie du sol :	28
- le stockage du sol :	9

La nature des documents analysés est la suivante :

- article scientifique:	75
- rapport d'étude :	22
- rapport de synthèse :	25
- texte réglementaire :	3
- plaquette d'organisme professionnel :	5

6 Agricola, Biological and agricultural index, Biosis preview, Cab abstracts, Enviroline, Geobase, Ntis, Pascal...

7 Le total est supérieur à 130 car certains documents relèvent de plusieurs rubriques.

• *Les visites de terrain :*

Les buts de cette phase de terrain étaient de :

- faire le bilan et une analyse critique des pratiques de réaménagement et des expérimentations menées dans les années 1980 en ayant maintenant un recul important. En effet, dans la plupart des cas, un bilan des expérimentations avait été tiré seulement deux à trois ans après le réaménagement, ce qui est peu en particulier pour ce qui concerne des boisements ;
- faire un bilan et une analyse critique des pratiques actuelles et voir leurs conséquences sur la qualité du réaménagement ;
- relever[8] les exemples positifs ou les problèmes rencontrés par les gestionnaires ou exploitants actuels ;
- faire la synthèse des cas rencontrés et proposer des améliorations possibles aux pratiques actuelles.

Au total, nous avons visité 15 carrières en réaménagement forestier[9], qui appartiennent à 4 grandes régions (figure 1) :

– l'Ile-de-France :
Bernières-sur-Seine [F1 m], Criquebœuf [F3 m], Ecuelles [F4 M], Guernes [F6 m], Moisson-Freneuse [F11 m].

– la région Est :
Marchaux [F9 M], Sierrentz [F13 m], Sundhoffen [F15 m].

– la région PACA :
Chateauneuf-les Martigues [F2 M], Gourdon [F5 M], Lafare-les-Oliviers [F7 M], St-Tronc [F12 M].

– la région Rhône-Alpes :
La Motte-Servolex [F8 Mo], Millery [F10 m], Sonnaz [F14 Mo].

Dans le codage utilisé dans ce livre, « m » signifie roche meuble, « Mo » moraine et « M » roche massive.

8 Par des photographies notamment.

9 Le processus de sélection des sites a été établi par le comité de pilotage de l'étude.

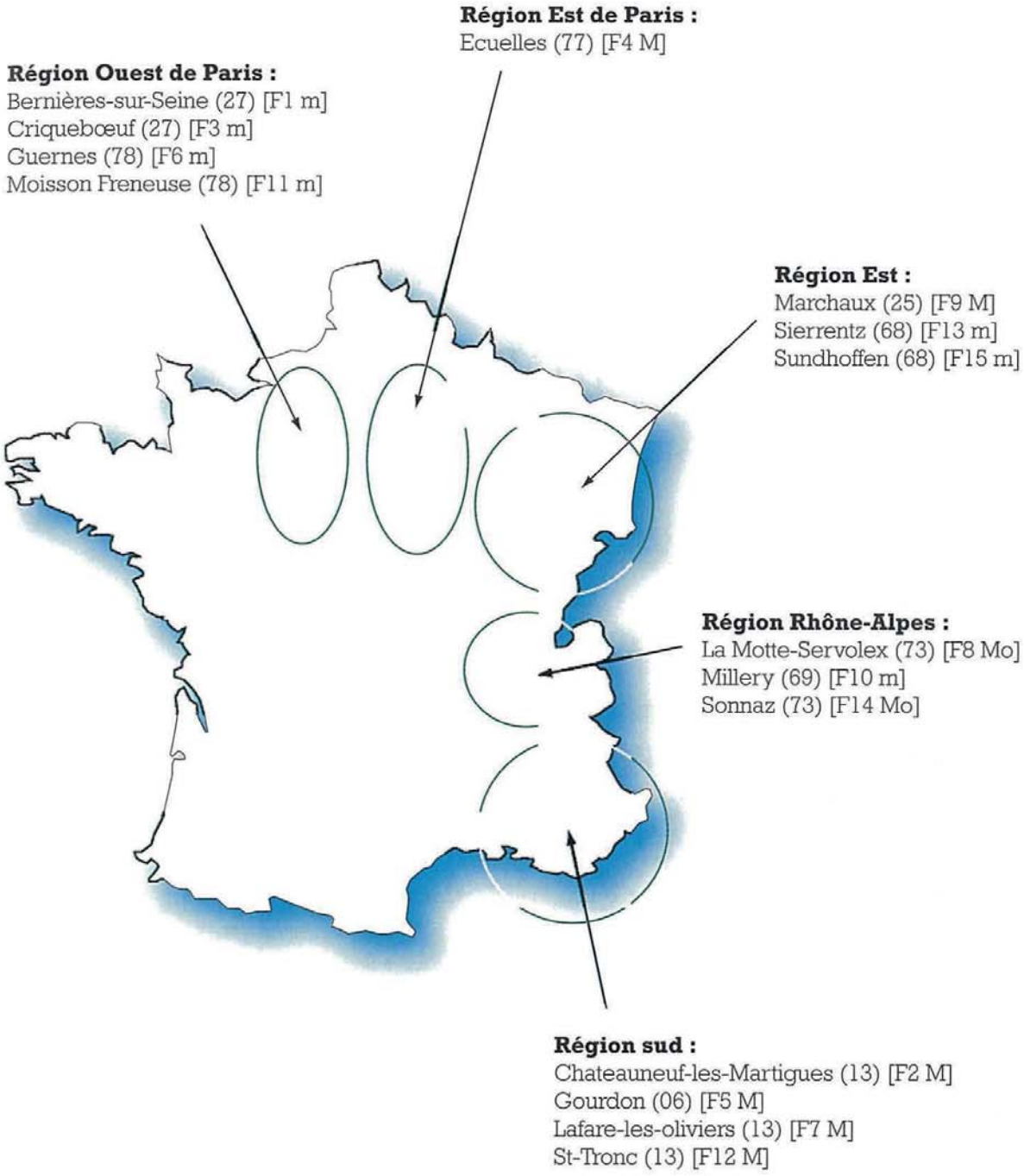


Figure 1 : Localisation des carrières à réaménagement forestier visitées pendant la phase de terrain.

PARTIE 1

GENERALITES

CHAPITRE 1

UN SOL FORESTIER

Dans ce premier chapitre, nous allons traiter de manière générale du sol forestier et des besoins des arbres en situation optimale et nous en tirerons les conclusions concernant les travaux de réaménagement de carrières afin que la pérennité des boisements mis en œuvre soit assurée.

I - CARACTERISTIQUES D'UN SOL FORESTIER

Les principales caractéristiques des sols forestiers par rapport aux sols agricoles sont :

- l'absence de travail du sol ;
- l'importance des retombées de matière organique morte qui assurent à la fois une épaisseur de litière importante et un taux élevé de matière organique.

Ces deux caractéristiques s'expliquent par la pérennité et le volume de la végétation arborée.

Les sols forestiers en place ont une hétérogénéité spatiale plus forte que les sols agricoles en raison de l'absence de travail du sol pouvant estomper les différences.

1 - UN SOL PROFOND

Un sol forestier fertile se caractérise par les propriétés suivantes [5] :

- une bonne richesse en éléments nutritifs ;
- une réserve en eau qui assure l'alimentation hydrique des arbres pendant l'été ;
- une bonne aération ;
- une porosité qui permet un ressuyage rapide du sol ;
- une activité biologique forte qui favorise le bon fonctionnement du cycle de dégradation de la litière du sol.

Il va être structuré en horizons à caractéristiques différentes. Le profil schématique d'un sol forestier est composé (figure 2) :

- d'horizons très organiques (OL litière, OF horizon de fragmentation, OH horizon organique) ;
- d'un horizon organo-minéral (A riche en humus et très colonisé par les racines) ;
- d'un horizon minéral (B à activité biologique faible mais quand même prospecté par quelques racines) ;
- du sous-sol non exploité par les végétaux

La plupart des problèmes de fertilité des sols forestiers proviennent d'un espace racinaire (volume de sol que peuvent prospecter les racines des arbres) insuffisant. Les racines des

arbres vont exploiter le sol plus profondément que des cultures annuelles. On considère généralement qu'elles vont descendre, si la nature du sol et du sous-sol le permet, jusqu'à 1,50 à 2,00 mètres de profondeur.

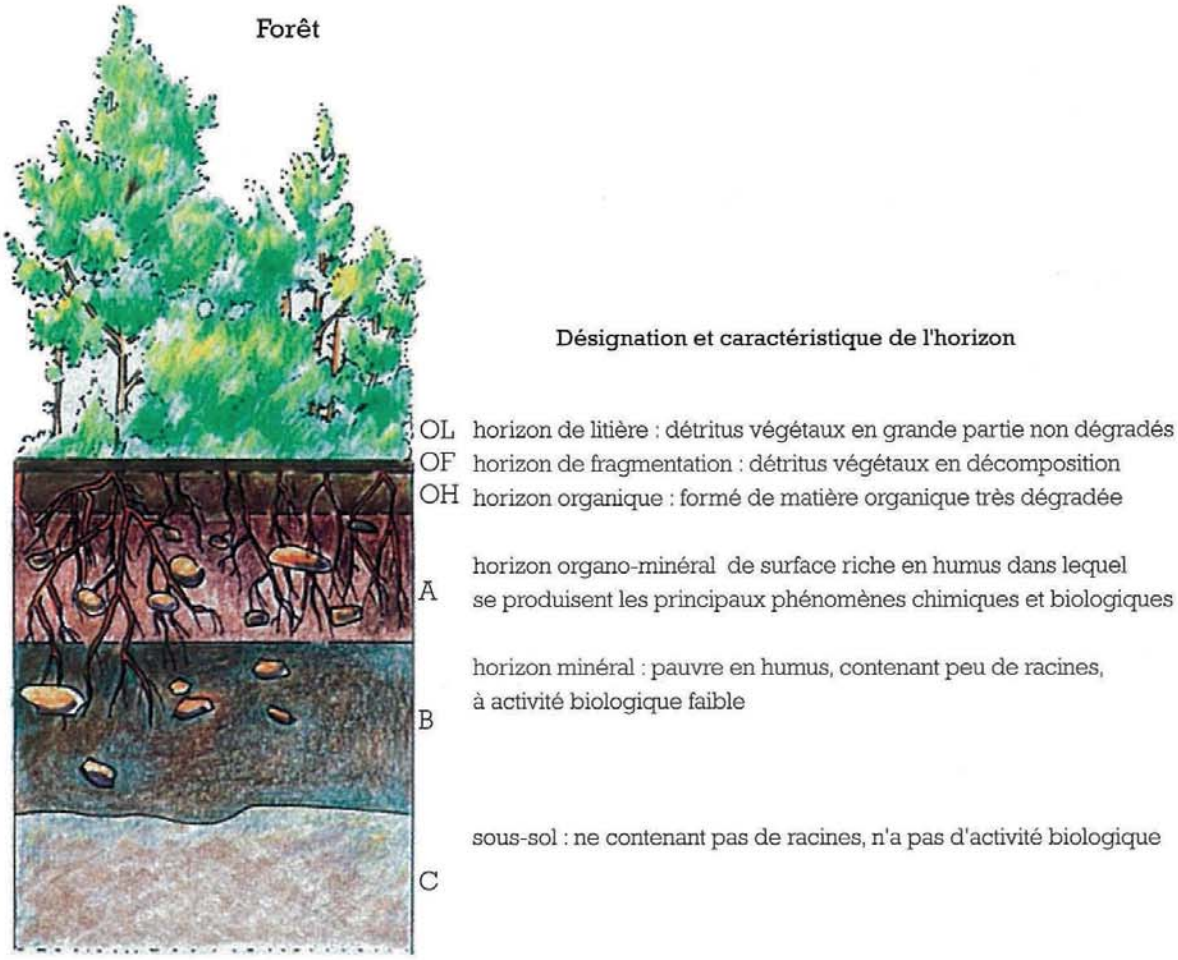


Figure 2 : Structure d'un sol forestier [d'après 5].

Une telle profondeur de sol utilisable par les racines est nécessaire au développement et à la croissance des arbres jusqu'à leur taille adulte. En effet, un espace racinaire limité permettra l'installation des plants, le début de leur croissance, mais leur mortalité surviendra à 5, 10 ou 20 ans selon la profondeur de sol que les racines auront pu utiliser.

La plupart des facteurs limitant la fertilité des sols forestiers reconstitués ou en place, proviennent de l'exiguïté de l'espace racinaire [5].

Ils peuvent être dus (figure 3) :
- soit à une barrière physique imperméable aux racines : rocher non fissuré, zone compacte dans le sol ;
- soit à une barrière d'eau stagnante défavorable aux racines : zone mouillante au-dessus d'une zone de compaction, couche d'eau stagnante au-dessus d'un niveau imperméable.

Les facteurs suivants limitent l'espace racinaire :

Rocher
Les racines des arbres pénètrent certes dans les fissures de la roche, mais ces stations sont arides et sans infiltration latérale permanente d'eau. Si le sol au-dessus du rocher est superficiel, seules les essences les plus frugales survivent.

Glaise compacte
Une couche de glaise compacte constitue un obstacle infranchissable pour les racines de nombreuses essences, à cause de sa résistance mécanique ou de son aération déficiente. Certaines essences comme le chêne s'accomodent des sols glaiseux.

Eau stagnante
L'eau stagnante au-dessus de couches imperméables est en général mal oxygénée et hostile à la vie. Peu d'essences la supportent (p.ex. aulne glutineux).

Zones compactes dans le sol
En répandant lors de la remise en état des lieux des matériaux humides et plastiques, on le compacte. Les précipitations ne s'infiltrent plus en ces endroits qui deviennent vite mouillants.

Surface du sol compactée
En Suisse, beaucoup de sols sont compactés, quand ils sont humides, par la circulation d'engins lourds. Ce compactage affecte parfois plusieurs décimètres d'épaisseur. Des terrains en friche peuvent être rendus imperméables par les précipitations qui colmatent les pores en entraînant des particules fines (sable fin, limon, argile). C'est pourquoi il faut engazonner au plus vite les dépôts de terre végétale et les sols récemment mis en place.

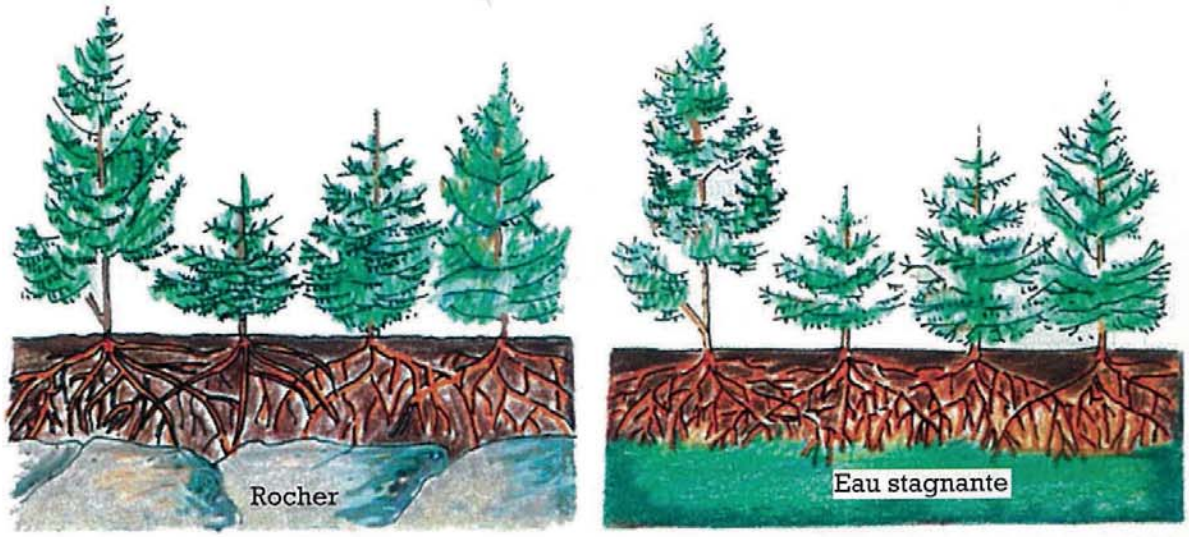


Figure 3 : Facteurs de réduction de l'espace racinaire [d'après 5].

2 - UN SOL BIEN AÉRÉ ET À BONNE RÉSERVE EN EAU

Pour assurer une bonne croissance des arbres, les sols doivent à la fois être fertiles, bien aérés et avec un bon pouvoir de rétention en eau. Certaines essences (frêne et merisier) nécessitent une réserve utile d'au moins 200 mm. On considère généralement [5] qu'un sol optimal doit contenir environ :
- 50 % en volume de matière solide ;
- 10 à 15 % en volume de pores grossiers[10] ;
- 35 à 40 % en volume de pores moyens et fins[11].

Une teneur en argile supérieure à 40 % donne un sol asphyxiant pour les racines, de même qu'une teneur en limons supérieure à 50 %. Un taux de sable supérieur à 70 % correspond à un sol déstructuré qui se dessèche facilement.

Un sol à trop fort pourcentage de cailloux aura une réserve en eau faible et ne permettra pas un ancrage suffisant du système racinaire des arbres, entraînant un manque de stabilité du peuplement en cas de tempête.

Le principal facteur limitant la productivité des sols forestiers est leur réserve utile en eau accessible aux racines des arbres. Elle dépend donc à la fois de la profondeur prospectable par les racines, de la texture du sol, de sa porosité et de la teneur en cailloux. Les barrières à la pénétration des racines sont soit des couches compactées du sol ou de la roche soit une nappe d'eau stagnante.

3 - UN SOL À FORTE ACTIVITÉ BIOLOGIQUE

De par l'importance des chutes de feuilles mortes, branches et rameaux, les sols forestiers sont riches en matière organique et sont le siège d'une activité biologique intense. La faune et la flore du sol assurent, en effet, la fragmentation, l'enfouissement, la décomposition et l'incorporation de la matière organique morte de la litière pour la dégrader sous forme d'éléments assimilables par les plantes. Un sol forestier fertile a un cycle de dégradation de la litière rapide (en 1 à 2 ans).

La faune du sol comprend les lombriciens (20 à 250 g/m^2), les enchytréides, les gastéropodes, les petits arthropodes (cloportes, myriapodes, collemboles, acariens oribates, insectes), les nématodes. La flore du sol a un rôle tout aussi important que la faune, elle comprend les bactéries et les champignons. Certains de ces champignons et bactéries sont libres dans le sol alors que d'autres vivent en symbiose (ils forment une association) avec les racines des arbres et sont indispensables à leur croissance. Les deux principales symbioses du sol sont les symbioses mycorhiziennes entre un champignon et un végétal et les symbioses fixatrices d'azote entre une bactérie et un végétal [52].

---

10 Les pores grossiers ont un diamètre supérieur à 0,03 mm, ils permettent l'infiltration rapide de l'eau de pluie en profondeur. Ils ont également un rôle dans l'aération du sol.
11 Les pores moyens ont un diamètre compris entre 0,002 et 0,03 mm. Ils emmagasinent l'eau que les plantes pourront utiliser, les pores de diamètre inférieur à 0,002 mm captent de l'eau qui ne pourra pas être restituée aux plantes.

a) LES SYMBIOSES MYCORHIZIENNES

Dans cette symbiose, la plante fournit au champignon des nutriments organiques et énergétiques (des sucres) fabriqués lors de la photosynthèse et le champignon apporte à la plante des sels minéraux (phosphore et azote en particulier) qu'il a extrait de la solution du sol.

Cette symbiose est efficace car :
- l'extension du champignon mycorhizien est plus forte que celle des racines. La surface d'absorption, mais aussi le volume de sol prospecté, sont fortement augmentés[12] ;
- les mécanismes d'absorption des nutriments minéraux par le champignon sont beaucoup plus performants que ceux des racines ;
- le champignon peut minéraliser des composés organiques (contenant de l'azote et du phosphore) que la plante ne peut pas assimiler directement.

Détail de racine mycorhizée avec Hebeloma [photo pépinière Robin]

Vue macroscopique d'une mycorhize [photo J. Garbaye]

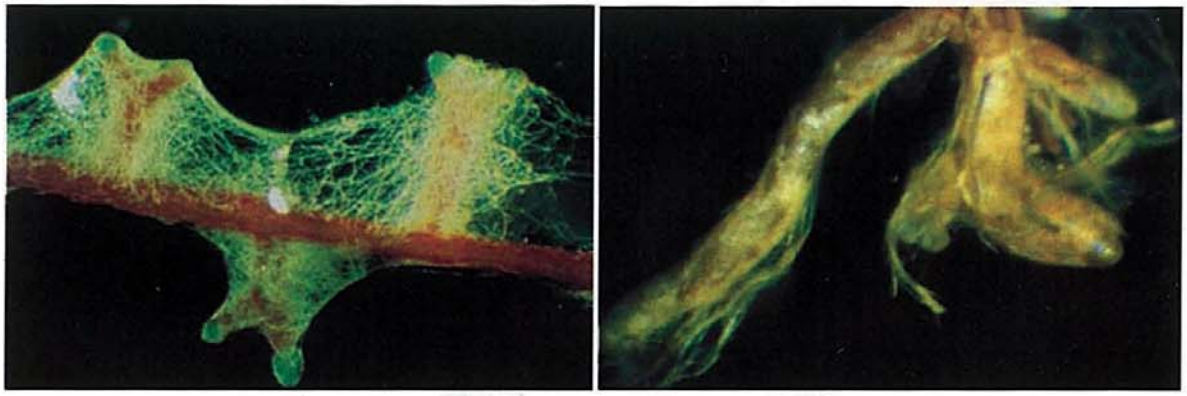


Figure 4 : Photos de racines mycorhizées.

Cette association a une très grande importance dans les conditions où l'arbre seul souffrirait de carence. A l'opposé, dans des sols riches (par exemple des sols forestiers ayant reçu des amendements organiques) les champignons mycorhiziens disparaissent [52].

b) LES SYMBIOSES FIXATRICES D'AZOTE

Plus des deux tiers de l'azote fixé dans la biosphère le sont par les bactéries symbiotiques des végétaux [52]. Dans le sol, les deux principales symbioses en zone tempérée sont celles entre légumineuses et bactéries de la famille des Rhizobiacées (les Rhizobium) et

12 Le diamètre du mycelium du champignon est plus faible que celui des racines, les filaments du mycelium peuvent donc pénétrer des pores plus petits du sol et donc accéder à de l'eau du sol inaccessible aux racines.

celles entre des plantes ligneuses de plusieurs familles et des bactéries filamenteuses, des actinomycètes[13], du genre Frankia.

** LES SYMBIOSES AVEC RHIZOBIUM*

Dans le cas des légumineuses, il se forme sur les racines une nodosité qui est un organe spécifique engendré par l'interaction entre la bactérie et la racine. La spécificité de la relation symbiotique est très variable, elle peut être très étroite (une espèce végétale et une espèce spécifique de Rhizobium) ou très large (une espèce de Rhizobium nodulant avec plusieurs espèces végétales ou une espèce végétale hôte de plusieurs espèces de Rhizobium).

La nodulation se déroule en quatre étapes :
- l'établissement du contact symbiotique entre le Rhizobium du sol et la plante (par des sécrétions racinaires qui stimulent la multiplication du Rhizobium) ;
- l'invasion du poil absorbant[14] par le Rhizobium (étape d'infection) ;
- le développement du nodule par prolifération des cellules de la racine ;
- le fonctionnement du nodule par formation d'une molécule propre à la symbiose (la leghémoglobine).

Dans la nodulation, certaines souches sont seulement infectieuses, elles forment de petits nodules de couleur pâle, non fonctionnels. Les autres souches sont efficaces, elles produisent un nodule actif fixateur d'azote atmosphérique.

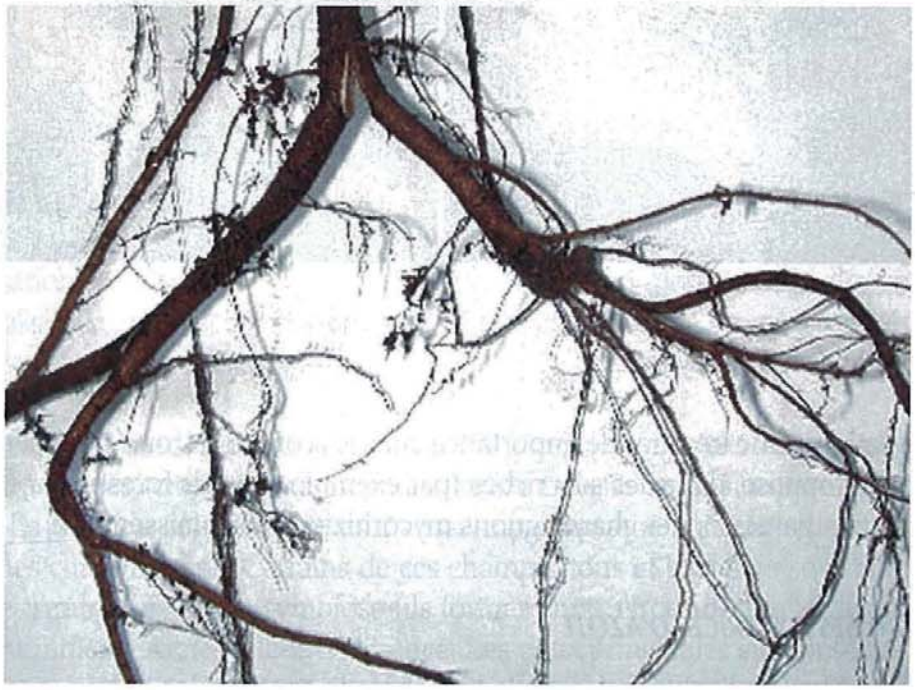


Figure 5 : Une racine nodulée par Rhizobium [photo Cleyet Marel].

13 Malgré leur nom trompeur, les actinomycètes ne sont pas des champignons mais des bactéries qui forment des filaments ramifiés qui ont été pris jusqu'en 1964 pour du mycelium de champignon.

14 De nombreux poils absorbants existent à l'extrémité de chaque racine, dans les 2 à 3 cm où se produit la croissance de la racine.

* *LES SYMBIOSES À FRANKIA*

Les symbioses actinorhiziennes sont réalisées entre le genre Frankia et 24 genres d'arbres ou arbustes appartenant à 8 familles. En zone tempérée, les principales familles concernées par cette symbiose sont les Bétulacées (l'aulne), les Eléagnacées (olivier de Bohème, argousier) et les Rosacées (ronces). A la différence des symbioses à Rhizobium qui ne se produisent qu'avec une seule famille de plantes, les symbioses à Frankia se produisent dans des familles éloignées. Le point commun entre les espèces qui créent des symbioses avec Frankia, est leur caractéristique écologique d'être capables de se développer sur des sols à fertilité azotée restreinte. Leur rôle est très important dans la colonisation des sols bruts minéraux.

Contrairement aux Rhizobiums qui ne peuvent fixer de l'azote qu'au sein d'un nodule, les cultures pures de Frankia peuvent fixer de l'azote à l'air libre. De la même manière, des Frankia se retrouvent en grande quantité dans le sol à proximité de racines de bouleaux (famille des Bétulacées comme les aulnes) et peuvent probablement fixer de l'azote sans symbiose avec le bouleau, mais enrichir le sol.

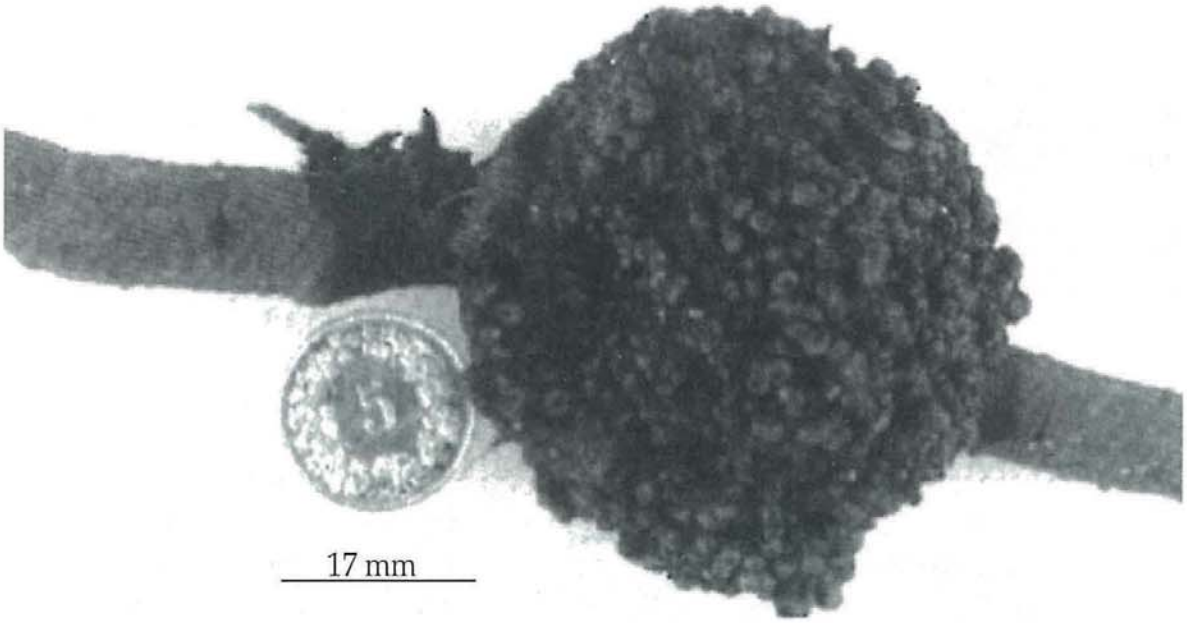


Figure 6 : Nodule actinorhizien chez l'aulne glutineux [52, photo M. Aragno].

Comme pour le Rhizobium, l'infection se produit au niveau des poils absorbants des racines. Il existe également des souches infectieuses non efficaces et des souches efficaces.

Qu'il s'agisse de symbiose à Rhizobium ou à Frankia, il est indispensable que dès la sortie de la radicelle, elle soit dans un substrat contenant la bactérie symbiotique puisque c'est dans la zone de croissance[15] de la racine que l'infection se produit. Ce point sera très important pour la production de plants mycorhizés.

15 Les poils absorbants se situent très près de l'extrémité de la racine.

De nombreux arbres créent des associations symbiotiques avec des champignons, des mycorhizes qui permettent une meilleure nutrition en éléments fertilisants et en eau de l'arbre. Dans des situations de sols pauvres, seuls des arbres mycorhizés peuvent se développer.

Les légumineuses (herbacées et arborées) et diverses plantes pionnières créent des associations avec des bactéries fixatrices d'azote atmosphérique (Rhizobium ou Frankia) ce qui leur permet de se développer sur des sols dépourvus d'azote et de l'enrichir par les retombées de litière riche en azote organique.

II - LES BESOINS DES ARBRES

A - LES BESOINS PHYSIOLOGIQUES DES ARBRES

La longue durée de croissance et de vie des arbres nécessite un milieu apte à fournir au jeune plant tout ce dont il a besoin pendant plusieurs décennies. En ce qui concerne les nutriments, à partir de quelques années, un cycle se met en place. Le recyclage biologique des éléments végétaux morts (feuilles, aiguilles, écailles de bourgeon, petits rameaux...) produits par l'arbre l'année n, permet son alimentation l'année n+1 ou n+2 pour produire de nouvelles feuilles. Par contre, les besoins en ancrage racinaire, en volume de sols à prospecter et en air doivent être uniquement satisfaits par le sol en place sans possibilité de remédier à un éventuel défaut.

1 - UN ESPACE RACINAIRE IMPORTANT

Nous avons déjà souligné qu'un sol forestier doit être profond. En effet, l'arbre doit explorer un volume racinaire important. De l'ordre de 1 à 3 mètres en profondeur et plus large que le diamètre de l'arbre en répartition latérale (figure 7).



Figure 7 : Schéma d'un appareil racinaire.

Ceci dépend cependant des espèces (figure 8), et en particulier de leur place dans la succession végétale (paragraphe B).

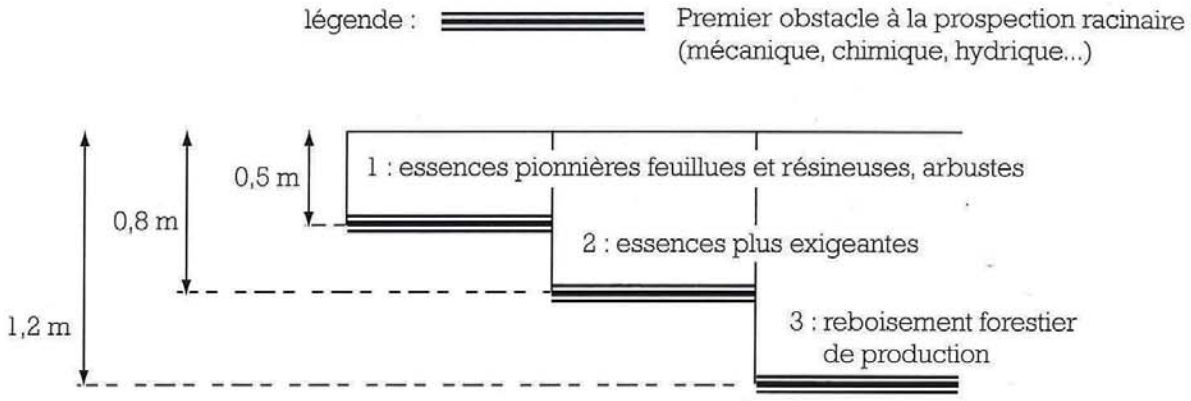


Figure 8 : Différentes profondeurs d'appareils racinaires.

Ainsi, les espèces pionnières et les arbustes pourront se contenter d'un sol prospectable profond de 0,50 m. Les espèces de transition (douglas[16], érables, tilleuls, charmes) auront besoin de 0,80 à 1 m de sol meuble et les reboisements forestiers de production (peupliers, chênes, hêtres) nécessiteront 1,20 m de profondeur de sol [TPG 2]. Le pin laricio de Corse peut développer des racines jusqu'à 1,5 m de profondeur.

Un sol forestier apte à porter des arbres à croissance correcte et un peuplement stable doit être suffisamment profond pour permettre une prospection par les racines sur 0,50 à 1,20 m de profondeur. Tout compactage ou engorgement par des nappes stagnantes doit être évité dans cette zone du sol.

2 - UNE AÉRATION ET UNE ALIMENTATION EN EAU SUFFISANTES

Le bon fonctionnement des racines et des organismes symbiotiques associés nécessite un sol bien aéré et l'absence de périodes d'engorgement par l'eau du profil du sol. En effet, les racines sont incapables d'absorber l'oxygène dissous dans la solution du sol[17], elles ont une respiration par échanges gazeux directement à partir de l'atmosphère du sol (c'est à dire par l'air présent dans les pores du sol à diamètre supérieur à 8 microns) [24]. En outre, les mycorhizes qui les alimentent en eau et éléments minéraux ont, elles aussi, des besoins importants en oxygène gazeux.

Ainsi, le sol où se développent les racines doit être à l'abri des immersions dues aux battements de la nappe phréatique. Les jeunes plants forestiers en période de végétation ne résistent pas à une immersion prolongée pendant quelques semaines.

La vie biologique du sol favorise une bonne aération et de bonnes capacités de ressuyage.

16 Espèce d'origine étrangère beaucoup utilisée en reboisement.
17 Les peupliers sont capables temporairement d'absorber de l'oxygène dissous, ce qui explique leur meilleure résistance à la submersion et à l'engorgement temporaire du sol.

Les besoins en eau des arbres sont importants en raison de l'importante évapotranspiration du feuillage en journée sèche et chaude. Dans l'alimentation en eau des arbres, trois phénomènes sont en jeu au niveau du sol [24] :
- la réserve utile de l'espace racinaire prospectable par les racines ;
- les potentialités de reconstitution de cette réserve utile ;
- la diminution des pertes par évapotranspiration.

La réserve utile doit être la plus grande possible, elle est fortement liée au volume de l'espace racinaire et aussi à la texture de cette zone de sol (paragraphe I - 1). Un sol fertile doit posséder une réserve en eau suffisante (entre 50 mm pour les espèces les plus résistantes à la sécheresse, jusqu'à 200 mm pour le frêne et le merisier) pour permettre à l'arbre de résister à des périodes de sécheresse[18]. Cependant, il est fondamental que cette réserve potentielle soit effectivement remplie d'eau au moment où les besoins des arbres s'expriment. Il faut que les réserves se reconstituent à chaque pluie, par infiltration. Dans certaines régions les événements pluvieux sont violents (et peuvent se produire en été), il est très important dans ce cas, que les fortes quantités d'eau tombées en peu de temps puissent s'infiltrer dans le sol et non pas ruisseler en provoquant une érosion. Ce sont surtout l'état de surface du sol, la topographie du site et éventuellement le sens des plantations (perpendiculaires à la pente) qui peuvent retarder la circulation de l'eau en surface et lui permettre de mieux s'infiltrer. Nous reviendrons sur ce point au niveau des réaménagements de banquettes en zone méditerranéenne.

La diminution des pertes par évapotranspiration est principalement liée à la limitation de la concurrence pour l'eau. En effet, pour que la réserve en eau profite au jeune plant, il faut limiter la végétation herbacée pendant les premières années suivant la plantation car la concurrence pour l'eau entre les plants et le tapis herbacé se produit souvent au détriment des arbres et provoque des mortalités importantes ou des diminutions de croissance.

La figure 9 montre une différence de taille importante entre deux plants de merisier de même âge (5 ans). Celui de droite[19] n'a pas été soumis à la concurrence herbacée (des désherbages chimiques annuels ont été pratiqués depuis sa mise en place sur un diamètre de 1 m autour du plant), celui de gauche[20] a eu sa croissance réduite par la concurrence des herbacées qui ont été laissées en place.

La réserve en eau utile du sol est le principal facteur limitant la survie et la croissance des plants forestiers mis en place. Elle doit être de l'ordre de 100 à 200 mm selon l'exigence des espèces. L'eau disponible pour la plante dépend de la capacité du sol à la stocker (la réserve utile) mais aussi de la capacité du sol à recharger cette réserve lors des pluies (une bonne infiltration est nécessaire) et surtout des autres plantes qui utiliseront ce stock d'eau (concurrence herbacée). La suppression des plantes herbacées dans un rayon de 0,50 m autour du plant améliore grandement les chances de survie et la croissance du plant.

18 Des travaux anglais [43] montrent que les arbres souffrent en moyenne de 8 mois de déficit hydrique par an (au lieu de 3 mois pour les prairies) en raison du fort pourcentage du volume des pluies qui est intercepté par le feuillage et qui s'évapore avant d'atteindre le sol.
19 Hauteur à 5 ans : 3 m.
20 Hauteur à 5 ans : 1,30 m.

Plant ayant subi la concurrence herbacée *Plant régulièrement désherbé*



Figure 9 : Effet de la concurrence herbacée sur la croissance de merisiers de 5 ans [43].

3 - UNE FERTILITÉ SUFFISANTE

En exploitation forestière à but de production sur sol en place, on considère les valeurs suivantes [TPG 2] comme seuil en dessous duquel une fertilisation est nécessaire :

- 1,5 pour mille pour l'azote ;
- 0,5 à 0,15 pour mille pour P_2O_5 ;
- 0,15 pour mille pour K_2O ;
- 0,05 pour mille pour MgO.

En reboisement sur sol en place en cas de teneurs inférieures à ces seuils, des apports d'engrais sont pratiqués en utilisant des formes d'engrais peu solubles afin de permettre la mise à disposition progressive des éléments minéraux aux plantes. L'azote n'est pas recommandé en raison des risques de brûlure de racines

et de développement accru de la végétation herbacée. Des apports de phosphore et de potasse sont parfois effectués (sous forme de phosphate naturel, de scories, de sulfate de potasse) aux doses suivantes :
- 50 à 100 kg/ha de P_2O_5 soit 150 à 300 kg de phosphate naturel ;
- 30 kg/ha de K_2O soit 60 kg de sulfate de potasse.

En cas de faible fertilité du sol, des apports d'engrais phosphatés et potassiques peuvent être effectués sous forme peu soluble (phosphate naturel, scories, sulfate de potasse). Les apports d'azote sont déconseillés.

4 - DES ESSENCES À BESOINS VARIABLES

Les arbres ont des besoins et des tolérances variables en terme de pluviométrie, de résistance à la sécheresse, de température de l'air ou du sol, d'humidité de l'air, de résistance aux gelées...

Selon ces critères, la France est traditionnellement découpée en six zones climatiques qui permettent, région par région, de connaître la liste des espèces les plus adaptées (figure 10).

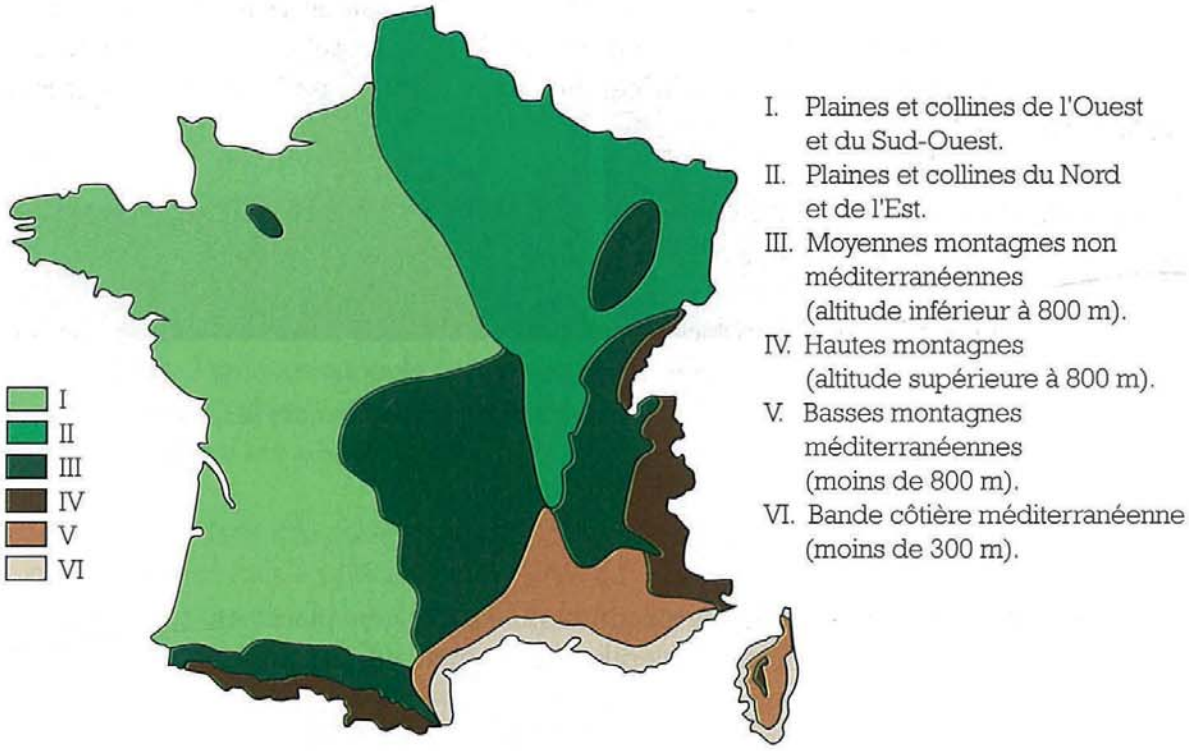


Figure 10 : Les régions climatiques sylvicoles [d'après TPG 2].

Le système d'enracinement de l'espèce doit aussi intervenir dans le choix selon la nature du sol :
- une espèce au système racinaire traçant ne sera pas installée sur un sol très perméable. Car ce type de sol étant très drainant, sa surface sera très sèche en raison de l'infiltration très rapide des précipitations et le plant sera soumis à un risque de dépérissement important ;

- une espèce à système racinaire pivotant et profond ne sera pas installée sur une banquette de roche compacte même recouverte de terre végétale (figure 11).

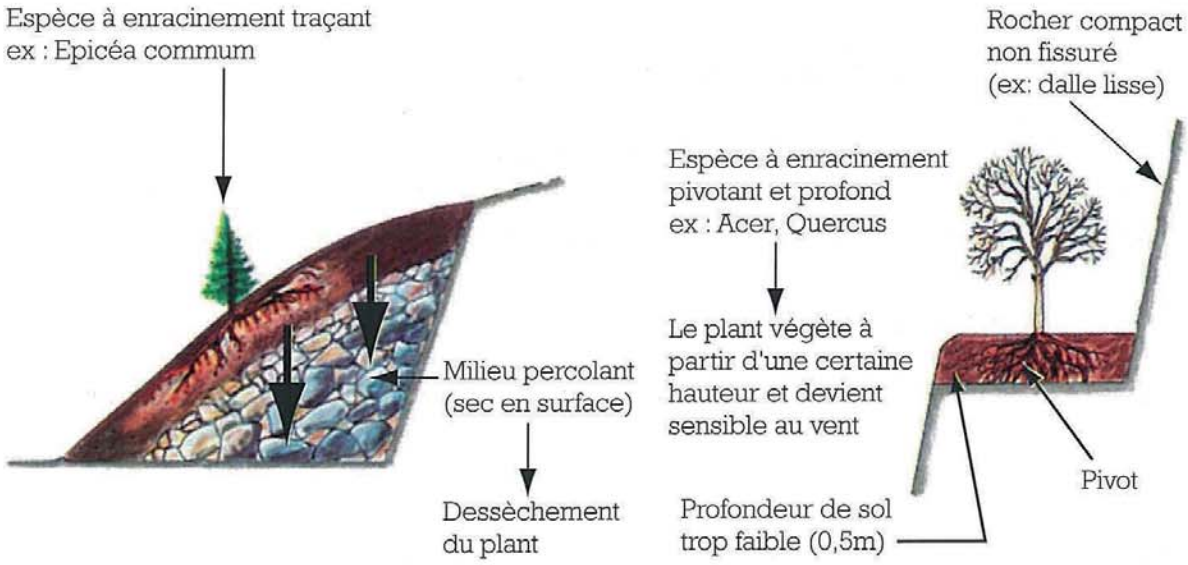


Figure 11 : Incompatibilité du système d'enracinement et du sol [d'après 75].

Se conjuguent aux régions climatiques, des exigences ou des intolérances à certains types de sols, des sensibilités au microclimat (importance de l'exposition et de la connaissance des risques de gelées tardives en fin de printemps) qui nécessitent de bien connaître la nature finale du sol reconstitué afin de choisir de manière optimale les essences à replanter (figure 12).

Les principaux facteurs limitant du sol concernent l'hydromorphie, la réserve utile en eau, le taux de calcaire actif, le pH.

L'hydromorphie des 0,50 m de surface est défavorable à de nombreuses espèces : sapin, épicéa, pin laricio de corse, pin maritime, chêne rouge, hêtre, noyer...

Le pin noir d'Autriche supporte les sols hydromorphes (bonne survie mais faible croissance cependant).

Des réserves utiles en eau importantes (150 à 200 mm) conditionnent la réussite de plantations de nombreuses espèces : sapin, douglas, mélèze, chêne rouge, hêtre, frêne et merisier (très sensibles à la sécheresse estivale, une réserve utilise de 200 mm au moins leur est nécessaire), noyer...

Le pin laricio de Corse peut se développer sur sol à faible réserve utile à condition qu'il n'y ait pas d'obstacle à la prospection de ses racines jusqu'à 1,5 m.

Les sols calcaires sont défavorables à un certain nombre d'espèces qui ne supportent pas la présence de calcaire actif dans le sol et développent des chloroses (jaunissement des feuilles ou des aiguilles) qui peuvent aller jusqu'à la mort de l'arbre. Pour certaines espèces si les 0,5 m de surface sont décarbonatés, elles peuvent se développer sur un sol à roche mère calcaire : douglas, chêne rouge...

D'autres ne supportent pas du tout un sol calcaire : pin laricio de Corse, pin maritime, noyer...

L'épicéa et le merisier supportent les sols carbonatés si ils disposent d'une bonne réserve en eau mais ils ont une meilleure croissance sur sol non carbonaté. Certaines provenances de pin noir d'Autriche supportent bien le calcaire actif ainsi que le pin sylvestre mais avec une croissance ralentie cependant. Le hêtre est indifférent à la teneur en calcaire du sol.

Le pH peut être un facteur limitant pour certaines espèces alors que d'autres supporteront une grande gamme de pH. Le douglas, le pin laricio de Corse et le cèdre de l'Atlas ont une préférence pour des pH acides (entre 4 et 6) ; le frêne pour des pH de 6 à 6,5.

Le mélèze, le pin sylvestre sont indifférents au pH, le merisier supporte une gamme large de 4 à 7,5.

Dans la figure 12 ci-dessous indication des types de sol : C : calcaire - L : sol lourd - S : siliceux - H : station humide - l : sol léger - c : station chaude - ( ) devrait si possible être abrité

Région	Feuillus	Type de sol		
I	Alisier torminal		SlH	SL
	Aulne blanc	C		
	Aulne glutineux			SL
	Charme			SL
	Châtaignier		Sl	
	Chêne rouge		Sl	SL
	(Hêtre)	CH	SlH	
	Merisier	C	Sl	SL
	Noyers	C	SlH	SLH
	Peupliers		SlH	SLH
	Robinier	C	SlH	SL
	Saules (alba, viminalis)	C	Sl	SL
	Sorbier commun	C		SL
II	Alisier torminal		SlH	SL
	Aulne blanc	Cc		
	Aulne glutineux		Sl	SL
	Bouleau verruqueux	C	Sl	
	Bouleau pubescent			SL
	Charme			SL
	(Hêtre)	CH	Sl	
	Merisier	C	Sl	SL
	Peupliers		Sl	SL
	Robinier	C	SlH	
	Tilleul	C		

Région	Résineux	Type de sol		
I	(Douglas)*	CH	Sl	
	Mélèze neurolepsis	CH	Sl	SL
	Epicéa de Sitka		SlH	SLH
	Pin Laricio	C	Sl	
	Pin noir	Cc		
	Pin maritime		Sl	SL
	Pin sylvestre		Sl	SL
	Pin Weymouth		Sl	SL
	Sapin de Nordmann	C	Sl	SLc
	(Sapin géant)	CH	SlH	
	* sauf bande côtière			
II	Epicéa commun	C	Sl	SL
	Mélèze neurolepsis	CH		SL
	Pin Laricio de Corse			Slc
	Pin noir	Cc		
	Pin sylvestre		Sl	SL
	(Sapin géant)	CH	Sl	SL
	Sapin de Nordmann	C		Slc
	(Sapin pectiné)	C	Sl	SLc

Région	Feuillus	Type de sol		
III	Alisier blanc	C		
	Alisier torminal		SlH	SL
	Aulne blanc	C	Sl	SL
	Charme			SL
	Châtaignier			Slc
	(Hêtre)	CH	Sl	
	Merisier	C	Sl	SL
	Noyer	C	SlH	SLH*
	Robinier	C	SlH	
	Sorbier des oiseleurs	C	SL	
	Tilleul	C		
IV	Bouleau verruqueux		Sl	
	Erable à f d'obier	C		Slc
	Erable plane	C	Sl	SL
	Frêne			SL
	Merisier	C		Slc
	Sorbier des oiseleurs	C		SL
V	Alisier blanc	C		
	Aulne blanc	C	Sl	
	Aulne à f. en cœur	C	Sl	
	Châtaignier		Sl	SL
	Chêne-liège		SlH	SL
	Chêne vert	C	Sl	
	Micocoulier	C	Sl	SL
	Marronnier	C	Sl	SL
	Mûrier	CH	S	
	Noyers	CH	SlH	SLH
	Platane		Sl	SL
VI	Aulne à f. en cœur	C	Sl	
	Charme houblon	CH	Sl	SL
	Chêne-liège		Sl	SL
	Chêne vert	CH	Sc	SLc
	Chêne-liège		SlH	SL
	Eucalyptus		Slc	SLc
	Micocoulier	CH	Sl	
	Platane		Sl	SL

Région	Résineux	Type de sol		
III	(Douglas)	CH	SlH	
	Epicéa commun	CH	Sl	SL
	Pin Laricio de Corse	C		Slc
	Pin noir	Cc		
	Pin sylvestre		Sl	SL
	Pin Weymouth			SL
	(Sapin pectiné)	CH	SlH	SL
	Sapin de Nordmann	Cc	Sl	
	* au sud seulement			
IV	Epicéa commun	C	Sl	SL
	Mélèze d'Europe*	CH	Sl	SL
	Pin à crochets	C	Sl	SL
	Pin sylvestre		Slc	SL
	(Sapin pectiné)**	C	Sl	SL
	* au sud seulement			
	** au-dessous de 1500 m			
V	Cèdre de l'Atlas	C	Sl	SL
	Pin Laricio de Corse	C	Sl	SL
	Pin maritime		Slc	SLc
	Pin noir	Cc		
	Sapin de Céphalonie	C	Slc	SLc
	(Sapin de Nordmann)		Sl	SL
	Sapin pinsapo	Cc		
VI	Cèdre de l'Atlas	CH		SL
	Cyprès de l'Arizona	C	Sl	SL
	Cyprès de Provence	C	Sl	
	Pin d'Alep	C	Sl	
	Sapin de Céphalonie	C	Slc	SLc
	Pin Laricio de Corse	CH	SlH	SL
	Pin maritime		Sl	SL
	Pin pignon		Sl	SL
	Sapin de Céphalonie	CH	SlH	
	Séquoia toujours vert			SL

Figure 12 : Tableau de synthèse d'essences utilisables en fonction de la région et du sol [d'après TPG 2].

Quand un catalogue des stations forestières existe dans le secteur[21], il est utile de s'y référer afin d'y positionner sa parcelle et de définir au mieux ses potentialités sylvicoles. En l'absence d'une typologie des stations utilisable, les facteurs écologiques suivants sont intéressants à connaître[22] :

- température de l'air : maximum, minimum, gels précoces d'automne et tardifs de printemps ;
- exposition : pente et orientation de la parcelle ;
- rayonnement solaire : ensoleillement moyen, nombre de jours ensoleillés ;
- vent : force et répartition statistique des vents (rose des vents) ;
- précipitations : quantité et distribution annuelle de pluie, neige, givre ;
- humidité de l'air : fréquence des brouillards ;
- dégâts sur la végétation : dégâts du gibier, présence de maladies et de ravageurs.

Cependant, arrêter la réflexion au choix des essences ne suffit pas, la région de provenance du plant aura également une grande importance. En effet, les espèces forestières présentent de grandes variations de comportement et de croissance en fonction de leur provenance (les espèces développent des écotypes adaptés aux conditions locales). En particulier, les caractéristiques phénologiques[23] des provenances telles le débourrement[24] précoce ou tardif sont d'une grande importance quand le plant risque d'être soumis à des gelées tardives au printemps. Les conditions de croissance en pépinière (chapitre 3) conditionnent également fortement le devenir des plants.

En zone méditerranéenne, la résistance au feu sera également à prendre en compte afin d'assurer la pérennité du peuplement. Ceci est particulièrement important si le boisement a lieu pendant l'exploitation du site afin de ne pas exposer aux risques d'incendie la carrière encore en activité. Ceci est vrai pour les espèces d'arbres mais aussi pour les éventuelles espèces arbustives ou herbacées accompagnant la plantation. En zone méditerranéenne, les plantes utilisées ne doivent pas laisser de résidus secs inflammables après leur période de végétation [Cleyet-Marel, com. pers.].

Le choix des essences à planter est complexe et doit être fait avec un expert forestier connaissant bien la région : le sol, le climat avec toutes ses composantes (gel, répartition des pluies...), l'état phytosanitaire des forêts, la pression des animaux et les essences (y compris les provenances) adaptées.

21 Les catalogues des stations forestières n'existent pas pour tous les secteurs et sont pour l'instant, non répertoriés de manière exhaustive.
22 Par analyse des données de la station météorologique la plus proche ou par enquête auprès de la population locale.
23 Les stades phénologiques traduisent le calendrier de la vie de la plante : époque d'ouverture des bourgeons, de la floraison, de la fructification, de la chute des feuilles... Ces caractéristiques sont liées à l'espèce, mais aussi à la provenance de l'arbre. Certains arbres ouvriront plus vite leurs bourgeons au début du printemps par exemple.
24 Chute des écailles protégeant la nouvelle pousse et ouverture du bourgeon.

B - LA SUCCESSION VEGETALE VERS LA FORET

Le reboisement d'un sol perturbé, comme celui reconstitué après l'exploitation de granulats, est équivalent à la mise en place naturelle d'une forêt sur un sol brut. Cette évolution d'un sol brut non boisé vers une forêt mature se produit de manière naturelle en plusieurs centaines d'années avec tout d'abord des espèces herbacées puis arbustives avant l'installation de plusieurs groupes d'essences forestières adaptées aux différentes conditions de sol, de lumière et de concurrence.

1 - LES ESSENCES PIONNIÈRES

La plupart des arbustes sont les premières espèces ligneuses à coloniser des sols bruts ; leur importance n'est pas à négliger en particulier pour leur capacité à limiter la concurrence herbacée tout en fournissant un ombrage pour les jeunes arbres qui germeront dessous et une litière souvent enrichissante. En outre, certaines espèces arbustives méditerranéennes sont fixatrices d'azote et peuvent permettre d'améliorer les sols (luzernes arborescentes par exemple).

Les premières espèces arborées à coloniser des sols bruts sont des espèces dites pionnières dont la dissémination est assurée par de petites graines produites massivement et dispersées par le vent ou les oiseaux. Il s'agit en particulier, des bouleaux, des aulnes, des saules, des frênes, des merisiers, des peupliers et des pins. Ces essences ont besoin de beaucoup de lumière pour se développer et sont capables de se contenter d'un sol pauvre. En particulier, les espèces fixatrices d'azote telles l'aulne ou le robinier peuvent s'installer sur des sols quasiment stériles. Les bouleaux grâce à des mycorhizes sont également présents sur des sols pauvres (par exemple en colonisation spontanée de terrils miniers).

Les feuilles des essences pionnières sont facilement dégradables et produisent une litière améliorante qui permet la production rapide d'humus nécessaire à l'installation d'espèces plus exigeantes.

2 - LES ESSENCES DE TRANSITION ET MATURES

Le peuplement pionnier améliore en quelques dizaines d'années le sol (augmentation de la fertilité, de la teneur en matière organique, de la structuration du sol, de la vie biologique...). Il ferme également le milieu par le développement des houppiers et diminue la lumière arrivant au sol. Ceci permet, au bout de 30 à 40 ans, la germination d'espèces plus exigeantes, dites de transition. Le développement des espèces de transition va peu à peu dominer les espèces pionnières et en modifiant les conditions d'éclairage, les éliminer car elles ne supportent pas l'ombre. Peu à peu, les espèces matures vont s'installer et dominer complètement le peuplement.

L'évolution naturelle d'un sol nu passe par l'installation de plantes herbacées, d'arbustes puis d'arbres. Les premières à s'installer sont des espèces pionnières disséminées facilement et dont les plants ont besoin de lumière pour se développer. Leur litière améliore le sol et leur couvert permet l'installation ultérieure d'espèces qui germent à l'ombre, les essences matures.

III - LES CONSEQUENCES SUR LE REAMENAGEMENT

Nous avons vu que les exigences des arbres nécessitent un sol de bonne qualité et ce sans correction possible après plantation. Le réaménagement devra donc être de très bonne qualité afin de remettre en place un sol apte à supporter une production ligneuse. Par ailleurs, le réaménagement forestier devra mimer et accélérer les phénomènes de succession végétale afin de fournir à chaque essence des conditions adaptées à ses besoins.

1 - LES CARACTÉRISTIQUES NÉCESSAIRES AU SOL RÉAMÉNAGÉ

Le sol reconstitué devra offrir aux plants une grande profondeur de sol prospectable donc meuble et accessible aux racines (figure 13). La manipulation de la terre devra être très soigneuse, être effectuée en condition sèche sans circulation d'engins sur les horizons remis en place afin qu'il n'y ait pas de zone de compaction dans au moins le premier mètre du sol.

Si une suspicion de compaction existe, un sous-solage croisé est nécessaire avant les travaux de plantation. Une fois les plants installés, il n'y a pas de correction possible permettant d'augmenter l'épaisseur du sol meuble.

La couche supérieure du sol[25], peut contenir des cailloux (diamètre supérieur à 5 cm) car ils peuvent améliorer le drainage et l'aération du sol sans poser de problèmes puisque la parcelle ne sera pas travaillée.

Afin d'éviter les risques d'engorgement de l'espace racinaire par les battements de la nappe phréatique, il est nécessaire d'établir la cote du terrain restauré au-dessus de la plus élevée des valeurs suivantes :
- 1 m au-dessus de la cote des plus hautes eaux connues ;
- 1,50 m au-dessus de la crue décennale.

Une étude hydrologique précise doit être effectuée afin de connaître au mieux les fluctuations saisonnières de la nappe. En effet, une immersion, même de courte durée, des zones actives des racines (c'est-à-dire de leur extrémité qui porte les poils absorbants et les associations symbiotiques) provoque l'arrêt de l'alimentation minérale et hydrique et la mort des racines. En période de végétation, une telle asphyxie des racines provoque la mort rapide des plants forestiers.

Le sol doit fournir une bonne réserve hydrique permettant aux arbres de supporter l'évapotranspiration des feuilles en période sèche et chaude. Une fraction granulométrique fine est donc indispensable.

25 D'une épaisseur de l'ordre du mètre.

Exigences	Conditions à respecter	Veiller à	Recommandations relatives aux réaménagements de carrières
Pénétrer ▲ Les racines doivent pouvoir ▼ **Respirer**	Absence d'obstacles : physiques	Sol et sous-sol meubles	Décompacter le sous-sol («rippage»...). Éviter le tassement (proscrire les engins à pneus, travailler par temps sec...).
	Absence d'obstacles : hydriques	Absence d'hydromorphie : Niveau et battement de la nappe	Étude hydrogéologique préalable indiquant la précision altimétrique avec laquelle les niveaux sont connus.
		Absence d'hydromorphie : Évacuation des eaux pluviales	Exutoire. Puits absorbants Pente du fond de carrière Assainissement. Drainage
	Sol poreux	Éviter le tassement superficiel	Proscrire l'utilisation d'engins à pneus (chargeur, pelle mécanique...). Travailler par temps sec.
S'alimenter en eau ▲ Le végétal doit pouvoir ▼ **S'alimenter en éléments nutritifs**	Ressources suffisantes en eau, véhicule des éléments nutritifs	Profondeur suffisante de sol prospectable par les racines	Examen du sol en place (description de profil), avant ouverture de la carrière. Déterminer cette profondeur, si possible avant l'ouverture de la carrière en utilisant notamment les données classiques de la bioclimatologie et de la pédologie.
	Éliminer la concurrence	Entretien	Prévoir l'entretien dès l'établissement du projet de réaménagement.
	Fertilité du sol	Préserver la ferilité	Examen du sol en place (description de profil) avant ouverture de la carrière. Préserver les horizons riches en matière organique (décapage sélectif). Ne pas maltraiter le sol lors des manutentions (proscrire le scrapper, travailler par temps sec...). Veiller aux conditions de stockage du sol décapé (horizon humifère en particulier...). Réduire le temps de stockage du sol (réaménagement à l'avancement, par tranches successives...).
		et	
		Compenser la perte de fertilité	Apport de matière organique (déchets organiques, engrais verts). Apport d'engrais.
	Éliminer la concurrence	Entretien	Prévoir l'entretien dès l'établissement du projet de réaménagement.

Figure 13 : Caractéristiques à respecter dans la reconstitution des sols forestiers [TPG 2].

Les sols forestiers nécessitant pour l'incorporation de la litière une faune et une flore du sol actives, il convient de préserver au maximum les horizons organiques et leur vie biologique afin que les cycles de dégradation de la litière et de transformation en éléments assimilables par les plantes redémarrent. Or le décapage sélectif de la terre végétale est parfois difficile sur une parcelle préalablement recouverte de forêt. En effet, la couche de terre contenant le maximum d'humus est souvent enserrée dans le réseau dense des racines des arbres et elle est souvent de faible épaisseur (de l'ordre de 0,20 m). C'est donc généralement un mélange de terre et de matériaux organiques morts (racines, petites souches, bois) qui est enlevé. Ce matériel est à stocker séparément en tas de faible hauteur non compactés afin d'éviter la fermentation anaérobie des matériaux organiques morts. En cas de réaménagement coordonné, si ce matériel est déposé immédiatement pour reconstituer une parcelle, on veillera à ce que tout le bois soit le plus proche de la surface. En effet, sa pourriture anaérobie peut dégager des substances dangereuses pour les eaux souterraines (des tanins et des phénols) [5].

Le sol reconstitué doit apporter une grande réserve utile en eau, une profondeur sans compaction ni engorgement d'au moins 1 m. Il doit être établi au moins 1,50 m au-dessus de la crue décennale, la connaissance des fluctuations de la nappe doit être la plus fine possible. Tout risque de compaction doit être évité, et au besoin un sous-solage avant plantation est nécessaire. Il doit présenter une fraction granulométrique fine afin d'augmenter ses capacités de rétention en eau.

2 - L'ACCÉLÉRATION DE LA SUCCESSION VÉGÉTALE

La plantation sur terrain remanié et nu d'espèces matures conduit souvent à des échecs ou à une production de faible qualité car les besoins des plants en ombre et en qualité de sol ne peuvent pas être assurés dans ces conditions.

Afin de parvenir rapidement à un peuplement mature d'espèces de rendement, il faut réussir à accélérer le processus naturel de la succession végétale. Pour cela deux solutions sont envisageables.

La première consiste à planter un peuplement d'espèces pionnières qui sera laissé en place pendant 30 à 40 ans. Cette phase pionnière permet de reconstituer les conditions de sol et de luminosité pour y introduire par la suite les espèces matures. Cette solution est la plus efficace pour assurer un retour optimal à une forêt de production. Elle est cependant très coûteuse puisqu'elle implique de revenir faire des travaux de plantation conséquents 30 à 40 ans après le premier réaménagement. Elle se prête donc mal au réaménagement forestier de parcelles n'appartenant pas au carrier puisqu'elle reporte à long terme les coûts de la reforestation. Elle peut être envisagée quand les parcelles sont la propriété du carrier et qu'il en conserve la gestion car elle pourra à long terme permettre une meilleure productivité.

La seconde possibilité est la mise en place en une seule fois d'une plantation mixte d'espèces pionnières et d'espèces de rendement. Ceci permet la création d'un peuplement abri où les espèces pionnières héliophiles vont se développer rapidement et ainsi produire un abri pour les espèces matures plantées en même temps au milieu d'elles. En outre l'ombrage créé, l'abri des essences pionnières permet :
- d'atténuer les variations climatiques (gel, chaleur, vent) en créant un microclimat plus

tempéré que sur un sol nu. Ainsi, sous un peuplement de bouleaux, en hiver la température est plus haute de 4°C et en été moins élevée qu'en terrain nu [5] ;
- le sol est amélioré du point de vue structure, fertilité, vie biologique et régime hydrique par les essences pionnières (de par leur fonctionnement racinaire, leurs associations symbiotiques et leur litière améliorante[26]) ;
- le peuplement pionnier limite le développement des herbacées donc la concurrence hydrique.

Au bout de 30 à 40 ans, les tiges des espèces matures vont dépasser celles des espèces pionnières qui déclineront en raison de la concurrence des espèces de rendement.

Les espèces pionnières utilisables sont entre autres, le bouleau, l'aulne, le tremble, divers saules, le sorbier des oiseleurs, le pin, le mélèze.

Afin de permettre la croissance d'espèces matures (se développant à l'ombre d'un couvert forestier), deux options sont possibles :
- un reboisement en deux temps, d'abord mise en place d'un peuplement d'essences pionnières qui sera enrichi au bout de 40 ans par une nouvelle plantation d'essences de production ;
- la mise en place d'un peuplement mixte associant essences pionnières et essences de production.

Les sols forestiers sont délicats à reconstituer en raison de la végétation pérenne qu'ils devront supporter et de l'absence de correction possible d'éventuels défauts une fois la plantation réalisée.

Les principaux points à assurer lors de la reconstitution du sol sont :

- une épaisseur de sol prospectable par les racines d'au moins 1 mètre ;
- une absence de compaction ;
- une aération suffisante ;
- une absence de stagnation d'eau dans l'espace racinaire.

Le choix d'espèces adaptées aux conditions pédoclimatiques locales et l'installation d'un peuplement d'abri doivent, si le sol a été mis en place dans de bonnes conditions, permettre l'installation d'une forêt de bonne qualité.

Les chapitres suivants détailleront les différentes étapes à respecter pour atteindre ce résultat.

26 Sauf dans le cas des pins.

CHAPITRE 2

PREPARATION DE L'EXPLOITATION

I - LE DEFRICHEMENT

Il n'est pas exceptionnel que les sites qui seront reboisés après exploitation du gisement soient des parcelles qui étaient boisées avant l'ouverture de la carrière. Dans ce cas, le défrichement avant exploitation est la première étape importante du projet de réaménagement car il va conditionner le décapage sélectif de la parcelle. Cette opération consiste à récolter le bois pour le vendre (grume) mais aussi, à exporter hors de la parcelle toutes les parties de l'arbre (branches, souche et racines).

Dans les cas de carrières massives en front de taille où la végétation existante n'a pas de valeur marchande, une destruction de la végétation peut avoir lieu par broyage [27] :

- par un broyage mécanique quand la pente est inférieure à 30% et pour une végétation de diamètre inférieur à 0,15 m (dans le cas contraire, un tronçonnage préalable des arbres de diamètre supérieur est nécessaire) ;
- par un débroussaillement manuel à la lame rotative portée à dos d'homme (lorsque la pente ou des rochers empêchent l'accès d'engins et pour des terrains accessibles sans danger, pente inférieure à 60%).

1 - LA RÉCOLTE DU BOIS

Il est important dès cette étape, de réfléchir aux conditions du reboisement :

- en étudiant la possibilité de laisser un rideau d'arbres (d'une largeur de 5 à 10 m) en place au moins du côté des vents dominants afin de réduire la vitesse du vent et l'évapotranspiration, ce rideau d'arbre peut jouer aussi le rôle de filtre à la poussière et d'écran visuel pour cacher l'exploitation de granulats ;
- en n'effectuant les coupes qu'au fur et à mesure des besoins afin de laisser les arbres en place grossir le plus possible pour obtenir un volume maximal de bois à la vente ;
- en n'effectuant les débardages et les sorties des bois coupés qu'en conditions de sol sec[27] afin de ne pas compacter et déstructurer le sol par des circulations d'engins sur pneus (tracteurs de débardage, fardier) et de ne pas enlever trop d'humus avec les circulations des engins.

En effet, la phase de coupe et de récolte des arbres en place peut grandement affecter le succès ultime de la réhabilitation en fonction de leur impact sur l'état du sol [92]. Les fardiers peuvent sortir plus de 18 tonnes de troncs, ils ont alors un poids total en charge de plus de 35 tonnes. La compaction qu'ils peuvent produire peut donc être très importante. Il est alors fondamental de prévoir la récolte et la sortie des grumes pendant la période la plus sèche de l'année. Un schéma de circulation précis doit être établi et visualisé sur la parcelle afin que les trajets des engins se fassent toujours au même endroit et qu'il n'y ait pas une compaction sur une trop grande surface. Les directives anglaises conseillent de faire circuler les engins sur les débris de récolte afin de diminuer la pression sur le sol [92].

27 La définition du sol sec supportant la circulation sera donnée dans le chapitre 5 IV -1.

La coupe des feuillus doit être faite de manière optimale après la chute des feuilles (à l'automne et avant les éventuelles pluies d'hiver) afin de laisser au sol la litière de feuilles fraîches qui sera décapée avec l'horizon organique. Cet apport de litière[28] (4 t/ha) enrichira en matière organique et favorisera le maintien d'une vie biologique de l'horizon organique pendant le stockage [92].

Les grosses branches sont constituées de bois et n'ont qu'une faible valeur nutritive, elles peuvent être entassées en andains et brûlées sur place s'il n'y a pas de contre-indication [92]. Si un premier brûlage n'a pas suffit, les déchets doivent être à nouveau rassemblés, secoués et de nouveau brûlés [39].

S'il existe des possibilités locales de marché, les branches peuvent être broyées et vendues pour leur valeur énergétique ou pour être compostées. Dans le cas de boisements forestiers classiques, il est parfois conseillé [27] de broyer finement les débris ligneux et de les enfouir dans le sol afin d'en accroître la porosité, la capacité de rétention en eau et la fertilité par apport d'éléments issus de la minéralisation de la matière végétale brute. Si le réaménagement s'effectue à l'avancée, les débris de branches de la parcelle en cours de défrichement peuvent être enfouis dans le sol d'une parcelle qui vient d'être reconstitué.

Par contre, les petits rameaux sont beaucoup plus riches en matière organique, dans le chapitre 6 nous présenterons un amendement organique original, le bois raméal fragmenté[29]. Les résidus de rameaux peuvent servir à préparer cet amendement.

L'exploitation de la forêt va laisser des souches en place qu'il faudra éliminer afin de pouvoir décaper le sol.

2 - LA DESTRUCTION DES SOUCHES

Dans le cas du réaménagement forestier d'une carrière, contrairement à une exploitation forestière classique, les résidus de souches et de racines doivent être impérativement extraits du sol puisque celui-ci sera décapé et réutilisé après un éventuel stockage pour reconstituer un nouveau sol forestier. Il est important que l'extraction des souches et des racines soit faite le plus soigneusement possible. Les racines sont en effet une source de contamination par des pathogènes si la forêt était attaquée.

Les moyens de détruire les souches restées dans le sol sont de trois types [24] :
- extraction à la pelle mécanique ;
- extraction à la lame de bulldozer ;
- réduction à l'état de copeaux ou de sciure.

L'extraction des souches ne peut se faire que si le sol est sec et en utilisant des engins à basse pression au sol afin d'éviter les phénomènes de compaction.

---

28 On considère que sous forêt de feuillus le retour annuel au sol de feuilles et organes aériens (écailles de bourgeon, brindilles...) est de l'ordre de 4 t/ha/an [63]

29 En France, le bois raméal fragmenté est peu utilisé, au Canada des expérimentations ont été mises en place (chapitre 6).

L'extraction de la souche à la pelle hydraulique est recommandée par les directives anglaises [92]. Elle permet de bien séparer les racines et la terre. La terre peut être détachée par des secousses données par la pelle une fois la souche extraite. La terre collant aux racines peut aussi tomber ultérieurement en séchant. La pelle provoque des perturbations mineures du sol, mais son rythme de travail est plus lent et il faut disposer d'un engin spécifique sur le chantier pour déplacer ensuite les souches extraites.

L'extraction à la lame de bulldozer est déconseillée [92] car elle ne permet pas de séparer proprement le sol et les racines. En outre, il provoque un décapage de la terre sur une superficie bien supérieure à celle de la souche car pour soulever la souche, le conducteur de l'engin est obligé d'atteindre en profondeur les racines maîtresses. Des compactages peuvent en outre se produire même avec un engin basse pression.

L'extraction des souches pose le problème de leur destruction. Les souches et les racines sont peu combustibles, pour les brûler, il est nécessaire d'y adjoindre un matériau beaucoup plus inflammable. Après un premier brûlage, les déchets doivent être rassemblés, secoués et de nouveaux brûlés. S'il reste trop d'imbrûlés, ils seront mis en tas ou alignés en andains [39].

La réduction des souches à l'état de sciure ou de copeaux est effectuée par un matériel spécifique, des fraises qui vont forer la souche. Il n'y a plus dans ce cas, de matériaux à sortir de la parcelle, les copeaux formés peuvent se mélanger au sol et permettre leur recyclage biologique et le sol est peu perturbé. Cependant, cette technique est coûteuse en raison de la rapidité d'usure des forets au contact de la terre.

Le défrichement avant exploitation est la première étape du réaménagement, il va occasionner des circulations d'engins sur le sol. Afin de ne pas dégrader l'horizon organo-minéral, il doit être réalisé en prenant des précautions :
- ne faire circuler les engins de transport de bois que sur les futures voies de desserte de la parcelle réaménagée ;
- détruire les souches par temps sec uniquement et de préférence à la pelle mécanique.

II - LE DECAPAGE SELECTIF DES HORIZONS HUMIFERE ET MINERAL

1 - LES HORIZONS HUMIFÈRE ET MINÉRAL

Nous avons vu (chapitre 1, figure 2) que les horizons organiques des sols forestiers (horizons O) ont souvent une épaisseur faible (de l'ordre de la dizaine de centimètres).

En outre, ces horizons sont constitués de plusieurs niveaux d'épaisseur variable (figure 14) :
- l'horizon de litière, épais tout au plus de quelques centimètres (OL) ;
- l'horizon de fragmentation (OF) ;
- l'horizon organique (OH).

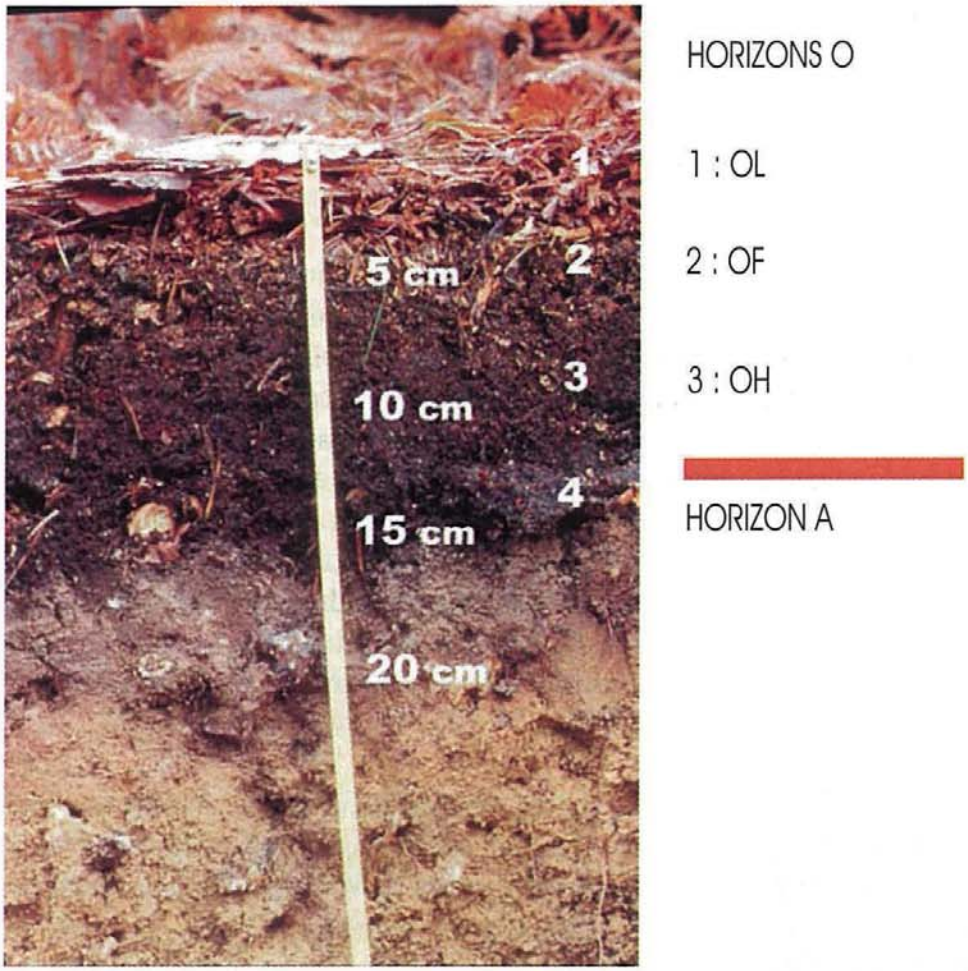


Figure 14 : Un sol forestier avec les différents horizons organiques [photo ENGREF Nancy].

Ces trois horizons organiques (OL, OF et OH) sont de trop faible épaisseur (moins de 0,20 mètre au total en général) pour pouvoir permettre leur décapage isolé[30]. C'est donc l'ensemble de ces horizons organiques et de l'horizon organo-minéral de surface riche en humus (horizon A) qui seront à décaper en les considérant comme « horizon humifère ». Cet ensemble (horizons OL, OF, OH et A) atteint généralement une épaisseur supérieure à 0,20 m.

Cependant, les gisements sont parfois dans des contextes géologiques tels, que l'épaisseur de la totalité de l'horizon humifère est faible (moins de 0,20 m). Ceci est assez fréquent en zone méditerranéenne où la couche de sol au dessus de la roche massive peut être très fine (de l'ordre de quelques centimètres). Dans ce cas, l'horizon humifère est trop fin pour pouvoir être décapé seul, il est alors prélevé avec les stériles de découverte. Dans le contexte du réaménagement forestier en zone méditerranéenne, un apport extérieur de terre végétale n'est pas toujours nécessaire, d'autres technique de végétalisation pouvant s'appliquer (plantes fixatrices d'azote et plants mycorhizés permettant des résultats intéressants sur des

30 Il est techniquement possible de décaper sélectivement une couche de terre qui a au minimum 0,20 m d'épaisseur.

substrats minéraux). Dans les autres situations, de la terre végétale devra être trouvée ou le sol décapé non sélectivement devra être amélioré par des amendements organiques.

Cette vision du sol découpé en horizons, (figure 15) est la vision d'un pédologue qui privilégie le fonctionnement interne du sol et en particulier les modes d'incorporation de la matière organique morte au sol ou, d'une moindre manière, celle d'un forestier qui se préoccupe de la façon dont l'arbre pourra prospecter le sol.

Le carrier, lui a une interprétation et un vocabulaire différents qui traduisent son utilisation du sol (figure 15, vision « exploitation du gisement »). Le carrier distingue dans le sous-sol le gisement qu'il va exploiter et entre ce gisement et la couche de terre végétale, tout est dénommé stériles de découverte (ce qui peut selon les cas englober l'horizon minéral et une partie du sous-sol).

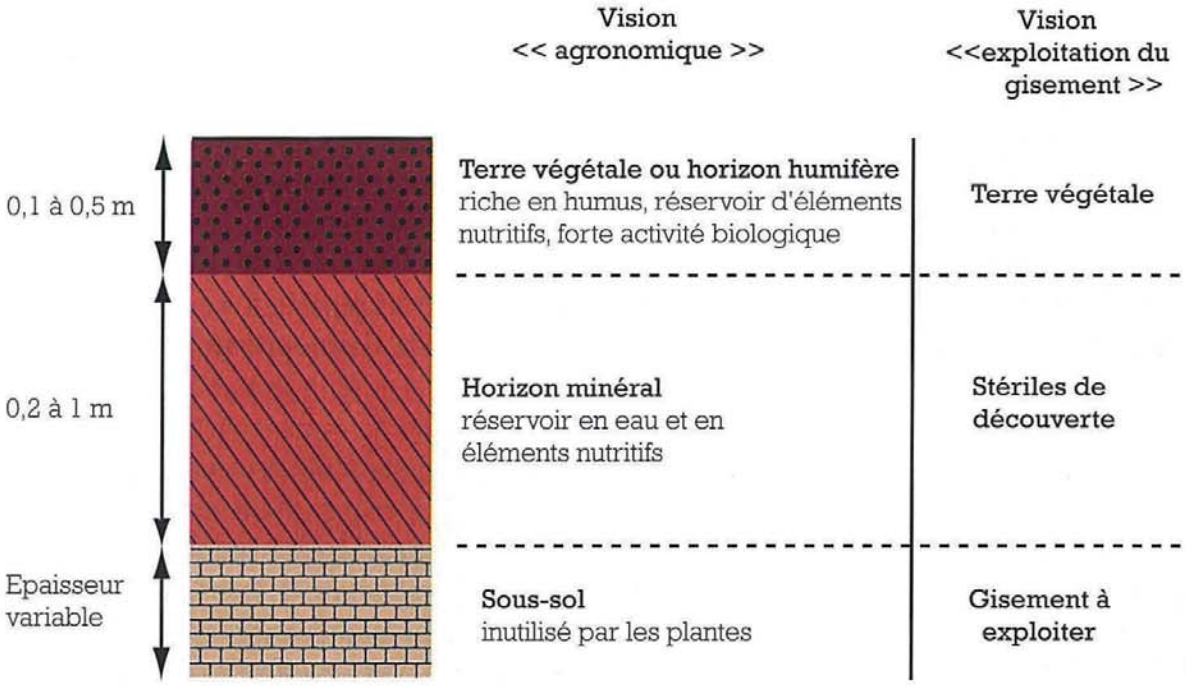


Figure 15 : Schéma d'un profil de sol : vision « pédologue » et « exploitation du gisement ».

Dans la majorité des documents étudiés, la parcelle à décaper est considérée dans son intégralité, seules les recommandations anglaises [92] demandent une cartographie des sols et préconisent un décapage et un stockage unité de sol par unité de sol. En effet, en Grande Bretagne, les sols reconstitués doivent être classés dans la même catégorie de sols qu'à l'origine.

2 - LA PRATIQUE DU DÉCAPAGE SÉLECTIF

Dans les carrières visitées, le décapage sélectif est souvent pratiqué par des engins adaptés, c'est-à-dire à la pelle mécanique sur chenille à godet lisse [F5 M, F12 M] ou au scraper.

Pour les carrières de roches massives exploitées en front de taille, la difficulté d'accès au terrain à décaper est souvent mentionnée [F5 M, F7 M, F12 M].

Le scraper permet une plus grande précision (le réglage fin de sa lame permet d'enlever exactement l'épaisseur souhaitée), il peut donc avoir un grand intérêt pour de faibles épaisseurs de terre végétale. Il va à la fois prélever le sol, le transporter et le remettre en place. Il a cependant l'important inconvénient d'être sur pneus et de circuler sur le sol qu'il est occupé à décaper ou sur celui qu'il vient juste de poser. La pelle mécanique sur chenille n'a pas à circuler sur le sol à décaper, elle est à côté et travaille dans le rayon d'action de sa flèche. En outre, la pression au sol exercée par les scrapers sur roues (de l'ordre de 3000 g/cm^2) est plus importante que celle exercée par des pelles sur chenilles (400 g/cm^2), des phénomènes de compaction ont été observés[31] lors de réaménagements au scraper réalisés en conditions pluvieuses (chapitre 5 - IV - 3).

Des différences existent entre les exploitations qui réalisent le décapage avec leur propre matériel et ceux qui sous-traitent [F7 M] ou font appel à une équipe spécialisée du groupe carrier. Elles concernent la nature des engins (matériels spécialisé dans le terrassement pour les sous-traitances, c'est-à-dire plus fréquemment un scraper) mais surtout les périodes de travail et l'adaptation aux conditions climatiques. L'intervention d'une équipe spécialisée plus sensibilisée à la qualité du réaménagement est souvent la garantie d'une meilleure qualité. Ceci souligne l'importance de la communication « qualité » et de la formation du personnel. La bibliographie anglaise [92] souligne également une relation très forte entre l'implication du personnel et la qualité des réaménagements effectués.

Les manipulations de sol (décapage, mise en tas, reprise et régalage) ne doivent avoir lieu que quand le sol est suffisamment sec (ce point sera développé dans le chapitre 5 - IV - 1).

Le sol forestier présente généralement des horizons organiques très peu épais (quelques centimètres) qui au mieux peuvent être décapés tous ensemble (quand leur épaisseur totale a plus de 0,20 m) ou sinon doivent être décapés avec l'horizon organo-minéral.

Le décapage doit être réalisé de préférence avec une pelle mécanique sur chenille ne circulant pas sur le sol. Le scraper qui doit rouler sur le sol engendre en effet des compactions importantes. Les bouteurs ou bulldozers malgré leur faible pression au sol (comparable à celle d'une pelle quand les chenilles sont larges) sont fortement déconseillés car ils poussent le sol ce qui le déstructure.

Le décapage du sol doit avoir lieu en conditions sèches (voir Chapitre 5).

31 Pour des réaménagements agricoles.

III - LE STOCKAGE SELECTIF DES HORIZONS HUMIFERE ET MINERAL

Suite au décapage sélectif, les deux horizons (horizon humifère et horizon minéral) doivent être stockés séparément.

1 - LES EFFETS DU STOCKAGE

Les éléments qui suivent sont issus d'une étude de synthèse [118] de 83 références bibliographiques mondiales.

Les analyses de prélèvements de terre à différentes épaisseurs dans des tas stockés depuis plus ou moins longtemps, montrent que le stockage du sol produit plusieurs modifications [97, 118] :

- des modifications chimiques (augmentation du pH, diminution de la teneur en azote nitrique et des autres nutriments, diminution de la matière organique) ;
- des modifications des propriétés physiques des sols, principalement du fait de la compaction due au poids de la terre (augmentation de la masse volumique, diminution de la porosité et de la conductivité hydraulique) et du fait de l'existence de conditions anaérobies au centre du tas de terre (dégradation de la structure du sol et diminution de la stabilité des agrégats) ;
- des changements dans la composition biologique par manque d'air et excès d'eau (conditions anaérobies).

Il est cependant difficile de distinguer les modifications induites par le stockage lui-même et celles dues aux déplacements de terre[32]. Ainsi, les auteurs soulignent que les étapes de décapage et de remise en place du sol peuvent provoquer des dégradations beaucoup plus importantes que le stockage. Ces dégradations sont d'autant plus importantes que ces manipulations de terre seront faites en conditions sous-optimales (sur sol humide, avec des engins trop lourds, par période de gel) , elles concernent :

- la compaction des sols, la destruction de la porosité d'aération et la diminution de la conductivité hydraulique ;
- le nombre et la biomasse de lombriciens (les manipulations de terre provoquent la disparition de plus de 90 % des grands individus, donc des adultes et des espèces de grande taille).

Les conclusions de l'analyse bibliographique mettent en avant que les modifications physiques dues au stockage (durée du stockage, hauteur des tas) sont moindres que celles dues aux transports de terre.

---

32 Et éventuellement par la dilution de la terre végétale par de l'horizon minéral quand le décapage n'a pas été bien réalisé.

Elles précisent également que le stockage n'a pas d'effets sévères et à long terme sur la qualité du sol. Les modifications chimiques observées peuvent être facilement corrigées par des amendements ou une fertilisation raisonnés après la remise en place de la terre végétale. Les changements biologiques sont plus complexes, mais le sol retrouve sa qualité biologique en quelques années (d'autant plus facilement en réaménagement forestier que le sol n'est pas labouré et que les fertilisations quand elles existent sont faibles et ainsi ne nuisent pas à la réinstallation des mycorhizes et des lombriciens).

Les communautés microbiennes d'un sol peuvent être un bon indicateur de la qualité de la perturbation et de la restauration. Dans des sols réhabilités, pendant les 3 premières années, la biomasse microbienne est très faible (de l'ordre de 20 % d'un sol non perturbé), elle augmente au cours des années pour être, au bout de 8 ans, identique à celle d'un sol resté en place.

Le rapport souligne la nécessité d'installer un couvert végétal, si possible mycorhizé, sur le tas de terre dès que le stockage doit durer plus de quelques semaines afin de maintenir au moins dans les 30 premiers centimètres du tas, des conditions biologiquement correctes et de limiter les phénomènes d'érosion. Des durées de stockage de 2 à 3 ans sont sans conséquences durables sur la qualité du sol. Ainsi, une comparaison de productivité entre une parcelle non perturbée et du sol remis en place après un stockage de 3 ans, ne met pas en évidence de différence.

2 - LES CONDITIONS OPTIMALES DE STOCKAGE

Les dépôts de terre sont à installer sur un sol propre, décapé et nivelé. Afin de limiter les altérations, l'institut agricole de l'état de Fribourg (Suisse) [62a] préconise, si le sous-sol est peu perméable, de creuser des fossés à ciel ouvert autour des dépôts pour détourner l'eau et, si le fond est très imperméable, de le recouvrir de 0,15 m de gravier et d'y incorporer des drains (figure 16).

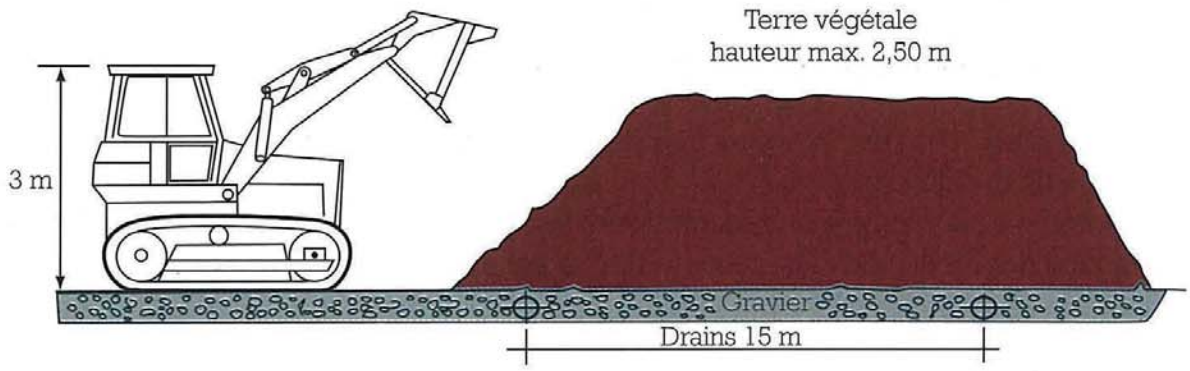


Figure 16 : Préparation d'un site de stockage sur un sol imperméable (d'après [62a]).

Les conditions de stockage doivent privilégier le maintien d'une vie biologique du sol [118], et donc les tas doivent être larges et peu élevés pour maintenir au maximum l'aération du sol. En outre, les compactions dues au poids de la terre doivent être minimisées en constituant des tas pas trop hauts.

Ainsi, pour des stockages d'une durée supérieure à 9 mois [62a], la hauteur de merlon ne doit pas dépasser 2,5 m pour la terre végétale, et 3,5 m pour l'horizon minéral. Pour des stockages inférieurs à 9 mois [62a], la hauteur peut être supérieure.

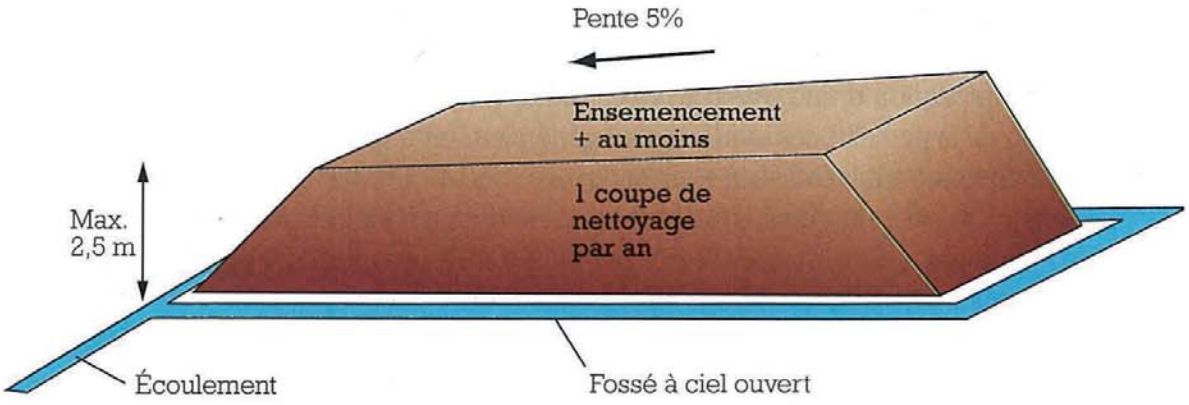


Figure 17 : Schéma d'un stock de terre végétale (d'après [62a]).

La hauteur du dépôt doit être constituée en une seule fois sans rouler sur le dépôt [62a].

En Suisse [62a], le sommet du dépôt de longue durée doit avoir une pente de 5% pour éviter les stagnations d'eau de pluie (figure 17).

L'institut agricole de l'état de Fribourg [62a] recommande également d'ensemencer le dépôt le plus vite possible, tout en éliminant les mauvaises herbes aussi souvent que possible. Ainsi pour un stockage de courte durée le chou de chine, le colza, la navette ou la moutarde jaune sont conseillés. Pour les stockages de longue durée des mélanges standards pour dépôts de terre sont proposés. Un apport de fumier peut également avoir une action positive. Le dépôt d'horizon minéral pourra lui aussi être ensemencé si le stockage est long.

Les durées de stockage peuvent aller jusqu'à 2 à 3 ans sans nuire au réaménagement ultérieur [118].

La phase de visites n'a pas permis d'observer des différences liées aux durées de stockage.

Si par le passé, des temps de stockage longs ont pu être pratiqués (5 ou 10 ans sans ensemencement), les exemples récents montrent que les pratiques actuelles sont plutôt le zéro stockage [F7 M]. Ceci parfois de manière caricaturale, car il vaudrait mieux stocker la terre, dans de bonnes conditions, quelques mois (de 6 à 12 mois [F5 M]), plutôt que de réaménager sans stockage en saison pluvieuse (la compaction du sol par manipulation de sol mouillé est irrémédiable).

Ainsi, le réaménagement doit être raisonné en fonction des conditions climatiques et la terre peut être stockée sans problème quelques mois si les conditions météorologiques sont défavorables après le décapage.

Le souci réel des exploitants de ne pas stocker la terre parce que cela nuit à la qualité du réaménagement mériterait d'être discuté et d'être mis en balance avec d'autres inconvénients

engendrés par l'absence de souplesse qu'impose le non-stockage. Une communication trop en défaveur du stockage, a peut-être induit cette situation actuelle et devrait être reprise afin de permettre plus de souplesse et d'adaptabilité aux conditions climatiques, aux conditions d'exploitation et à la disponibilité en personnel et en engins.

Dans les quelques cas où des stockages de terre sont faits[33], c'est souvent sous forme de merlons pour isoler l'exploitation d'une voie d'accès et limiter les nuisances (bruit et poussière). En fin d'exploitation de la parcelle, ces merlons sont généralement régalés avec la terre végétale. Un ensemencement est parfois réalisé avec du ray-grass ou du trèfle. Mais quand l'ensemencement des merlons n'est pas pratiqué, il s'y développe une flore adventice (parfois importante) qui amène lors de la plantation un stock semencier important aux parcelles et donc des problèmes de concurrence herbacée accrue pour les jeunes plants.

La pratique de l'ensemencement des stockages (stockage de 2 ans avec semis de ray-grass, de fétuque et de légumineuses), mais surtout des merlons, doit être développée.

L'horizon organominéral et l'horizon minéral doivent être stockés séparément.

Le stockage provoque des modifications physiques et chimiques dans les sols mais n'induit pas de modifications irréversibles. Elles peuvent être facilement corrigées par des amendements ou une fertilisation. Les manipulations du sol en mauvaises conditions peuvent elles, provoquer des destructions durables de la structure du sol (compaction, destruction de la porosité...).

Le stockage doit être établi sur un emplacement sain, au besoin drainé, en tas de 2,5 m de haut pour l'horizon organominéral et 3,5 m pour les stériles. Le sommet du tas doit avoir une pente de 5% et être ensemencé (ray-grass et fétuque). Des durées de stockage de 2 à 3 ans ne nuisent pas au réaménagement ultérieur.

Il vaut mieux manipuler et stocker la terre dans de bonnes conditions que de la manipuler à l'état humide parce que l'on veut éviter son stockage.

33 Surtout observé pour des réaménagements agricoles.

Toute opération intervenant sur la parcelle doit être conduite de manière à éviter le compactage du sol. La récolte du bois, la sortie des troncs, le dessouchage et le décapage sélectif doivent donc être :

- menés uniquement quand le sol est suffisamment sec ;
- pratiqués avec des engins excerçant une faible pression au sol (engins à chenille).

Ainsi, il est préférable de pratiquer le dessouchage avec une pelle mécanique sur chenille, il doit être soigneux afin de laisser le moins possible de racines dans le sol.

Il faut raisonner le choix des parcelles à défricher de manière à laisser un écran de végétation qui servira à la fois pendant l'exploitation (protection visuelle et contre la poussière) et qui protégera les futures plantations.
Le décapage sélectif est souvent difficile en raison des faibles épaisseurs d'horizon humifère. Il convient de regrouper éventuellement les horizons les plus riches en matière organique pour éviter au maximum la dilution de la matière organique.

Le stockage sélectif des différents horizons doit avoir lieu en tas larges sur une hauteur de 2,5 mètres de haut avec une pente de 5% du sommet du tas et être disposés sur un sol sain et si besoin drainé. Les phénomènes de dégradation du sol sont plus souvent liés aux conditions inadéquates des mouvements de terre qu'au stockage en tant que tel.

Un ensemencement des tas est toujours souhaitable avec des graminées et des légumineuses.

CHAPITRE 3

LES PLANTS FORESTIERS

Le reboisement d'une parcelle réaménagée peut se faire par semis direct ou par plantation. La plus grande partie s'effectue par plantations de plants de qualité achetés à des pépinières en raison de l'avantage économique global (coût d'entretien inclus) de cette méthode de reboisement par rapport au semis direct.

I - SEMIS DIRECT OU PLANTATION

La pratique du semis direct présente des avantages et des inconvénients que nous préciserons. Dans la plupart des espèces et situations, le bilan est défavorable à cette technique et la mise en place de plants élevés en pépinière s'impose.

1 - LES AVANTAGES DU SEMIS DIRECT

Un arbre mis en place par semis direct présente généralement un système racinaire de meilleure qualité car, contrairement aux plants, il n'a pas été déplacé donc il n'a pas été abîmé au cours de différentes opérations intervenant dans la plantation (repiquage, soulèvement, arrachage, transport, plantation). Ce système racinaire lui permettra donc d'avoir une croissance, une résistance à la sécheresse et aux pathogènes et un ancrage dans le sol meilleurs. Semer évite aussi la crise de transplantation qui peut être une cause importante de mortalité pour certaines espèces fragiles. Cependant, malgré ces avantages, le semis est peu pratiqué.

Le coût d'installation par semis est moins important que celui occasionné par des plantations mais de nombreux entretiens sont nécessaires ensuite ce qui augmente le coût global et nécessite d'intervenir plusieurs années de suite sur la parcelle pour assurer le succès de l'opération. En effet, à ce coût d'installation doivent s'ajouter des coûts non négligeables pour :

- limiter la prédation (de la part d'oiseaux, de rongeurs ou de sangliers) ;
- limiter la concurrence herbacée ;
- diminuer la densité des tiges par dépressages[34] successifs.

La mise en place d'une densité de graines beaucoup plus forte (5 à 10 fois) que la densité d'arbres souhaitée au final, impose une opération sylvicole supplémentaire, le dépressage pour éliminer les plants en surnombre. Cependant cette opération présente le grand intérêt de permettre de sélectionner les tiges à conserver. Elle permet en effet, de supprimer toutes les tiges mal formées (gels de bourgeons terminaux, dégâts de pathogène ou de gibier) et de ne conserver dans le peuplement final que les plus beaux individus.

2 - LES INCONVÉNIENTS DU SEMIS DIRECT

Nous venons de voir qu'il faut mettre en place 5 à 10 fois plus de graines que le nombre d'arbres souhaité dans le peuplement, ceci augmente le coût de l'installation du peuplement

34 Le dépressage d'une parcelle boisée consiste à éliminer en une seule fois, en les coupant et en les abandonnant à terre, les tiges attardées ou dominantes mais mal formés.

et se heurte parfois à une absence de graines disponibles. En effet, les difficultés de ramassage (coûteuse en main d'œuvre) et la nécessité de ne ramasser que des graines d'arbres sélectionnés pour leur qualité génétique et les aléas des fructifications conduisent à une certaine pénurie de graines pour certaines espèces. Il est alors peu rationnel à l'échelle du pays, de gaspiller des graines en semis direct alors que les rendements des semis en pépinière sont bien meilleurs.

Semer nécessite un travail du sol soigné sur 0,15 à 0,20 m car il faut que les conditions de germination et de survie soient optimales. Ainsi, pour les petites graines[35], la germination est une phase très délicate car les plantules sont fragiles. Pour favoriser leur survie, il faut :

- un lit de semences très bien préparé, sans mottes, sans cailloux ;
- un sol ameubli pour permettre le développement rapide de la radicule du jeune semis et pour éviter son dessèchement en cas de conditions climatiques défavorables ;
- supprimer la végétation herbacée qui à ce stade peut faire périr le jeune semis par concurrence pour l'eau.

La concurrence herbacée est importante et sauf à la supprimer par des opérations répétées et coûteuses[36], il est indispensable que la jeune plantule se développe très rapidement afin d'échapper le plus vite possible à cette concurrence. La croissance initiale rapide (dans les premiers mois après le semis) est donc indispensable car c'est pendant cette période que l'élimination de la végétation herbacée préalable au semis va encore être efficace.

Certaines espèces à croissance initiale lente ne peuvent donc pas être semées, il en est de même pour les espèces qui nécessitent un ombrage lors de leur première saison de végétation (espèces d'ombre telles les sapins, l'épicéa, le douglas et le hêtre).

3 - AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES PLANTATIONS

Pour la plupart des points cités dans les paragraphes précédents, les avantages des plantations sont les points relevés comme inconvénients des semis directs et inversement.

Une grande attention doit être portée au système racinaire des plants qui seront installés. Les opérations culturales de la pépinière et la transplantation vont induire des déformations et des blessures aux racines qui peuvent conduire à la mortalité du plant (racines en chignon par exemple). Nous reviendrons sur ce point dans les paragraphes II et III. En règle générale, les arbres issus de plants ont un système racinaire de moins bonne qualité que les plants issus de semis.

---

35 La plupart des graines sont de petite taille, seuls les chênes ne nécessitent pas de telles précautions mais seront eux plus sensibles à la prédation par les rongeurs et les oiseaux en particulier mais aussi les sangliers.

36 Ces opérations mécaniques ou par phytocides sont coûteuses et ne sont pas réalisables dans la proximité immédiate du semis où l'intérêt de contrôler la végétation est primordial.

Les plants sont soumis de manière plus ou moins intense à une crise de transplantation qui peut provoquer une certaine mortalité. Cette mortalité est d'autant plus forte que :

- le plant est en mauvaise condition physiologique (en raison des conditions d'élevage en pépinière, de transport et de stockage) ;
- le bilan alimentation en eau / pertes par évapotranspiration est défavorable (période de sécheresse après la plantation, vent, capacité de rétention en eau faible) ;
- l'espèce est sensible ou non (le pin maritime et le cèdre sont très sensibles).

Les coûts de plantation sont plus élevés tant en ce qui concerne l'achat des plants que le prix de revient des opérations de plantation. Par contre, les opérations d'entretien sont moindres (moins grande sensibilité à la concurrence herbacée qui peut permettre d'espacer les désherbages, pas de nécessité de dépressage).

La plantation ne permet pas une sélection des meilleures tiges, tous les arbres survivants sont conservés. Si les taux de survie sont mauvais, un regarnissage quelques années après la plantation peut être nécessaire afin d'obtenir une densité d'arbres suffisante.

La préparation du sol peut être moins fine en surface mais la pratique des trous de plantation doit être menée avec soin (en particulier en évitant de lisser les parois du trou qui se comporteraient alors comme des barrières physiques aux racines).

4 - BILAN

Seules quelques espèces dont la transplantation est très difficile et dont la croissance initiale après semis est forte, doivent faire l'objet de semis direct. Il s'agit principalement du pin maritime qui supporte très mal la transplantation et également de certains chênes (chêne liège) dont les semences ne posent ni de problème de récolte ni de germination et dont le système racinaire pivotant supporte très mal le repiquage en pépinière et la transplantation.

L'annexe 1 présente pour ces cas particuliers, les conseils de semis direct.

Dans la grande majorité des cas et des espèces, la plantation est la solution à préférer. Cependant, la réussite d'une plantation dépend de nombreux facteurs tant en ce qui concerne le plant lui-même que tout ce qui entoure la plantation et son entretien.

Le semis n'est guère pratiqué en réaménagement de carrière en raison d'un bilan global coût/avantage en sa défaveur par rapport aux plantations. Le semis induit en effet une très grande consommation de graines et nécessite des opérations d'entretien importantes.

La plantation de plants issus de semis et d'élevage en pépinière est donc la règle. Les plants mis en place vont subir une crise de transplantation en raison du traumatisme subi par le système racinaire lors de l'arrachage (plants à racines nues) et/ou des conditions de milieu plus défavorables que celles créées lors de l'élevage en pépinière. Toutes les précautions doivent être prises pour limiter les effets et la durée de cette crise de transplantation, elles concernent le choix de la pépinière, le choix du type de plant, les conditions d'élevage, de

conditionnement, de transport et de mise en place des plants. La plupart de ces points doivent être clairement définis dans un contrat précis liant le carrier à la pépinière et/ou à l'entreprise mettant en place les plants.

II - LES DIFFERENTS TYPES DE PLANTS

A qualité de semence équivalente, beaucoup de facteurs influencent en pépinière les potentialités des plants forestiers, il s'agit en particulier de l'âge, des opérations culturales, du type de support, du type de conteneur, de la fertilisation et de l'inoculation ou non par des bactéries ou des champignons mycorhiziens. Cependant, la principale distinction entre les plants dépend de l'état du système racinaire à la plantation : plant à racines nues ou plant en conteneur (ou en motte). Ce choix conditionne l'élevage du plant en pépinière.

Ces différents facteurs vont influencer : la hauteur du plant, l'état de son système racinaire, ses potentialités de croissance, son aptitude à la reprise après plantation, sa résistance à la concurrence herbacée et aux attaques parasitaires. Chaque type de plant aura ses avantages et ses inconvénients, le choix à effectuer résultera d'un compromis entre coût du plant et chance de survie. Des normes européennes (annexe 2) et des normes du Fonds Forestier National[37] FFN (annexe 3) fixent les caractéristiques (hauteur, diamètre au collet) en fonction de l'espèce, de l'âge et des catégories du plant.

1 - LES PLANTS À RACINES NUES

Les plants destinés à être vendus à racines nues, c'est-à-dire qui seront arrachés au moment de la vente, font l'objet d'un circuit de production particulier. Pour les espèces pivotantes, la croissance racinaire de la première année concerne principalement le pivot[38] qui peut au bout d'un an atteindre une longueur de 1 m [27]. Une telle longueur de pivot n'étant pas compatible avec une plantation ultérieure, il est nécessaire de stopper la croissance du pivot et de favoriser le développement des racines primaires et secondaires. Ainsi les opérations de repiquage et/ou de soulevage vont permettre de réduire la croissance du pivot et de développer de nombreuses racines afin que le plant supporte ensuite l'arrachage et la replantation.

a) LE REPIQUAGE ET LE SOULEVAGE

Le repiquage consiste à prélever le jeune plant issu de semis et à le réinstaller en pleine terre[39]. Cette opération doit être réalisée de manière à ce que les racines soient sectionnées et non arrachées ce qui occasionnerait des attaques de parasites et/ou des déformations du système racinaire. Le repiquage effectué en fin de première année se traduit par la section de

37 Ces normes du Fonds Forestier National étant plus sévères que les normes européennes, il est préférable de s'y rapporter même si la plantation ne peut pas bénéficier d'une subvention de cet organisme.

38 Les racines primaires et secondaires sont très peu nombreuses voire même absentes.

39 En pleine terre pour des plants à racines nues ; dans du substrat de culture pour les plants en conteneur.

la racine pivot à 0,10 m et par la production d'un système racinaire à racines charpentières trapues avec peu de racines secondaires fines. Ces plants sont à mettre en place en creusant un potet afin d'avoir assez de place pour y disposer correctement les racines.

Le soulevage consiste à passer une lame sous le sol afin de trancher le pivot. Le soulevage permet de sectionner les racines à 0,15 m et produit un système racinaire plus groupé constitué de nombreuses racines secondaires fines. Ces plants peuvent être plantés au coup de pioche. Ils ont en général un développement aérien plus important que les plants repiqués.

Pour les résineux, le repiquage ou le soulevage sont indispensables pour les plants âgés de plus d'un an[40] en raison de la mauvaise qualité du système racinaire des plants ni repiqués ni soulevés. Généralement, le repiquage est effectué en fin de première année et un soulevage peut intervenir ensuite en début de deuxième année de repiquage. Cette pratique est surtout courante pour les douglas et certains épicéas qui ont tendance à développer une pousse terminale trop importante (donc trop fragile).

Pour les feuillus, certaines espèces peuvent être plantées à un an (merisier et chêne rouge) ou deux ans (érable sycomore, frêne) sans repiquage. Les autres espèces à planter à plus de deux ans doivent avoir fait l'objet d'un repiquage ou d'un soulevage.

b) L'ÂGE ET LA TAILLE DES PLANTS À RACINES NUES

Les plants à racines nues peuvent être plantés jusqu'à l'âge de 5 à 6 ans. Dans le cas d'un plant âgé de plus de deux ans, il convient de s'assurer du développement harmonieux des parties aériennes. Ainsi, il faudrait connaître non seulement la classe de hauteur (donnée classique des catalogues de pépinières avec la catégorie d'âge) mais aussi le diamètre au collet (qui n'est pas donné de manière standard). Si les plants respectent les normes (CEE ou plus encore FFN), le rapport entre diamètre du collet et longueur des parties terminales est satisfaisant.

La taille n'est pas un critère lié de manière régulière à l'âge du plant. Si les grands plants sont généralement les plus vieux, un plant de taille médiocre peut avoir 3 ou 4 ans de plus que la moyenne des plants standards de même taille. Ainsi, la réglementation précise qu'un sapin pectiné compris dans la fourchette de hauteur « 45-60 » ne peut pas avoir plus de 5 ans, mais des sapins pectinés de 5 ans peuvent appartenir à la classe de hauteur « 15-25 » qui correspond en moyenne à des plants de 3 ans. Il faut aussi se méfier des conditions de culture en pépinière et en particulier de la fertilisation excessive qui augmentera la taille du plant au détriment de son fonctionnement physiologique et nuira gravement à ses capacités de survie en milieu forestier.

En conditions difficiles de sol ou de climat (sécheresse après plantation), il faut toujours préférer des plants de petite dimension (qui auront une évapotranspiration moins forte). Dans

40 Mettre en place une plantation d'un an n'est pas souhaitable en raison de la faible taille du plant et des risques très importants de mortalité par concurrence herbacée.

des conditions moyennes à favorables, des plants plus grands réussissent mieux (meilleure résistance face à la concurrence herbacée).

A âge égal, la répartition des années avant repiquage et après repiquage, c'est-à-dire la catégorie d'âge (figure 18) a une grande importance.

Age du plant	Catégorie d'âge	Signification
1 an	1 - 0	1 an de semis
2 ans	1 - 1	1 an de semis et 1 an repiqué
3 ans	1 - 2	1 an de semis et 2 ans repiqué
3 ans	2 - 1	2 ans de semis et 1 an repiqué

Figure 18 : Signification des catégories d'âge.

Les plants 1-2 sont produits en semant les graines et en repiquant le plant au bout d'un an ; deux ans après ce repiquage, ils sont arrachés pour être vendus. Les plants 2-1 sont produits en semant les graines et en repiquant le plant au bout deux ans ; un an après ce repiquage, ils sont arrachés pour être vendus. Ces deux catégories de plants ont le même âge (3 ans) mais pas le même schéma de production et pas les mêmes caractéristiques physiques. Ainsi des plants 2-1 présentent généralement un système racinaire mieux conformé et un développement aérien moins important que des plants 1-2. Les plants 1-2 seront à préférer en milieu favorable et les plants 2-1 en condition plus hostile.

Le choix de la catégorie de plant à racines nues et de sa taille dépend des conditions pédoclimatiques du site à reboiser :

- en conditions difficiles de sol ou de climat : plants de petite taille, de préférence des plants 2-1 qui auront un meilleur système racinaire ;
- en conditions moyennes à favorables : plants de grande taille, de préférence des plants 1-2.

2 - LES PLANTS EN CONTENEURS

a) LA FORME DU CONTENEUR

Un grand nombre de types de conteneurs a été utilisé en pépinière, les matériaux sont variés ainsi que les dimensions. Le facteur primordial pour juger de la qualité d'un conteneur, est la qualité du système racinaire des plants qui se seront développés dans ces conteneurs. En effet, le principal inconvénient des conteneurs est la déformation du système racinaire produite par la limitation du volume racinaire qu'ils imposent. Dans un pot classique, si le plant reste trop longtemps, son système racinaire finit par atteindre les parois et se met à tourner (racines spiralées ou en chignon). Si le substrat de culture n'est pas assez aéré, le système racinaire ne sera pas assez développé (pivot sans ramifications latérales).

Un plant qui a des déformations racinaires[41] (figure 19) a des chances de survie moindres et s'il survit, il peut présenter une perte de vigueur, une mauvaise stabilité. Les plants dont les racines sont en crosse, spiralées ou en chignon doivent être éliminés.

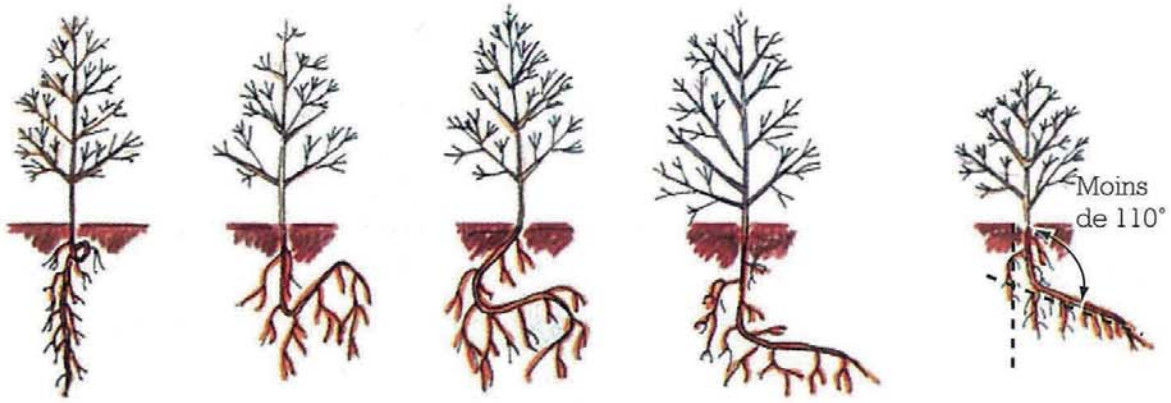


Figure 19 : Déformations racinaires graves sur des plants de résineux ([39]).

Pour les plants à racines nues ces défauts sont visibles à l'examen des plants, et un protocole statistique précis figurant en annexe 4 permet de définir si la livraison est à accepter ou à rejeter.

Pour les plants en conteneur, la motte autour des racines ne permet pas de déceler ces défauts. Pour constater l'état du système racinaire, il faut donc le dégager du substrat et cet examen est donc destructif[42]. Un cahier des charges précis peut définir par contrat entre le carrier et le pépiniériste, les conditions de contrôle et d'acceptation d'un lot de plants en conteneur.

La difficulté du contrôle visuel direct de la qualité du système racinaire des plants en conteneur, impose des précautions en amont et en particulier, la sélection de la pépinière pour la qualité de son travail en visitant au besoin ses installations, le choix de conteneurs de culture adaptés et des garanties de reprise des plants.

En effet, pour pallier aux déformations des systèmes racinaires, des conteneurs spécifiques assurant un bon développement racinaire des plants ont été développés. Il s'agit de conteneurs sans fond et dont les parois rainurées et/ou avec des angles prononcés permettent le développement d'un système racinaire non déformé. En effet, chaque fois qu'une racine touche un angle ou une rainure, elle réajuste sa croissance vers le bas du conteneur au lieu de se mettre à suivre la paroi. Ces conteneurs sont en outre non fermés. Ils sont soit composés de deux morceaux emboîtés ou sont repliés sur eux

41 L'annexe 4 présente les différents types de déformations racinaires inacceptables.
42 Le plant est ramené à l'état de plant à racines nues sans en avoir les caractéristiques.

même et enclipsés. Ceci permet de sortir la motte sans tirer le plant par le collet. Ces godets sont un peu différents selon les pépinières : pot WM[43] ou godet anti-chignon (figure 20) par exemple, mais il est indispensable de ne s'approvisionner qu'en plants élevés dans des conteneurs de ce type.

Il convient également de s'assurer par une visite de la pépinière, que ces plants sont élevés dans leurs godets sans fond sur un coussin d'air d'au moins 0,10 m qui assure un autocernage des racines, c'est-à-dire, un arrêt de leur croissance dès qu'elles arrivent au contact de l'air. Les caisses de culture ne doivent pas être en contact avec le sol mais doivent être surélevées.

Godet Robin de 1 litre ouvert[44]
(photo pép. Robin)

Godet Lubéron 400 cm^3
(photo pép. Naudet)



Figure 20 : Godets anti-chignon.

43 Licence INRA
44 Le plant est un Pinus cembra 3+2+2.

Les visites de terrain nous ont permis de constater que bien souvent l'état physiologique et physique des plants n'était guère pris en compte par les carriers et que trop peu d'entre eux s'assuraient de la qualité du matériel végétal qu'ils commandaient ou qui leur était livré. Des échecs de plantation ont ainsi fréquemment eu pour cause la mauvaise qualité des plants. Ceci est d'autant plus important que les conditions de milieu sont hostiles et que seul un plant de bonne qualité et en bon état aura des chances d'y survivre et de s'y développer. Planter pour obtenir un procès verbal de récolement et avoir dans la première année 80 % de mortalité, comme cela a pu exister dans le passé, n'est plus acceptable.

Les responsables des carrières n'ont pas vocation à être des reboiseurs et à savoir produire un plant forestier. Néanmoins, il est de leur responsabilité de rédiger des cahiers des charges précis mentionnant les caractéristiques des plants souhaités et de faire respecter au besoin ses engagements au pépiniériste ou au prestataire de service effectuant les plantations. La fiche « contrat de production de plants » reprend les points à préciser dans le cahier des charges et la fiche « réception des plants » précise les points à contrôler pour apprécier la qualité d'un plant.

b) LA TAILLE DU CONTENEUR

Pour la région méditerranéenne et les autres zones particulièrement difficiles du point de vu du sol et du climat, les grands volumes de conteneur sont préférables et ce d'autant plus que l'espèce nécessite plusieurs années de culture en pépinière (Sapin) [27]. Ainsi la hauteur du conteneur va conditionner la profondeur de l'enracinement. La hauteur du plant, son diamètre au collet et le nombre de bourgeons racinaires sont en corrélation directe avec la section du conteneur. Une section minimale de 25 cm^2 est indispensable. Dans des plantations expérimentales en zone méditerranéenne, le taux de reprise dépend très largement du volume du conteneur. Un gain de reprise important est obtenu avec des conteneurs de 400 cm^3 par rapport à ceux de 350 cm^3 (figure 21). Le volume minimum à employer est de 400 cm^3.

Volume du conteneur en cm^3	% de reprise 6 ans après la plantation
600	88,7
400	85,1
350	62,9
300	52,0

Figure 21 : Influence du volume du conteneur sur le taux de reprise de Cèdres de l'Atlas (1-0) (d'après [27]).

c) UNE MEILLEURE REPRISE DES PLANTS EN CONTENEUR

Les plants en conteneurs élevés de manière correcte présentent donc un système racinaire de meilleure qualité et qui n'a pas été endommagé par un arrachage. En outre, leur conditionnement les protège mieux des accidents physiologiques qui peuvent être liés au transport ou au stockage avant plantation dans de mauvaises conditions.

Les plants en conteneur de bonne qualité et plantés pendant la période de repos végétatif de l'espèce, présentent des conditions de reprises meilleures que les plants à racines nues, en particulier parce qu'ils ne subissent pas de crise de transplantation. Leurs racines ne sont pas arrachées et réduites, elles continuent à se développer dans la motte mise en place avant d'atteindre la terre qui les entoure. Le plant n'a pas à recréer de nouvelles racines avant de pouvoir s'alimenter en eau et éléments nutritifs.

Les plants en conteneur doivent être mis en place très jeunes afin que le développement de leur système racinaire ne soit pas trop important (sinon risque de confinement des racines dans le conteneur et de déformations). Pour beaucoup d'espèces, la période de croissance en conteneur ne doit pas excéder une saison de végétation (et même seulement quelques semaines pour le cèdre qui développe très rapidement une racine pivot) [24].

Donc les plants en conteneurs mis en place jeunes, ont une partie aérienne de plus petite taille que celle des plants à racines nues. La concurrence herbacée sera donc à contrôler de manière plus forte afin de permettre aux plants d'y résister. Généralement, l'absence de crise de transplantation permet une croissance vigoureuse dès la première saison de végétation.

Il est nécessaire que le plant soit équilibré entre le développement de sa partie aérienne et celui du système racinaire, ainsi, la tige ne devrait pas dépasser 2 fois la hauteur, ni 8 fois le diamètre du conteneur. Ainsi pour un godet de hauteur 11,5 cm et de diamètre 3 cm, le plant 1-0 ne devrait pas dépasser 23 cm.

Il est préférable pour les espèces qui ramifient dès la première année, de privilégier les plants qui ont des ramifications[45].

d) LE SURCOÛT DES PLANTS EN CONTENEUR

Malgré ses avantages, le principal frein à l'emploi des plants en conteneurs est leur coût. Les plants en conteneurs sont en effet plus chers en moyenne à âge et taille égale que les plants à racines nues (figure 22).

Espèce	Taille	Catégorie et prix racines nues	Catégorie et prix en conteneur [46]	Surcoût du conteneur
épicéa	15/30	2-0 : 0,45 f	2-1 : 3,75 f	8 fois plus cher
pin sylvestre	8/+	1-1 : 1,30 f	1-0 : 1,89 f	1,5 fois plus cher
bouleau blanc	40/60	1-1 : 2,59 f	1-0 : 4,40 f	1,7 fois plus cher
hêtre	15/30	1-0 : 1,60 f	1-0 : 1,95 f	1,2 fois plus cher

Figure 22 : Différences de prix entre plants à racines nues et en godet anti-chignon (exemples tirés du catalogue 2000 des pépinières Robin).

45 Ces ramifications sont garantes d'un développement plus harmonieux du plant et de conditions d'élevage à densité pas trop élevée en pépinière (200 à 250 plants / m^2).
46 Ces prix sont ceux de la plus petite taille de conteneur, les variations sont encore plus importantes en fonction de la taille croissante du conteneur à âge et taille de plant égales. Cependant depuis 2002, cette pépinière ne produit plus de plants à racines nues.

Quand le pépiniériste garantit la reprise de ses plants en conteneur et s'engage à remplacer ceux qui ne survivent pas, le coût de la plantation est payé une fois pour toute. Dans le cas de plants à racines nues, la mortalité doit être corrigée par une phase de regarnissage des plantations aux frais du carrier.

Les plants en conteneurs présentent un surcoût important au moment de la plantation (achat des plants eux-mêmes et plantation un peu plus onéreuse), ils nécessitent un bon contrôle de la concurrence herbacée dans les 3 à 4 premières années mais nécessitent par la suite moins d'opérations d'entretien.

Les taux de reprise sont meilleurs et d'autant plus que les conditions du milieu sont difficiles. Ils sont la plupart du temps couverts par une garantie de reprise qui permet un regarnissage sans rachat de plants.

Comme le contrôle visuel de l'état du système racinaire n'est pas possible à la livraison, c'est en amont qu'il faut se préoccuper des conditions d'élevage en pépinière en contractualisant les impératifs fixés : choix de la catégorie d'âge, de la taille du plant, de la taille du conteneur (au minimum 400 cm^3 pour les zones difficiles), d'un godet garantissant un système racinaire de bonne qualité, exigence d'une culture sur coussin d'air...

3 - LES PLANTS INOCULÉS

Nous avons développé dans le premier chapitre, le rôle des mycorhizes ou des symbioses bactériennes dans le fonctionnement de la nutrition et donc de la croissance des arbres. Nous avons souligné l'importance de l'installation de la symbiose au moment de la croissance de la racine, c'est donc au moment de la germination de la graine qu'elle est la plus efficace. Depuis quelques années, des travaux de recherche ont mis en évidence l'intérêt et la possibilité de contrôler en chambre de culture l'installation des bactéries symbiotiques.

Les essais mis en place depuis plusieurs années tant dans le domaine du réaménagement de carrières que dans les reboisements forestiers classiques, montrent une meilleure survie et une meilleure croissance des plants mycorhizés dans les situations les plus difficiles. En situation de sol favorable tant au niveau de la texture du sol que de sa fertilité, les différences qui peuvent être mises en évidence sont faibles et statistiquement non valables. Seuls des plants mycorhizés permettent l'installation de ligneux sur des stériles de terrils houillers par exemple. Cette possibilité de réussir une plantation d'arbres sur des terrains de très faible qualité ne doit pas amener à négliger la préparation correcte du sol remis en place et la conservation soigneuse de la terre végétale disponible. Elle permet cependant en situations limites, et en particulier dans le cas de carrières en front de taille en zone méditerranéenne avec des épaisseurs de terre végétale très faibles, de procéder à des plantations qui auront des chances de survie accrues.

L'inoculation était au stade de la recherche expérimentale dans les laboratoires de l'INRA, du CNRS ou du Cemagref il y a encore quelques années. Actuellement, la technique et les souches efficaces commencent à être transférées au niveau de la production en pépinière et à être proposées pour quelques couples espèce forestière/champignon mycorhizien au niveau de la production standard.

Ainsi le GIE Forêt-Mycorhize regroupe quatre pépinières forestières qui produisent des plants de Douglas mycorhizés avec une souche sélectionnée par l'INRA[47] de *Laccaria laccata* dont l'efficacité a été démontrée par des essais pour les plantations de douglas sur arène granitique. Des gains de croissance de 16 à 25% au bout de 10 ans sont obtenus avec des plants à racines nues mycorhizés par rapport à des plants à racines nues non inoculés volontairement[48]. Pour ces plants à racines nues, les plants 1+1 taille 20/40 sont vendus (tarifs pépinières Naudet, 1999-2000) :

- 3,20 f pour des plants non inoculés ;
- 4,30 f pour des plants inoculés avec la souche S238N de *Laccaria.*

D'autres recherches sont en cours pour sélectionner et transférer à la production en pépinière des souches de champignon permettant des gains de productivité chez des feuillus (hêtre et chêne).

En dehors du couple douglas/*Laccaria laccata* produit presque exclusivement à racines nues, peu de pépinières en France se sont lancées dans la production de plants mycorhizés. A notre connaissance, la plus avancée dans le domaine est la pépinière Robin qui propose une gamme maintenant assez large d'espèces mycorhizées sous forme de plants en conteneurs (figure 23).

Espèce forestière	Mycorhize	Catégorie âge / volume conteneur / taille plant	Prix
Cedrus atlantica	*Hebeloma crustuliniforme*	1-0 / 430 cm^3 / 12+	4,65 f
Cedrus atlantica	*Laccaria bicolor*	1-0 / 430 cm^3 / 12+	4,65 f
Picea excelsa	*Hebeloma crustuliniforme*	1-0 / 300 cm^3 / 10-20	4,80 f
Picea excelsa	*Laccaria bicolor*	1-0 / 300 cm^3 / 10-20	4,55 f
Pinus halepensis	*Hebeloma crustuliniforme*	1-0 / 300 cm^3 / 8-15	3,95 f
Pinus laricio corsicana	*Laccaria bicolor*	1-0 / 430 cm^3 / 8+	4,35 f
Pinus sylvestris	*Laccaria bicolor*	1-0 / 300 cm^3 / 8+	2,89 f
Betula verrucosa	*Laccaria bicolor*	1-0 / 300 cm^3 / 30-50	5,40 f
Fagus sylvatica	*Laccaria bicolor*	1-0 / 300 cm^3 / 20-35	4,40 f
Fagus sylvatica	*Hebeloma crustuliniforme*	1-0 / 300 cm^3 / 20-35	4,40 f

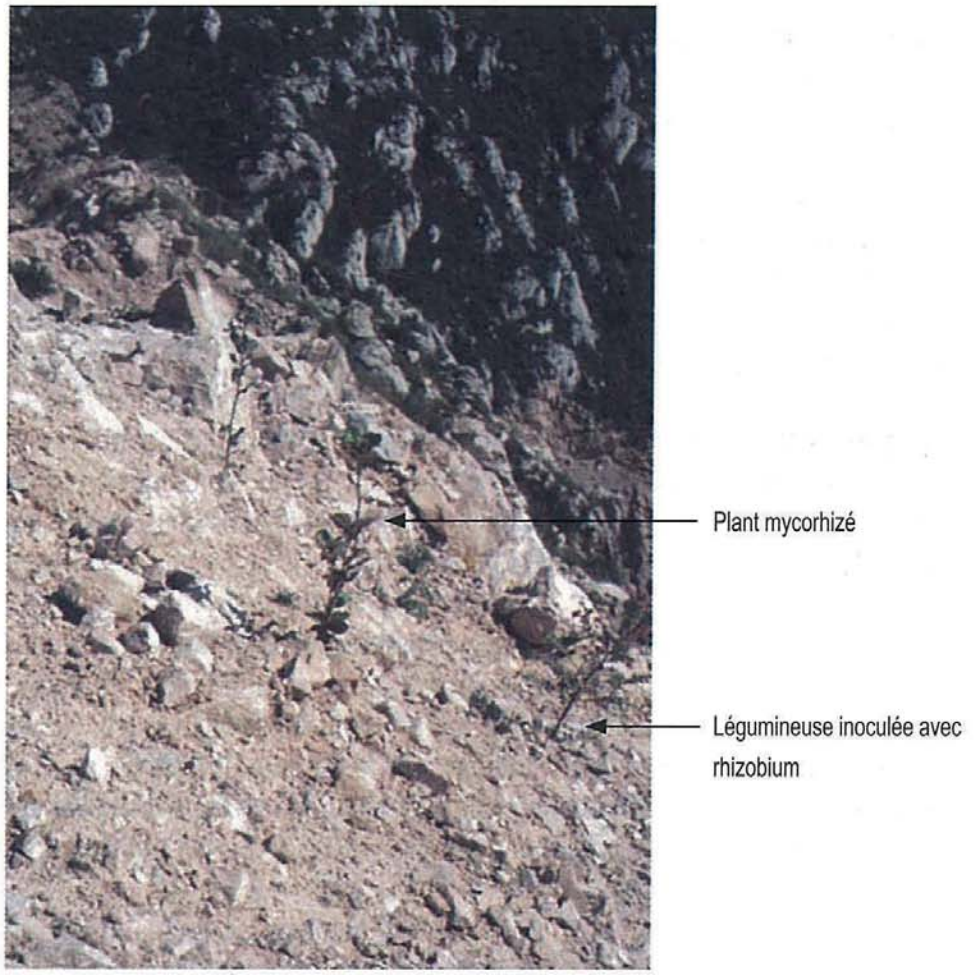
Figure 23 : Exemple de couples arbre/mycorhize (éléments tirés du catalogue 2000 des pépinières Robin).

Les plants produits sont tous des plants en conteneur, et généralement dans un conteneur de taille moyenne (de 300 à 430 cm^3). Il s'agit donc de plants déjà chers en raison de la taille du conditionnement et la mycorhization y ajoute un surcoût de 1 franc. C'est également le cas pour les productions de douglas à racines nues des autres pépinières du GIE, les plants mycorhizés coûtent 1 franc de plus que les plants standard.

47 INRA de Nancy, M. Garbaye, Equipe Microbiologie Forestière 54280 Champenoux.
48 Mais pour lesquels une inoculation naturelle peut se produire dans le sol.

D'autres types d'inoculation ont été réalisés de manière expérimentale (travaux de M. Moiroud[49] [TPG 4] et de M. Cleyet-Marel[50]) avec des bactéries fixatrices d'azote (Frankia ou Rhizobium selon les espèces) sur des substrats bruts. Ces méthodes sont largement employées au Canada et aux USA. Ces mycorhizations permettent en effet la croissance des plantes inoculées avec une plus grande vigueur et permettent aussi à plus long terme d'enrichir le milieu. Actuellement, à part des cultures de petits lots inoculés par la pépinière administrative des Milles à Aix-en-Provence, il ne semble pas que des plants soient produits de manière standard par des pépinières.

PLANCHE 1 . Un exemple d'utilisation de plants mycorhizés.



[F12M] Photo Cemagref Delory I.

Essai de mise en place de plants mycorhizés sur un substrat brut. La plantation d'essences forestières est accompagnée de celle de légumineuses inoculées par des bactéries fixatrices d'azote pour enrichir le milieu.

Dans la région lyonnaise les espèces testées sur un substrat brut sur une pente d'exposition sud, ont montré de bons résultats en taux de survie après 4 saisons de végétation (figure 24) et des croissances pour les plantes à port arborescent de 1,70 à 2,30 m en 4 ans.

49 Université Claude Bernard Lyon I, laboratoire d'écologie microbienne.
50 Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes, UMR 113, Montpellier

Espèce	Bactérie fixatrice d'azote	Taux de survie
Alnus cordata	*Frankia*	76 %
Eleagnus angustifolia	*Frankia*	63 %
Hippophaë rhamnoides	*Frankia*	97 %
Coraria myrtifolia	*Frankia*	97 %
Robinia pseudoacacia	*Rhizobium*	100 %
Spartium junceum	*Rhizobium*	100 %
Colutea arborescens	*Rhizobium*	100 %
Alnus subcordata	*Frankia*	90 %*
Shepherdia canadensis	*Frankia*	100 %*
Caragana arborescens	*Rhizobium*	96 %*
Cytisus laburnum	*Rhizobium*	90 %*

Figure 24 : Espèces fixatrices d'azote ayant montré de bons résultats (d'après [TPG 4]).
** les taux de survie ont été mesurés à deux ans pour ces espèces.*

Les travaux menés par M. Moiroud [TPG 4] montrent :
- que la sélection des souches de bactéries symbiotiques doit être effectuée afin de sélectionner des souches très performantes (cas de l'aulne à Voglans) et plusieurs souches doivent être inoculées pour obtenir les meilleurs résultats ;
- que les plants d'aulnes non nodulés mis en terre, n'ont pas rencontré au bout de trois ans, d'inoculum dans le sol et qu'ils ne fixent donc pas l'azote atmosphérique ;
- que les conditions de culture en pépinières doivent être spécifiques pour les plants inoculés et en particulier ne pas recevoir d'apport d'azote (utiliser un substrat pauvre en azote et ne pas fertiliser) et recevoir peu de phosphore.

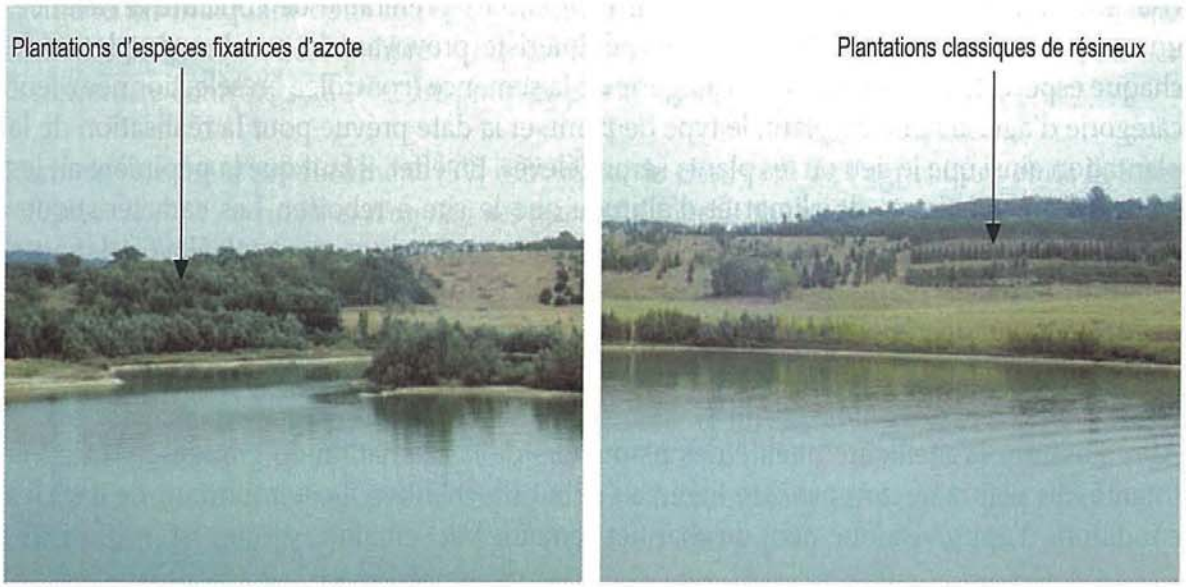
Pour la zone méditerranéenne, les expérimentations mises en place par M. Cleyet-Marel montrent l'intérêt des inoculations de souches spécifiques de Rhizobium pour diverses espèces légumineuses annuelles et pérennes arborescentes afin de leur permettre de s'installer sur des substrats bruts. Associer dans un même schéma de plantation ces espèces fixatrices d'azote, des plants forestiers classiques et des espèces méditerranéennes de garrigue, permet à ces derniers un meilleur développement grâce à l'enrichissement du milieu en azote.

Nous reprendrons ces éléments dans la partie concernant les réaménagements de carrières en roche massive en zone méditerranéenne. Néanmoins, les espèces arbustives qu'il est possible d'utiliser sont les suivantes :
- Les espèces fixatrices d'azote : *Alnus cordata, Amorpha fruticosa, Colutea arborescens, Medicago arborea, Robinia pseudoacacia ;*
- Les espèces méditerranéennes : *Arbutus unedo, Bupleurum sp, Cistus monspeliensis, Phillyrea sp, Pistacia terebinthus* ou *lentiscus, Quercus ilex.*

Les plants inoculés présentent une piste d'expérimentation très intéressante et prometteuse pour les réaménagements dans les conditions les plus difficiles (sol et climat défavorables à la croissance des plants). Les recherches engagées et les ébauches de transfert vers la production de plants en pépinière concernent aussi bien les mycorhizations que les inoculations avec des bactéries fixatrices d'azote qui peuvent permettre de végétaliser et de boiser des sols bruts.

Le développement d'une filière de production de plants spécifiques pour le réaménagement des carrières pourrait être envisagé de la même manière que les sylviculteurs intéressés par les potentialités du douglas ont suscité la mise en place du GIE Forêt Mycorhize.

PLANCHE 2 . Comparaison de plantations fixatrices d'azote et non fixatrices d'azote.



[F10m] Photo Cemagref Delory I.

Sur le même site :
- plantations rectilignes traditionnelles de résineux (photo de droite).
- plantations non alignées d'arbres fixateurs d'azote : aulne et robinier (photo de gauche).
Le développement en hauteur et la fermeture du milieu sont bien plus importants pour les plants fixateurs d'azote qui peuvent se développer sur un milieu pauvre.

Quel que soit le type de plant retenu, son état physique et physiologique au moment de la plantation est un élément primordial dans le succès du boisement, et il est donc fondamental de s'assurer de la qualité des plants, nous développerons ce point dans le paragraphe suivant.

III - LE CAHIER DES CHARGES POUR L'ACQUISITION DES PLANTS

La mauvaise qualité des plants est toujours synonyme d'échec de la plantation. Beaucoup d'argent et de moyens humains auront donc été dépensés pour rien. La qualité des plants dépend de cinq étapes les menant à la plantation [24, 39]:
- le semis d'une semence de bonne qualité génétique ;
- les conditions de culture en pépinière ;
- les conditions d'arrachage, de conditionnement[51] et de transport ;
- les conditions de stockage sur le site avant plantation ;
- les conditions de plantation proprement dites[52].

51 Ces deux points ne sont valables que pour les plants à racines nues.
52 Ce point sera traité dans le chapitre 7.

La définition d'un cahier des charges précis liant le pépiniériste, l'entreprise transportant les plants, l'entreprise mettant en place les plants et le carrier[53] permet de fixer de manière contractuelle ces quatre étapes.

1 - LES CONDITIONS DE CULTURE EN PÉPINIÈRE

Pour favoriser la qualité des plants [39], il est toujours préférable de conclure à l'avance, un contrat de culture (CCTP[54]) avec un pépiniériste prévoyant le nombre de plants de chaque espèce, leur provenance, la catégorie de la semence (contrôlée ou sélectionnée), leur catégorie d'âge, la taille du plant, le type de plant, et la date prévue pour la réalisation de la plantation ainsi que le lieu où les plants seront élevés. En effet, il faut que la pépinière ait les mêmes caractéristiques de climat et d'altitude que le site à reboiser. Les caractéristiques de sol n'ont pas d'importance pour les plants en conteneurs qui sont élevés dans un substrat. Pour les plants à racines nues nous n'avons pas trouvé dans les différents documents sur le reboisement, de préconisations concernant la nature du sol de la pépinière [24, 27, 39].

Afin d'assurer la meilleure qualité des plants lors de la plantation de grandes surfaces, la totalité des plants ne doit pas être livrée au début du chantier, il est important de fixer les conditions d'approvisionnement du chantier semaine par semaine.

Toutes ces précautions permettent en effet de bénéficier de plants qui auront été élevés spécialement pour l'occasion alors qu'une commande de « dernière minute » va utiliser les plants disponibles dans la pépinière. Ceux-ci ne seront pas forcément de bonne qualité (plants rejetés par d'autres acheteurs, plants restés trop longtemps en culture, plants sous divers conditionnement ou types...). Ils ne correspondront en outre pas forcément aux essences souhaitées.

Ceci impose d'avoir réfléchi en amont du projet de réaménagement et de savoir à quelle période le terrain sera disponible pour la plantation, connaître les espèces, la catégorie des plants et le nombre de plants souhaités. Le moment de cette commande dépendra de la durée d'élevage en pépinière des différentes catégories de plants (de 1 à 4 ans).

Dans le cas de plants particuliers (plants inoculés, espèces peu fréquemment utilisées) cette étape de contrat préalable est indispensable.

Un point très important à discuter avec le pépiniériste, est la fertilisation des plants pendant la phase de culture, et en particulier la fertilisation azotée. Les conséquences d'une fertilisation azotée sont une croissance plus rapide des plants mais aussi, une certaine fragilisation physiologique car le système racinaire n'aura pas eu à chercher de l'azote dans le sol puisqu'il lui aura été fourni en abondance. Les plants trop fertilisés sont donc de grande taille pour leur âge, ce qui est déconseillé pour les boisements en conditions difficiles. De plus, les plants

53 Dans certains cas, le pépiniériste se charge de la livraison des plants, dans d'autres cas le carrier lui-même les transporte et les met en place.
54 Cahier des Clauses Techniques Particulières.

sont habitués à un certain taux d'éléments nutritifs qu'ils ne retrouveront pas dans le sol et leur crise de transplantation en sera d'autant plus forte. Pour les plants mycorhizés, l'absence de fertilisation azotée et une faible fertilisation en phosphore doivent être imposées afin que l'infestation[55] se produise bien et que les bactéries symbiotiques soient actives.

Des garanties doivent être également prises en ce qui concerne la qualité du système racinaire en indiquant dans le contrat à partir de quel pourcentage de plants à système racinaire déformé ou déséquilibré, le lot sera refusé. Ce contrat CCTP doit également préciser comment ce contrôle sera effectué pour les plants en conteneur.

L'annexe 4 issue d'un document [39] diffusé par le ministère de l'agriculture et de la forêt « *Réussir la forêt : contrôle et réception des travaux* » fournit toutes les indications permettant le contrôle statistique des lots de plants livrés et les différentes situations de rejet des plants pour absence de qualité.

Un cahier des charges précis établi entre le carrier et la pépinière permet :
- de réaliser des appels d'offre précis en pouvant mieux comparer les différentes réponses faites ;
- de garantir de meilleures conditions de production donc de qualité des plants et de respect des délais ;
- de pouvoir en cas de non-respect du cahier des charges obtenir une réparation du préjudice.

Il doit définir le plus précisément possible la qualité des plants souhaitée, le nombre, la date de livraison, les conditions particulières de production à respecter et les conditions de contrôle et de refus des lots livrés.

2 - LES CONDITIONS D'ARRACHAGE, DE CONDITIONNEMENT ET DE TRANSPORT

Les conditions d'arrachage et de conditionnement s'adressent principalement aux plants à racines nues. Pour les plants en conteneurs, la taille des caisses peut cependant être spécifiée en fonction de la difficulté d'accès du lieu de plantation (par exemple pour des banquettes de front de taille).

Le délai à ne pas dépasser entre l'arrachage et la livraison peut être spécifié dans le CCTP. En règle générale (CCTG, article 2-3-1) l'intervalle compris entre l'arrachage et la plantation ne doit pas dépasser 7 jours.

Généralement, les plants à racines nues sont conditionnés en bottes de 50 à 100 plants. Les ligatures si elles sont trop serrées peuvent blesser les tiges. Le meilleur conditionnement est de mettre les plants dont les parties aériennes sont non humides, dans des sacs de polyéthylène et encore mieux suremballés dans un carton [24].

55 L'infestation est la phase d'interaction effective entre l'organisme symbiotique et les racines de l'arbre hôte, alors que l'inoculation est la technique qui permet d'introduire l'organisme symbiotique dans le substrat où poussent les racines.

Les plants entre l'arrachage et la plantation doivent être protégés du soleil, du vent et du dessèchement à toutes les étapes (dans la pépinière, pendant le transport, sur le lieu du chantier). Si les plants ne sont pas expédiés tout de suite après l'arrachage, ils doivent être mis en jauge saine[56] à l'ombre (figure 26) et arrosés ou conservés en chambre froide.

Toute exposition au soleil des plants arrachés est préjudiciable en terme de taux de survie mais encore plus en croissance ultérieure (figure 25).

Durée d'exposition au soleil	Taux de reprise	Accroissement cumulé sur 5 ans (base 100)
0 mn	100 %	100
6 mn	90 %	25
10 mn	80 %	20
30 mn	30 %	15

Figure 25 : Incidence de l'exposition des plants au soleil (d'après [39]).

Le transport de tous les types de plants doit respecter 4 conditions essentielles [24] :
- protection contre le dessèchement, ce risque est accru par la vitesse de déplacement du véhicule ;
- protection contre le gel ;
- protection contre le soleil ;
- protection contre l'échauffement par fermentation de la masse des plants formant le lot d'expédition.

L'utilisation d'un véhicule fermé ou bâché permet généralement d'y répondre, avec en plus une sensibilisation du conducteur à la fragilité de sa marchandise[57]. Il est souvent préférable que la livraison soit faite par le pépiniériste qui reste ainsi responsable des éventuels dégâts aux plants occasionnés par le transport.

Les plants sont fragiles (surtout ceux à racines nues). Des précautions doivent être prises pendant l'arrachage et le transport. Ils doivent être impérativement protégés contre le soleil, le dessèchement, l'échauffement et contre le gel donc être conditionnés de manière adaptée et transportés en camion fermé.

3 - LES CONDITIONS DE STOCKAGE SUR LE SITE AVANT PLANTATION ET CONTRÔLE

Nous avons vu que toute exposition du plant au soleil nuit gravement à ses capacités de croissance et de survie. Il convient donc que la livraison des plants soit la plus rapprochée possible de leur plantation et que tout soit prêt pour réceptionner les plants.

Pour les plants en conteneurs ou les plants à racines nues en sacs plastiques, il faut les stocker dans un hangar fermé à température ambiante en ménageant des circulations d'air entre les lots afin de ne pas provoquer un échauffement.

56 Une jauge est une tranchée creusée dans un sol sain (non mouillant) dans laquelle les racines des plants sont déposés et recouverts si possible de sable sec.
57 Eviter les arrêts du véhicule en plein soleil ou au vent par exemple.

Pour des plants à racines nues, une jauge de taille adéquate doit être installée sur un sol sain, à l'ombre et à l'abri du vent, sur le lieu de la plantation. Les plants doivent y être déposés immédiatement. Les bottes seront déliées et les plants seront séparés les uns des autres et alignés côte à côte afin que leurs racines soient en contact avec la terre du bord de la jauge et avec le sable qui recouvrira les bases des plants (figure 26). Les plants ne doivent pas rester plus de 15 jours en jauge afin d'éviter qu'ils n'y reprennent leur croissance.

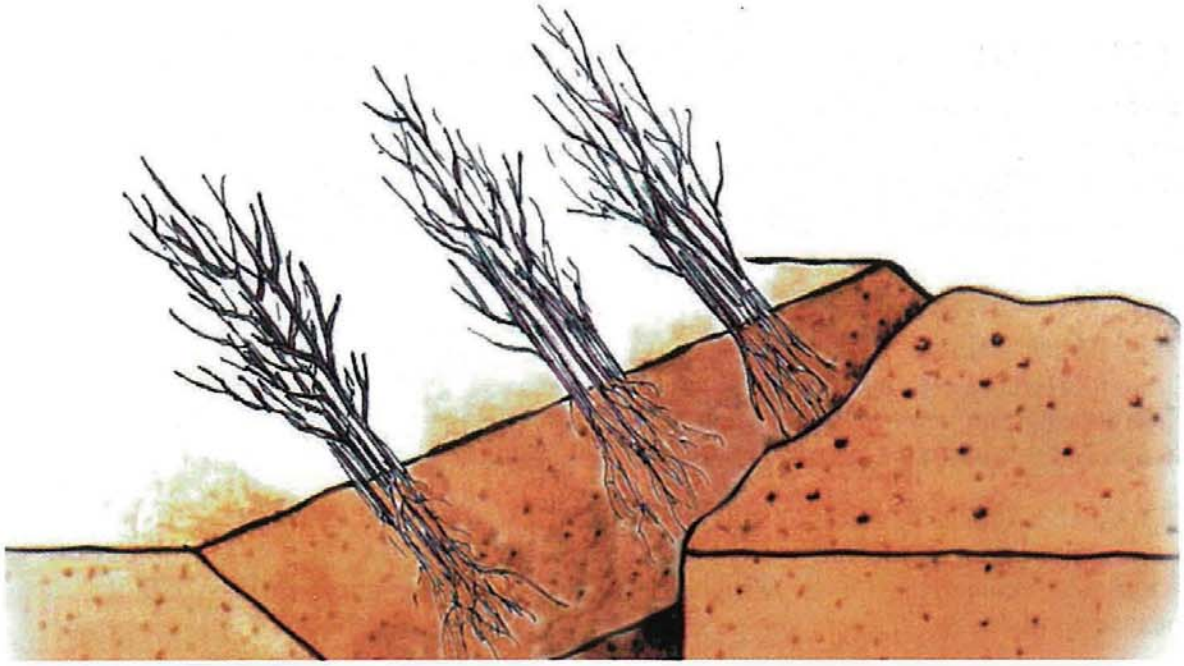


Figure 26 : Mise en jauge de plants à racines nues [27].

Le responsable du chantier de plantation doit donc réceptionner les plants dès leur arrivée et constater immédiatement leur conformité au CCTP (annexe 4). Si besoin, une réclamation sera formulée immédiatement au pépiniériste si les lots ne sont pas de bonne qualité.

Les points à contrôler pour la réception des lots varient selon les groupes d'espèces (figure 27).

La mise en jauge des plants à racines nues doit être effectuée si les plants ne sont pas plantés tout de suite. Le contrôle de la qualité des plants doit être immédiat. Il permet de vérifier le respect du cahier des charges et de contrôler l'état des systèmes aériens et racinaires des plants.

Défauts excluant les plants de la qualité loyale et marchande	*Abies alba Picea*	*Larix*	*Pinus*	*Pseudotsuga taxifolia*	*Fagus Quercus*	*Populus sp*
Plants portant des blessures non cicatrisées :						
- sauf blessures de coupe pour supprimer les flèches en surnombre	X	X	X	X	X	X
- sauf autres blessures de coupe pour tailles culturales	X	X	X	X		X
- sauf blessures de rameaux	X	X	X	X	X	X
Plants partiellement ou totalement desséchés	X	X	X	X	X	X
Tige à forte courbure	X			X		X
Tiges multiples	X	X	X	X	X	X
Tige à plusieurs flèches	X	X	X			X
Tige, rameaux incomplètement aôutés	X(1)		X(1)			X(2)
Tige sans bourgeon terminal sain	X(1)	X(1)	X(1)	X(1)		
Ramification absente ou nettement insuffisante	X			X		
Aiguilles les plus récentes gravement endommagées	X		X	X		
Collet endommagé (4)	X	X	X	X	X	X(3)
Racines principales gravement enroulées ou tordues (4)	X	X	X	X	X	
Radicelles absentes ou gravement amputées (4)	X	X		X	X(5)	
Plants présentant de graves dommages causés par des organismes nuisibles	X	X	X	X	X	X
Plants présentant des indices d'échauffement, de fermentation ou de moisissure consécutifs au stockage en pépinière	X	X	X	X	X	X

(1) sauf si les plants sont extraits de la pépinière pendant la période de végétation
(2) à l'exclusion des clones Populus deltoïdes angulata
(3) sauf pour les plants de Populus recépés en pépinière
(4) sauf pour les plançons
(5) sauf pour les Quercus borealis

Figure 27 : Liste des points à contrôler pour vérifier la qualité des plants livrés (d'après [27]).

Sauf cas particuliers, le semis direct n'est généralement pas utilisé en réaménagement forestier de carrières de granulats. La plantation est la voie quasi exclusive du reboisement.

Le choix des plants est primordial dans la réussite du réaménagement, il va conditionner :
- le coût de l'opération ;
- les chances de survie des espèces plantées et donc la nécessité d'un regarnissage si la mortalité est trop importante ;
- les opérations d'entretien à prévoir les premières années.

C'est donc le coût global du reboisement réussi, au terme d'une dizaine d'années, qu'il faut calculer pour choisir la meilleure solution.

Les plants à racines nues, ont un prix d'achat et de plantation moindres mais ils sont très fragiles (conditions de transport, crise de transplantation, concurrence herbacée...). Ils sont donc généralement plantés à forte densité, nécessitent des regarnissages et un entretien bien suivi.

Les plants en conteneurs sont beaucoup plus chers à l'achat, leur plantation exige des moyens plus conséquents (trou à creuser) mais ils sont moins fragiles, leur taux de survie est d'autant plus important que le volume du conteneur est grand (400 cm^3 au minimum). Généralement leur reprise est garantie par le pépiniériste, ils ont une meilleure croissance la première année.

Les plants mycorhizés ont montré un intérêt certain dans les sols les plus pauvres justifiant largement leur faible surcoût par rapport au plant de même type en conteneur.

Etablir avec un pépiniériste un contrat précis de fourniture de plants est un élément fondamental (et n'engendrant pas de surcoût) dans la réussite du reboisement. Un cahier des charges le plus précis possible permet de s'assurer de la qualité des plants qui seront mis en œuvre. Il permet aussi le refus de plants de mauvaise qualité. Les points fondamentaux à définir sont les conditions :

- de culture en pépinière ;
- d'arrachage, de conditionnement des plants et de transport ;
- de stockage sur le site avant plantation et de plantation proprement dites.

PARTIE 2

REAMENAGEMENT DES FONDS DE FOUILLE ET DES CARREAUX

CHAPITRE 4

PREPARATION DE LA REHABILITATION

I - LE PHASAGE DES OPERATIONS

Toutes les études bibliographiques soulignent le grand intérêt de la remise en état à l'avancement et l'importance fondamentale du soin apporté aux opérations réalisées lors de l'étape de décapage sélectif et de manipulation des terres de découverte avant l'exploitation du gisement.

Elles mettent aussi en évidence la nécessité de réfléchir très en amont, au moment du dépôt de demande d'autorisation d'exploiter, au schéma global de l'exploitation. En effet, il faut exploiter le gisement de manière cohérente afin de diminuer les coûts, de ne pas créer des difficultés et même créer des conditions favorables pour le futur reboisement. Les réflexions doivent porter sur l'ordre d'exploitation des différents secteurs de la carrière (pour faciliter les écoulements d'eau) et sur la disposition d'éventuels écrans de végétation laissés en place ou à créer en début d'exploitation.

En outre, comme les recommandations anglaises [92] le préconisent, une étape de concertation entre les différents intervenants (carrier, administration de l'agriculture et de l'industrie, expert forestier ou sylviculteur) est très utile pour la constitution d'un dossier précis de préparation de la réhabilitation.

La définition précise des espèces, catégories d'âge et types de plants (voir chapitre 3) doit être faite à cette étape afin de préparer un cahier des charges précis pour permettre la signature d'une convention de production et/ou de plantation avec un pépiniériste et une entreprise de travaux forestiers. Les périodes de plantation doivent être également précisées dans le plan de phasage.

1 - RESPECT DES ÉCOULEMENTS D'EAU

Dans le cas d'un terrain en pente, l'exploitation doit commencer en amont de l'écoulement de la nappe (c'est-à-dire en haut de pente) afin que l'évacuation des eaux de la nappe soit toujours possible pour l'ensemble de la carrière. Dans le cas contraire, si les parcelles les plus basses sont exploitées en premier, l'eau de la nappe en amont stagnera dans la fosse créée et imposera des pompages avant réaménagement.

2 - ECRANS BOISÉS ET VOIES DE DESSERTE

Dans le cas des réaménagements forestiers de production, nous avons déjà souligné l'intérêt de concevoir l'exploitation de manière à garder des rideaux d'arbres ou à les créer de manière précoce, pour protéger les futures plantations du vent et leur assurer un ombrage latéral.

De plus, quand la parcelle à reboiser est à proximité de l'exploitation, l'émission de poussières peut être très nocive pour les jeunes plants. En effet, la poussière (souvent calcaire) se dépose sur les feuilles, ralentit les mécanismes de la photosynthèse et affaiblit les arbres. L'arbre affaibli est alors beaucoup plus sensible aux attaques d'insectes et de champignons. Dans ce cas, laisser un écran de végétation existant est indispensable afin de protéger les plantations contre le dépôt de poussière.

Le plan de phasage doit prévoir de manière précise les schémas de desserte du futur boisement. Ces voies de circulation devront être utilisées dès la phase de réaménagement comme seules voies de circulation sur la parcelle afin de limiter le compactage des autres secteurs.

3 - PHASAGE DE L'EXPLOITATION

Dans la phase de visite, nous ne nous sommes pas intéressés au plan de phasage (nous n'avons pas demandé la communication des dossiers d'autorisation d'exploiter).

Cependant, lors des entretiens avec les carriers et dans les recommandations anglaises [92], la nécessité que l'administration de tutelle accepte une certaine souplesse dans le respect du plan de phasage est mise en évidence comme un moyen d'améliorer la qualité des réaménagements. En effet, les experts anglais notent qu'un réaménagement prévu longtemps à l'avance ne peut pas permettre de s'adapter aux conditions réelles trouvées lors de l'extraction. Ils conseillent de prévoir, si cela se justifie par la qualité attendue du réaménagement, la possibilité de modifier après une nouvelle concertation le plan de réaménagement[58]. En particulier, le respect trop strict d'un plan de phasage peut avoir pour effet négatif de pousser à manipuler de la terre en condition humide. Ce point sera développé dans le chapitre 5 - IV -1.

Le réaménagement coordonné constitue toujours le meilleur choix [84]. Quand il est soigneusement planifié et réalisé, il permet de limiter au maximum la manipulation de la terre. L'idéal est de ne pas avoir à déposer la terre en tas pour la reprendre ensuite, mais de passer directement du décapage à la remise en place sur une autre parcelle. Ces opérations nécessitent une bonne coordination et un rythme d'avancement comparable des deux chantiers. Il faut toutefois tenir compte des conditions de climat et d'humidité du sol pour toujours éviter de manipuler des terres insuffisamment ressuyées ou par temps humide (chapitre 5 - IV - 1).

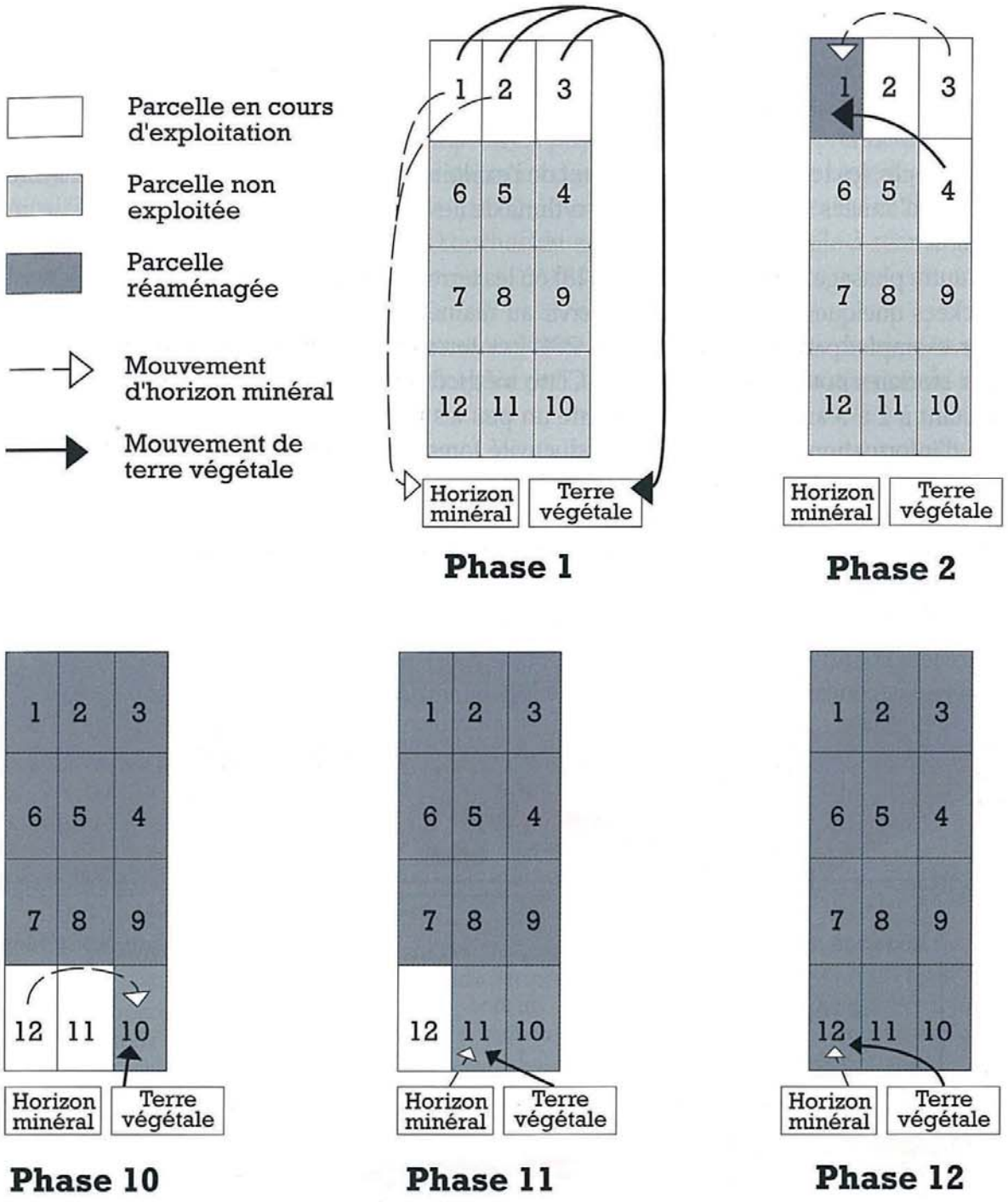
En Grande-Bretagne [84], un plan d'avancement de l'exploitation est proposé afin de pouvoir limiter les mouvements de terre (figure 28).

Lors de la première phase :
- l'horizon organo-minéral des trois premières parcelles est décapé sélectivement et stocké à l'extrémité de l'exploitation,
- l'horizon minéral est décapé sur les deux premières parcelles et stocké en bout d'exploitation. Ces deux tas seront laissés en place jusqu'à la dernière parcelle à réaménager. Le stockage pourra donc être de plusieurs années et nécessitera des précautions particulières (chapitre 2 - III - 2),
- le gisement des parcelles 1 et 2 est exploité.

Lors de la deuxième phase :
- la parcelle 1 est à réaménager,
- l'horizon minéral de la parcelle 3 est alors décapé et mis directement en place sur le fond de fouille nivelé de la parcelle 1,
- la parcelle 4 est alors décapée de son horizon organo-minéral qui est mis en place directement sur le niveau d'horizon minéral de la parcelle 1.

---

58 Cette éventualité est également prévue par la réglementation française, il y a une procédure de déclaration de modification des conditions d'exploitation et de réaménagement.



Phase 1 : la terre végétale décapée des parcelles 1 à 3 est stockée, l'horizon minéral des parcelles 1 et 2 est décapé et stocké, les granulats des parcelles 1 et 2 sont exploités.

Phase 2 : la parcelle 1 reçoit l'horizon minéral décapé de la parcelle 3 et la terre végétale de la parcelle 4.

Phase 10 : les parcelles 1 à 9 sont réaménagées, la parcelle 10 reçoit l'horizon minéral de la parcelle 12 et le tiers de la terre végétale stockée depuis la phase 1.

Phase 11 : la parcelle 11 reçoit la moitié de l'horizon minéral stocké depuis la phase 1 et le deuxième tiers de la terre végétale stockée.

Phase 12 : la parcelle 12 reçoit le reste du stock de l'horizon minéral et le dernier tiers du stock de la terre végétale.

Figure 28 : Planification d'une exploitation pour limiter les mouvements de sol (d'après [84]).

L'exploitation et le réaménagement à l'avancement se poursuivent ainsi de parcelle (n) en parcelle (n+2) pour l'horizon minéral et (n+3) pour l'horizon organo-minéral. Les trois dernières parcelles réaménagées utiliseront les terres stockées depuis le début de l'exploitation.

Dans ce cas, les terres décapées au début de l'exploitation pourront être stockées plus d'une dizaine d'années selon la surface et le rythme de l'exploitation du gisement.

Un autre phasage peut être proposé [118] où les terres décapées de la première parcelle sont stockées quelques années avant de servir au réaménagement d'un parcelle intermédiaire (par exemple, parcelle 7 de la figure 28). Les terres de la parcelle 7 seront donc à leur tour stockées pour quelques années. Cette méthode évite les stockages trop longs en les limitant à 2 à 3 ans, mais elle augmente un peu les manipulations de terre. Nous n'avons pas d'information sur les gains de productivité forestière obtenus par cette réduction de la durée de stockage du sol. Cette manipulation supplémentaire de terre n'a peut être pas un grand intérêt si le stock de terre de longue durée est installé sur un terrain sain, drainé et ensemencé avec des légumineuses et des graminées (voir le chapitre 2 - III - 2).

La terre décapée de la première parcelle peut également servir à constituer un merlon anti-poussière et anti-bruit le long de l'exploitation [118] avec une mise en végétation rapide et soigneuse (couverture de graminées et de légumineuses et plantation d'arbres).

Le déroulement schématique idéal d'un réaménagement forestier à l'avancée peut ainsi être représenté (figure 29).

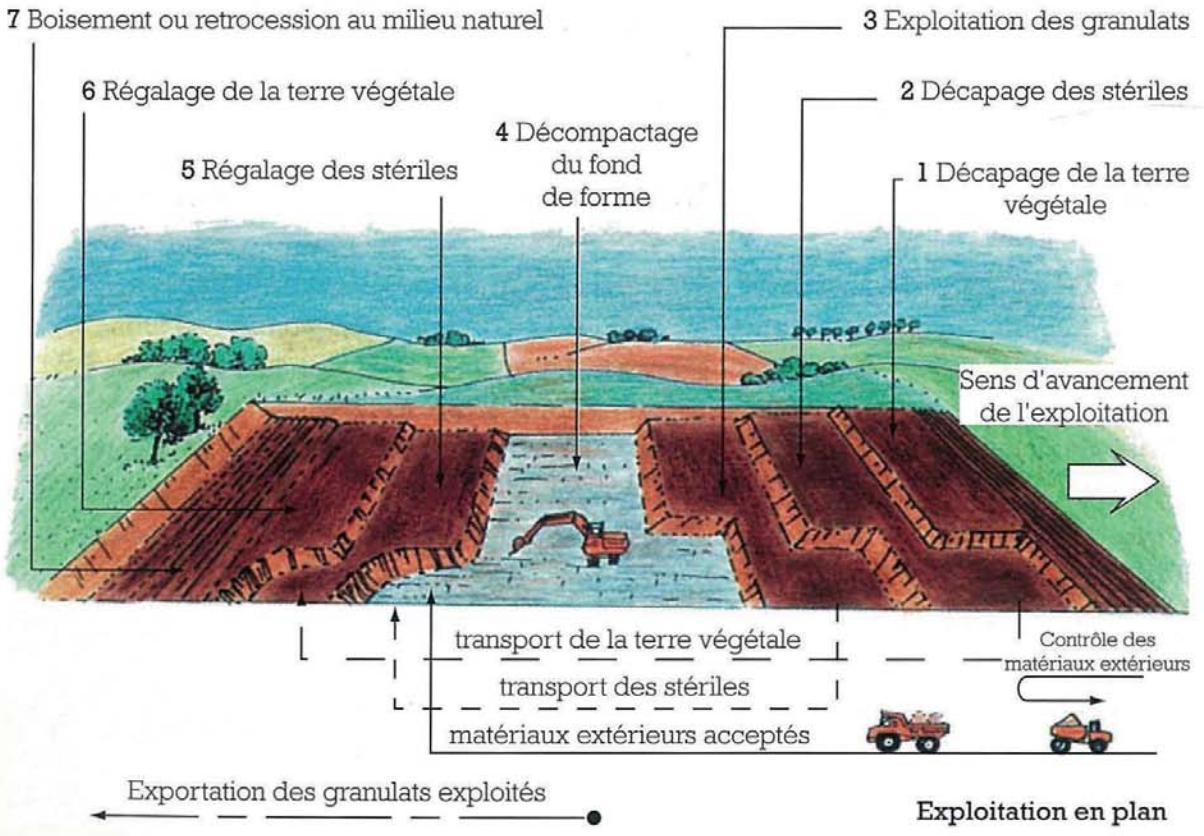


Figure 29 : Schéma d'un réaménagement forestier à l'avancée.

Les opérations coordonnées doivent être les moins contraignantes possibles en ce qui concerne les circulations de véhicules.

Afin de faciliter les manœuvres des engins[59], il est possible de décaper une première parcelle de 60 m de large et de ne décaper par la suite que des parcelles de 40 m de large (figure 30). Ainsi, seuls 40 m de la première bande (de 60 m) sont réaménagés. Ceci laisse 20 m aux engins pour manœuvrer et régaler les couches de sol. La dernière parcelle à réaménager fera 60 m.

Plus les bandes sont longues, plus le chantier avance rapidement. Au cours du réaménagement de chaque bande, on procède par largeur de 5 à 6 m (soit l'amplitude d'action du bras de la pelle).

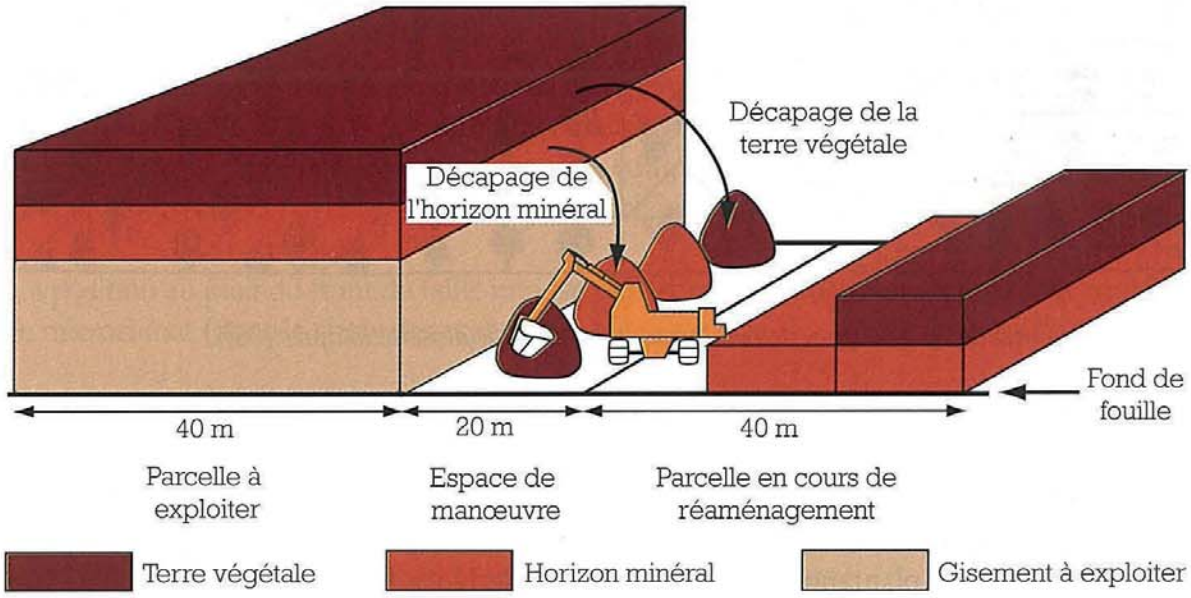


Figure 30 : Schéma de décapage pour faciliter les manœuvres.

Le phasage des opérations permet d'organiser au mieux le décapage, l'exploitation du gisement et le réaménagement coordonné. Il permet de limiter les mouvements de véhicules et les manipulations de terre, sources de risques de compaction du sol. Il permet de prévoir très en amont, les mises en place d'écrans boisés de protection de la future plantation et de rédiger un cahier des charges très précis de commande des plants forestiers.

59 Dossier de réaménagement agricole de Criqueboeuf-sur-Seine, mais applicable au réaménagement forestier.

II - L'ACCESSIBILITE DE LA PARCELLE REAMENAGEE

Si la vocation de la parcelle est la production ligneuse, les voies de desserte doivent être définies afin de permettre l'entretien et l'exploitation des plantations dans de bonnes conditions. En effet, la facilité d'accès dans les parcelles boisées influence la gestion et la rentabilité du reboisement [38]. Ainsi, les lignes de plantation doivent être espacées de 3 à 4,50 m afin de permettre le passage du matériel d'entretien, des layons parallèles aux lignes de plantation faciliteront les travaux d'élagage. Un espace suffisant (5 m au minimum) doit être laissé libre de toute plantation en bout de ligne afin de permettre les manœuvres des engins. Les voies de desserte doivent supporter la circulation d'engins lourds, elles doivent avoir des pentes inférieures à 7 % et ne pas comporter de virage prononcé. Leur disposition par rapport aux lignes de plantation doit faciliter les sorties des tracteurs (figure 31).

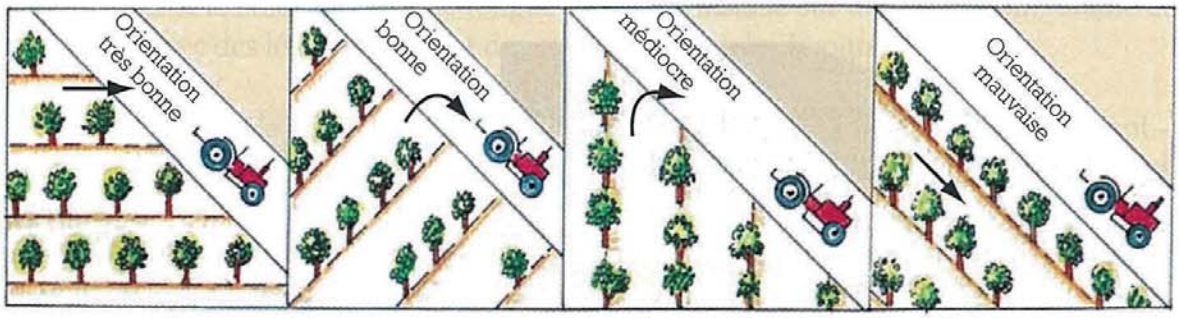


Figure 31 : Orientation des lignes de plantation et des voies de desserte (d'après [38]).

1 - LES CARRIÈRES EN FOSSE

Plusieurs aspects de la topographie de la parcelle réaménagée sont à prendre en compte, ils sont cependant très liés au contour des périmètres autorisés :

- la protection des plantations contre les chutes de blocs (voir paragraphe 2) quand la carrière reste fortement encaissée ;
- l'accès à la parcelle décaissée doit être facile pour les différents engins forestiers, les rampes d'accès devront être d'une pente inférieure à 7 % avec un espace de manœuvre suffisant en bas pour permettre l'accès des tracteurs assurant l'entretien et des engins de débardage de bois ;
- le nivellement de la rampe d'accès à la parcelle doit être étudié[60] pour éviter qu'elle ne guide les écoulements d'eaux pluviales dans la parcelle ;
- les conditions de microclimat (stagnations d'air froid, accumulations de neige...) et de drainage du terrain doivent être analysées afin de choisir les espèces les mieux adaptées et l'étude microclimatique doit être au besoin suivie par des relevés pendant l'exploitation afin de modifier éventuellement le projet de réaménagement[61] si un risque d'échec de la plantation choisie est pressenti.

60 Il est possible par exemple de constituer en haut de la rampe une contre-pente qui limitera la descente directe des eaux de ruissellement.

61 Il est possible de changer l'essence forestière prévue pour une autre espèce moins sensible aux gels de printemps par exemple.

Car en ce qui concerne le microclimat, les reboisements forestiers sont très sensibles aux stagnations d'air froid qui peuvent entraîner des gels de bourgeons, et ce pour diverses raisons [5] :
- les jeunes plants débourrent en général avant les arbres adultes (jusqu'à 4 semaines avant pour des plants d'épicéa) [5] ;
- quand il y a un couvert herbacé, la température est plus basse au sommet des graminées[62] qu'au sol, or c'est à ce niveau que se situe le bourgeon terminal des jeunes plants ligneux.

Les gels de bourgeons annulent complètement les possibilités de croissance des plants cette année là. De plus, à long terme, quand le bourgeon terminal est détruit, un bourgeon latéral le remplace et produit un arbre déformé dont la qualité marchande sera médiocre.

La stabilisation des talus autour des parcelles en décaissé sera abordée dans le chapitre 10.

2 - LES CARREAUX D'EXPLOITATION

Généralement le carreau des exploitations de carrière à flanc de coteaux ne présente pas de difficultés d'accès. Il a, dans la plupart des cas, servi aux déplacements des engins pendant l'exploitation. A ce titre, il a pu être fortement compacté et une attention toute particulière doit être portée à son décompactage avant remblaiement.

La position au pied du front de taille impose plusieurs contraintes concernant la sécurité et le microclimat (donc le choix des espèces).

La protection des plantations contre les éventuelles chutes de blocs peut être assurée soit par :

- un merlon de protection à établir entre la plantation et le pied du front de taille en laissant une distance suffisante (5 mètres) pour les manœuvres d'engins ;

- un talutage du gradin le plus bas avec une pente qui permette la plantation.

Ces deux points seront abordés dans le chapitre 10.

Les conditions climatiques en pied de front de taille peuvent être influencées par la présence et la nature de celui-ci (réverbération du soleil sur une roche claire, ombrage de la parcelle, protection contre le vent...).

Souvent, au début de l'exploitation, un merlon a été constitué et planté afin d'isoler l'exploitation visuellement, phoniquement et contre les poussières. La présence de ce merlon déjà boisé par des arbres bien développés peut constituer une protection climatique et favoriser une ambiance forestière.

---

62 Ceci est lié au rayonnement calorique fort de la végétation pendant la nuit ; une grande partie de la chaleur accumulée pendant la journée est réémise vers le ciel la nuit.

3 - LES BASSINS DE DÉCANTATION

La principale difficulté d'accès des bassins de décantation est leur portance. En effet, il faut qu'ils soient complètement ressuyés depuis environ 5 ans[63] pour que leur portance soit suffisante pour l'accès de véhicules. Les plantations ne peuvent avoir lieu que sur des parcelles où il est possible d'accéder. Or, pendant ce délai, dans la plupart des situations[64], la recolonisation naturelle se produit de manière efficace [TPG 3]. Cette étude spécifique de la recolonisation naturelle des bassins de décantation met en évidence, à l'arrêt d'alimentation en eau des bassins, le passage progressif, en une dizaine d'années, d'une zone humide à une zone boisée par revégétalisation naturelle. Cette période s'accompagne du dessèchement progressif du bassin et de l'augmentation de la portance des sols. A ce moment, la situation est donc différente des autres types de réaménagements puisque le milieu est parfois occupé de manière très dense par des saules, des aulnes, du sureau, du robinier, éventuellement du bouleau et du pin sylvestre.

La réflexion devra porter alors sur le choix :
- de conserver ce boisement pionnier tel quel ;
- d'introduire des espèces matures sous l'abri de ce peuplement ;
- de le détruire et de pratiquer une plantation.

Ces points seront développés dans le chapitre 8.

L'accessibilité de la parcelle doit être réfléchie en fonction des contraintes du futur boisement (contraintes microclimatiques influençant le choix des espèces) et de celles de l'exploitation à maturité de ce boisement (accessibilité pour les entretiens et la récolte de bois).

63 Chaque bassin est un cas particulier, néanmoins, l'étude TPG 3 met en évidence des grandes classes de bassin en fonction de leur âge sans que la nature des boues et la région n'interviennent.

64 Sur substrat très sableux quelques blocages de la colonisation ont été observés en raison de la réserve en eau du sol trop faible [TPG 3].

Le projet de réaménagement forestier doit être prévu de manière précise très en amont de l'exploitation. Tous les paramètres détaillés ci-dessous doivent être analysés de manière à assurer aux futures plantations les conditions optimales de leur développement et à intégrer dans le projet de réaménagement les contraintes liées à la mise en œuvre et à l'entretien des futures plantations.

Des rideaux d'arbres (s'ils existent) doivent être laissés afin de :
- protéger les plants de la poussière de l'exploitation ;
- fournir un abri du côté le plus exposé au vent et recréer une ambiance forestière pour les plants.

Sur l'ensemble de l'exploitation, le réaménagement coordonné soigneusement planifié doit permettre de limiter les manipulations de terre. Cependant, en cas de conditions pluvieuses, stocker la terre quelques mois est préférable à une manipulation de terre non ressuyée.

Les futures voies de desserte sur la parcelle forestière doivent être définies, matérialisées sur le sol et servir à tous les transports de matériaux afin de limiter la compaction du reste de la parcelle.

Dans le cas d'une plantation ligneuse de rendement, la facilité d'accès pour les travaux d'entretien et de récolte future des bois doit être étudiée (disposition des dessertes par rapport aux rangs de plantation, mais aussi, rampe d'accès à une parcelle en fosse).

Les conditions microclimatiques des parcelles doivent être étudiées avec soin afin de choisir les essences les plus adaptées :
- pour les parcelles en décaissé, surtout en ce qui concerne les risques de gels tardifs (en période de débourrement des bourgeons des jeunes plants) ;

- pour les carreaux de carrière exploitée en flanc de coteaux en ce qui concerne l'ombrage ou la réverbération provoqué par le front de taille.

Le réaménagement des bassins de décantation doit être différé tant que le sol n'est pas suffisamment ressuyé. L'état de la recolonisation naturelle à ce moment-là doit être pris en compte pour proposer le réaménagement définitif.

CHAPITRE 5

METHODE DE REMISE EN ETAT DU SOL

La remise en état doit permettre après exploitation du gisement, de reconstituer sur le fond de fouille un sol ne présentant pas de facteurs limitant le développement de la végétation, c'est-à-dire qui assure :
- la création d'une bonne structure fragmentaire de la terre végétale permettant la pénétration des racines, de l'air et de l'eau ;
- une bonne richesse minérale et organique afin de satisfaire les besoins nutritifs des arbres ;
- le développement d'une vie biologique indispensable à la fertilité des sols.

Pour cela, différentes couches de matériaux sont à remettre en place, car deux ou trois niveaux composeront le sol reconstitué :
- l'horizon organo-minéral[65] ou « terre végétale » (topsoil en anglais),
- l'horizon minéral[66] ou stériles (subsoil en anglais),
- éventuellement une couche de remblais en sous-couche (overburden en anglais).

Selon les cas, le réaménagement se fera en décaissé (le niveau du sol reconstitué étant alors sous le niveau initial) ou à niveau si tout le volume de gisement exploité est comblé par des matériaux (figure 32).

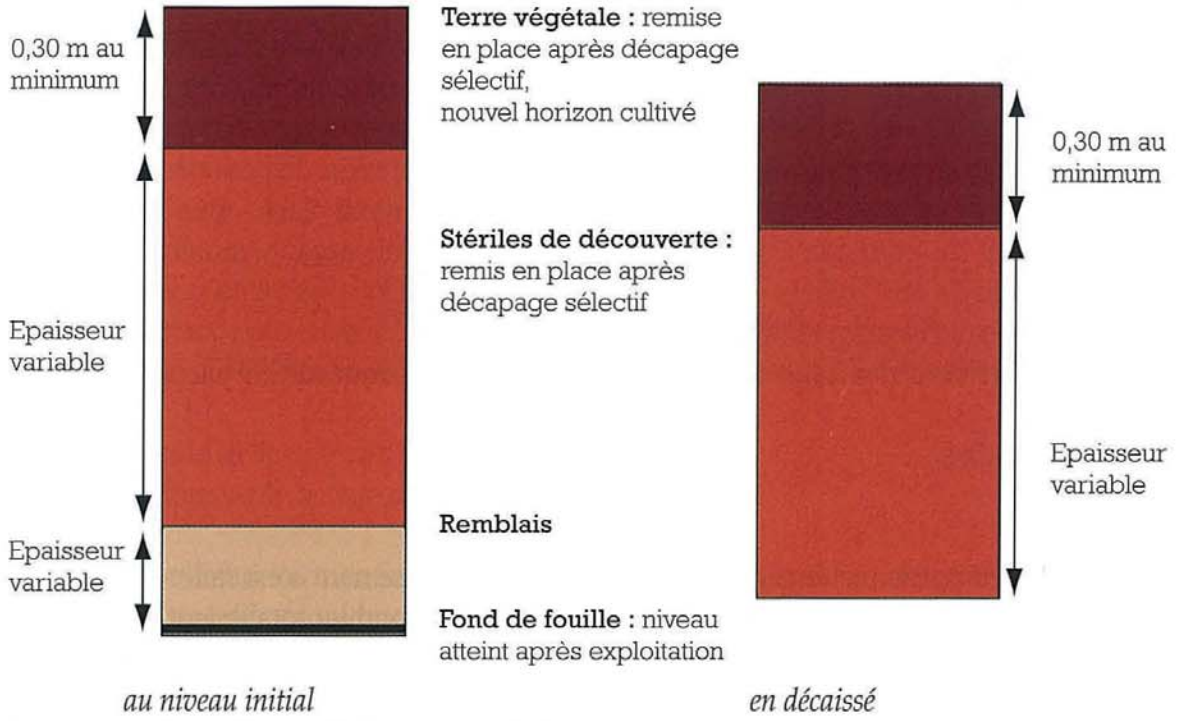


Figure 32 : Schéma d'un profil de sol reconstitué.

Cette mise en place doit se faire sans compaction ni destruction du sol. En effet, la compaction du sol a plusieurs effets [62 a] :
- elle diminue la pénétration de l'eau dans le sol. Elle augmente donc les risques de stagnation d'eau (mouillères). Paradoxalement, elle augmente aussi les risques de pénurie hydrique estivale car les pluies hivernales ne peuvent pas s'infiltrer correctement pour reconstituer la réserve en eau du sol ;

65 Il s'agit des horizons OL, OF, OH et OA du sol.
66 Il s'agit de l'horizon B ou S du sol.

- elle diminue la zone de prospection par les racines et donc les capacités de nutrition minérale et hydrique des arbres.

La dégradation de la structure du sol augmente les risques d'érosion, de constitution d'une croûte de battance si le sol reste nu et de compaction ultérieure lors des passages de tracteur pour les travaux d'entretien de la plantation.

En Grande-Bretagne [92], une carte des sols doit être établie avant l'exploitation. Si des unités de sol différentes sont identifiées, elles doivent être décapées, stockées et remises en place séparément. En effet, chaque sol fait l'objet d'un classement en classe d'aptitude et la remise en état doit tendre vers l'obtention du même niveau pour le sol remis en place que celui qui existait au préalable[67].

I - PREPARATION DE LA REMISE EN ETAT DU SOL

1 - DÉTERMINATION DES DIFFÉRENTS NIVEAUX DES MATÉRIAUX DE COMBLEMENT

Les différentes couches remises en place sont conditionnées par :
- la profondeur de matériaux extraite par rapport à la hauteur de la nappe phréatique ; ainsi, certains projets de réaménagement laissent un substrat de granulats en place au-dessus de la nappe phréatique alors que d'autres exploitations se terminent en eau ;
- la quantité et la nature de matériaux internes à l'exploitation disponibles (stériles de traitement) ou de remblais extérieurs à mettre éventuellement en place ;
- les quantités de matériaux de décapage stockés (horizon organo-minéral et stériles de découverte).

Un premier choix intervient dans la position topographique de la parcelle qui sera boisée :
- au niveau initial,
- en décaissé.

Ce choix est en partie technique, car si l'exploitation du gisement s'est faite sur plusieurs mètres (par exemple sur 11 m [TPG 13]), il sera difficile de combler totalement l'excavation. Cependant en cas de risque trop important de stagnation d'air froid rendant le boisement trop incertain, un comblement ou une réaffectation autre du site devra être prévu. Mais c'est aussi un choix concerté entre le carrier, le propriétaire de la parcelle et l'administration afin de trouver la solution technique qui convienne aux partenaires. Ainsi, la création d'une mosaïque de milieux (zone humide, lande, pelouse sèche) [F1 m, F6 m, F11 m] peut, en limitant la surface forestière à reconstituer, permettre de mettre une parcelle à niveau. Une zone humide ou un étang peut servir d'exutoire à un réseau de fossés drainant la parcelle et est capable de prévenir des fluctuations périodiques de la nappe [92]. Un étang peut également servir de réserve d'eau en cas d'incendie du peuplement [92].

67 Ceci peut être incompatible avec un réaménagement à l'avancée où le sol remis en place n'est pas celui d'origine de la parcelle.

Le principal facteur de détermination du niveau de reconstitution du sol est lié aux risques d'engorgement des terrains liés aux remontées de la nappe phréatique. De manière moins impérative et uniquement pour les carrières en fosse situées sur une pente naturelle[68], le microclimat prévu dans la fosse peut conduire à fixer le niveau de reconstitution du sol.

Ce sont cependant de manière prépondérante les remontées de nappe qui nuisent à la fois aux plantations et aux sols remis en place (tassement) et qui limitent les possibilités d'intervention dans les parcelles. Par conséquent, la mise hors d'eau de la zone de prospection des racines (horizon organo-minéral et horizon minéral exploité par les racines) est nécessaire. Pour cela, la connaissance du niveau piézométrique de la nappe phréatique et de ses variations est indispensable. En Grande-Bretagne, les experts [92] considèrent que le succès d'un réaménagement forestier dépend directement de la capacité à prédire[69] l'hydrologie et l'hydrogéologie. Il convient en effet d'apprécier au mieux, le niveau que pourra atteindre en hautes eaux la nappe phréatique, la durée et l'époque de ses battements saisonniers ainsi que ses plus hauts niveaux exceptionnels [TPG 1]. C'est plus souvent la période de survenue de l'inondation qui prime plutôt que la hauteur de la submersion. En effet, au printemps ou en été, une submersion pendant un mois de l'espace racinaire est fatale à la plupart des espèces d'arbres.

En France, le niveau du réaménagement est évalué par rapport à la cote de crue décennale de la nappe phréatique. Le bilan des expériences taxes parafiscales menées montre que, dans tous les cas, la zone prospectée par les racines doit être au-dessus de cette cote, sinon il y a des engorgements trop importants du sol et une mortalité rapide des jeunes plants.

Aux USA [90] et en Angleterre [97], la surface du sol réaménagé doit être à 1 m au-dessus du niveau de la nappe phréatique[70]. En France, à défaut d'une étude hydrogéologique complète, il est conseillé [TPG 2] de retenir pour la cote du terrain restauré, la plus élevée des valeurs suivantes :
- 1 m au-dessus de la cote des plus hautes eaux connues ;
- 1,50 m au-dessus de la crue décennale.

Deux expérimentations menées avec l'aide de la taxe parafiscale sur les granulats dans les années 1980 ont démontré que les risques d'inondation étaient grands et qu'une épaisseur de substrat insuffisante occasionnait des pertes importantes de plants et nécessitaient de nouvelles plantations.

A Sündhoffen [TPG 14], le niveau de la crue décennale n'est pas connu au moment de l'expérimentation mais est estimé par extrapolation à partir d'une valeur connue sur un

68 Car c'est dans ces conditions principalement que des coulées d'air froid sont à craindre.
69 Prédire et non mesurer avant exploitation car l'exploitation de granulats perturbera les conditions hydrologiques et hydrogéologiques du site et de ses environs.
70 Nous n'avons pas de précision quant au niveau de risque retenu pour la nappe (crue décennale ou autre).

site distant de moins de 10 km. La cote définitive du sol remis en place en 1981 était selon les parcelles, de 0,25 m à 0,50 m au-dessus du niveau de la crue décennale estimée. Or, dès février 1982, la nappe phréatique atteignait de manière durable le niveau de la crue décennale et jusqu'au courant de l'année 1983[71] les plantations se trouvaient submergées par une crue de durée de retour de 40 ans. Tous les résineux plantés[72] ont dépéri, de même que les érables sycomores et les tilleuls à petites feuilles. Quelques chênes pédonculés ont survécu et environ 50 % des peupliers. Cette expérimentation a montré la nécessité d'accroître la cote finale du sol à au moins 1 m de la crue décennale ou de se baser sur un niveau de crue cinquantenaire au moins.

PLANCHE 3 . Zone de mouillère dans un réaménagement forestier.



Photo Cemagref Delory I.

Une zone de mouillère en période de végétation peut, en quelques jours d'inondation, faire périr les plantations.

A Sierentz [TPG 13], les plantations d'essences variées (frênes, tilleuls, merisiers, platanes, érables sycomores, noyers et pins Laricio) faites en 1980 pour une partie au-dessus des plus hautes eaux décennales et pour l'autre partie au-dessous, ont été inondées de février à avril 1982 puis de mi-mai 1983 à août 1983 (figure 33). Les plants situés dans la partie la plus basse de la parcelle n'ont pas survécu à ces deux inondations successives.

Les plantations de peupliers faites sur des terrasses plus basses, de 1 m à 1,5 m sous le niveau de la crue décennale, ont été submergées à partir de décembre 1981 et jusqu'à fin 1983.

71 De fin avril à mi-juillet 1983, le dispositif expérimental est inondé.
72 Pins Laricio et pins noirs.

En mai 1982, au maximum de la crue, la parcelle de peupliers[73] était recouverte de 1,5 m d'eau. Une tempête survenue pendant la crue (fin juin 1982) a couché la totalité des peupliers et la plantation a été considérée comme perdue.

Cependant, les peupliers étaient vivants malgré la submersion pendant toute une saison de végétation avec une croissance en 1982 très faible. C'est la tempête qui a provoqué le plus de dégâts sur des arbres déjà fragilisés. Certains arbres recépés en 1983 ont donné des touffes de rejets de bonne vigueur. Cependant, en juin 1986 la parcelle était une nouvelle fois inondée par une dizaine de centimètres d'eau. La répétition de ces épisodes d'inondation prouve qu'un remblai au-delà du niveau de la crue décennale est nécessaire. Les peupliers peuvent cependant bien résister à des inondations prolongées.

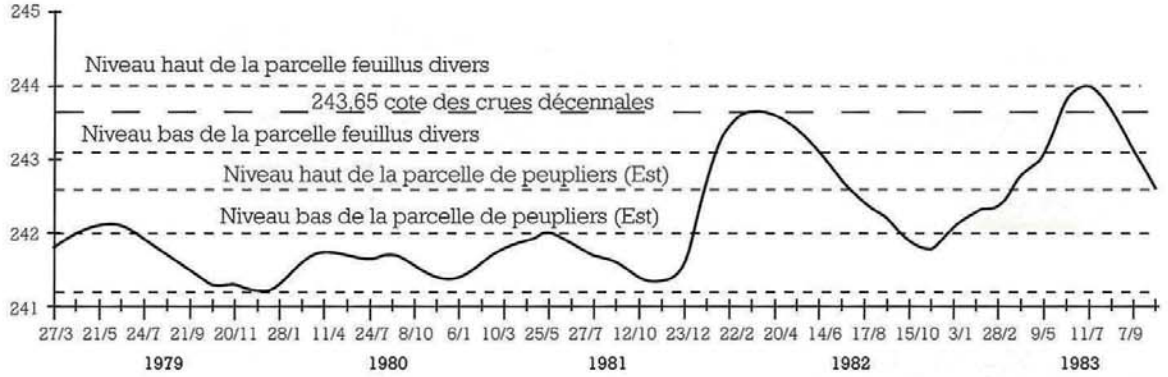


Figure 33 : Battements de la nappe d'eau entre 1979 et 1983 (d'après [TPG 13e]).

Ces expériences montrent qu'il est nécessaire, pendant l'exploitation du gisement, de mettre en place un suivi du niveau piézométrique de la nappe afin d'analyser avant plantation les risques d'inondation. Ce suivi devrait permettre, le cas échéant, de modifier le projet de réaménagement si les nouvelles informations qu'il apporte contredisent les cotes de remblaiement prévues dans le dossier préalable à l'exploitation (en changeant la cote définitive ou en choisissant d'autres espèces éventuellement).

2 - NIVELLEMENT ET DRAINAGE DU FOND DE FOUILLE

Le fond de fouille doit au préalable être assaini. Pour cela, il doit y avoir un enlèvement des objets indésirables encombrant le fond de fouille (rochers, stocks, bâtiments). Eventuellement, un pompage doit être mis en place ou maintenu afin de pouvoir procéder au nivellement. Le rippage du fond de fouille est pratiqué avant l'apport du remblai [TPG 1] afin de l'ameublir.

Dans le cas des carreaux des carrières de roches massives à flanc de coteaux, le carrier doit réaménager ces surfaces constituées généralement de l'affleurement de la roche en n'ayant pas à sa disposition une quantité suffisante de matériaux pour reconstituer une épaisseur de sol satisfaisante. Dans cette situation, un pétardage à l'explosif ou une intervention d'un brise-roche est nécessaire afin de « fracturer » le substratum du carreau. Ces opérations sont pourtant particulièrement lourdes.

73 Pour les autres parcelles, l'eau s'est maintenue au niveau du sol pendant presque toute l'année 1982

Pour les réaménagements forestiers, au vu des recommandations suisses [5], anglaises [92] et françaises [TPG 2], le fond de fouille doit être aplani et modelé pour obtenir une évacuation générale des excès d'eau.

Cependant, c'est surtout le dessus du remblai qui devra faire l'objet d'un décompactage et d'un modelé permettant le drainage.

Le choix du niveau final du sol reconstitué doit prendre en compte les possibilités techniques, le volume de matériaux disponible mais le point le plus important à considérer, est le niveau de remontée de la nappe phréatique. Une étude piézométrique précise et si possible suivie pendant l'exploitation doit permettre de connaître le niveau de reconstitution garantissant que la zone de prospection des racines restera hors d'eau. Le choix d'espèces moins sensibles aux engorgements peut permettre d'accepter un certain niveau de risque d'inondation mais dans ce cas leur croissance sera toujours très limitée.

Pour les carreaux sur roche massive, une fracturation à l'explosif ou au brise-roche est parfois utile.

II - QUALITE ET QUANTITE DES MATERIAUX

1 - CHOIX DES MATÉRIAUX

Un inventaire des matériaux disponibles est nécessaire, le choix des matériaux dépendra de leur disponibilité sur le site ou à proximité du site :
- des matériaux de remblaiement de fond de fouille : stériles d'exploitation (de décapage, de traitement des granulats), déblais de chantiers de terrassement ou des déchets inertes issus de chantiers de démolition (par exemple, briques, tuiles, pierre...) ;
- des matériaux de reconstitution de l'horizon minéral : stériles d'exploitation, terres décapées en vrac provenant de terrassements extérieurs ;
- de la terre végétale : horizon organo-minéral de décapage ou terre végétale décapée sélectivement dans un chantier de terrassement extérieur ;
- des matériaux visant à améliorer le substrat : compléments organiques tels que composts ou déchets verts ou fines de décantation permettant d'augmenter la réserve en eau.

a) LES MATÉRIAUX DE REMBLAIEMENT DU FOND DE FOUILLE

En France, les remblais en carrière ne peuvent être constitués que de matériaux inertes. Les matériaux sont réputés inertes s'ils ne sont pas fermentescibles (absence de matière végétale : herbe, bois) et s'ils ne sont pas susceptibles de modifications physico-chimiques (absence de ferrailles, produits chimiques...).

Ce n'est pas le cas dans tous les pays. Ainsi, en Grande-Bretagne, des ordures ménagères sont utilisées [43]. Quand elles sont employées fraîches[74], la fermentation provoque des

74 C'est à dire sans compostage préalable mais déversées dès la collecte, en fond de fouille.

dégagements de gaz (méthane et dioxyde de carbone) qui peuvent nuire aux plantations. Actuellement les carrières remblayées avec des ordures doivent être à plus de 250 m d'habitations, le fond de fouille doit être rendu étanche par une chape d'argile compactée et des systèmes de captage des gaz doivent être installés (ce qui permet leur utilisation pour produire de l'énergie).

** LES MATÉRIAUX INERTES INTERNES À L'EXPLOITATION*

Il peut s'agir des stériles de découverte et de traitement parfois produits en grande quantité[75] et stockés sous forme de terrils pendant l'exploitation.

** LES MATÉRIAUX INERTES D'ORIGINE EXTÉRIEURE*

Dans certains cas, l'autorisation d'exploiter peut permettre l'utilisation de matériaux externes à l'exploitation provenant de chantiers aux environs de la carrière.

Actuellement, la majorité des carrières qui acceptent des remblais pratiquent ou vont mettre en place un procédure de contrôle précis des réceptions pour être en conformité avec la réglementation (arrêté ministériel du 22 septembre 1994).

** LE CAS PARTICULIER DES TERRES DE LAVAGE DE BETTERAVE*

Elles contiennent principalement de la terre végétale mais aussi de la matière organique provenant des radicelles et des morceaux de betteraves. Dans ce cas, il ne s'agit pas d'un matériau inerte, car il contient de la matière organique fermentescible, il peut même dans une certaine mesure être considéré comme un amendement organique.

Habituellement, ces terres sont décantées dans des bassins surélevés construits spécialement pour la sucrerie. Parfois, la proximité géographique de l'extraction et de la sucrerie a permis le montage d'expérimentation du remblayage d'une ballastière par des boues de sucrerie liquide, afin de rendre cette zone à l'agriculture [TPG 15][76]. Cette étude portait essentiellement sur les risques de pollution de la nappe phréatique, car les boues de sucrerie contiennent une fraction terreuse importante mais aussi de la matière organique en décomposition susceptible de provoquer une pollution par augmentation de la demande en oxygène et par percolation d'éléments minéraux.

Dans les quinze premiers jours du comblement de la ballastière, on a pu observer une augmentation de concentration de la nappe en potassium, en chlorures, et en azote qui s'est poursuivie jusqu'au colmatage du bassin. Plus tard, quelques périodes fortement pluvieuses ont également engendré des pollutions.

---

75 Surtout dans le cas de carrières de roche massive dont on veut reboiser le carreau.

76 Le dossier traite d'un réaménagement agricole, mais un site visité (Chevrière) comprenait des parcelles agricoles et des parcelles forestières réaménagées de cette façon avec des terres de lavage de betterave.

Il a été préconisé de rendre au préalable la fouille et la berge étanches, afin de limiter les diffusions, par :
- le recouvrement de la berge par la terre de découverte (qui dans ce cas était argilo-tourbeuse) ;
- éventuellement, une mise ne place de l'étanchéité du fond de fouille par un dépôt de bentonite (ou autre technique adéquate).

D'autres excavations d'exploitation de granulats [Chevrière] proches d'une sucrerie pratiquent le remblaiement par terres de lavage de betteraves. Ces boues permettent donc d'isoler l'excavation de la nappe alluviale et de la remblayer totalement (parfois sur 4 à 8 m). Cependant, cette technique est très contraignante car des pics de pollution organique de la nappe se produisent dans la première semaine quand le colmatage se met peu à peu en place. La coordination entre le carrier et la sucrerie doit être bonne afin que la sucrerie puisse fonctionner en circuit fermé pour son approvisionnement en eau et une surveillance continue et stricte doit être effectuée. Pendant 4 à 5 ans après le remblaiement (par 3 m de boues de sucrerie et 0,30 m de terre végétale) [Chevrière], la parcelle est gorgée d'eau et se ressuie lentement. Au bout de 5 ans, il n'y a plus de mouillères. La mise en place de drains et d'un fossé d'assainissement est conseillée pour permettre l'évacuation des eaux de pluie puisque le bloc de terre est isolé dans un caisson imperméable.

b) LES MATÉRIAUX DE RECONSTITUTION DE L'HORIZON MINÉRAL

Dans le sol, nous avons vu que l'horizon minéral a un rôle important pour la pénétration des racines et pour la constitution de la réserve utile du sol. Cet horizon minéral reconstitué à partir de stériles de découverte (horizon minéral autrefois en place) ou de stériles de traitement devra avoir des caractéristiques physico-chimiques assurant ces fonctions.

Une estimation de la quantité des matériaux disponibles doit être effectuée (mesure de l'épaisseur de la terre de découverte disponible, estimation des volumes de stériles d'exploitation, des fines de décantation...). Ces matériaux doivent être ensuite analysés afin de définir leurs qualités et leurs carences (en particulier en ce qui concerne leur granulométrie, leur capacité de rétention en eau et leur teneur en matière organique et pour les fines, leur teneur en calcaire actif[77]).

Il est possible d'utiliser des matériaux hétérogènes en remblai de carrière, à condition de respecter un ordre dans leur disposition sur le fond de fouille.

Certains matériaux seront à éviter pour constituer la partie supérieure du remblai [23] :
- ceux à plus de 60 % d'éléments grossiers en raison de leur réserve hydrique utile insuffisante et de leur perméabilité trop forte ;
- ceux à plus de 50 % de limons en raison des risques de dégradation de la structure et de formation d'une croûte de battance engendrant des phénomènes d'érosion et de non infiltration des eaux de pluie ;

77 Le calcaire actif est une fraction fine du calcaire qui peut nuire au développement de certaines essences forestières (risque de chlorose ou de blocage de l'assimilation du phosphore).

- ceux à plus de 30 % d'argile en raison de leur imperméabilité et des risques d'apparition de phénomènes d'hydromorphie de surface.

Le sol reconstitué [97] doit refléter la composition du sol originel, mais peut quelquefois être modifié pour améliorer ses caractéristiques :
- en mélangeant par exemple des sols de différents endroits ;
- en augmentant l'épaisseur de certains horizons ;
- en modifiant des caractéristiques indésirables de certains horizons comme le pH, une texture fine ou de l'induration.

** LES STÉRILES DE DÉCOUVERTE*

Ils sont issus soit du décapage sélectif, à l'avancée, d'une autre parcelle de l'exploitation, soit de la reprise d'un stock constitué lors de l'exploitation de la parcelle à réaménager. Il peut dans certains cas, s'agir de la reprise de merlons constitués pour assurer une protection contre le bruit et la poussière autour de la carrière.

Leur composition est donc celle d'un horizon minéral en place, mais, dans le cas d'exploitation en terrasses alluviales, il peut y avoir une grande différence entre des horizons minéraux de basse et de haute terrasse. Lors d'un réaménagement à l'avancée, reconstituer un sol de haute terrasse (à l'origine sableux) avec un horizon minéral et de la terre végétale d'un sol de basse terrasse (plus argileux), modifiera les caractéristiques du sol. Cet élément sera à prendre en compte dans le choix des essences à planter.

** LES STÉRILES DE TRAITEMENT*

Il s'agit de produits qui résultent du processus de traitement des produits extraits du gisement pour fabriquer différentes qualités de granulats et qui ne sont pas vendus : soit des granulats impropres à la vente, soit des stocks non vendus.

Ces matériaux permettent de constituer une épaisseur suffisante de prospection pour l'appareil racinaire des arbres, à condition qu'ils n'aient pas été compactés. Par contre, généralement, ils n'assurent pas une réserve en eau suffisante. Une amélioration possible de la réserve en eau de l'horizon minéral peut être apportée par des fines de décantation.

** LES FINES DE DÉCANTATION*

Les fines (ou boues) de décantation sont un sous-produit du lavage des granulats. Les eaux de lavage sont déversées dans des bassins de décantation où les matières minérales se déposent afin de recycler l'eau propre pour une utilisation en circuit fermé. Comme leur composition peut être très différente d'une carrière à une autre, il faut analyser chaque produit afin de connaître ses caractéristiques. Du fait de leur granulométrie très fine, elles possèdent une forte capacité de rétention en eau. Cependant, utilisées pures, elles peuvent se comporter comme une couche imperméable. Elles sont pauvres en matière organique et un apport supplémentaire est nécessaire si elles sont utilisées seules.

Les fines de décantation présentent plusieurs avantages :
- augmenter l'épaisseur du sol reconstitué, donc augmenter le volume prospectable par les racines ;

- incorporées à l'horizon minéral, elles améliorent notablement la réserve utile en eau[78] ;
- elles apportent aux sols grossiers une fraction minérale plus fine favorable à la constitution du complexe argilo-humique qui joue un rôle très important dans la nutrition des plantes.

En réaménagement forestier, nous disposons d'un seul dossier d'expérimentation d'un site où des fines de décantation ont été utilisées [TPG 13]. Dans ce cas, il est impossible de tirer une conclusion sur l'intérêt de l'incorporation des fines car la plantation a été détruite par des inondations. D'autres expériences ont été tentées (rapportées dans [TPG 1]) mais ne mettent pas en évidence de résultats statistiquement interprétables car bien d'autres facteurs que la dose de fines incorporée jouent (en particulier l'exposition au vent ou la protection offerte par les autres placettes expérimentales, les compactions locales dues au passage de bull à chenille...).

Si le retour d'expérience en réaménagement forestier est faible, celui en réaménagement agricole est plus important[79] et permet de bénéficier des connaissances acquises pour les transférer dans le domaine forestier :
- les plantations souffrent souvent d'un déficit hydrique (chapitre 1 - I-2) et l'intérêt d'augmenter la réserve utile du sol par l'emploi de fines de décantation est très grand ;
- les plantations peuvent aussi souffrir de remontées de nappe et l'intérêt d'augmenter l'épaisseur de sol pour mettre les plants à l'abri des plus hautes eaux milite aussi pour l'utilisation de fines de décantation souvent présentes sur la carrière mais non utilisées.

Au vu des expériences agricoles, les fines peuvent être utilisées à trois niveaux :
- incorporées aux stériles de découverte : après régalage, incorporation par des passages de chisel[80] afin de mélanger les fines par rippage. Dans ce cas, il faut veiller à ce que les fines soient sèches, afin qu'elles s'incorporent bien au sous-sol[81] [TPG 13] ;
- incorporées à la terre végétale : après séchage, apport de la terre végétale en tas et brassage au chargeur des deux matériaux, avant d'être chargés au camion, puis d'être régalés ;
- en reconstitution de sol, mais elles doivent obligatoirement être associées à un amendement organique (compost) qui apporte la matière organique qui y manque. Dans ce cas, la société du canal de Provence [47] a étudié la possibilité d'utiliser les boues de lavage de granulats, en mélange avec du compost d'ordures ménagères. Il semble que l'étalement des boues de lavage en couches, le compost étant déversé dessus puis mélangé avec un rotavator, soit la meilleure méthode.

---

78 Pour les rapports forestiers nous n'avons pas d'éléments chiffrés sur l'augmentation de la réserve utile liée à l'utilisation de fines en mélange. Cependant, pour un réaménagement agricole à Passy, la réserve utile est de 50 mm pour la terre végétale, 80 mm pour le mélange terre végétale, compost et fines et entre 75 et 105 mm si les fines sont incorporées dans le sous-sol.

79 Se reporter à l'ouvrage « *Réaménagement agricole des carrières de granulats* ».

80 Appareil agricole à dents permettant de travailler le sol sur 0,30 m de profondeur.

81 La parcelle reconstituée avec des fines mouillées a été très difficile à mettre en place, des ornières profondes de 0,3 m se sont formées et le sol était très compacté.

Ainsi, l'incorporation des fines au sous-sol augmente la productivité agricole de façon relativement importante notamment sur les parcelles non irriguées ou en période de sécheresse. Elles constituent également une zone de repli pour les lombriciens en cas de sécheresse.

Cependant, les sols les plus riches en fines présentent des problèmes de stabilité structurale et ces fines sont également caractérisées par une absence de vie biologique (ce qui a conduit le Cemagref à pratiquer des ensemencements de vers de terre dans les sols de Passy). Il faut cependant faire attention à la discontinuité entre des matériaux « meubles » et des fines qui peuvent être plus compactes, car cela peut poser des problèmes d'engorgement par discontinuité hydrique. D'autre part, il faut veiller à manipuler ces matériaux quand ils sont bien ressuyés afin de ne pas les tasser.

Dans les études taxes parafiscales citées, l'utilisation des fines a souvent été faite à forte dose, voire même en remplacement total de la terre végétale, car il s'agissait de reprise d'exploitations anciennes où il n'y avait pas de terre végétale disponible.

La phase de terrain de l'étude réaménagement agricole a permis de mettre en évidence que l'utilisation de fines pour suppléer à l'absence (ou à la trop faible épaisseur) de terre végétale est possible mais doit être accompagnée d'un apport de matière organique.

Dans la pratique actuelle d'utilisation des fines de décantation, il s'agit plutôt de résoudre le problème du devenir des bassins de décantation que de raisonner l'apport modéré de fines dans les différentes parcelles réaménagées. Les solutions retenues sont alors soit l'incorporation massive de fines de décantation, soit la mise en valeur forestière du bassin de décantation lui-même (chapitre 8).

Piste de recherche

Les potentialités améliorantes des fines devraient être mises en valeur en les intégrant dans les plans de réaménagement plutôt qu'en les considérant comme un déchet à éliminer quand le bassin de décantation est plein. Ceci nécessite cependant de mettre au point une technique permettant l'extraction et le ressuyage des fines avant leur incorporation à la sous-couche du sol et de ne pas négliger dans ce cas les apports de matière organique pour améliorer la structure du sol.

c) L'HORIZON ORGANO-MINÉRAL

Il provient du décapage sélectif d'autres parcelles de l'exploitation (réaménagement à l'avancée) ou de la même parcelle avec reprise du stock constitué au moment du décapage.

En cas de manque d'horizon organo-minéral pour assurer une épaisseur suffisante, il peut provenir de chantiers extérieurs dans la mesure où le décapage a été fait de manière sélective. Dans ce cas, il faut préférer quand c'est possible, des sols à texture sableuse plutôt qu'argileuse. En effet, un sol argileux est plus sensible aux stagnations d'eau et la pénétration

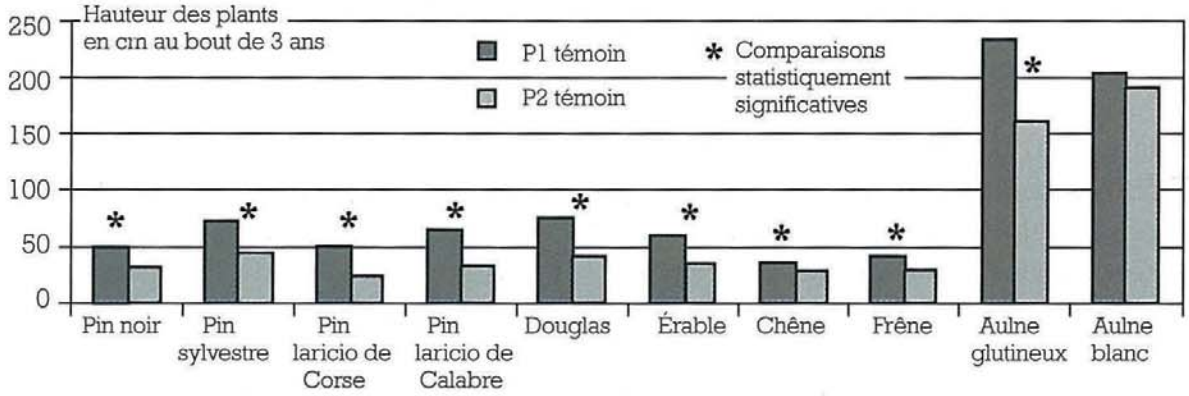
des racines y est plus difficile. S'y ajoute aussi un risque de destruction des racines en cas de rétraction du sol lors d'épisodes de sécheresse.

Il faut cependant éviter les sols à trop forte pierrosité qui induisent des risques d'entraînement en profondeur des particules fines sur un sol fraîchement remis en place et qui ont une très faible réserve utile.

Dans certains cas extrêmes où il n'existe pas (ou plus) d'horizon organo-minéral, il est possible soit de reconstituer un horizon organique avec des stériles mélangés à des fines de décantation et à du compost , soit de planter sur l'horizon minéral en utilisant des plantes fixatrices d'azote (herbacées, arbustives et arbres) et des plants forestiers mycorhizés (chapitre 7 et 12).

Ainsi, un essai a été mené à Jablines [TPG 9] sur une exploitation ancienne dont l'horizon organo-minéral n'était plus disponible. Avant la plantation, sur la moitié de chaque site, deux années de culture d'engrais vert (ray-grass et trèfle violet) ont été pratiquées, suivies d'un labour.

- site 1 : plantation sur des remblais grossiers recouverts d'un mètre de terre de découverte stockée sous forme de merlons pendant 20 ans ;
- site 2 : plantation sur plusieurs mètres de stériles d'exploitation (argiles grises et fines de lavage) compactés et se desséchant très vite.



P1 témoin : site 1, terre de découverte sans culture d'engrais vert
P2 témoin : site 2, stériles d'exploitation sans culture d'engrais vert

Figure 34 : Comparaison des hauteurs des plants en fonction du sol remis en place [TPG 9].

Au bout de 3 ans, l'étude montre une faible croissance de toutes les espèces plantées sur les stériles. Elle met en évidence de manière statistiquement valable (figure 34) que la terre de découverte est plus propice aux essences testées que les stériles.

Dans d'autres comparaisons, cette étude met également en évidence :
- que la culture préalable d'engrais vert a un impact pratiquement nul sur le site 1 et un impact moyen sur le site 2 ;
- que les stériles d'exploitation (site 2) peuvent être améliorés par une culture préalable d'engrais vert.

Néanmoins, la reprise des plants est toujours meilleure et le réaménagement à moindre coût quand l'horizon organo-minéral peut être décapé et stocké sélectivement en condition sèche et avec des engins adaptés.

Les matériaux de remblaiement du fonds de fouille doivent être inertes, ils peuvent provenir de l'exploitation (stériles de traitement ou de découverte) ou provenir de l'extérieur. Dans ce cas, une procédure de contrôle des remblais livrés est imposée.

Le choix raisonné des matériaux de reconstitution de l'horizon minéral doit permettre de reconstituer un bon sol forestier. En effet, ces matériaux doivent être choisis pour leur complémentarité et leur intérêt : stériles pour apporter un volume de substrat important prospectable par les racines et suffisamment drainant, fines de décantation pour améliorer la rétention en eau, primordiale pour assurer une bonne croissance des arbres.

L'horizon organique bien qu'il soit parfois peu épais et difficile à décaper doit toujours être utilisé même si des reconstitutions de cet horizon sont possibles à partir de stériles, fines de décantation et compost, par exemple.

2 - EPAISSEUR DE MATÉRIAUX

** Les matériaux grossiers*

L'épaisseur des remblais à mettre en place est notamment conditionnée par le niveau à atteindre au-dessus de la nappe, par la réserve utile à constituer et par la topographie que l'on souhaite restituer. Elle est calculée en fonction des épaisseurs fixées pour les horizons supérieurs (horizon minéral et horizon organo-minéral). Ainsi, en Suisse [5], les fosses sont comblées par du remblai jusqu'à 1,5 à 2 m au-dessous du niveau définitif.

Si la quantité disponible sur place ne permet pas d'obtenir une épaisseur suffisante, des matériaux extérieurs devront être utilisés. Si la perméabilité du remblai est insuffisante, les directives suisses [5] prévoient la création de réseaux de drainage.

** L'horizon minéral*

Selon les pays, les préconisations relatives aux épaisseurs minimales d'horizon minéral à mettre en place varient :
- de 1,5 à 2 m en Suisse[82] [5] ;
- au minimum 1 m en France [15] et jusqu'à 1,20 m pour des espèces exigeantes[83] ;
- calcul en fonction du bilan hydrique et de la nature du sol en Grande-Bretagne [92].

L'expérimentation de Jablines [TPG 9] montre qu'une profondeur de terre de découverte de 0,80 m assure une bonne croissance des arbres (aulnes) les premières années. Mais dès la

82 Les Suisses ne font pas de préconisation séparée pour l'horizon minéral et l'horizon organo-minéral, ils considèrent l'ensemble de l'espace prospectable par les racines. Cependant, ils recommandent un décapage et un stockage sélectifs de ces deux horizons et de remettre l'horizon organo-minéral en couche finale.
83 Peupliers, chênes et hêtres.

troisième année, on constate un ralentissement de leur croissance terminale qui traduit la prospection par les racines de toute la profondeur disponible et donc la trop faible épaisseur de sol pour assurer un bon développement ultérieur.

En Grande-Bretagne [92], les experts considèrent que le sol doit fournir à un peuplement d'arbres adultes, une réserve utile suffisante pour que l'arbre puisse transpirer à son taux optimal pendant l'été (c'est-à-dire qu'il ait suffisamment d'eau pour ne pas avoir à réduire sa transpiration et donc sa photosynthèse). L'épaisseur de sol à reconstituer dépendra donc de la nature des matériaux mais aussi du climat local, de la plantation prévue (des caractéristiques du système racinaire des essences plantées).

En France [23], on considère le bilan hydrique global sur l'année. La détermination de la réserve hydrique utile du matériau (en mm par cm de sol) permet de calculer l'épaisseur à apporter afin de fournir aux arbres une quantité d'eau suffisante pour compenser les déficits hydriques d'origine climatique. L'appréciation du déficit global annuel se fait par sommation des déficits mensuels[84]. Ils sont calculés à partir des valeurs mensuelles des précipitations[85] et de l'évapotranspiration potentielle fournies par les stations météo. La réserve hydrique à reconstituer correspond au volume du déficit annuel global qu'elle va servir à compenser [23].

La topographie peut influencer l'épaisseur de sol à mettre en place, à mi-pente et en versant nord elle sera moindre qu'en versant sud [88]. En effet, le principal facteur contraignant dans ce cas est la disponibilité en eau, et il y a plus d'eau disponible à mi-versant que sur le sommet de la pente pour une même épaisseur de sol. Sur le versant nord, il y a notamment plus de neige, moins de sublimation et il y a le bénéfice des eaux de ruissellement, à la fois en surface et dans le sol. Dans ces conditions climatiques, il est donc possible de mettre en place un sol un peu moins épais[86] s'il y a une pente de surface.

* *L'HORIZON ORGANO-MINÉRAL*

L'épaisseur minimale d'horizon organo-minéral conseillée est de 0,30 à 0,75 m en Grande-Bretagne [92]. En France, les chiffres annoncés dans les dossiers de réaménagement vont de 0,25 m à 0,50 m.

Entre le volume de terre végétale en place et le volume disponible pour le réaménagement, il y a toujours un déficit (estimé par un carrier à 30 %) lié au non décapage de toute la terre végétale (une partie de celle-ci reste au niveau de la couche de stérile) et aux manipulations de terre. Souvent, les épaisseurs de terre à remettre sont donc inférieures à celles qui existaient. En pratique tout l'horizon organo-minéral disponible doit être épandu sur la parcelle à

84 Dm (déficit mensuel) = Pm (précipitations mensuelles) - ETPm (évapotranspiration potentielle mensuelle).

85 En France, on ne prend pas en compte le coefficient d'interception des pluies par le feuillage qui diminue de 25 % le volume des précipitations capables de recharger la nappe. Une amélioration du calcul serait d'introduire ce coefficient afin de ne pas sous-estimer l'épaisseur de sol nécessaire.

86 Donc une couche d'horizon minéral plus fine.

réaménager. Cependant, le phénomène de foisonnement des terres lors de la manipulation est à prendre en compte, car une terre manipulée est souvent moins dense qu'une terre en place et des tassements interviendront. Le niveau final du réaménagement sera, après tassement, en-dessous de celui atteint juste après la remise en place des terres.

Piste de recherche

Peu de résultats existent sur l'influence de l'épaisseur d'horizon organo-minéral sur la production ligneuse. Les quelques expériences tentées (Jablines, Sündhoffen et Sierentz) n'ont pas pu être suivies à long terme[87]. Au vu des pratiques récentes d'utilisation de plants mycorhizés sur horizon minéral, il serait intéressant de mettre en place des essais à long terme[88] (20 ans) faisant jouer les facteurs suivants :
- épaisseur d'horizon organo-minéral (0 m, 0,25 m, 0,50 m) ;
- plants mycorhizés, plants en conteneur non mycorhizés et plants à racines nues.

Les matériaux de comblement doivent permettre d'amener le niveau jusqu'à 1,5 m au-dessous du niveau définitif.

L'horizon minéral qui va être prospecté par les racines doit être épais de 1 m à 1,2 m au minimum. Il doit posséder une réserve utile permettant de compenser la sécheresse estivale.

L'horizon organo-minéral doit être épais de 0,25 à 0,50 m.

III - MISE EN PLACE ET ASSAINISSEMENT DES MATERIAUX DE COMBLEMENT

1 - MISE EN PLACE DES MATÉRIAUX DE COMBLEMENT

Après le rippage du fond de fouille, pétardage à l'explosif ou défonçage du carreau rocheux au brise-roche, un comblement avec des remblais peut être effectué.

Les camions amenant les remblais doivent circuler sur les futures voies de desserte de la parcelle.

Les plus gros éléments des matériaux inertes apportés seront situés dans les niveaux inférieurs [5]. La granulométrie doit être de plus en plus fine vers le haut. Les matériaux mis dans le dernier mètre du comblement doivent être les plus perméables [62a].

87 Des inondations ont détruit les plantations à Sündhoffen et Sierentz au bout de 2 ans, les parcelles de Jablines ne sont plus connues.
88 Sur des parcelles non soumises au risque d'inondation.

Ainsi, un remblayage en terrasse (figure 35) permet de déposer les matériaux différents séparément en fonction de leur qualité [5] :
- les matériaux glaiseux, imperméables seront dans la partie inférieure, sur le fond de fouille ;
- les matériaux à pierrosité importante ou contenant des éléments de grande taille seront également déposés en fond de remblai ;
- les matériaux les plus graveleux et les plus meubles seront réservés à la partie supérieure du remblai.

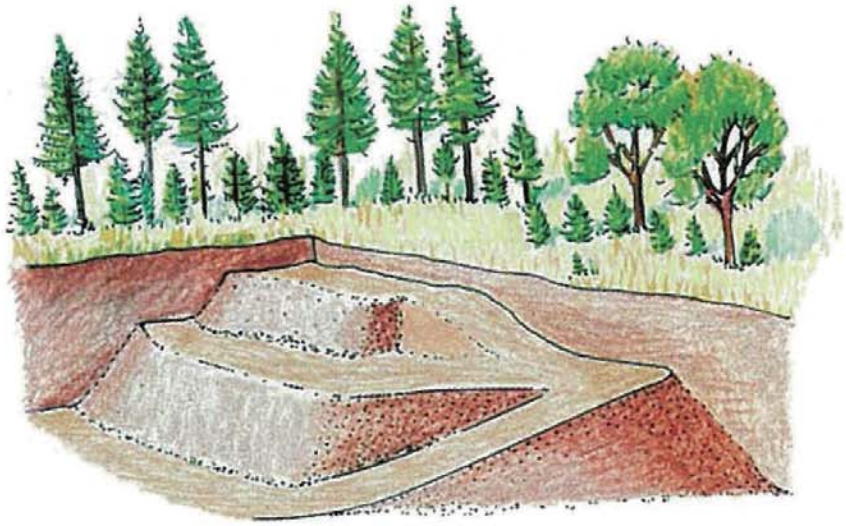


Figure 35 : Schéma d'un remblayage en terrasse (d'après [5]).

Ce remplissage en fonction de la granulométrie est plus compliqué quand les remblais proviennent de l'extérieur et que le carrier n'a pas de moyens de prévoir la quantité et la granulométrie de ce qui va lui être livré. La procédure de contrôle mis en place permet éventuellement de trier les remblais et de les reprendre pour remblayer en terrasse (figure 35) même si la granulométrie varie en fonction des livraisons.

Le remblayage doit être effectué en deux niveaux avec un compactage sommaire à l'interface. Toute intervention sur le toit du remblai doit être faite avec des engins à basse pression au sol (moins de 300 g/cm^2 en Suisse [62a]).

Il convient de s'assurer que la perméabilité du remblai mis en place est correcte. Les préconisations suisses [62a] recommandent quand le remblai est imperméable, d'y incorporer des dispositifs d'infiltration : au fur et à mesure que le remblai monte, il s'agit de disposer à certains endroits des puits filtrants remplis de graviers ou de matériaux perméables (annexe 5) qui permettront les évacuations en profondeur de l'eau drainée.

Pour que le réaménagement soit optimal, il faut que le niveau remblayé soit entièrement terminé avant de remettre en place les deux couches de terre (horizon minéral et horizon organo-minéral). Il est même préférable [5] qu'un délai de 2 ans au moins soit prévu après le remblayage brut pour exécuter la couche d'horizon minéral. Ce délai permet que le remblai se stabilise avant la remise en état du sol dessus. En effet, selon la taille des matériaux inertes mis en place, lors du remblayage, des espaces vides peuvent être créés, si les racines pénètrent de tels espaces, leur croissance s'arrête. Laisser un délai permettant les tassements est donc préférable

2 - LE NIVELLEMENT DU TOIT DU REMBLAI

La mise en forme du toit du remblai permet de le décompacter par passage d'un ripper à basse pression (400 à 300 g/cm^2) et de modeler des pentes pour améliorer le drainage. Des pentes de 4 à 6 % sont conseillées en Suisse si le terrain initialement est plat afin de guider l'eau de drainage sous l'espace racinaire au niveau de collecteurs.

3 - LE DRAINAGE

La question du drainage est importante car, nous avons vu qu'une nappe d'eau stagnante est une barrière à la prospection de l'espace par les racines. La création d'un horizon d'engorgement du à la faible perméabilité du sol est donc très défavorable au bon développement des arbres. En effet, à chaque épisode pluvieux, il y aura un risque de création d'une nappe superficielle d'eau asphyxiant les racines.

Si le remblai se compose de matériaux perméables, en ameublir la couche superficielle par rippage suffit à assurer un bon drainage. Si le remblai est imperméable ou peu perméable, un réseau de drainage est à créer sur toute sa surface [5] en dirigeant l'eau par des collecteurs vers des émissaires de drainage ou vers les puits filtrants constitués dans le remblai. Quand des collecteurs sont posés sur le toit du remblai imperméable, ils doivent être entourés d'un filtre de gravier et être isolés par un lé non tissé (figure 36).

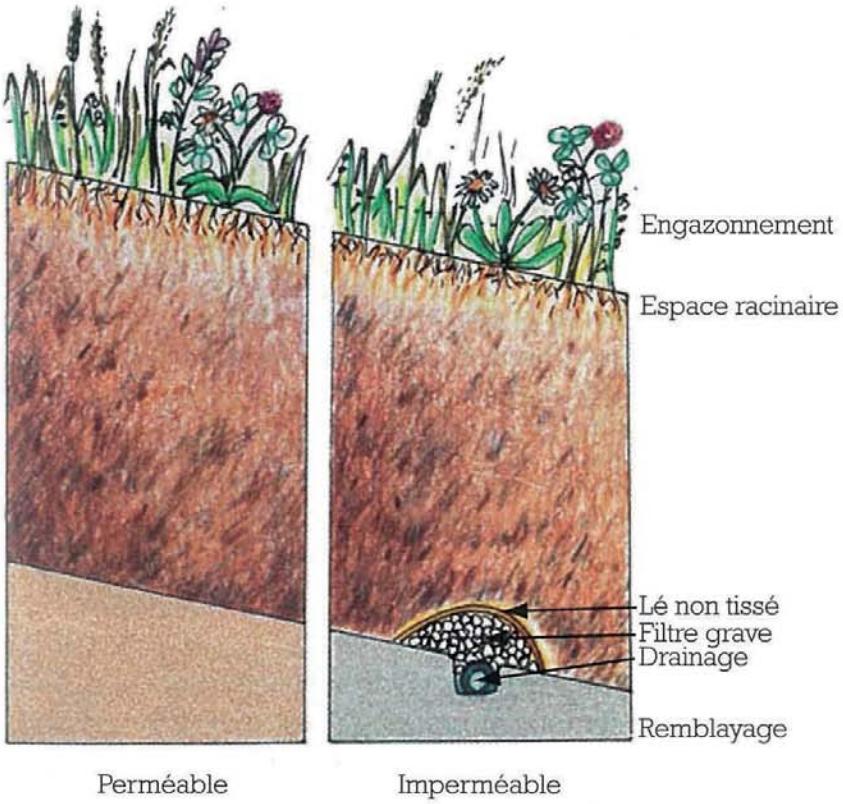


Figure 36 : Réalisation d'un collecteur sur un remblai imperméable [5].

Sur un terrain plat, un modelé doit être créé sur le toit du remblai (figure 37) :
- sous forme d'un réseau de collecteurs parallèles ;
- sous forme d'un réseau en entonnoir.

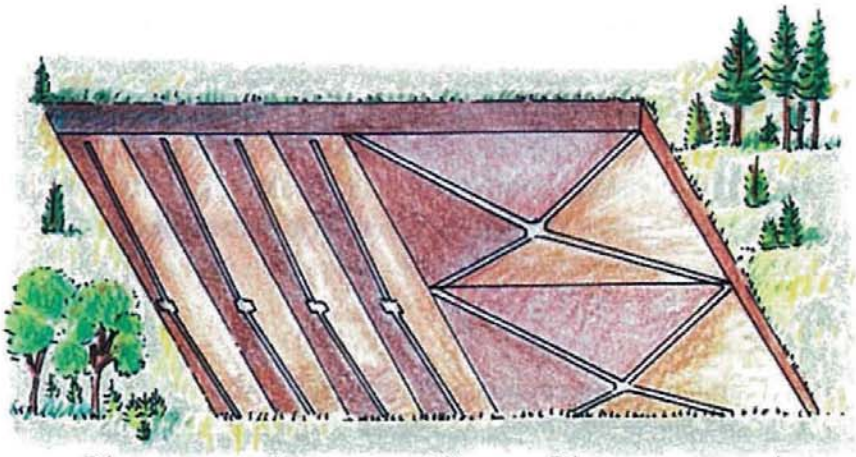


Figure 37 : Modelage d'un toit de remblai plat pour évacuer les eaux d'infiltration [5].

Cependant, tous les sols ne sont pas drainables, car, pour qu'un drainage de parcelle fonctionne de manière satisfaisante, il faut :

- que l'eau puisse circuler dans le sol par gravité dans la macroporosité du sol (ce qui n'est pas réalisé quand une couche de terre est compactée ou quand la texture est trop argileuse) ;
- que l'évacuation hors des drains puisse se faire, c'est-à-dire que les drains soient au-dessus du niveau d'une nappe d'eau (ce n'est donc parfois pas le cas pour certaines périodes de l'année dans des parcelles sur basses terrasses alluviales).

IV - MISE EN PLACE DU SOL PROSPECTABLE PAR LES RACINES

A la différence du réaménagement agricole où la couche de terre végétale présente un intérêt agronomique beaucoup plus fort que l'horizon minéral, pour le réaménagement forestier, toute la couche de sol prospectable par les racines (donc l'horizon minéral et l'horizon organo-minéral) est à traiter avec le même soin afin d'éviter tout compactage. Le terme « terre » utilisé par la suite s'adressera donc aussi bien à l'horizon minéral qu'à l'horizon organo-minéral.

1 - CONDITIONS DE MANIPULATION DE LA TERRE

Nous avons déjà mentionné à plusieurs reprises la nécessité de ne manipuler la terre (terre végétale, stériles de décapage ou fines de décantation) que si elle est suffisamment sèche. Nous allons développer ici ce point qui est apparu dans la phase de visite de terrain comme l'un des points le moins bien pris en compte dans les réaménagements.

Les conditions météorologiques jouent un grand rôle dans tous les mouvements de terre. En effet, pour être manipulée dans de bonnes conditions, la terre doit être correctement ressuyée. Transporter et manipuler une terre trop humide provoque des phénomènes de compaction et de dégradation de sa structure [6, 62a, 97, 118]. Le décapage et le réaménagement ne

devraient avoir lieu que si le sol est suffisamment sec (terre friable, non modelable, ne collant pas aux mains et aux machines [62a]).

Déterminer si le sol peut être manipulé peut relever de l'observation de deux paramètres : le climat ou le sol. Ainsi, en Grande-Bretagne [92, 97], deux méthodes sont basées sur le climat :
- la restriction globale des mouvements de terre aux seuls mois réputés peu pluvieux, d'avril à septembre, avec l'inconvénient d'être à la fois beaucoup trop restrictif et non opérationnel en année à pluviométrie à répartition anormale ;
- l'observation des événements pluvieux et après une pluie de 12 mm et plus, ne pas manipuler la terre avant 3 jours consécutifs de temps sec. Cette méthode est plus fiable mais elle ne prend pas en compte l'évapotranspiration qui peut sécher rapidement le sol en été ni la texture du sol qui influence son comportement vis-à-vis de l'humidité.

La méthode basée sur l'observation du sol nécessite qu'il soit sec et friable ou, au pire, qu'il soit un peu plus sec que sa limite de plasticité[89].

La limite de plasticité est atteinte quand, avec une boulette de 15 g de sol, on peut faire des boudins de 3 mm de diamètre qui sont suffisamment plastiques pour se plier en fer à cheval sans se fissurer (figure 38) : le sol est alors trop humide pour être manipulé sans risque de compactage et de dégradation de sa structure. Afin de savoir si le sol est assez sec pour être manipulé, il faut essayer de réaliser ce boudin. Si celui-ci se fissure quand on le plie (figure 38) ou s'il est impossible de réaliser ce boudin, le sol peut être manipulé, il est suffisamment sec.



Figure 38 : Détection de la limite de plasticité d'un sol.

89 Limite d'Atterberg.

Les experts anglais [92] pensent qu'il est inutile de proposer des méthodes plus poussées de mesure de l'humidité du sol. Ils considèrent que si les responsables du réaménagement et les conducteurs d'engins sont sensibilisés correctement, les erreurs actuelles pourront être évitées.

Nos observations rejoignent ce point de vue. En effet, la phase de terrain nous a montré que la nécessité du décapage sélectif est bien admise par les exploitants (tous les sites font l'objet de décapage sélectif). Par contre, la nécessité de ne pas manœuvrer de la terre humide n'est pas encore passée dans les pratiques systématiques.

2 - MISE EN PLACE DE L'HORIZON MINÉRAL

Les conditions de mise en place des matériaux (stériles de découverte ou de traitement, fines de décapage, terres décapées non sélectivement provenant de l'extérieur) influent beaucoup plus sur la qualité du réaménagement que les caractéristiques intrinsèques de ces matériaux. En effet, pour l'horizon minéral, c'est principalement l'absence de compactage qui sera garant de la qualité du réaménagement.

La mise en place de la terre prospectable par les racines doit donc se faire sans compaction. La terre doit être manipulée avec précaution, avec des machines à basse pression. Au Canada [90], la pression des machines ne doit pas dépasser 1000-2 000g/cm^2 pour éviter la compaction du sol. Nous voyons que les normes suisses [62a] sont beaucoup plus contraignantes avec une pression maximale de 300 g/cm^2. En France, nous sommes proches des valeurs suisses, puisque le chiffre retenu dans la bibliographie est une pression de 400 g/cm^2 pour une pelle sur chenille pouvant travailler en rétro sur le sol remis en place. Il ne faut pas pousser la terre avec la pelle sur de longues distances : le sol est un matériau fragile.

Les matériaux terreux doivent toujours être mis en place de haut en bas (figure 39) sinon les eaux de pluies risquent de s'accumuler derrière eux [5].

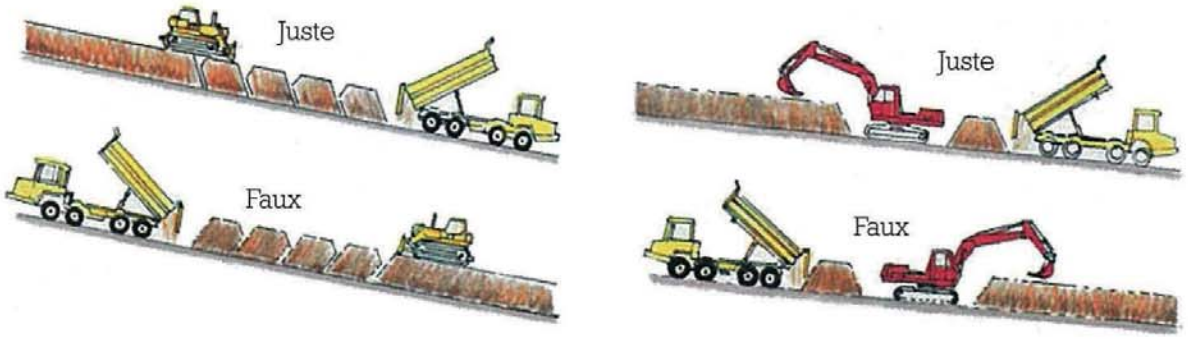


Figure 39 : Mise en place du sous-sol de haut en bas (d'après [62 a]).

Une fois le fond de fouille nivelé et drainé, le régalage de l'horizon minéral se fait au godet du chargeur ou à la pelle mécanique, en bandes, le chargeur ne devant pas rouler sur la surface rippée ou régalée. L'horizon minéral est benné sur la zone rippée, couche par couche, et régalé par une pelle ou un chargeur situé latéralement, travaillant en pousse ou en rétro. La pelle peut aussi travailler en reculant sur la bande en cours d'aménagement, par balayage. Aucun engin sur pneus ne doit circuler sur la surface rippée ou sur la sous-couche afin de ne pas la tasser. Il faut également éviter le scraper qui compacte.

Dans toutes les situations, il est nécessaire de décompacter la couche supérieure de l'horizon minéral afin de l'ameublir avant de déposer l'horizon organo-minéral.

Afin de pratiquer un travail optimum, il est bon de mener le rippage et le régalage de façon conjointe, par bandes :

- rippage d'une bande de 2,5 ou 3 m ;
- apport de la couche d'horizon minéral sans rouler sur la zone rippée ;
- régalage de l'horizon minéral, afin d'éviter l'apparition des mouillères il est nécessaire de pratiquer un nivellement correct de la surface de l'horizon minéral en respectant la pente du toit du remblai;
- apport de l'horizon organo-minéral sans rouler sur l'horizon minéral ;
- régalage de l'horizon organo-minéral.

Ensuite, une deuxième bande peut être réalisée, sans tassement de la première.

Si le godet du chargeur est de grande taille par rapport au volume de terre à apporter sur une bande de 3 m de large, il est conseillé de vider le godet en deux fois en décalant latéralement le chargeur d'une largeur de godet.

En Suisse [5], afin de connaître l'épaisseur de couche prospectable par les racines et la nature de matériaux la composant, un rapport précis des étapes de remblai et de reconstitution de l'horizon minéral doit être tenu, au besoin avec des photographies prises pendant le comblement. Comme les erreurs commises lors de la remise en état des lieux ne sont guère corrigibles après coup, et parfois ne sont mises en évidence qu'au bout de plusieurs années, il importe de contrôler chaque étape du réaménagement (sous la forme d'un procès-verbal de reconnaissance de la remise en état des lieux).

Pour l'apport des fines, nous n'avons aucune information précise dans les rapports forestiers, nous nous référons donc ici aux éléments des réaménagements agricoles.

La mise en place séparée des fines (couche inférieure) et des stériles (couche supérieure) puis l'incorporation par labour peuvent présenter des irrégularités et des zones de tassement [TPG 13] (ornières de 0,30 m de profondeur dans les fines manipulées mouillées). Pour le mélange de deux couches d'épaisseur relativement importante (0,25 m chacune), il semblerait que les outils agricoles classiques soient limités, un malaxeur ou une machine

à bêcher semblant préférable. Par ailleurs, si les pourcentages de stériles sont faibles, le régalage d'une faible couche (0,10 m) est beaucoup plus difficile à effectuer dans de bonnes conditions qu'une couche plus épaisse.

Piste de recherche

Les conditions idéales de la mise en place de fines de décantation est leur séchage au préalable pour les manipuler sèches. Ce point n'est pas encore bien maîtrisé et nécessiterait des expérimentations pour préciser les conditions de prélèvement et de ressuyage des fines avant leur incorporation aux stériles.

3 - MISE EN FORME DE LA SURFACE DU SOL RECONSTITUÉ

Modeler la surface du sol reconstitué permet [92] :
- le contrôle des eaux de ruissellement ;
- l'amélioration du drainage de surface et prévient l'apparition de zones de mouillères ;
- favorise l'infiltration de l'eau en profondeur donc la recharge de la réserve en eau du sol à chaque épisode pluvieux[90] ;
- diminue les risques d'érosion.

Les apports d'eau sur la parcelle sont de deux ordres :
- les précipitations tombant directement sur la parcelle ;
- les arrivées d'eau de ruissellement amont.

Ces eaux de ruissellement amont sont à capter[91] afin d'éviter leur entrée sur la parcelle. Afin d'assurer un bon assainissement de surface, des fossés sont creusés autour du site, ceci est d'autant plus efficace que la carrière est en creux. Ils peuvent éventuellement guider les eaux vers un bassin de rétention permettant l'arrosage des plants. En outre, ils peuvent améliorer l'insertion paysagère du site et la reprise des plantations en étant bordés de haies (constitution d'un écran).

Le premier moyen de contrôle du régime hydrique du sol est la topographie de la parcelle. Un excès d'eau ne peut pas être évacué sur un terrain plat. Seule la création de pente permet de conduire les eaux pluviales en excès hors de la parcelle ou vers un point bas de la carrière en fosse. La pente minimale pour assurer cet assainissement de surface est de 6°, des pentes plus fortes peuvent en cas de grosses pluies d'orage être génératrices de phénomènes d'érosion.

90 En particulier en augmentant la distance et la durée du parcours de l'eau sur la parcelle ce qui lui donne plus de possibilité de s'infiltrer.
91 Les ruissellements d'eau se produisent toujours par forte pluie, à un moment où l'eau de pluie peut déjà avoir du mal à s'infiltrer dans le sol de la parcelle. Il est donc inutile d'amener encore plus d'eau sur la parcelle.

Créer une topographie sous forme de grands billons[92] larges de 30 m et hauts en leur centre de 1,5 m a été préconisé en Grande-Bretagne [92] dans les années 1980 (figure 40). Sur substrat imperméable (schéma du haut), ces billons sont séparés par des fossés qui permettent l'évacuation de l'eau en excès vers un collecteur. Sur substrat perméable (schéma du bas), ils sont séparés par une bande de sol décompacté par le passage d'un ripper.

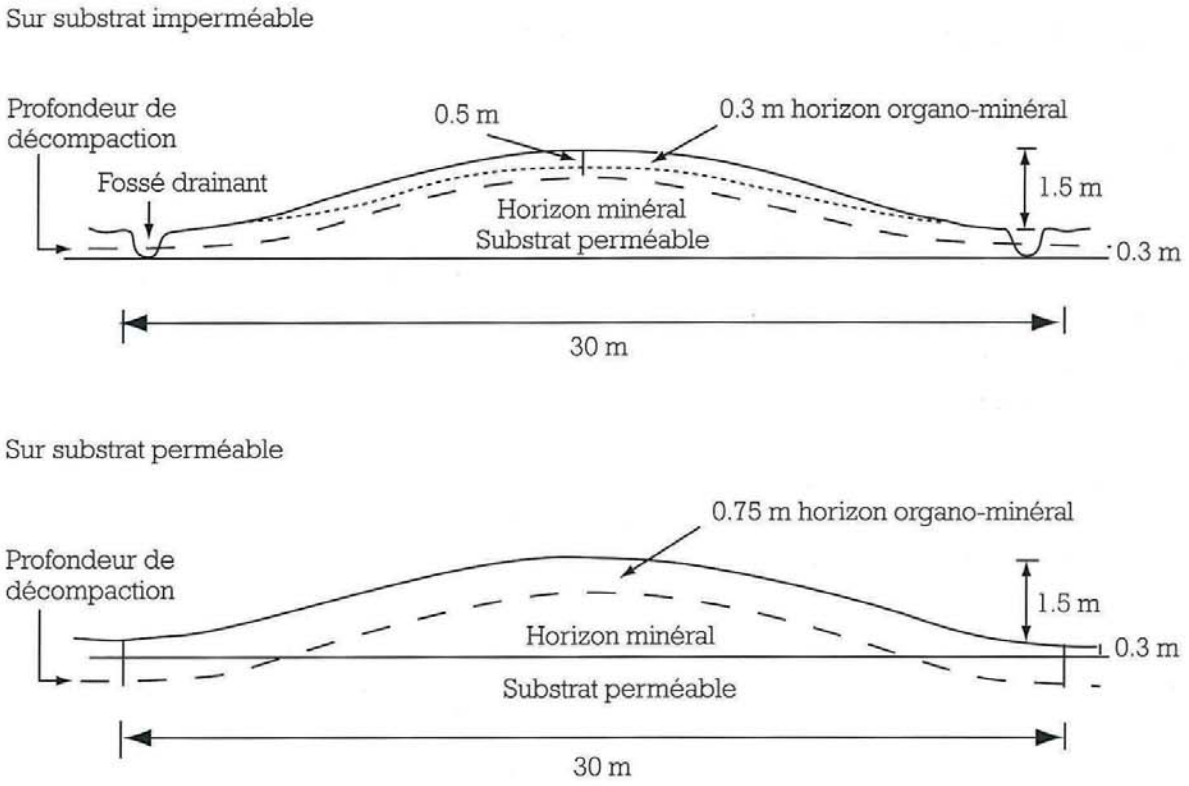


Figure 40 : Modelé du terrain en billons (d'après [92]).

Une évaluation des résultats de ce modelé de terrain en terme de croissance des arbres a été faite en 1989. Les conclusions des experts mettent en évidence que ce système est un bon moyen de réduire les engorgements dans tout le billon. En climat humide, il a permis une bonne croissance des arbres en assurant aux racines la prospection d'un espace racinaire aéré plus important. Cependant, en climat sec, la partie centrale (la plus élevée) présente des arbres à faible croissance en raison d'un trop long déficit hydrique en été. Au vu de ce bilan, les préconisations actuelles [92] sont de modeler en billons uniquement dans les climats humides où le déficit hydrique n'est pas trop fort. Pour les climats secs à déficit hydrique marqué, le modelé en billon doit être fortement adouci afin de réduire la profondeur de la nappe en été.

92 Un modelé en billon consiste à créer de légères buttes larges de 20 à 30 m pour 1,5m de haut dans leur milieu et séparées de part et d'autre par des fossés.

Afin de ne pas gêner les travaux, le billon doit être mis en forme avant l'ouverture des fossés. Si la portance du sol le permet, la plantation doit aussi être effectuée avant l'ouverture des fossés car ils constituent un obstacle important aux circulations d'engins [24].

L'ouverture de fossés pour évacuer les eaux en excès n'est efficace que si une dénivellation permet le vidage des fossés dans un émissaire plus bas que la parcelle [24].

4 - CHOIX ET UTILISATION DES ENGINS

Nous avons déjà souligné l'importance d'engins basse pression pour ne pas compacter le sol, ainsi que la nécessité de ne pas rouler sur les couches remises en place. Pour cela, il est nécessaire de planifier soigneusement les déplacements des engins et de baliser soigneusement les pistes de circulation (les futures voies de desserte) afin qu'elles soient bien identifiées par les conducteurs.

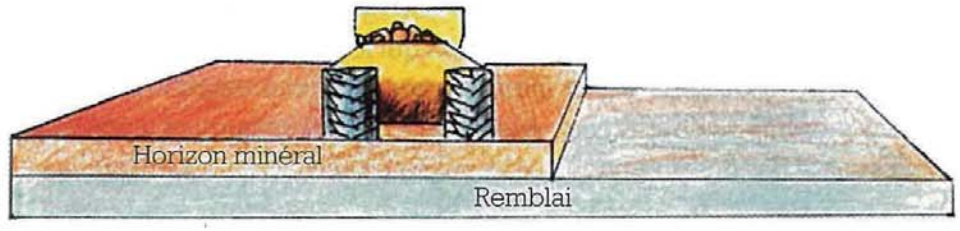
Les sols reconstitués au scraper sont mis en place par couches successives de 0,25 m d'épaisseur. Ceci peut donc induire de fortes compactions des premières couches en place au niveau du passage des roues. Un tel sol aura donc une série de couches compactées à différentes profondeurs [92]. Un tel sol sera défavorable à un reboisement en raison des barrières à la pénétration des racines. Un rippage de chaque couche déposée est nécessaire. Ainsi, des parcelles reconstituées au scraper sur des sols humides [F1 m] ont été compactées ce qui a conduit à des échecs de plantation au bout de 2 à 4 ans avec une forte mortalité des plants. En effet, en raison du compactage, des engorgements superficiels se produisaient et les jeunes plants ont dépéri. Ces parcelles ont du être décompactées par sous-solage profond (0,80 à 1 m) et la plantation a du être refaite. Le scraper est donc à déconseiller ou à utiliser partiellement en évitant sa circulation sur l'horizon organo-minéral.

Lors d'une remise en place avec une pelle et des dumpers, la pelle reprend le tas versé par le dumper et le régale avec le godet. Si le protocole est soigneusement suivi, il n'y a pas de compaction. Cette méthode est bien meilleure mais plus lente et plus coûteuse que celle au scraper.

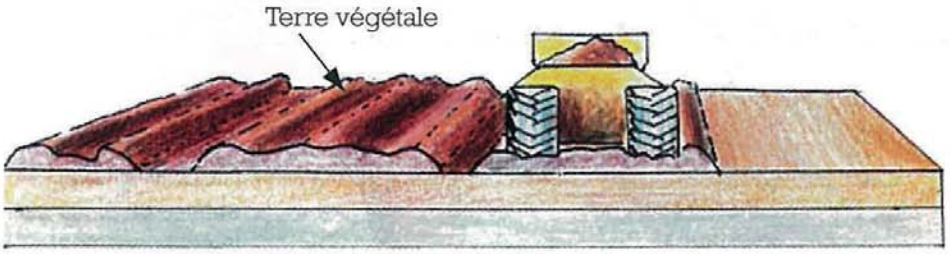
Deux méthodes ont été mises au point en Angleterre dans les années 80 [97] :

– l'une avec un scraper et une pelle (figure 41)

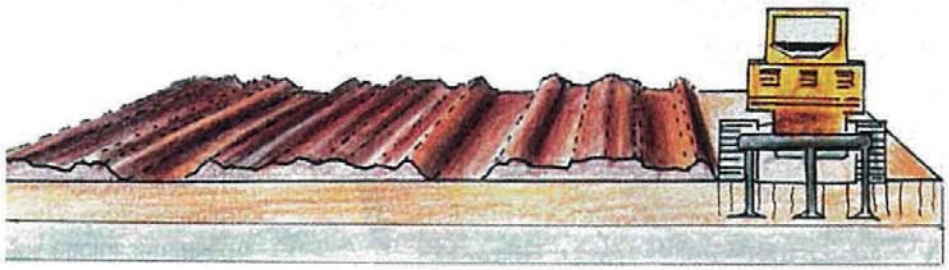
L'horizon minéral est mis en place et régalé par un scraper. Ensuite, le scraper roulant sur l'horizon minéral dépose l'horizon organique en tas légèrement distants en laissant une bande libre. L'horizon minéral de cette bande libre est rippé et l'horizon organique est étalé par la pelle sur la surface rippée. Le sol est ensuite rippé sur la bande à l'emplacement du tas étalé dans l'étape précédente et ainsi de suite. Dans cette méthode, le scraper roule sur l'horizon minéral mais celui-ci est décompacté par rippage et il ne circule pas sur l'horizon organo-minéral.



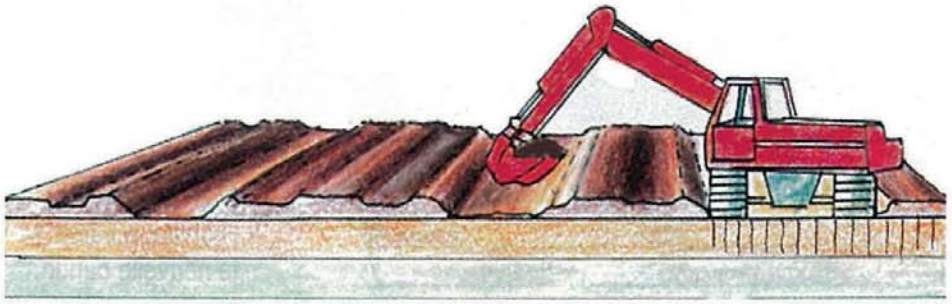
1) Mise en place de l'horizon minéral par un scraper



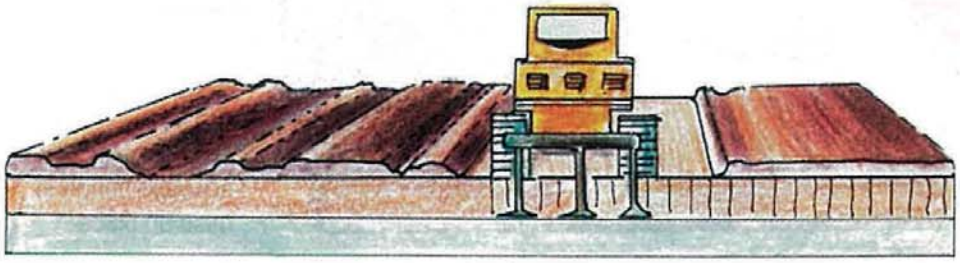
2) Dépôt de la terre végétale en tas



3) Rippage d'une bande d'horizon minéral



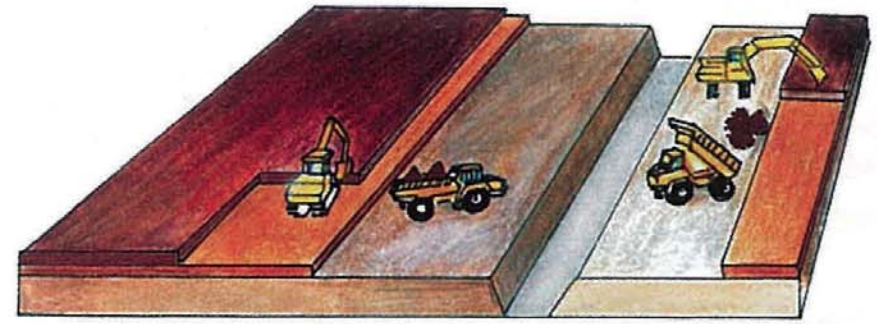
4) Régalage de la terre végétale par une pelle



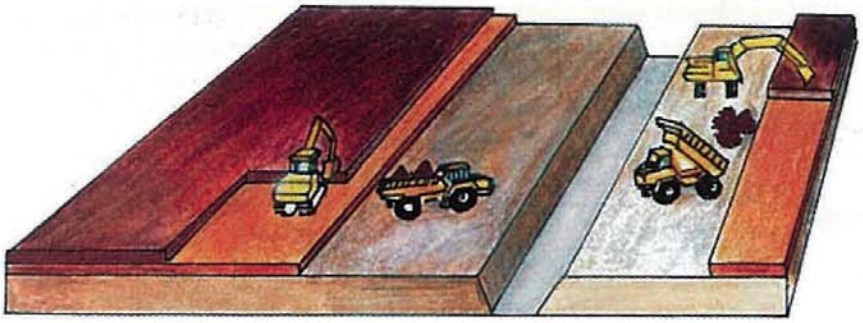
5) Rippage d'une bande d'horizon minéral

Figure 41 : Schéma de mise en place du sol avec scraper et pelle.

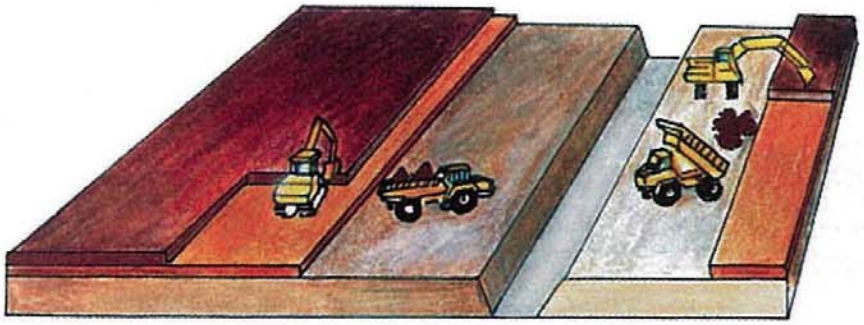
– une méthode plus soigneuse est réalisée avec des dumpers et des pelles (figure 42) L'horizon minéral[93] est découvert, puis placé dans le camion qui le dépose en tas et en bandes, puis il est étalé. Ensuite, on procède de la même manière avec l'horizon organo-minéral qui est replacé sur l'horizon minéral de l'autre côté. Auparavant, le soubassement a été rippé. Ainsi, le sol n'est jamais tassé par des engins.



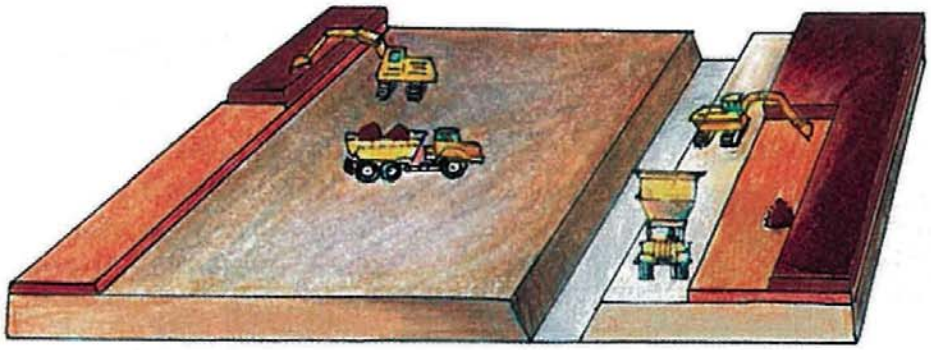
1 – Décapage de l'horizon minéral et mise en place sur le soubassement préparé



2 – Décapage de la terre végétale d'une nouvelle bande et mise en place à la pelle mécanique sur l'horizon minéral



3 – Décapage de l'horizon minéral de la nouvelle bande

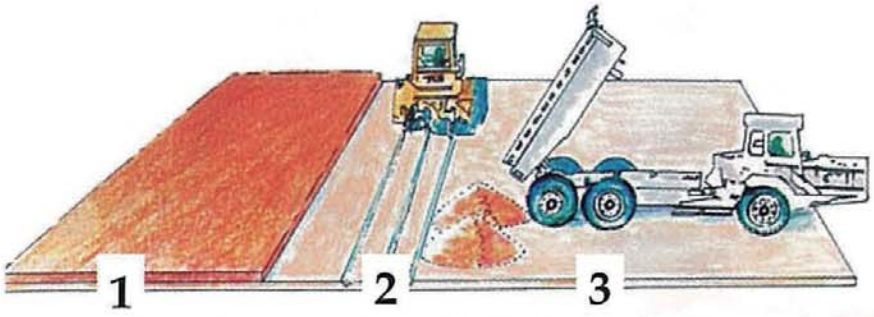


4 – Décapage de la terre végétale d'une nouvelle bande et mise en place

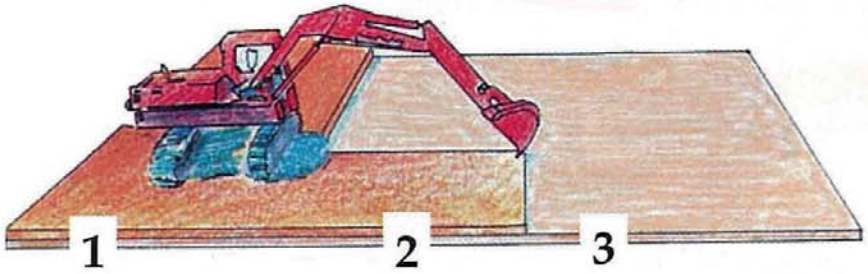
Figure 42 : Schéma de décapage avec dumpers et pelles.

93 Préalablement décapé de son horizon organo-minéral dans une phase précédente.

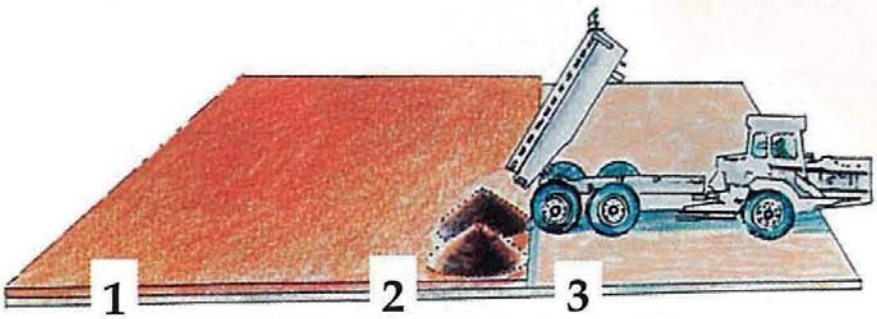
En France, pour le réaménagement agricole, deux méthodes sont préconisées par le BDPA[94] (figures 43 et 44) :
- l'une recommande le régalage par pelle à chenille placée sur la couche mise en place et fonctionnant en rétro (schéma 4 fig. 43) ou par pelle à roues depuis le soubassement et travaillant en poussée (schéma 4 fig. 44) ;



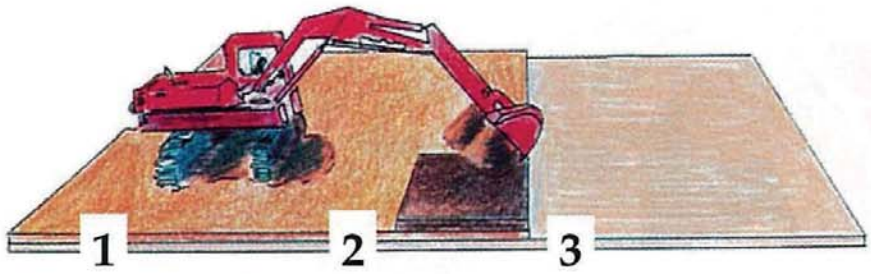
1 – Rippage de la bande 2 et apport de la couche inférieure, sans roulage des dumpers sur la bande 2.



2 – Régalage de la couche inférieure par une pelle montée sur chenilles, circulant sur la bande 1 terminée ; travail presque exclusivement en rértro.



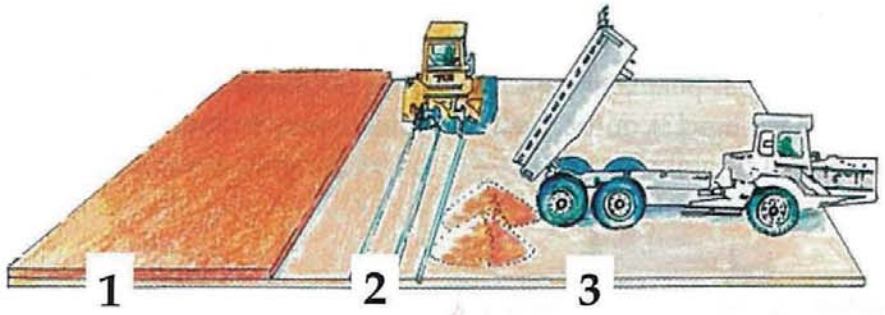
3 – Apport de la couche supérieure sur la bande 2. Le bennage doit être fait sur la couche inférieure, quitte à monter les roues arrière, pour ne pas gaspiller la terre sur le soubassement de la bande 3.



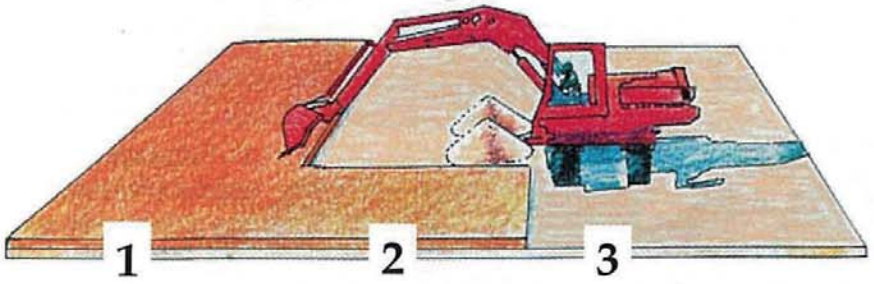
4 – Régalage de la couche supérieure par une pelle montée sur chenilles circulant sur la bande1 terminée. Travail aisé en rétro, y compris pour la reprise de terre versée éventuellement sur le soubassement.

Figure 43 : Schéma de régalage avec pelle à chenille.

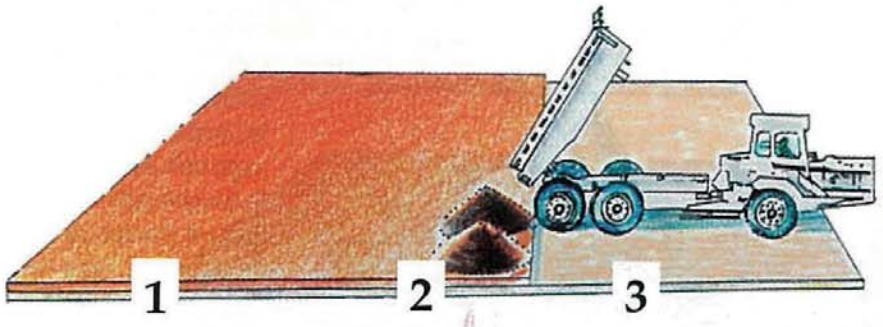
94 BDPA : Bureau de Développement des Productions Agricoles.



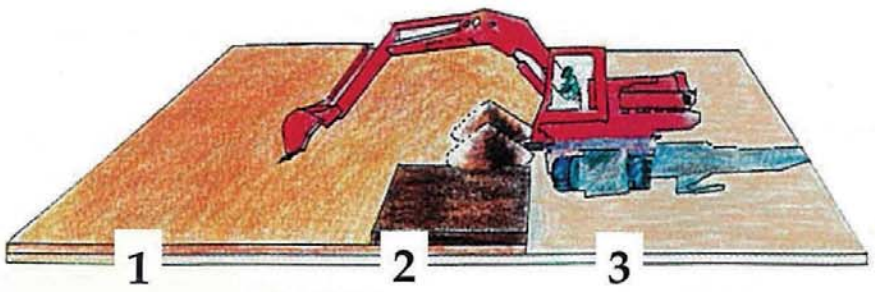
1 – Rippage de la bande 2 et apport de la couche inférieure, sans roulage des dumpers sur la bande 2.



2 – Régalage de la couche inférieure par une pelle montée sur pneus, depuis le soubassement de la bande 3. Travail du godet en poussée puis finition en rétro.



3 – Apport de la couche supérieure sur la bande 2. Le bennage doit être fait sur la couche inférieure, quitte à monter les roues arrière, pour ne pas gaspiller la terre sur le soubassement de la bande 3.



4 – Régalage de la couche supérieure par une pelle montée sur pneus, depuis le soubassement de la bande 3. Travail en poussée et en rétro, avec nécessité de pivoter la tourelle pour reprendre en rétro la terre versée sur le soubassement.

Figure 44 : Schéma de régalage avec pelle montée sur pneus.

- l'autre méthode utilise un chargeur sur roues travaillant en rétro sans rouler sur la bande (figure 45).



1 – Rippage du soubassement (trax, bouteur, chargeur en rétro).



2 – Apport de la terre sur la bande à réaménager. Pas de roulage sur la bande.



3 – Dépôt de la terre et régalage grossier, godet manipulé en rétro.



4 – Finition du régalage de la terre avec le godet du chargeur.

Les opérations 2 à 4 sont reprises ensuite pour la terre végétale.

Figure 45 : Schéma de remise en place des terres avec chargeur travaillant en rétro.

La totalité des articles et études montre que l'utilisation d'un mauvais engin (sur roues circulant sur les couches de sol mises en place) ou la manipulation de terre humide, sont deux causes de dégâts irrémédiables à la structure et donc à la qualité du sol.

Si des engins non adaptés sont utilisés, il faut procéder au rippage de chaque couche déposée avec une profondeur de rippage supérieure à l'épaisseur de la couche de sol pour pouvoir atteindre la semelle de compactage.

5 - EPIERRAGE

Pour les sols forestiers les épierrages ne se justifient pas, en effet, la présence de cailloux (jusqu'à 30 %) peut améliorer le drainage et l'aération du sol et ne pose pas de problème mécanique puisque le sol n'est pas travaillé.

Le taux de cailloux a cependant un impact défavorable sur la réserve utile du sol. Si on a affaire à un sol contenant plus de 60 % de cailloux, ses capacités d'alimentation hydrique des arbres seront limitées. Si en outre le volume de matériau à réutiliser est faible et à forte teneur en cailloux, il peut être intéressant de pratiquer, comme pour les réhabilitations de pistes de ski [40], le concassage des pierres avec un appareil à marteaux fixes tracté par un tracteur de plus de 150 ch à vitesse d'avancement lente. Cette pratique est plus rapide que l'épierrage et permet l'utilisation de terre chargée de pierres avec moins de perte de matériaux, donc moins de perte d'épaisseur de terre. Ainsi, à Lans-en-Vercors, en épierrant manuellement, 1000 m^3/ha de terre sont nécessaires alors qu'en concassant, seuls 400 m^3/ha de terre sont utilisés[95] pour reconstituer la même épaisseur de sol.

6 - TRAVAIL DU SOL

Même en reboisement de sol forestier en place et même si elle est coûteuse, la préparation du sol présente presque toujours des avantages importants quant à la survie et à la croissance des plants [24].

Les effets positifs du travail du sol permettent :
- l'amélioration des conditions d'alimentation en eau ;
- l'amélioration des conditions d'alimentation minérale ;
- l'amélioration des conditions de croissance racinaire ;
- l'homogénéisation des conditions de milieu ;
- l'amélioration des conditions d'entretien ultérieur.

Pour les sols reconstitués, le travail du sol est encore plus justifié.

En Suisse [62a], un bêchage de surface, qui soulève toute la masse du sol jusqu'à une profondeur de 0,60 à 0,70 m, est recommandé : une bêcheuse mécanique permet en effet de soulever toute la masse de sol sans mélanger les horizons du sol ni provoquer de couche de lissage. En France [TPG 2], il est recommandé d'ameublir après le dépôt de chaque couche de substrat.

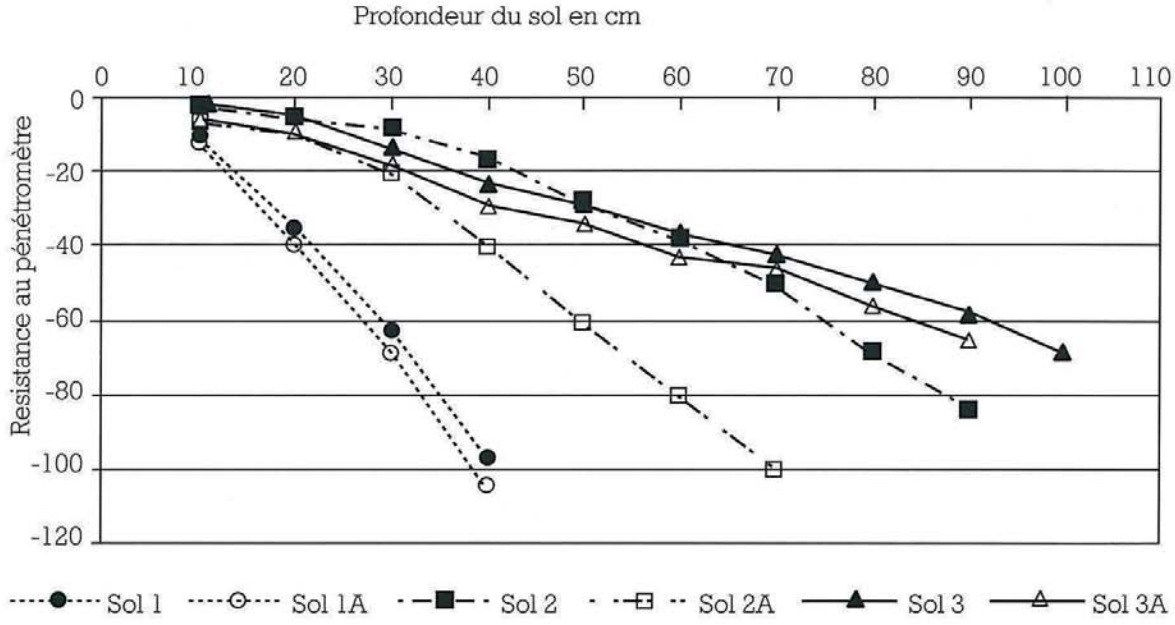
95 Et une économie de main-d'œuvre de 70 %.

Le rippage doit être effectué entre le dépôt de chaque couche déposée, à une profondeur permettant d'atteindre et de décompacter la couche précédente éventuellement compactée. Le labour est également recommandé [39], il doit avoir lieu suffisamment tôt avant la plantation pour qu'il n'y ait plus de mottes au moment de la plantation mais pas trop tôt afin qu'il n'y ait pas installation d'espèces herbacées.

L'expérimentation de Jablines [TPG 9] a montré l'intérêt du labour pour décompacter les 20 premiers centimètres du sol, cependant cette profondeur de décompaction est très insuffisante pour permettre la croissance d'arbres. La pratique du labour ne peut être efficace que si au préalable on s'est assuré que le sol n'était pas compacté.

De la même manière, en Grande-Bretagne [37a] un sous-solage profond est pratiqué après la reconstitution du sol, mais l'étude indique que les conditions optimales de ce décompactage sont encore mal connues. L'utilisation de ripper ou de sous-soleuse est souvent inefficace, la décompaction n'est pas assez profonde pour des sols forestiers.

En effet, en Grande-Bretagne [92], des essais comparatifs de mesure de densité du sol reconstitué au pénétromètre (instrument de mesure de la résistance du sol à la pénétration) comparent (figure 46) des sols compactés lors de la mise en place (sol 1 non décompacté ensuite, sol 2 décompacté par sous-solage avec des dents à ailettes) et un sol mis en place par une pelle sur chenille depuis le toit du remblai (sol 3).



Sol 1 : sol compacté non retravaillé mesure en juin 1990
Sol 1 A : sol compacté non retravaillé mesure en février 1991
Sol 2 : sol compacté et sous-solé en juin 1990, mesure en juin 1990
Sol 2A : sol compacté et sous-solé en juin 1990, mesure en février 1991
Sol 3 : sol mis en place avec une pelle sur chenille mesure en juin 1990
Sol 3 A: sol mis en place avec une pelle sur chenille mesure en février 1991

Figure 46 : Comparaison de la résistance à la pénétration du sol entre un sol compacté, un sol compacté puis sous-solé et un sol non compacté à la mise en place (d'après [92]).

Les mesures de résistance du sol à la pénétration ont été faites deux fois :
- la première en juin 1990 après la reconstitution du sol et après le passage de la sous-soleuse pour le sol 2 ;
- la deuxième, 8 mois après, afin d'étudier la durée du décompactage assuré par le sous-solage et l'évolution de la compaction pour les autres sols.
Plus la résistance à la pénétration est forte plus le sol est compacté.

Ce graphique montre :
- que l'utilisation d'une pelle à chenille permet d'obtenir un sol moins compacté (sol 3) et ce jusqu'à une grande profondeur (1 m) ;
- que le sous-solage d'un sol compacté est efficace sur une profondeur de 0,30 m tout au plus ;
- qu'un sol réaménagé à la pelle présente une faible augmentation de la compaction après 8 mois ;
- que l'effet du sous-solage sur ce type de sol[96] ne dure pas, puisque pour le sol 2 la courbe au bout de 8 mois montre que la compaction a augmenté.

Sur d'autres types de sol, et en particulier sur sol sableux [F1 m], un sous-solage pratiqué par condition de sol sec, a des effets qui persistent.

Seul le travail soigneux de remise en place de l'horizon minéral et de l'horizon organo-minéral du sol quand il est suffisamment sec, avec des engins et une technique adaptée et scrupuleusement respectée, permet de mettre en place un sol forestier de bonne qualité car non compacté dans ses deux premiers mètres.

96 Sol constitué de stériles de mine de charbon à ciel ouvert.

La remise en état du sol est l'une des étapes fondamentales du succès ou de l'échec d'un réaménagement forestier.

L'épaisseur du remblai et du sol à remettre en place doit amener l'espace racinaire en dehors de la zone de battement de nappe phréatique. Le niveau du sol reconstitué doit donc être au moins à 1 m au-dessus du niveau de la crue décennale de la nappe.

Les remblais doivent être disposés en fond de fouille, les plus grossiers et les moins perméables au fond et les plus graveleux et les plus perméables au-dessus. Le toit du remblai doit être modelé de manière à permettre l'évacuation des eaux de pluie.

La reconstitution de l'horizon minéral et de l'horizon organo-minéral doit être effectuée avec le même soin en ce qui concerne l'absence de compactage des différentes couches remises en place :
- le sol ne doit être manipulé qu'en condition sèche (en dessous de la limite de plasticité) ;
- les engins transportant la terre ne doivent circuler que sur les futures voies de desserte ;
- la remise en place des terres doit être effectuée si possible avec un dumper et une pelle sur chenille ;
- si un scraper doit être utilisé, il ne doit pas rouler sur les horizons supérieurs et chaque couche déposée doit être rippée pour la décompacter ;

Afin que les plants ne soient pas soumis à des conditions asphyxiantes, les couches supérieures du sol doivent être perméables, un drainage efficace de surface doit être mis en place en modelant des pentes ou des billons, un captage des eaux de ruissellement amont par fossé doit être prévu.

Le sol avant mise en place de la plantation ne doit pas présenter de zone compactée dans ses deux premiers mètres. Un sous-solage profond (1 m) dans certains sols peut être efficace.

Toute zone de compaction non détruite avant la plantation sera la cause :
- d'une limitation de la zone de prospection des racines en créant une barrière physique à leur croissance ;
- d'une source d'hydromorphie et d'engorgement superficiel.

L'utilisation de fines de décantation est à promouvoir en testant les meilleures conditions de manipulation et de mélange à l'horizon minéral afin d'augmenter la réserve utile des sols.

CHAPITRE 6

AMELIORATION DU SUBSTRAT

La fertilité d'un sol forestier est due, nous l'avons vu dans le chapitre 1, pour une grande part à ses potentialités de réserve en eau (liée pour une part à sa teneur en matière organique) mais aussi, à ses capacités d'échange des éléments nutritifs (fonction également de la teneur du sol en matière organique).

Nous avons également vu que la couche organo-minérale d'un sol forestier était parfois de faible épaisseur et difficile à décaper, en outre, dans un sol qui a été stocké, il y a généralement une dégradation ou une disparition de l'humus. Le sol qui est reconstitué est souvent plus pauvre en humus que le sol qui existait avant l'exploitation du gisement.

Dans un réaménagement forestier, les besoins des jeunes plants en éléments minéraux vont être faibles au début et vont augmenter progressivement. Des restitutions annuelles (chute de feuilles et d'écailles de bourgeon) vont se produire et être minéralisées dans le sol. L'accumulation d'humus commencera tout de suite après le reboisement des sols. Les apports en litière fraîche qui interviennent une fois la plantation installée, permettent de reconstituer en une dizaine d'années une teneur en humus satisfaisante [5]. Le sol forestier est donc plus capable d'autosuffisance qu'un sol agricole auquel on demande une production forte les premières années et qui ne reçoit pas de restitution de matière organique puisque les récoltes exportent toute la production de matière.

Néanmoins, il est important de conserver les horizons organo-minéraux intacts ou à défaut, de remettre les sols en culture immédiatement avec des espèces améliorantes afin de reconstituer un humus.

Pour les sols forestiers, seules des situations exceptionnelles justifieront un apport important de matière organique, principalement quand l'horizon organo-minéral n'existe plus et que l'horizon minéral est de médiocre qualité (avec une très faible réserve en eau par exemple). Par contre une stimulation de la vie biologique des sols peut être d'un grand intérêt pour remettre en marche les cycles de minéralisation du sol Cependant, peu d'expérimentations ont été testées.

La matière organique peut être apportée sous forme d'engrais vert ou sous forme d'amendements organiques.

Pour les réaménagements forestiers, le raisonnement de l'amélioration de la teneur en matière organique des sols et de la fertilisation devront prendre en compte :
- le risque de développement concurrentiel d'une végétation herbacée préjudiciable aux jeunes plants ;
- le risque d'une trop grande richesse du sol qui nuise à la bonne installation et au bon fonctionnement des mycorhizes du sol.

Si l'apport d'amendements organiques n'est pas la règle, néanmoins pour améliorer certains sols, il peut être intéressant. Pour décider de réaliser ou non un apport d'amendement organique et pour choisir quel type d'amendement utiliser, un certain nombre d'éléments doivent être pris en compte :
- la disponibilité des éléments à proximité de l'exploitation ;

- la composition du substitut de sol, au niveau physique, chimique[97], biologique ;
- les caractéristiques générales des sols à réhabiliter, afin de déterminer la meilleure combinaison de matériaux utilisables ;
- la localisation du site (proximité de zone vulnérable, cours d'eau, captage...) ;
- la topographie (attention au risque d'érosion) ;
- les caractéristiques physiques des sols (risque de lessivage) ;
- les contraintes réglementaires.

C'est principalement en région méditerranéenne et dans les carrières de roches massives en front de taille ainsi que pour certaines carrières de roche massive en fosse, que les amendements organiques pourront avoir un intérêt (faible épaisseur de sol disponible, grande demande hydrique en raison du climat). Nous traiterons donc de la présentation des amendements organiques : composts, boues de station d'épuration... dans la partie 3 chapitre 11.

I - L'AMELIORATION BIOLOGIQUE DES SOLS

Pour les réaménagements forestiers, il est préférable de stimuler la capacité des plants et du sol à rétablir un écosystème fonctionnant bien, plutôt que d'apporter aux plants une nourriture « toute prête ». En effet, si le milieu autour du plant est riche en éléments fertilisants, deux conséquences négatives peuvent en résulter :
- non installation des mycorhizes provenant du sol sur les racines du plant (ou non fonctionnement voire disparition des mycorhizes inoculées au plant) ;
- faible développement du système racinaire, ce qui n'assure pas au plant une bonne stabilité ni une bonne capacité de résistance à une période de sécheresse.

La stimulation des phénomènes de minéralisation dans le sol peut être faite grâce à l'utilisation d'engrais vert, de bois raméal fragmenté ou d'introduction de lombriciens.

1 - LES ENGRAIS VERTS

Quand la plantation n'est pas faite directement après la remise en place des sols, un engrais vert peut être semé afin de ne pas laisser le sol nu ce qui entraînerait un risque :
- accru d'érosion ;
- de constitution d'une croûte de battance ;
- de percolation des éléments fins du sol ;
- d'installation d'une végétation défavorable : espèces fortement concurrentielles pour l'eau, espèces invasives[98] pouvant provoquer une diminution de la biodiversité...

L'engrais vert a en effet l'intérêt de couvrir le sol et donc de limiter l'érosion, d'empêcher la germination de graines déposées par le vent, en outre, il améliore la structure du sol par

97 Et en particulier, l'absence d'éléments polluants.
98 Les principales espèces invasives colonisant les sols remaniés sont le buddleia, l'ambroisie et la renouée du japon et en zone méditerranéenne, le sénecon du Cap ; ce point sera développé dans le chapitre 8.

l'action de ses racines. S'il s'agit d'une légumineuse, il augmente la teneur en azote du sol. Lorsqu'il sera enfoui avant la plantation, il se minéralisera dans le sol augmentant ainsi la richesse du sol et stimulant les microorganismes du sol.

Sur des pentes où les risques d'érosion sont forts, les plantes semées en couverture de sol seront laissées en place après la plantation. Laisser l'engrais vert en place peut permettre aussi de limiter le développement de plantes invasives. Quand l'engrais vert est laissé, un contrôle local (au pied de chaque plant[99]) devra être mis en place afin de limiter la concurrence du tapis herbacé pour l'eau. On considère [24] en effet, que pendant les trois premières années de croissance du plant la concurrence ne s'exerce que dans un diamètre d'un mètre autour du plant. Laisser une végétation herbacée dans l'interbande de plantation n'est donc pas préjudiciable à la croissance du plant si la zone autour de celui est maintenue propre.

Les mélanges à utiliser peuvent être à base de graminées faciles à installer et n'étant pas trop compétitives pour l'eau et de légumineuses. En Grande-Bretagne [92] le mélange recommandé comprend :

- *Agrostis capillaris* 10 %
- *Festuca rubra var commutata* 20 %
- *Festuca ovina / Festuca tenuifolia* 40 %
- *Trifolium repens* 20 %
- *Lotus corniculatus* 10 %

Espèce	Forme de vie	pH	Demande en nutriments	Tolérance à l'hydromorphie	Tolérance à la sécheresse
Lupin *Lupinus arboreus*	annuelle	4,5-7,0	faible	moyenne	bonne
Gesse sauvage *Lathyrus sylvestris*	pérenne	4,0-7,5	faible	moyenne	bonne
Pois vivace *Lathyrus latifolius*	pérenne	4,0-7,5	faible	moyenne	bonne
Trèfle blanc *Trifolium repens*	pérenne	5,5-7,0	forte	moyenne	faible
Trèfle rouge *Trifolium pratense*	biannuelle	5,0-7,5	forte	faible	moyenne
Lotier corniculé *Lotus corniculatus*	pérenne	4,5-8,0	moyenne	moyenne	bonne
Sainfoin *Onobrychis viciifolia*	annuelle	6,5-8,0	moyenne	bonne	bonne
Lotus'maku' *Lotus uliginosus*	pérenne	4,0-7,0	moyenne	bonne	moyenne
Luzerne *Medicago sativa*	pérenne	5,5-8,0	forte	faible	bonne

Figure 47 : Légumineuses utilisables en couvert végétal (d'après [92]).

99 Isoplant, paillage plastique, mulch, désherbage localisé (ce point sera développé dans le chapitre 7 - IV).

Les légumineuses (pérennes ou non) installées pourront en restant en place après la plantation, enrichir le sol en azote donc favoriser l'alimentation en azote des arbres.

Les légumineuses préconisées en Grande-Bretagne en fonction de leurs exigences et donc de la nature des sols reconstitués sont présentées dans la figure 47.

Un effet très bénéfique sur la croissance des plants a été mis en évidence en Grande-Bretagne [92].



avec végétation naturelle *avec couvert de Lotier*

Figure 48 : Effet d'un couvert de légumineuse sur la croissance de plants forestiers (d'après [92]).

Sur les photos (figure 48) les épicéas de Sitka plantés la même année au milieu d'un couvert naturel ou au milieu d'une légumineuse semée (*Lotus uliginosus*) montrent au bout de 5 ans, des différences de croissance :
- environ 0,85 m pour l'épicéa dans la végétation naturelle ;
- environ 1,4 m pour celui au milieu de la légumineuse.

Dans le cas de légumineuses arbustives, il est préférable de les planter plutôt que de les semer afin de les localiser à bonne distance des plants forestiers et donc de limiter la concurrence pour l'eau. L'utilisation de légumineuses inoculées assure une meilleure efficacité pour la fixation d'azote car les sols reconstitués ne possèdent pas forcément l'espèce de Rhizobium adaptée à la légumineuse choisie.

Nous développerons dans le chapitre 7 - II des expérimentations de plantation conjointe d'espèces fixatrices d'azote et de plants forestiers.

En France, un essai a testé l'effet d'engrais vert constitué de ray grass et de trèfle enfoui après 6 mois, (Jablines [TPG 9]). Sur sol reconstitué issu de stériles très compactés, l'engrais vert a eu un effet bénéfique sur la croissance des trois premières années comparé au témoin sur ce même sol sans engrais vert. L'enfouissement de l'engrais vert par un travail du sol avait permis l'ameublissement des 20 premiers centimètres du sol. Pour le sol reconstitué à partir de remblais recouverts d'un mètre de terre de découverte stockée non compactée, l'impact de l'engrais vert a été nul, il n'y a eu pas de différence de croissance avec le témoin. Cette

expérimentation semble mettre en évidence que le principal effet de l'engrais vert est plus lié au travail du sol qui a décompacté les stériles qu'à son effet direct. Cependant, l'expérience n'est pas suffisamment concluante pour en tirer un enseignement.

A Sierentz [TPG 13], du mélilot blanc (légumineuse inoculée) a été planté sur la bande de plantation 2 mois après la plantation des feuillus. En comparaison avec des bandes de plantation protégées par du paillage plastique disposé de manière à recueillir au pied du plant les eaux de pluies, les bandes à mélilot ont montré des résultats très inférieurs (pour *Platanus acerifolia, Juglans regia* et *Tilia cordata*) en terme de survie, de vigueur et de croissance après deux ans (figure 49). Par contre en considérant l'analyse foliaire des feuilles (qui traduit la nutrition des plantes), les parcelles à mélilot montrent une meilleure nutrition azotée et une nutrition potassique un peu plus faible que sous paillage plastique. Ces résultats semblent indiquer que dans cette expérimentation c'est la disponibilité en eau qui a été le facteur clé. Une plantation de mélilot en interbande aurait sûrement été plus bénéfique.

traitement	platane	noyer	tilleul
% de survie			
sous plastique	90	100	95
avec mélilot	78	78	93
% de plants vigoureux			
sous plastique	86	66	71
avec mélilot	21	14	15
Hauteur totale en cm			
sous plastique	174	83	90
avec mélilot	90	68	70

Figure 49 : Comparaison d'une plantation sur paillage plastique et sur bande de mélilot inoculé.

Cependant, ces deux expérimentations n'ont pas été menées avec suffisamment de rigueur[100] pour être concluantes.

Piste de recherche

Tester en France la pratique proposée en Grande-Bretagne de couverture de sol à base de légumineuses dans différentes situations de climat, de nature de sol et d'espèces forestières :
- soit sous forme d'engrais vert enfoui au moment de la plantation sur toute la parcelle ;
- soit en culture restant en place entre les bandes de plantation.

Selon les climats et les types de sols, différentes espèces de légumineuses seront à tester, l'influence de l'inoculation par les souches de Rhizobium adaptées devrait également faire l'objet d'un protocole d'expérimentation.

100 Pour la première, le protocole mis en place ne permet pas de dissocier entre l'effet engrais vert et l'effet travail du sol, dans la deuxième, placer les paillages plastiques en creux ajoute un effet eau non testé pour les plantations de mélilot.

Il peut être nécessaire quand les arbres de la parcelle d'où provient le sol étaient attaqués par des champignons (*Fomes annosus*) ou par des insectes (hylobes par exemple), de retarder la plantation de quelques années afin de diminuer le foyer d'infestation. Une culture agricole intermédiaire peut alors être envisagée.

2 - LE BOIS RAMÉAL FRAGMENTÉ

Le bois raméal fragmenté ou copeaux de taille [120, 121, 122] est constitué de rameaux de diamètre inférieur à 7 cm (donc jeunes) découpés en petits fragments. Il s'agit en fait d'un apport massif de litière au sol, la litière étant d'habitude constituée uniquement des feuilles, des écailles de bourgeons et des quelques rameaux tombés naturellement.

En effet, les rameaux sont la partie la plus riche du bois. La plupart des éléments nutritifs de l'arbre s'y trouvent : 75 % des nutriments de l'arbre [120]) et en particulier la lignine (qui va contribuer à la formation de l'humus dans le sol), la cellulose et les protéines. Ne pas exporter hors de la parcelle cette partie très riche de l'arbre et la restituer au sol permet d'apporter une quantité non négligeable d'éléments organiques.

En effet, dans le tronc et les grosses branches (le bois caulinaire) la plus grande partie du bois est morte et constituée d'éléments carbonés et de très peu de protéines[101], seule la zone très fine où circule la sève et où s'accroît l'arbre est vivante.

La méthode d'utilisation du bois raméal fragmentée a été développée au Québec dans les années 1980 et testée au Sénégal, en Ukraine et en République Dominicaine [120]. Actuellement elle n'a pas été expérimentée de manière rigoureuse en France. Elle n'a pas été utilisée au Québec dans le domaine du réaménagement de carrières mais des exemples d'utilisation existent pour la renaturalisation de zones périurbaines ou pour la remise en culture de zones dégradées et en foresterie.

La préparation du bois raméal fragmenté s'effectue par le broyage de branches de différents types de feuillus d'un diamètre inférieur à 7 cm. Il est préférable de procéder à l'automne quand les feuilles sont tombées[102]. Actuellement des appareils de broyage de branches sont utilisés dans les espaces urbains pour diminuer le volume à transporter de déchets d'élagages d'arbres d'alignement ou de parcs. Généralement, ces résidus sont compostés. Le bois raméal fragmenté lui n'est pas composté, il est épandu directement sur le sol en couche de 0,5 à 0,10 m (soit un apport entre 15 et 30 tonnes de matière sèche par hectare). L'humification[103] et la minéralisation se produisent dans le sol grâce à l'activation de la croissance des champignons du sol dégradant la lignine. En cascade, toute la chaîne des organismes du sol (bactéries, collemboles, vers de terre ...) est également activée.

---

101 Le rapport C/N du bois raméal varie de 25 à 150, celui du bois caulinaire de 300 à 600 [121].

102 Ce qui correspond à la période préconisée pour le défrichement (voir chapitre 2).

103 L'humification est l'ensemble des processus menant à la formation de composés humiques colloïdaux à partir de la matière organique fraîche.

Si le bois raméal fragmenté n'est pas utilisé tout de suite, il peut être stocké en andains ne dépassant pas 2 mètres et pour une durée inférieure à 3 mois sinon le processus de compostage s'engage. Les épandages doivent être effectués à l'automne afin que l'immobilisation d'azote consécutive à l'apport d'un matériau riche en carbone (la faim d'azote dure environ 2 mois) se produise quand les végétaux sont peu actifs. Si l'épandage a lieu sur un sol forestier qui n'a pas été stocké longtemps, les inoculums de champignon sont présents et pourront dégrader rapidement le bois raméal fragmenté. Dans le cas où la terre de découverte ne provient pas d'un sol forestier ou d'un sol issu d'un stockage de plusieurs années, il est recommandé de l'inoculer avec de la litière prélevée sous une forêt de feuillus (éventuellement sur le site de la carrière dans une zone pas encore exploitée ou déjà reboisée depuis une dizaine d'années). On prélèvera de préférence, l'horizon inférieur de la litière, c'est à dire la couche la plus décomposée et qui contient le plus de filaments de champignons). La dose recommandée est de 1 à 2 tonnes par hectare.

Selon les travaux québécois [120, 121, 122], l'utilisation du bois raméal fragmenté permet d'augmenter la réserve en eau du sol grâce aux capacités de rétention en eau de l'humus formé. Il permet de reconstituer en 3 ans un capital d'humus à grande durée de vie. Il constitue de ce fait un frein à l'érosion et au lessivage des éléments nutritifs.

Piste de recherche

Dans les situations de réaménagements forestiers à l'avancée occasionnant le défrichement de parcelles de forêt de feuillus, il peut être intéressant de tester l'effet du bois raméal fragmenté sur les taux de croissance de jeunes plants de feuillus et sur l'évolution du sol (teneur en humus et micromorphologie de la litière et composition de la faune et de la flore du sol).

3 - L'UTILISATION DE LOMBRICIENS

De nombreux travaux [16] ont montré que l'activité des lombriciens[104] dans le sol améliore la structure du sol, sa porosité, ses capacités de drainage et sa fertilité[105].

Au moins 20 % de la minéralisation totale de la matière organique serait due aux vers de terre. Ils agissent aussi sur la teneur en cailloux de la surface du sol car le sous-sol ramené en surface par les lombrics sous forme de turricules recouvre rapidement les cailloux.

Outre les effets sur le sol, la plupart des études citées [16] indiquent des augmentations de rendement sous prairie de 10 à 30 % par rapport au niveau de production avant introduction de lombriciens. Les lombriciens jouent donc un rôle déterminant dans l'amélioration du sol reconstitué. De plus, ils peuvent participer à l'ingestion de matière organique fraîche ou compostée, contribuant à sa minéralisation.

---

104 Sous prairie, un réseau de galeries de lombricien fait 500 m linéaires par m^3 de sol et contient 4 à 6 litres d'air ; une tonne de lombriciens ingère 250 tonnes de terre par an.
105 Les parois de galeries de ver de terre contiennent 125 fois plus de microorganismes fixateurs aérobies que le reste du sol.

Ils sont naturellement présents dans l'horizon organo-minéral correctement décapé, stocké et remis en place et ne nécessitent pas d'introduction particulière. Cependant, en l'absence d'horizon organo-minéral ou en présence de terre médiocre ayant perdu ses qualités biologiques, l'introduction de lombriciens est positive. Elle permet de raccourcir le délai de colonisation des vers de terre et de rétablir une diversité des espèces et un équilibre des communautés. La mise en place d'un couvert végétal avant et en interbande pendant la plantation est complémentaire à l'introduction de vers de terre, le chevelu racinaire leur étant favorable. Sans inoculation, les espèces anéciques qui sont les plus efficaces dans les processus de transformation des sols, n'apparaissent que 10 à 50 ans après une reconstitution de sol. C'est essentiellement les peuplements de vers anéciques et endogés qui sont à prendre en compte pour établir un diagnostic des capacités des sols, et éventuellement à introduire si ces peuplements sont absents ou insuffisants. Cependant, en France, il n'y a pas de pratiques établies d'élevage et d'introduction de lombriciens, d'éventuelles introductions ne peuvent se faire que de manière artisanale en allant prélever du sol avec ses lombrics dans des zones proches du site à ensemencer.

Des essais en Angleterre ont montré qu'une faible augmentation de population par introduction de lombrics dans un site nouvellement restauré avait de gros effets à long terme sur la population et sur la structuration du sol.

Des essais d'introduction de lombriciens ont été effectués à Passy[106]. Il en résulte que les lombriciens, en ingérant une fraction organo-minérale et en rejetant des turricules, enrichissent le sol en matière organique et en azote, tout en abaissant le rapport C/N. Ainsi, il y a augmentation de la stabilité structurale tout en ramenant le pH vers la neutralité. Il y a également augmentation de la disponibilité des éléments chimiques du complexe argilo-humique (CEC), en particulier du potassium.

Aucun des sites visités lors de la phase de terrain ne pratique d'apport de lombriciens.

Pistes de recherche

Réfléchir aux conditions de mise en place de structure d'élevage de vers anéciques : approfondir les connaissances sur les conditions d'élevage, tester les stades optimaux pour ensemencer (cocon, stade larvaire, stade juvénile, stade adulte).

Sur des sols compactés expérimentalement et semés en prairie, tester les différentes densités d'ensemencement de lombriciens anéciques et suivre sur 3 ans, les modifications du sol induites par l'activité des vers de terre. Cette expérimentation permettrait de déterminer l'ensemencement optimum.

Suivre sur des stocks de terre, l'évolution des populations lombriciennes au cours du stockage et leur devenir une fois le sol épandu.

106 Exemple de réaménagement agricole.

II - LES AUTRES AMENDEMENTS

1 - LES BOUES DE PAPETERIE

Les boues de papeterie ont été testées pour l'utilisation en amélioration de sols agricoles ou forestiers, en France et au Canada. Il s'agit en effet d'un apport de matière organique mais aussi d'un matériau qui peut améliorer la rétention de l'eau dans le sol et qui peut remonter le pH [42].

Les produits dénommés boues de papeterie peuvent être extrêmement variables en fonction du type de production, des processus de production, de la nature même de l'effluent qui est utilisé :
- résidus primaires : composés de fibres de bois trop courtes rejetées lors de la fabrication initiale du papier ;
- résidus secondaires : issus du traitement des eaux ;
- boues de désencrage qui contiennent des fibres de bois, des argiles et de l'encre.

Chaque production est donc un cas particulier dont il convient de connaître parfaitement la composition avant d'envisager son utilisation en tant qu'amendement de sol forestier :
- teneur et nature de la matière organique ;
- rapport C/N qui va conditionner la quantité d'azote à fournir pour permettre sa minéralisation ;
- teneurs en éléments fertilisants et disponibilité de ces éléments (ainsi P_2O_5 est généralement peu mobile dans ce type de substrat [42]) ;
- teneur en éléments traces.

Les doses recommandées [24] en amendement ne doivent pas dépasser 100 t/ha et être accompagnées d'une fertilisation azotée limitant la faim d'azote provoquée par l'apport d'un matériau à C/N élevé. Cet apport azoté risquant d'induire un développement accru de la végétation herbacée, un contrôle plus fréquent de celle-ci doit être fait. Tous ces inconvénients réduisent l'intérêt d'un apport de boues de papeterie même en tant qu'amendement.

Des essais [42] en bacs de culture ont été mis en place en 1996 pour tester les possibilités d'utilisation de boues de papeterie en révégétalisation. L'analyse du produit montre que c'est un produit non toxique, fortement organique. Il permet de relever le pH du sol. Cependant, son rapport C/N très élevé (entre 70 et 250) a un effet dépressif[107] très fort sur l'azote. Un apport d'azote minéral très important[108] s'avère nécessaire.

---

107 Les microorganismes du sol doivent en effet dans ces conditions prélever de l'azote disponible dans la solution du sol pour «digérer» le carbone des boues ; l'azote manque alors pour les espèces mises en place.

108 Deux unités d'azote par tonne de boues brutes à C/N d'environ 100 sont nécessaires pour éviter un effet dépressif fort sur la végétation.

Pour une reconstitution de sol, les quantités de boues de papeterie prévues (1500 t/ha) conduisent à préconiser des apports d'engrais azotés irréalistes[109] tant par le coût que par les risques très importants de pollution azotée. Ce produit ne paraît donc pas intéressant en reconstitution de sol à fortes doses.

Sous réserve que l'analyse précise du produit (C/N et éléments traces en particulier) ne mette pas en évidence de risques de pollution, une utilisation en tant qu'amendement est possible à une dose inférieure à 100 t/ha et avec une fertilisation azotée et un contrôle de la végétation herbacée (ce qui limite fortement l'intérêt économique de ces produits).

2 - LES BOUES DE SUCRERIE

Nous n'avons pas trouvé d'exemple d'utilisation de ces produits en tant qu'amendements des sols. Quand ils sont utilisés, c'est pour remblayer une excavation et ils constituent l'horizon minéral du sol.

III - LES PRATIQUES CULTURALES

Toutes les actions d'amélioration du sol par l'apport d'éléments fertilisants ou d'amendements pour relever le pH ne seront efficaces que si les propriétés physiques du sol sont bonnes. Elles ne peuvent en aucun cas remédier à un sol compacté, pas assez profond ou subissant des stagnations d'eau. Un sol profond formé de bons matériaux et mis en place avec soin retrouve sa pleine fertilité après peu d'années (5 à 8 ans) [5]. Si la nature des matériaux constituant l'horizon minéral risque d'induire un manque de fertilité du sol, une analyse de sol permet d'envisager les corrections qui pourront être apportées.

1 - RELEVER LE PH

Le pH des sols peut être relevé avec des amendements calciques ou des cendres de charbon [46]. En Espagne [66], le chaulage est recommandé pour relever le niveau du pH : chaux vive (CaO), carbonate de calcium ($CaCO_3$), dolomite (carbonate calcimagnésique).

Nous avons vu qu'il est parfois possible d'utiliser les boues minérales (boues de papeterie [24]) pour relever le pH à la dose de moins de 100 t/ha avec une fertilisation azotée correctrice de la faim d'azote.

Des apports de chaux sont parfois recommandés en Grande-Bretagne pour leur action favorable sur la structure du sol. Les teneurs sont calculées sur la base d'une analyse de sol. Cependant, si l'apport de calcium sur des sols à pH très bas (4,5) semble améliorer la croissance des arbres [24], peu de références existent en sylviculture classique et encore moins sur sols reconstitués.

---

109 Les calculs faits dans cette étude indiquent qu'un apport de 9 tonnes d'ammonitrate 33,5 serait nécessaire pour compenser un apport.

2 - UTILISATION D'UNE FERTILISATION DE FOND

La fertilisation d'un sol forestier profitera aux plants mais, en contrepartie, sera la source d'une concurrence herbacée accrue qui utilisera, elle aussi, ces éléments nutritifs disponibles. Fertiliser doit donc être suivi d'un contrôle accru de la végétation herbacée.

Le phosphore et le potassium peuvent manquer dans les sols forestiers, un apport précoce et limité peut être bénéfique [92]. Généralement un apport azoté est inutile voire même nuisible [24], en effet, il a une action négative sur la croissance des racines (ralentissement de la croissance ou brûlure des radicelles et donc diminution du taux de reprise). Ainsi en sylviculture classique, on considère qu'une fertilisation de fond est nécessaire si le sol a des teneurs inférieures aux seuils suivants :
- 0,15 % d'azote ;
- 0,01 à 0,015 % de P_2O_5 ;
- 0,015 % de K_2O ;
- 0,005 % de MgO.

Dans ce cas, une fertilisation avec des engrais peu solubles (phosphate naturel, scories, sulfate de potasse...) est pratiquée aux doses suivantes par hectare :
- 50 à 100 unités fertilisantes de P_2O_5 , soit 150 à 300 kg de phosphate naturel ;
- 30 unités fertilisantes de K_2O, soit 60 kg de sulfate de potasse.

Si de l'azote est nécessaire, son apport doit être retardé de 1 à 2 ans après la plantation afin de diminuer ses effets secondaires (brûlure des radicelles, risque de déformation du plant).

La plupart des études [24, 92] recommandent un suivi du peuplement afin de détecter à l'aspect du feuillage d'éventuels déséquilibres nutritifs (apparition de jaunissement par exemple) ou de réaliser un diagnostic foliaire afin de prévoir éventuellement une fertilisation quand le peuplement est bien installé.

L'amélioration du sol forestier reconstitué passe beaucoup plus par une réactivation des mécanismes internes de l'écosystème forestier afin de lui assurer un fonctionnement autonome, que par des apports correctifs d'éléments nutritifs.

Ainsi, plusieurs voies paraissent intéressantes à explorer :
- l'utilisation d'engrais verts à base de légumineuses fixatrices d'azote ;
- l'utilisation de déchets du défrichement pour restituer au sol ses éléments fertilisants sous forme de bois raméal fragmenté capable d'initier un retour d'une faune et flore du sol actives ;
- l'ensemencement du sol par des lombriciens.

Dans la majorité des cas, les amendements organiques et la fertilisation ne sont pas justifiés. Ils devront être raisonnés au cas par cas en fonction soit de l'analyse du sol, soit de l'analyse des feuilles du peuplement installé depuis quelques années.

CHAPITRE 7

TECHNIQUES DE PLANTATION ET CHOIX DES ESPECES

I - LE CHOIX DU MATERIEL VEGETAL

Nous avons décrit de manière générale dans le chapitre 3, les grands principes de choix des espèces. Dans la pratique observée lors des visites sur le terrain, beaucoup de réaménagement ont été faits en faisant appel à un expert forestier au moins dans la partie conseil des essences à planter [TPG 14, F1 m, F3 m, F14 Mo]. Les experts forestiers consultés peuvent être un responsable forêt au niveau de la DDA[110] ou du SERFOB[111], appartenir à l'ONF[112] ou être des experts indépendants. Les CRPF[113] et les entrepreneurs spécialisés dans le reboisement[114] peuvent également être des partenaires dans les projets de reboisement. Quand les parcelles n'appartiennent pas au carrier, la gestion forestière après restitution est fréquemment faite par l'ONF [F6 m].

1 - SÉLECTION DES ESSENCES ADAPTÉES

En fonction des conditions climatiques locales, des conditions microclimatiques liées à la topographie et à l'environnement de la parcelle, des caractéristiques du sol reconstitué (et en particulier sa profondeur, ses capacités de drainage et sa teneur en calcaire), de l'environnement de la parcelle et des risques d'hydromorphie, une liste d'espèces adaptées peut être définie avec un expert forestier connaissant bien le contexte régional. Les grandes indications fournies par les régions climatiques sylvicoles (figure 10) ou les informations climatiques plus locales des catalogues de stations forestières[115] ne peuvent en effet pas se substituer à une connaissance fine des potentialités de la région.

Les tableaux de synthèse d'essences utilisables (figure 12) permettent d'effectuer un premier tri entre les espèces qui seront potentiellement utilisables et celles qui sont franchement à déconseiller. Une réflexion au cas par cas est à mener en précisant les objectifs fixés au reboisement : production ligneuse, boisement à rôle écologique ou paysager... et en connaissant l'écologie des espèces (et des provenances des semences).

Le Guide du forestier méditerranéen [27] précise les exigences de trente espèces adaptées au milieu méditerranéen (liste en annexe 6). Les directives pour le reboisement des gravières désaffectées (Suisse, [5]) indiquent les caractéristiques écologiques de 23 espèces (annexe 6). Dans la région centre, un guide revégétalisation des carrières [125] avait fourni à la demande de l'UNICEM des listes d'arbres ou arbustes (annexe 6) adaptés à différents contextes géomorphologiques (calcaires durs, calcaires tendres, alluvions, sables, roches métamorphiques, argiles à silex).

---

110 DDA : direction départementale de l'agriculture.
111 SERFOB : service régional de la forêt et du bois
112 ONF : office national des forêts.
113 CRPF : centre régional de la propriété forestière, qui fédère les propriétaires privés.
114 L'UNEP (union nationale des entrepreneurs du paysage) présente dans son annuaire une centaine d'entreprises spécialisées dans le reboisement
115 Les catalogues de stations forestières n'existent pas pour tous les secteurs et sont pour l'instant non répertoriés de manière exhaustive.

De manière locale, certaines études spécifiques existent pour certaines régions avec des degrés de finesse plus importants. Ainsi une étude [73] menée sur les talus de la ligne TGV Atlantique (entre Paris et Vendôme) distingue 4 régions géoclimatiques entre lesquelles les taux de survie des espèces peuvent être très variables. Par exemple, le tilleul à petites feuilles présente des taux de survie au bout de 7 ans, variant de 96 % à 52 %. L'exposition, la position du talus en déblai ou en remblai influent également de manière variable sur les taux de survie des différentes espèces.

Les différents résultats de cette étude mettent bien en évidence la complexité du choix des espèces. De plus, nous avons mentionné dans les chapitres 1 et 3, l'importance de la zone de provenance de l'essence, des conditions de culture en pépinière ainsi que de toutes les étapes entre la sortie de la pépinière et la plantation, dans le succès ou non d'un reboisement.

La plupart des réaménagements forestiers ont un objectif écologique ou paysager et les espèces choisies sont généralement des espèces locales privilégiées pour leur rusticité, leur bonne adaptation au milieu et le respect du paysage. Il s'agit en particulier [F3 m, F4 M, F13 m, F15 m] d'érables sycomore et champêtre, de bouleau verruqueux, de chêne sessile, de pin sylvestre, d'aulne, de frêne, de hêtre, de noyer, de cornouillier sanguin, de cytise aubour, de noisetier, de prunier de Ste Lucie, de sorbiers, d'alisier et de peuplier. L'aulne cordé, le pin sylvestre, le pin laricio, le robinier ont montré les meilleurs résultats.

Dans les premiers réaménagements, les plantations étaient souvent monospécifiques sur 2 à 3 hectares (pins laricio [F1 m, F3 m]). Actuellement l'administration demande des plantations feuillues plurispécifiques par petits bosquets.

Si les synthèses existantes permettent d'orienter le choix des essences à installer, le diagnostic et le conseil d'un expert forestier sont très appréciables pour proposer le meilleur peuplement en fonction des caractéristiques de chaque site.

2 - CHOIX DU TYPE DE PLANT

Le choix du type de plant (à racines nues ou en conteneur) sera à relier avec la densité de plantation, l'origine des plants, la fréquentation de la parcelle par le gibier, l'entretien à mettre en place pendant les 20 ans suivant la plantation, la concurrence herbacée...

Le facteur économique est bien souvent le premier point évoqué pour justifier le choix des plants à racines nues, cependant seul le coût total de la plantation devrait servir de base de raisonnement. Or ce coût n'inclut que pour une faible part l'investissement au moment de la plantation (achat des plants et mise en place). La part principale du coût d'un reboisement concerne l'entretien dans les années qui suivent la plantation : lutte contre la concurrence herbacée, coût du regarnissage en cas de mortalité trop forte, élagage, taille d'entretien, éclaircie du peuplement.

Les plants à racines nues ont un prix d'achat et de plantation moindre, cependant, ils doivent être plantés à forte densité. Ils peuvent être plus facilement triés afin d'éliminer les sujets à enracinement inacceptable. Ils sont très fragiles pendant le transport et dans l'attente de la

plantation. Ils subissent une crise de transplantation et sont fortement concurrencés par le développement de la végétation herbacée. Une plantation de plants à racines nues nécessite souvent un regarnissage et des éclaircies sont nécessaires afin de sélectionner les meilleures tiges et d'atteindre la densité d'arbres optimale en phase de croissance du peuplement.

Les plants en conteneur sont plus chers à l'achat et à la plantation mais ils sont moins fragiles. Leur reprise est souvent garantie par le pépiniériste. Leur croissance est meilleure la première année car ils ne subissent pas la crise de transplantation.

Les plants mycorhizés semblent très intéressants sur des substrats pauvres (reconstitution du sol à partir de stériles uniquement) et en conditions climatiques difficiles.

Piste de recherche :

Il convient de continuer à développer les expérimentations utilisant des plants mycorhizés sur différentes natures de sol (sol fertile et sol pauvre) afin de mieux définir l'intérêt de leur utilisation comparée à des plants à racines nues ou à des plants en conteneur.

Dans tous les cas, comme nous l'avons développé dans le chapitre 3, le contrat le plus précoce possible et le plus précis possible avec un pépiniériste est un moyen important de s'assurer de la bonne qualité des plants qui seront livrés. Contrôler scrupuleusement la qualité des plants livrés est néanmoins indispensable.

II - LES TECHNIQUES DE PLANTATION

La plantation est selon les cas réalisée par le carrier, par le pépiniériste ou par une entreprise spécialisée dans le reboisement.

Nous avons vu que le semis était très marginal comme mode de reboisement, les plantations sont le principal mode de reboisement.

1 - EPOQUE DE PLANTATION

Le choix de l'époque de plantation doit être commandé par la recherche de conditions optimales de survie et de reprise, surtout pour les plants à racines nues [24]. Ces conditions optimales doivent permettre au plant de rétablir le plus rapidement possible l'équilibre entre les pertes par évapotranspiration et l'alimentation en eau. Pour cela il faut :
- des conditions climatiques peu desséchantes (température de l'air basse, faible déficit hygrométrique, peu de vent) ;
- des disponibilités en eau dans le sol ;
- un système racinaire des plants apte à utiliser l'eau disponible dans le sol.

En ce qui concerne le dernier point, un plant à racines nues ne sera pas en mesure dès sa plantation de s'alimenter suffisamment. Il faudra pour cela que les racines qui disposent encore d'une zone de croissance (c'est-à-dire celles qui n'ont pas été sectionnées lors de

l'arrachage ou de l'habillage du plant avant plantation) aient eu le temps de s'allonger et que de nouvelles racines soient apparues pour compenser celles qui ne peuvent plus grandir. La croissance racinaire et la faculté de régénération racinaire dépendent du plant lui-même[116] mais aussi des facteurs du milieu. Il s'agit en particulier de la température, de la teneur en eau et de l'oxygénation du sol. Ainsi une température du sol après la plantation inférieure à 3 à 4 °C (minimum nécessaire pour la croissance des racines) ou une hydromorphie créant de mauvaises conditions d'oxygénation ne vont pas permettre une bonne reprise du système racinaire.

Deux grandes périodes sont généralement retenues pour les chantiers de plantation : les plantations d'automne et les plantations de printemps.

* *LES PLANTATIONS D'AUTOMNE :*
Elles peuvent débuter quand :
- les plants sont aoûtés[117] ;
- la température moyenne de l'air est descendue autour de 10 °C ;
- les réserves hydriques du sol ont recommencé à se reconstituer après la sécheresse de l'été ;
- les risques de retour de période chaudes et desséchantes sont faibles.

Plus le délai qui s'écoule entre la plantation et l'arrivée de conditions bloquant le développement des racines est long, meilleures seront les chances des plants pour résister aux rigueurs de l'hiver.

Cependant, si les pluies deviennent brutalement excédentaires, les conditions seront vite défavorables sur sols peu perméables.

* *LES PLANTATIONS DE PRINTEMPS :*
Elles peuvent débuter quand le réchauffement du sol (vers 4 à 5 °C) permet la croissance racinaire et que le retour de grands froids n'est plus à craindre.

Plus le délai qui s'écoule entre la plantation et l'arrivée de conditions chaudes ou desséchantes est long, meilleures seront les chances des plants pour résister à la sécheresse estivale.

Dans tous les cas, il ne faut pas planter les jours de gel ou de neige ni par vent froid et sec ou desséchant.

Le choix de la période de plantation doit tenir compte en plus, de facteurs autres que l'adéquation de la physiologie des plants aux conditions climatiques, et en particulier,

---

116 Il peut s'agir en particulier de phénomènes de dormance ou de rythme de développement saisonnier des racines qui sont mal connus. Pour le Douglas on sait que le potentiel de régénération des racines est maximum à la fin de l'hiver et au début du printemps, ce qui explique les bons taux de reprise des plantations de Douglas au printemps [24].
117 Plant aoûté : plant dont les rameaux de l'année sont lignifiés et durcis à la fin de leur phase de croissance (en fin d'été en général).

les contraintes matérielles d'exécution des plantations et d'organisation des chantiers (impossibilité d'accès et de circulation des engins nécessaires aux plantations sur des sols trop mouillés).

Selon les régions, les époques de plantation seront différentes selon les conditions climatiques prévisibles dans les mois qui suivent la plantation. C'est donc en analysant la répartition des pluies, des périodes de sécheresse et des températures du sol au cours de l'année que la période optimale sera choisie. Dans les régions océaniques de basse altitude, les plantations de printemps sont à privilégier car il y a souvent en automne une période de forte pluviométrie qui risque d'engorger le sol et d'asphyxier les sols. Dans les régions à climat continental marqué ou dans les zones montagneuses, il faut plutôt privilégier les plantations d'automne car au printemps les risques de gels tardifs sont trop importants.

Ainsi, en Normandie [F1 m], les plantations sont faites en mars-avril afin de profiter des pluies importantes du mois de juin. Les pluies de juin permettent en effet le démarrage des plants en juin-juillet et même si l'été est plus sec, les plants repartent en septembre. En région lyonnaise [F10 m], la période idéale est septembre car les plants peuvent bénéficier de l'humidité automnale et profitent d'une légère croissance hivernale.

Parfois la période d'automne est privilégiée car elle permet, en absence de conditions climatiques favorables, de reporter les plantations au printemps sans trop de difficultés (ce qui n'est pas possible si la plantation est prévue au printemps, car les plants seraient, à l'automne suivant, trop âgés).

Pour les plants en conteneur, la période de plantation est plus large car les racines ne sont pas soumises au stress de la plantation (pas de section de racines) et elles sont donc moins soumises aux conditions climatiques. Seul le gel et l'engorgement du sol sont des conditions à proscrire totalement. Ainsi, en région méditerranéenne, une plantation en hiver est souvent favorable car elle permet au plant de profiter des pluies hivernales et de bénéficier d'une plus grande période de croissance avant la sécheresse estivale. Dans le reste de la France, seuls les mois de juillet et août sont à éviter totalement. Les plantations d'automne de plants en conteneur sont souvent privilégiées car même si la partie aérienne de la plante est en repos végétatif, le potentiel de développement racinaire est encore important.

2 - DENSITÉ ET DISPOSITION DES PLANTATIONS

a) FAIBLE OU FORTE DENSITÉ

Le choix de la densité de plantation est un problème complexe qui dépend de nombreux facteurs et en particulier qui dépend de l'objectif du reboisement. Un projet de réaménagement forestier à but écologique ou paysager n'aura pas les mêmes contraintes et bilan économique qu'un réaménagement à vocation de production[118].

118 Et au sein des reboisements de production, il convient de distinguer si l'on attend une production de masse ou de qualité.

La densité influe en effet sur le coût du reboisement, sur le coût des entretiens ultérieurs (élagage, éclaircie...), sur le volume de bois qui sera produit mais aussi sur la qualité des produits.

La densité de plantation n'a guère d'influence sur la croissance en hauteur des arbres, par contre, elle a une influence très nette sur le diamètre moyen des tiges, le volume total de bois produit et sur la qualité du bois. Une forte densité (plus de 4000 plants par ha) produit un plus fort volume total de bois, mais des tiges de faible diamètre cependant bien cylindriques avec des nœuds peu importants. En outre, si la variabilité génétique des plants est forte, planter à forte densité et éclaircir ensuite permet de sélectionner les plus beaux arbres. Cependant, la sensibilité aux dégâts de neige ou de tempête des peuplements à forte densité est plus forte.

Le choix de la densité est à raisonner en fonction :
- de la qualité génétique des plants ;
- des moyens disponibles pour réaliser par la suite les entretiens ;
- de la présence plus ou moins importante du gibier ;
- du marché potentiel des bois d'éclaircie et du type de production (masse ou qualité) et d'âge d'exploitation souhaité.

Quelle que soit la densité choisie, un reboisement de production doit assurer, à terme, une production minimum par hectare d'arbres de qualité [38] :
- 50 à 150 arbres/ha pour les feuillus ;
- 160 à 200 arbres/ha pour les peupliers ;
- 200 à 400 arbres/ha pour les résineux.

Pour des peuplements de production, les fortes densités (à partir de 2500 arbres/ha[119]) s'imposent [38] quand la qualité génétique des plants n'est pas garantie, sur sol nu sans végétation d'accompagnement, avec des essences à tendance buissonnante (chêne, hêtre...). Elles sont souhaitables ou possibles avec des plants bon marché peu susceptibles d'être attaqués par le gibier, si les produits d'éclaircie se vendent facilement. Elles seront réalisées avec des plants à racines nues plantés en fente.

Les faibles densités (moins de 1200 arbres/ha[120] et souvent aux alentours de 600 arbres/ha) sont souhaitables quand les produits d'éclaircie n'ont pas de débouché. Elles sont envisageables avec des plants de bonne qualité génétique, si l'emploi de protections individuelles contre les grands animaux est nécessaire, si on n'envisage pas de réaliser des éclaircies. Elles seront donc réalisées avec des plants dont la chance de reprise est importante (plant en conteneur) par une plantation en potet très soigneuse et un manchon de protection contre les cerfs ou chevreuils et une lutte efficace contre la concurrence herbacée au pied du plant.

Pour les peupliers ou les noyers, la densité de plantation est la densité finale attendue soit entre 150 à 200 plants/ha. Pour des chênes ou des hêtres en absence de peuplement d'accompagnement, des densités très fortes de 2500 à 7000 plants/ha peuvent être pratiqués.

---

119 Ce qui correspond à peu près à un espacement des arbres de 2 m x 2 m [27].
120 Ce qui correspond à peu près à des espacements de 3 m x 3 m [27].

L'annexe 7 [125] présente les fourchettes de densité habituellement pratiquées en France pour une trentaine d'espèces. En Grande-Bretagne [92] les recommandations proposent des densités de 2500 plants/ha. En Suisse [5], les intervalles entre arbres recommandés sont de 1,5 m entre lignes et environ 1 m[121] sur la ligne afin de ne pas avoir des arbres trop espacés (qui pourraient devenir difformes) et de limiter le nombre de regarnissage nécessaire.

b) LA DISPOSITION DES PLANTS

Aux plantations de production monospécifiques et alignées des premiers réaménagements [F1 m, F3 m], se substituent actuellement, des plantations plurispécifiques en petits bosquets de 0,25 ha suivant des lignes courbes [F4 M].

Souvent [F3 m, F15 m], une enveloppe d'arbres à croissance rapide (peuplier, robinier) est installée en bordure afin de protéger les autres plants à croissance plus lente (rôle de brise-vent, d'ombrage et de protection contre la poussière). La densité des arbres en bordure peut également être supérieure à celle du reste de la parcelle dans les zones soumises à des vents forts.

En cas de boisement à but de production, il est nécessaire de ménager les voies de circulation d'engins (espace de 3 à 3,5 m entre les lignes) pour faciliter l'entretien de la plantation (désherbage, élagage, éclaircie...). Dans ce cas, les lignes de plantation doivent être orientées de manière à assurer une sortie facile sur une voie de desserte. Afin d'améliorer la stabilité du peuplement face à des vents importants, les lignes de plantation doivent être perpendiculaires aux vents les plus forts. Pour les sols en pente ou en billon, les lignes doivent être dans le sens de la pente. L'espacement des plants entre deux lignes et entre deux plants de la même ligne, doit être relativement équilibré afin de ne pas engendrer un déséquilibre des cimes et des systèmes racinaires et donc un retard dans la fermeture du couvert. Il est généralement conseillé de respecter un écart minimum entre plants sur la ligne égal à l'écartement entre lignes divisé par 1,6[122].

Pour les densités faibles (1000 plants /ha), il est possible d'installer une essence de taillis entre les arbres de tige (par exemple de l'aulne glutineux installé en sous-étage de frêne) [125].

Le plan de reboisement de peuplements mélangés de feuillus doit à la fois être défini en terme de pourcentage des différentes essences, mais aussi préciser leur répartition spatiale [5] :
- par pieds isolés ;
- par touffes d'une cinquantaine d'arbres[123], (surface inférieure à 0,05 ha) ;
- par groupes d'une centaine d'arbres (surface entre 0,05 et 0,1 ha) ;
- par bosquets de cent à cinq cents arbres (surface entre 0,1 et 0,5 ha).

Le plan de reboisement doit également prévoir le peuplement final désiré, les périodes de coupe des espèces d'abris et les éventuelles introductions ultérieures d'espèces[124]. Dans les

121 Ce qui correspond à peu près à une densité de 2500 arbres/ha.
122 Ainsi, si l'écart entre lignes est de 3 m, l'écart des plants sur la ligne ne devra pas dépasser 1,9 m.
123 En considérant une densité de 1000 arbres/ha.

peuplements mélangés, il est nécessaire de tenir compte des caractéristiques de croissance et de compétition des diverses essences.

Les recommandations suisses [5] prévoient de constituer une véritable lisière s'étendant sur environ 30 m autour du peuplement de rapport et comprenant les phases d'une lisière naturelle (figure 50) :
- ourlet de buissons (largeur 5 m) ;
- enveloppe d'arbres et arbustes de taille moyenne (largeur 5 m) ;
- manteau d'arbres de grande taille et d'arbustes (largeur 18 m).

Cette recommandation mérite d'être suivie en France afin de constituer des boisements qui s'intégrent mieux dans le paysage par une transition plus douce entre un espace non boisé et la forêt.

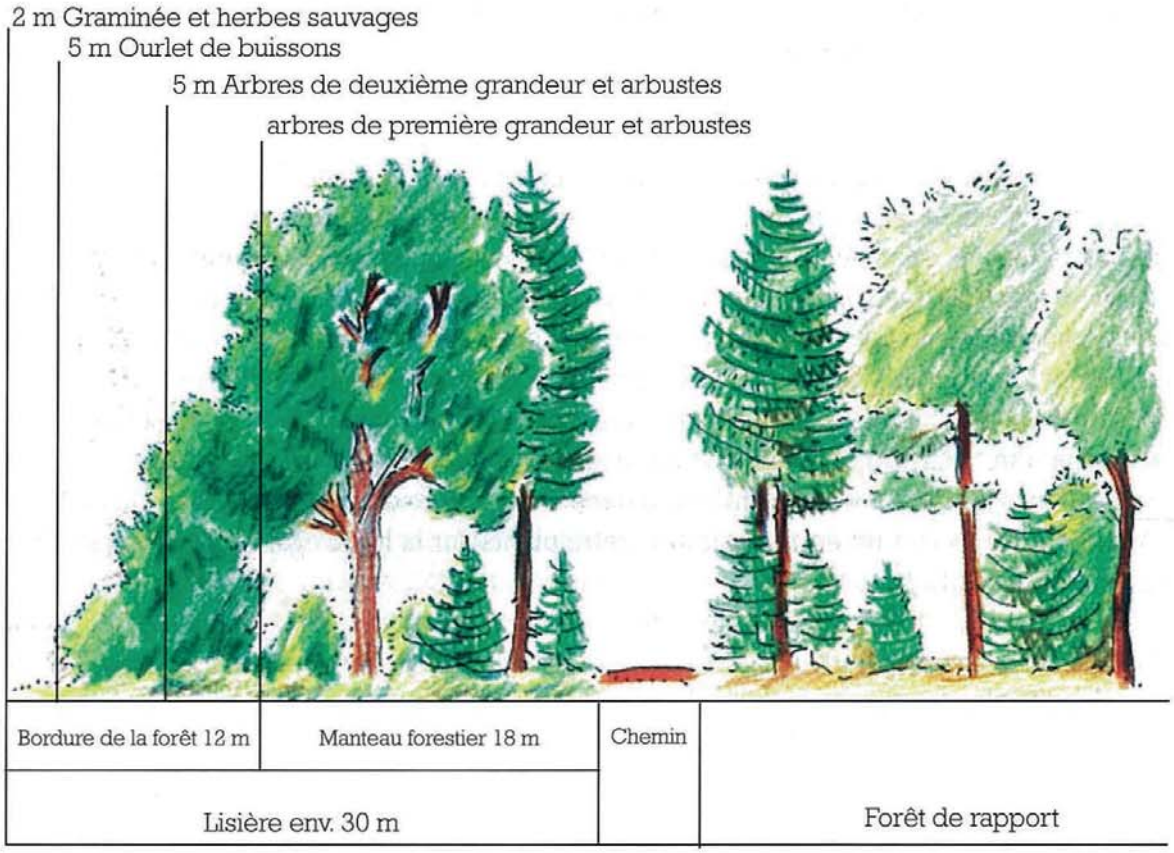


Figure 50 : Constitution d'une lisière en bordure de peuplement de rapport[125] (d'après [5]).

Des zones ouvertes peuvent être créées au centre d'un peuplement afin de favoriser une recolonisation naturelle et une augmentation de la biodiversité.

---

124 Ainsi, il est préférable d'introduire du charme dans un peuplement de chêne quand les chênes ont 2 à 3 m de haut.
125 Un peuplement de rapport est un peuplement que l'on exploitera, il a une vocation sylvicole.

3 - MODE OPÉRATOIRE

Le mode de plantation adopté doit s'efforcer de respecter au mieux le système racinaire des plants et de conserver intacte l'organisation spatiale des racines principales. Pour cela, il faut assurer un contact étroit entre les racines et le sol minéral qui les entoure et éviter les déformations racinaires graves. En effet, si des poches d'air sont au contact des racines, celles-ci ne se développeront pas et les chances de survie du plant seront fortement diminuées [24].

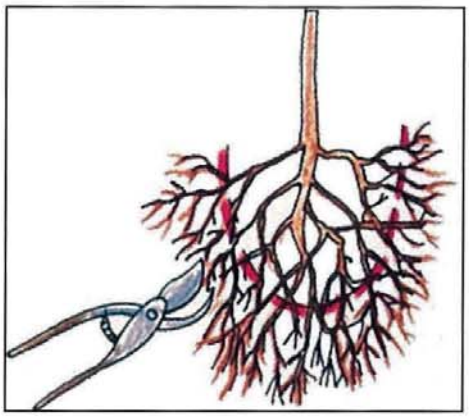
La plantation ne doit être faite ni en période de gel ni sur sol trop humide. Elle doit être effectuée sur un sol bien préparé mais en respectant un délai entre le travail du sol et la plantation afin que le sol ait eu le temps de se tasser.

La mise en place des plants dépend principalement de leur type : à racines nues ou en conteneur et aussi de la surface à boiser (intervention ou non d'une planteuse mécanique). Dans tous les cas, le collet doit être enterré. En région humide et en sol mouilleux, il est préférable de planter en modelant une bosse au niveau du plant. En région sèche et sur sol meuble, une cuvette peut être formée au niveau du plant afin de mieux capter les pluies.

a) PLANTATION DES PLANTS À RACINES NUES

Il convient de rappeler (chapitre 3) que les plants après un contrôle rigoureux à la réception, auront été placés en jauge dans l'attente de la plantation afin d'éviter le dessèchement de racines. La durée en jauge ne doit pas dépasser 15 jours[126].

Avant la mise en terre, on procède si besoin, à l'habillage des plants au système racinaire trop long (plus de 0,25 m) ou blessé (figure 51) :
- on coupe proprement au sécateur, les parties blessées des grosses racines et on supprime (on rafraîchit) une partie du chevelu racinaire. Il est indispensable de conserver un pivot le plus long possible pour les espèces à enracinement pivotant ;
- on rétablit l'équilibre racine-tige en réduisant le volume des parties aériennes des grands plants dont une partie des racines a été amputée à l'arrachage.



<< Habiller >> les plants,
cest-à-dire tailler les racines avec un bon sécateur faisant des coupes bien nettes.
C'est sur ces coupes que se développent les nouvelles racines.

Figure 51 : Habillage d'un plant à racines nues.

126 Au-delà, il y a risque de reprise de la croissance des racines dans la jauge et donc d'un nouveau choc de transplantation.

Il est à noter cependant, qu'un travail de qualité en pépinière devrait avoir fourni un système racinaire de bonne qualité et qu'un arrachage soigneux des plants ne devrait pas avoir altéré la qualité. L'habillage systématique de tout un lot de plant ne devrait pas arriver car cela signifierait qu'une erreur a été faite dans le choix des plants ou dans celui d'une technique de plantation non adaptée [24]. Il traduirait par exemple, la commande de plants non soulevés ou non repiqués (donc à pivot de plus de 0,30 m) alors que le mode de plantation exigeait un système racinaire compact.

Nous avons déjà souligné le danger (tant pour le taux de reprise que pour la croissance ultérieure des plants) d'une exposition à l'air libre des racines, protéger les plants du dessèchement exige dont une préparation soigneuse du chantier de plantation (qui mérite d'être précisée de manière contractuelle quand une entreprise intervient pour effectuer les plantations). Les manipulations de plants doivent ainsi être effectuées au dernier moment et par petit nombre de plants[127].

* *LA PLANTATION AU COUP DE PIOCHE OU EN FENTE (figure 52) :*
C'est la plus fréquente pour les plants à racines nues. Elle est très rapide[128] mais souvent au détriment de la qualité. Elle n'est vraiment adaptée qu'aux plants à système racinaire peu développé et linéaire, elle ne convient donc qu'aux plants d'essences très robustes plantés à forte densité sur un sol meuble [38].

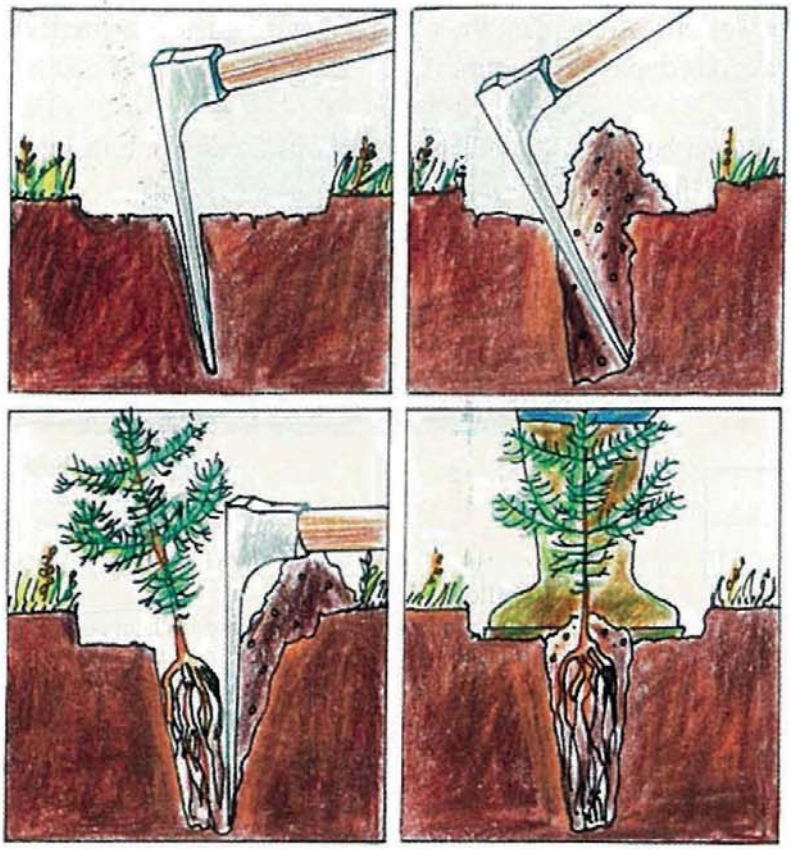


Figure 52 : Plantation au coup de pioche ou en fente [38].

127 Ainsi pour une plantation manuelle, un planteur ne doit pas emmener plus de 10 plants, dans le cas des plantations mécaniques, un dispositif de protection des plants doit exister sur la machine.
128 1000 plants par jour et par planteur [24].

Ses inconvénients sont nombreux et annulent souvent les économies faites à la plantation. En particulier la mauvaise position des racines (toujours positionnées dans un seul plan et parfois enroulées autour du doigt du planteur pour pouvoir rentrer dans la fente) induisent des risques importants de malformations racinaires (en chignon ou mal réparties dans le sol) et diminuent les chances de reprise des plants et la vitesse de croissance. En outre, la plantation en fente peut induire un habillage sévère des racines, de manière à les faire entrer plus facilement dans la fente ce qui nuit gravement à la survie du plant.

Elle peut être améliorée en ameublissant au préalable le trou par deux ou trois coups de pioche. Le sol doit être tassé au pied après plantation, des galets peuvent être placés au pied [F14 Mo].

* *LA PLANTATION EN POTET (figure 53) :*
Elle se pratique en ouvrant dans le sol un trou cubique suffisant pour étaler les racines (0,30 m x 0,30 m x 0,30 m ou plus si besoin). Elle permet de mieux respecter les besoins du plant en terme d'étalement et de positionnement dans l'espace des racines mais elle est beaucoup plus lente[129].

Quand un travail préalable du sol l'a ameubli, l'ouverture du potet se fait à la bêche.

En l'absence de travail du sol, des tarières portatives ou montées sur tracteur peuvent être utilisées. Elles ont l'inconvénient de tasser la terre contre les parois du potet et donc de créer une barrière de sol compacté qui empêche la pénétration des racines en dehors du potet. De plus, ce tassement de la terre conduit à un manque de terre pour remplir le potet après installation du plant. Pour que la plantation soit optimale, il faudrait remplir le potet en plusieurs étapes en tassant la terre entre chaque couche de terre afin d'assurer un bon contact terre/racines.

L'ouverture du potet peut également être faite à la pelle mécanique sur chenille, elle aura l'avantage de ne pas compacter les bords du trou.

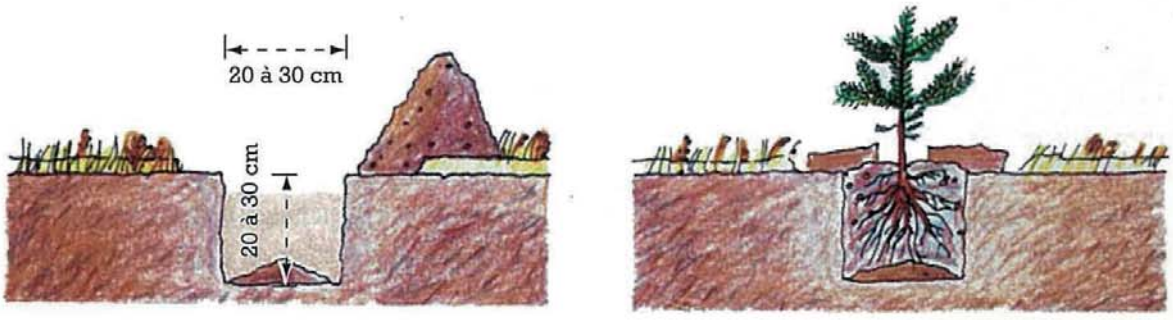


Figure 53 : Plantation en potet [38].

129 Soit 350 plants par jour et par planteur [24].

Pour que la mise en terre du plant soit correcte :
- sa tige doit être verticale ;
- son collet doit être replacé au niveau du sol
- ses racines doivent être étalées dans le potet, non retroussées et recouvertes de terre fine légérement tassée ;
- la terre doit être tassée autour du plant de manière à ce qu'il n'existe pas de poche d'air.

La plantation au potet favorise une bonne reprise et une croissance vigoureuse des plants. Elle est à utiliser dans les cas de plantation à faible densité où la qualité du plant et la nécessité d'un très bon taux de survie justifient le surcoût au moment de la mise en terre du plant.

* *LA PLANTATION MÉCANIQUE :*
Les reboisements de plus de 10 ha peuvent justifier l'emploi de planteuses mécaniques [24] si la pente n'est pas trop forte (pas au-delà de 15 % pour un travail en courbes de niveau). Pour une grande surface de réaménagement forestier (300 ha au total [F1 m]), une planteuse mécanique est utilisée après une bonne préparation du terrain par passage d'un covercrop puis d'un canadien[130].

Le réglage de la profondeur de plantation se fait en fonction de la longueur du système racinaire des plants. Cependant comme pour le coup de pioche, les racines sont rassemblées dans un seul plan. Le tassement de la terre au pied du plant n'est généralement pas suffisant, ce qui peut nuire à la reprise des plants sur sol lourd.

b) PLANTATION DES PLANTS EN CONTENEUR

Dans tous les cas et quelle que soit la nature du conteneur, celui-ci doit être enlevé au moment de la plantation (cela n'a pas toujours été le cas) sans faire perdre sa cohésion à la motte autour du système racinaire. Si le plant n'a pas été élevé dans un conteneur sans fond placé sur un coussin d'air d'au moins 10 cm[131], il a pu se produire en fond de pot, une accumulation de racines qui doit être coupée afin que le plant une fois en terre ne développe pas un système racinaire en chignon.

Les plants en conteneur sont moins fragiles que les plants à racines nues mais il faut également limiter l'exposition afin de ne pas aboutir à des dessèchements du substrat. La motte doit être humidifiée jusqu'au refus d'eau avant mise en terre.

La plantation peut être manuelle au coup de pioche ou mécanique si la motte est petite, au potet (figure 54) pour les mottes de grande dimension.

Il est important de veiller à ce que les racines du plant colonisent bien la terre et ne se confinent pas au substrat de la motte, pour cela, il est indispensable de ne pas créer de discontinuité entre

130 Ces matériels ont été achetés par le carrier qui est propriétaire des terrains.
131 Isoler les conteneurs sans fond par une couche d'air permet en effet un arrêt de la croissance des racines à la sortie du pot et donc évite des phénomènes de racines en chignon.

la motte plantée et le sol en place. Il faut donc bien tasser le sol pour éviter les poches d'air autour de la motte et ne pas ouvrir un potet en compactant les parois [24].

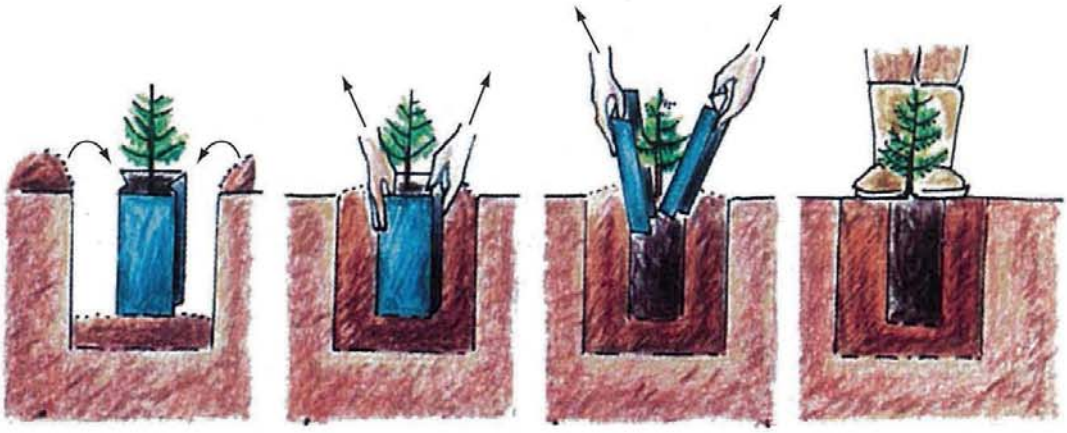


Figure 54 : Plantation d'un plant en conteneur en potet [27].

Un facteur de mortalité des plants en conteneur est le dessèchement de la motte par effet de mèche : si le haut de la motte est à l'air libre, son humidité plus importante que le sol environnant va être aspirée par effet de mèche. Il faut pour éviter cela, recouvrir le haut des mottes d'au moins 2 cm de terre. En sol mouillant, on façonne la surface du potet en butte afin d'éviter les excès d'eau, en sol séchant, on façonne en cuvette (figure 55).

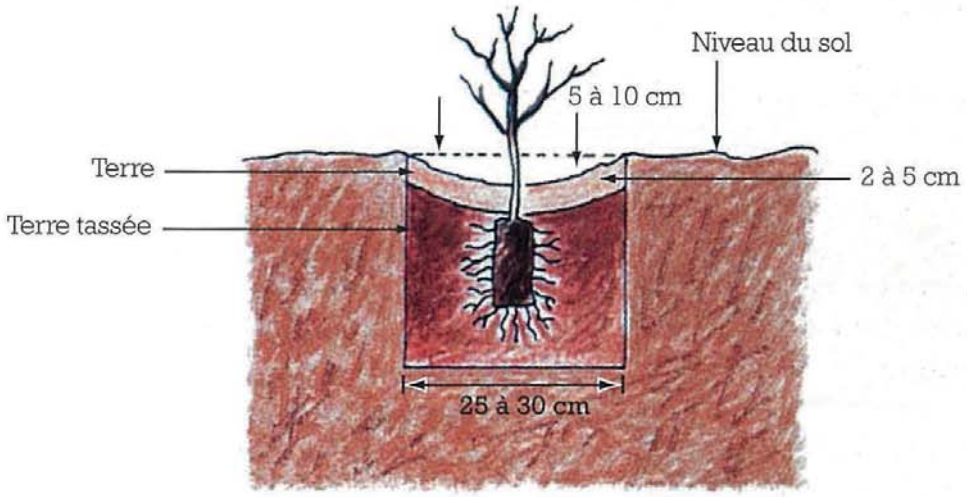


Figure 55 : Façonnage en cuvette d'une plantation [27].

Une fertilisation peut être disposée dans le potet sous forme d'amendement organique (fumier, compost...) ou sous forme d'engrais, généralement d'engrais retard (principalement pour l'azote) afin de libérer l'engrais au fur et à mesure de la croissance et des besoins du plant. En réaménagement de carrière, nous n'avons pas de résultats comparant l'efficacité et le coût d'une fertilisation en plein avant plantation et d'une fertilisation dans le trou de plantation.

Les plants de peuplier sont fréquemment sous forme de plançons[132] qui sont plantés profondément dans des trous ouverts à la pelle mécanique (Sierentz [TPG 13], plantation des plançons dans la nappe à 1,70 m de profondeur).

132 Tiges d'un an sans racines et sans branches d'une hauteur de 3 à 4 m.

4 - DISPOSITIFS PARTICULIERS

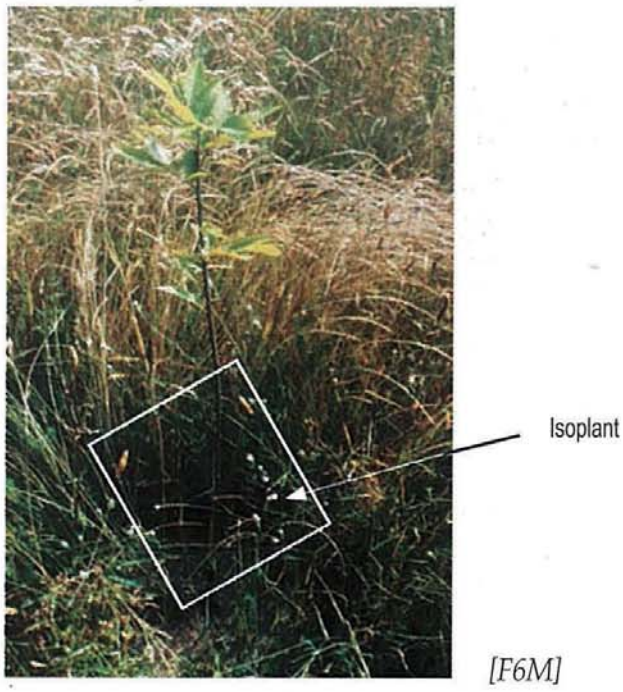
Afin de protéger les jeunes plants contre les risques de dessication superficielle du sol et contre la concurrence herbacée dans les 2 à 3 premières années, différents dispositifs sont utilisables. Ces dispositifs ne sont utilisés que pour les plantations à faible densité de plants à bonne chance de survie (plants en conteneur).

a) DISPOSITIFS INDIVIDUELS

Il s'agit, de recouvrir le sol autour du collet de chaque plant, d'une dalle qui limite l'évapotranspiration du sol et qui empêche la colonisation herbacée. Ces dalles peuvent être de différente nature : liège, fibre de bois (isoplant) disponibles en différentes tailles. Ces dalles sont passées autour du plant et sont fixées au sol par des agrafes.

La planche 4 montre l'efficacité de ce type de dispositif pour lutter contre la concurrence herbacée. Elles sont utilisées sur plusieurs sites en raisonnant ou non leur emploi aux sites les plus défavorables pour l'humidité : ainsi des isoplants sont utilisés en haut de talus et non utilisés en bas de pente [F1 m, F4 M]. De telles précautions permettent des taux de reprise de 90 à 95 % [F1 m]. Ces dispositifs limitent dans les premières années, cruciales pour la survie du plant, des opérations de désherbage autour du plant qui sont coûteuses.

PLANCHE 4 . Des moyens de lutte contre la concurrence herbacée à proximité directe du plant.



[F6M] *Photo Cemagref Delory I.*

L'isoplant est une plaque en fibre de bois qui protège les plants contre la repousse des herbacées à proximité directe du plant. Il diminue l'évapotranspiration et régule la température. Dans les premières saisons de végétation, la croissance du jeune plant en conteneur mis en place est favorisée. Les tailles des dalles varient de 33 cm / 33 cm à 120 cm / 120 cm.



[F15M]
Photo Cemagref Delory I.

En situation climatique pas trop chaude et pas trop exposée au soleil, le paillage plastique au moment de la plantation permet également la lutte contre la végétation herbacée et diminue l'évapotranspiration.

b) DISPOSITIFS EN PLEIN OU EN BANDE

Il s'agit dans ce cas de couvrir la bande de plantation d'un paillage qui sera percé[133] pour y disposer les plants. Le paillage peut être de différente nature : plastique, géotextile non tissé en fibres végétales (bois et jute) ou toile tissée.

* *LE PAILLAGE PLASTIQUE*

Le paillage plastique (film de polyéthylène de couleur noire) permet d'augmenter la température moyenne du sol (par interception des rayonnements solaires) et d'augmenter la teneur en eau du sol (en empêchant le développement d'une végétation herbacée source d'une forte évapotranspiration et en freinant l'évapotranspiration directe du sol). Il permet également de maintenir les améliorations de la structure du sol apportées par les façons culturales [125]. Cependant, cette technique présente plusieurs inconvénients :

- son coût et l'augmentation du temps nécessaire à la plantation (il faut poser le plastique, le fixer, le fendre, mettre le plant en place et refermer soigneusement la fente autour du collet) ;
- il peut provoquer en exposition sud, un échauffement excessif du sol ;
- il peut provoquer des acidifications des horizons de surface ;
- il peut entraîner des pullulations d'insectes et de rongueurs au pied des plants (le milieu ainsi créé leur étant très favorable) et donc provoquer des pertes de plants ;
- en cas de mauvaise refermeture de la fente de plantation, des touffes d'herbes très concurrentielles, car bénéficiant de la richesse en eau sous le paillage, peuvent s'installer juste au niveau du collet et provoquer la mort du plant.

Le paillage plastique est à réserver à des conditions particulièrement difficiles (talus).

133 Certains modèles peuvent être préperforés à la demande à l'écartement de plantation choisi.

* *LES GÉOTEXTILES*

Les différents types de géotextiles proposés sur le marché sont actuellement peu utilisés en carrière en raison de leur coût de revient. Par contre, ils sont beaucoup utilisés en revégétalisation en conditions difficiles (talus autouroutiers, réhabilitation de pistes de ski, berges de cours d'eau ou de barrage). Ils ont moins d'inconvénients que les paillages plastiques notamment en terme d'échauffement mais permettent l'installation d'une certaine concurrence herbacée. Ils sont à réserver pour des situations où l'érosion risque de détruire la plantation.

* *LES MULCHS*

Des écorces ou des copeaux de résineux sont épandus sur le sol après plantation en couche de 8 à 15 centimètres. Ils permettent d'empêcher le développement de la végétation herbacée et de limiter l'évapotranspiration directe du sol. Ils ne peuvent être utilisés qu'en terrain plat. Nous avons détaillé dans le chapitre 6 l'intérêt du bois raméal fragmenté qui peut lui aussi avoir un effet de mulch.

III - L'ENTRETIEN DE LA PLANTATION

On considère de manière conventionnelle que la phase de reboisement se termine à la première éclaircie, laissant alors la place à la phase sylvicole [24]. Toutes les opérations qui se situent entre la fin de la plantation et la première éclaircie sont des travaux d'entretien.

Le succès du reboisement étant loin d'être acquis à la fin de la plantation, son entretien est une étape fondamentale de la qualité d'un reboisement. Il doit viser à assurer :
- une bonne survie des plants mis en place en luttant contre toutes les causes de dépérissement et de limitation des potentialités de croissance des plants (concurrence herbacée pour l'eau, dégâts dus aux animaux...) ;
- une croissance harmonieuse des plants pour obtenir la quantité souhaitée par hectare d'arbres de qualité (élagage...).

La finalité de ces entretiens est d'amener le jeune peuplement jusqu'à un stade de développement tel qu'il pourra assurer seul sa propre survie.

1 - PROTECTION DES ARBRES CONTRE LE GIBIER

Les plants peuvent être une source de nourriture pour :
- les rongeurs (types surmulots, mais aussi lapins et lièvres) ;
- les cervidés (chevreuil et cerfs).

Outre la recherche de nourriture (abroutissement qui correspond au prélèvement des jeunes pousses d'un plant), les cervidés provoquent des dommages par frottis (frottement des bois du mâle chevreuil sur les tiges pendant la période de reproduction pour marquer son territoire) et écorçage par les cerfs de l'écorce des jeunes arbres.

Les semis pourront, en plus, être recherchés au stade graine par des oiseaux (geai) mais aussi par les sangliers.

Les dégâts provoqués peuvent soit faire mourir le plant (destruction des racines, section du collet, attaque ultérieure de champignons), le déformer (bourgeon terminal cassé) ou retarder sa croissance (répétition de l'abroutissement, quand une partie de l'écorce est enlevée).

En fonction de la superficie d'un seul tenant mise en place, de la densité de plantation et de la qualité des plants utilisés, de l'appétence des espèces et du degré de fréquentation du site par les différents prédateurs, une protection individuelle ou une clôture de toute la parcelle seront à envisager.

Pour limiter les attaques de petits rongeurs (fréquentes quand le milieu est enherbé), il est utile et très peu onéreux d'installer des perchoirs à rapaces au milieu de la plantation (figure 56). La pression de prédation instaurée par les rapaces diurnes utilisant ces perchoirs permet en effet de diminuer la population de micro-mammifères à un seuil sans risque pour les plantations [5].



Figure 56 : Perchoir à rapaces au milieu d'un reboisement [5].

La clôture de toute la parcelle doit être faite avec des grillages d'au moins 1,8 m de haut [5], contre le sanglier, un fil électrifié est efficace. Les anglais [92] considèrent qu'au-dessus de 2 hectares la clôture est moins onéreuse que des protections individuelles.

Les protections individuelles consistent en des manchons de grillage ou de plastique entourant le plant et fixés par des piquets :
- de 0,60 m de haut contre les dégâts de lièvre ou de lapins ;
- de 1,20 m de haut contre le chevreuil ;
- de 2,50 m de haut contre le cerf.

Elles protègent le plant contre les prédations mais créent également un microclimat favorable [92] pour la croissance du plant (mini-serre).

L'utilisation de manchons de protection est une pratique courante[134] en réaménagement forestier de carrière, il faut cependant bien connaître la faune fréquentant le site afin de ne pas installer une protection onéreuse mais qui sera cependant inefficace (planche photo 5 : les plants sont protégés par des manchons anti-lapin, un chevreuil broute les plants sur la parcelle).

PLANCHE 5 . Les manchons de protection contre les dégâts du gibier.



Manchon de protection en plastique contre les lapins, fixé par des tuteurs métalliques

[F1M] *Photo Cemagref Delory I.*



Chevreuil

[F1M]
Photo Cemagref Delory I.

La connaissance du gibier fréquentant la parcelle reboisée permet de choisir le mode de protection adapté. Ici, les manchons protègent contre les dégâts de lapins, mais pas contre les abroutissements du chevreuil qui fréquente la parcelle.

Les Suisses [5] préconisent aussi des cultures pour gibier (céréales et colza) sur une partie du site réaménagé afin de détourner les chevreuils et les cerfs des parcelles boisées. La mise en place d'une strate arbustive et d'une strate herbacée peut également diminuer la pression de prédation sur les arbres.

134 Toutes les carrières visitées le pratiquent.

Le choix des espèces (figure 57) peut également permettre de trouver un bon compromis, certaines espèces peu appétantes[135] pour le chevreuil peuvent être privilégiées quand une fréquentation du site est connue.

	Feuillus	Résineux
Espèces préférées	Merisier Chêne rouge d'Amérique Erable sycomore	Sapin pectiné
Espèces moyennent recherchées	Chêne pédonculé Chêne sessile Frêne commun	Cèdre Pin maritime Pins (sylvestre, laricio)
Espèces délaissées	Erable champêtre Hêtre Chataignier Tilleul Bouleau Noyer	Epicéa Douglas Mélèze

Figure 57 : Echelle de préférence du chevreuil vis-à-vis de l'abroutissement.

2 - LIMITATION DE LA CONCURRENCE HERBACÉE ET ARBUSTIVE

Nous avons vu que l'une des principales causes de dépérissement des plants était le déficit hydrique entre l'alimentation possible par le sol et l'évapotranspiration du plant. Le facteur essentiel de concurrence était la végétation herbacée à proximité du plant. Les graminées peuvent aussi empêcher une installation correcte du plant, car les racines de graminées peuvent constituer dans le sol un feutrage[136] qui constitue une barrière physique à la croissance des racines du plant. Ceci est d'autant plus vrai pour la reconstitution de sol où, dans certains cas, l'utilisation d'horizon organo-minéral stocké sans végétalisation peut apporter sur la parcelle, un stock important de semences.

Dans les 3 premières années après la plantation, une surface d'un mètre carré autour du plant doit être tenue libre de toute autre plante. Nous avons précisé les moyens de prévention (paillage, protection individuelle par dalle, mulch). Le dégagement de la bande de plantation peut être également effectué avant plantation par l'utilisation d'herbicide. Les conditions d'utilisation d'herbicides avant ou après un reboisement sont complexes, nous n'aborderons pas ici cette question[137].

---

135 Peu attractives en tant que nourriture pour le chevreuil.

136 Un tapis très dense de racines constitue une couche presque continue de racines dénommée feutrage.

137 On pourra se reporter aux ouvrages « *Phytocides en sylviculture Application des traitements par produits chimiques* », Cemagref INRA, 1988, 120 p. et « *Guide pratique du désherbage et du débroussaillement chimique* », IDF, 1986, 226 p.

Au bout de 5 ans, le plant a généralement acquis une taille et un enracinement suffisants pour s'affranchir de la concurrence pour l'eau des espèces herbacées. Cependant, il peut se produire également une concurrence par des ligneux et semis-ligneux (fougères, ronces, genêts, ajoncs...). Ces espèces quand elles forment un écran au-dessus des plants sont principalement des concurrentes pour l'espace et la lumière. Elles peuvent freiner la croissance des plants, les déformer ou les étouffer. Cependant, si l'on arrive à maintenir un couvert de fougères, ronces, genêts, ajoncs de hauteur inférieure à la tête des plants il peut y avoir un effet bénéfique en limitant le développement de l'herbe et en maintenant la structure et la fraîcheur du sol [38].

Dans certains cas, le manque d'entretien et l'existence d'un fort potentiel semencier d'espèces pionnières (saules, bouleaux) autour de la carrière a permis une colonisation naturelle d'espèces indigènes nuisant totalement aux espèces plantées. Ainsi, à Sündhoffen [TPG 15], les saules sont plus hauts que les chênes qui ont été plantés : un dégagement s'impose afin de laisser grandir les chênes qui sinon végéteront sous le couvert des saules.

La limitation de la concurrence aura pour conséquences :
- une amélioration de la reprise du peuplement ;
- une accélération de sa croissance initiale.

Un entretien curatif doit être fait si les dispositifs de prévention n'ont pas été utilisés ou s'ils ne remplissent pas correctement leur rôle, avant que les effets négatifs de la concurrence ne se fassent sentir.

Différents moyens peuvent être utilisés :
- moyens mécaniques avec utilisation d'outils coupants ne travaillant pas le sol (broyeur à axe vertical) ;
- moyens mécaniques avec utilisation d'outils coupants et travaillant le sol (covercrop, cultivateur à dents, gyrobroyeur, rouleau landais, houes rotatives) ces engins ne sont à utiliser que les premières années car ensuite, le plant aura développé latéralement son système racinaire et celui ci pourra être abîmé par le travail du sol ;
- moyens manuels : débroussailleuse portative
- moyens chimiques qui sont à réserver à l'entretien d'un sol peu colonisé afin d'empêcher l'installation de nouvelles plantules car il est difficile de lutter contre un enherbement installé sans risquer de nuire aux plants eux mêmes.

3 - LE REGARNISSAGE

La nécessité de regarnir le peuplement doit être analysée en fonction du taux de mortalité intervenu dans la plantation, de la répartition des plants morts et la densité initiale du peuplement. Le regarnissage doit être effectué si le peuplement en l'état ne sera pas apte à se fermer.

En effet, regarnir introduit un nouveau coût, impose une durée d'entretien plus longue et des entretiens plus complexes en raison de la présence conjointe sur la ligne de plantation, de plants d'âge différents, et donc de taille et de sensibilité différente.

PLANCHE 6 . Illustration de la concurrence pour l'eau et l'espace.



[F15m] Photo Cemagref Delory I.
Concurrence entre l'espèce plantée et une colonisation naturelle plus vigoureuse.
Cette parcelle devrait être dégagée pour permettre un meilleur développement des plantations.



[F3m] Photo Cemagref Delory I.
Concurrence par des arbustes : le développement des genêts et des fougères peut provoquer une concurrence forte pour l'eau.

Analyser les causes de la mortalité des plants est absolument nécessaire afin de ne pas répéter les mêmes erreurs et au contraire de pouvoir corriger les facteurs ayant provoqué la mortalité. Ainsi, si la mortalité est répartie uniquement dans un secteur précis de la parcelle, des excès d'eau peuvent en être la cause et la mise en place d'un drainage doit alors être envisagée.

A Sierentz [TPG 13] la hauteur du sol par rapport aux remontées de nappe étant insuffisante, tout regarnissage ou replantation sans réhaussement du niveau du sol aurait été soumis au même facteur de risque d'inondation.

Quand la cause de la mortalité n'a pas pu être mise en évidence, il est préférable de changer de stratégie, soit en changeant d'espèce en privilégiant une espèce à reprise plus facile soit parfois en renonçant à boiser cette zone et en favorisant une mosaïque de milieux (landes, pelouses sèches...).

Dans le cas des plantations à but de production à faible densité, il convient de regarnir car l'espace occupé par chaque plant mort ne pourra pas être récupéré par un plant voisin.

En cas de mauvais démarrage d'une plantation ou d'accident d'ordre climatique, un recépage[138] des plants est parfois effectué [F4 M, TPG 13] afin de permettre la récupération de la plantation. Si le recépage échoue, une nouvelle plantation devra être effectuée.

4 - LES TECHNIQUES SYLVICOLES APPLIQUÉES

a) TAILLES ET ÉLAGAGES

La taille de formation et l'élagage sont complémentaires et permettent d'obtenir une longueur optimum de bille (tronc) droite et verticale. Ces deux pratiques sont d'autant plus importantes que la densité de plantation est faible.

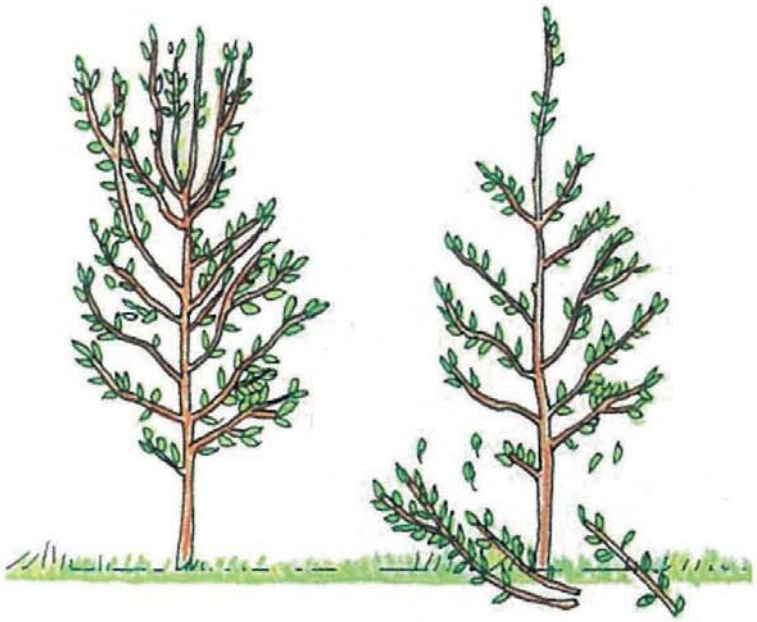


Figure 58 : Taille de formation d'un feuillu [38].

138 Il s'agit de couper le plant sous le départ des premières branches afin de lui faire produire une nouvelle tige.

** LA TAILLE DE FORMATION*

La taille de formation sur feuillu a pour objet de supprimer les fourches et les grosses branches du tiers supérieur de l'arbre qui en se redressant peuvent concurrencer la cime (figure 58). Elle vise donc à obtenir un jeune arbre dont la tige terminale présente une bonne dominance sur les branches inférieures.

Les tailles de formation doivent avoir lieu dès que les arbres montrent des signes évidents de reprise, c'est-à-dire, dans les premières années du plant (entre 2 à 6 ans). Dans les plantations feuillues, les premières tailles de formation seront effectuées sur 300 à 500 tiges/ha choisies parmi les plus vigoureuses et ayant un avenir certain.

** L'ÉLAGAGE*

L'élagage consiste à couper des branches pour obtenir du bois sans nœud sur une longueur déterminée de bille droite et verticale. Il doit servir à éliminer toutes les branches mortes et à supprimer les branches basses vivantes. La hauteur souhaitable d'élagage varie de 4 à 10 m selon les essences :

- 7 m pour les peupliers ;
- 6 m pour les arbres en peuplement ;
- 5 m pour les arbres isolés ;
- 4 m pour les noyers.

Tous les arbres isolés doivent être élagués. En peuplement, seuls les arbres dominants, les plus beaux et les plus vigoureux répartis le plus régulièrement possible seront élagués :

- de 100 à 200 arbres/ha pour un peuplement feuillu ;
- de 200 à 400 arbres/ha pour un peuplement résineux.

Plus l'élagage est pratiqué tôt moins il coûte cher et plus il est efficace [38]. Le premier passage d'élagage doit ainsi être pratiqué quand l'arbre a atteint une hauteur variable selon l'espèce et le type de plantation (figure 59).

Essences	Hauteur totale au début de l'élagage	
	arbres isolés	arbres accompagnés
Noyers	3 m	5 à 6 m
Autres feuillus	4 m	6 m
Pins	5 m	6 m
Autres résineux	6 m	9 m
Peupliers	7 à 9 m	9* à 13** m

* pour 3 passages, ** pour 2 passages

Figure 59 : Hauteurs pour commencer l'élagage [38].

Si l'élagage est pratiqué en plusieurs fois (figure 60) la hauteur élaguée à chaque passage dépend de la hauteur totale de l'arbre à ce moment là :

- pour le premier passage, le tiers inférieur de la hauteur de l'arbre ;
- à partir du deuxième passage, l'élagage se poursuit de 0,40 à 1 m pour les arbres isolés et de 1 à 2 m pour les arbres en peuplement.

PLANCHE 7 . Couvert de résineux (pins laricio) élagués.



[F3m] *Photo Cemagref Delory I.*

Plantation de pins laricio réalisée en 1980 aux densités de 13 000 à 16 000 plants/ha. Aucune éclaircie n'a été faite, mais l'élagage est réalisé régulièrement. Les arbres mesurent 7 m actuellement. Les strates arbustives et herbacées sont absentes.

Après le dernier passage, la hauteur sans branche devra représenter la moitié de la hauteur totale de l'arbre à cet instant.

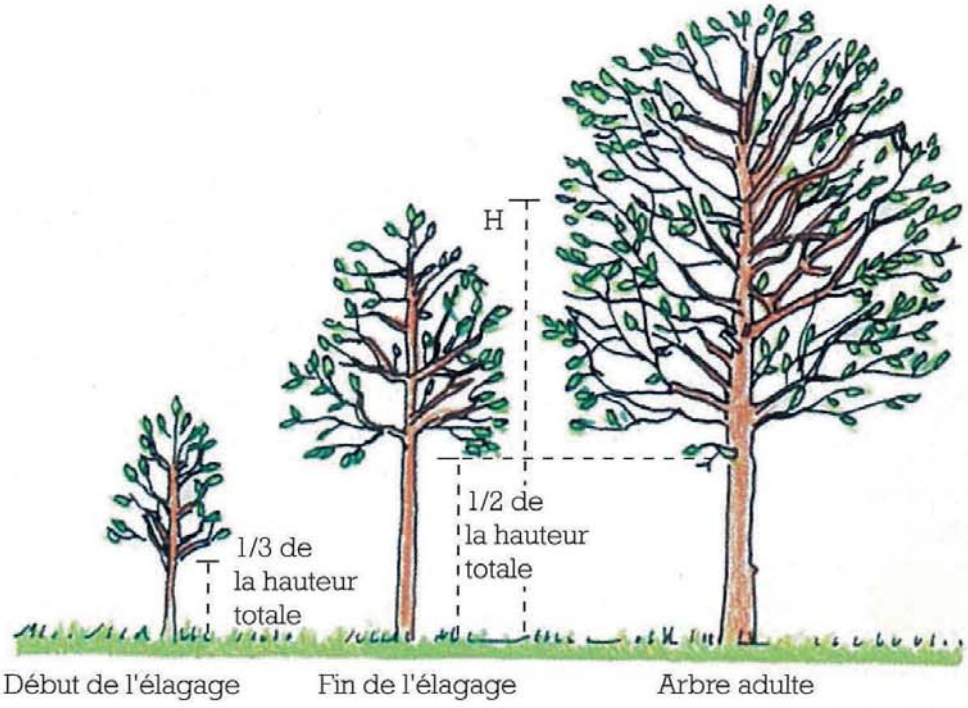


Figure 60 : Réalisation des élagages [38].

En peuplement, les élagages doivent être renforcés par des éclaircies au profit des arbres élagués afin de les faire grossir rapidement et d'accélérer la cicatrisation des plaies d'élagage.

Dans les premières plantations de résineux à forte densité [F1 m], les élagages n'étaient pas pratiqués. Actuellement, ils sont pratiqués à 4 ans pour les feuillus et à 7 ou 8 ans pour les résineux.

La pratique des élagages outre l'aspect qualité du bois évoqué, permet d'obtenir un sous-bois plus diversifié. Ainsi [F1 m] sous des pins laricio de 12 et 10 ans non élagués, le sous bois est limité à deux espèces (callune et ronce) alors que les plantations de 8 ans, élaguées présentent une flore herbacée riche de 17 espèces.

b) DÉPRESSAGE ET ÉCLAIRCIE

Dans les plantations à forte densité, des éclaircies sont nécessaires afin :
- d'obtenir le nombre d'arbres souhaité par hectare ;
- afin de sélectionner les sujets de meilleure forme.

Les premières éclaircies en plantation de feuillus débuteront dès que le peuplement aura atteint 8 à 14 m de haut [38].

Pour les plantations de résineux à plus de 2000 tiges/ha, il faut effectuer un dépressage (c'est-à-dire éliminer en une seule fois, en les coupant et en les abandonnant à terre, les tiges attardées ou déformées). Cette opération doit intervenir quand les arbres ont de 4 à 7 m de

haut. Pour les pins et les épicéas, la meilleure période se situe à l'automne afin de limiter les attaques d'insectes. Le dépressage doit laisser de 800 à 1200 tiges/ha.

Pour les plantations de résineux moins denses[139], ou après une opération de dépressage, on doit procéder à une éclaircie qui consistera à couper et à vendre une forte proportion de jeunes tiges (c'est-à-dire de hauteur 12-15 m). L'objectif de cette éclaircie est de ramener la densité à 800 tiges/ha.

Pour les semis de chêne, le dépressage débutera quand les tiges auront une hauteur de 4 à 5 m (8 à 12 ans) et sera effectué en 2 à 3 passages afin de ramener la densité à 1500 à 2000 tiges/ha.

Pour les semis de pin maritime, le dépressage aura lieu en deux passages :
- le premier passage quand la hauteur des tiges est 1,50 m afin d'atteindre une densité de 2500 tiges/ha ;
- le second passage quand la hauteur des tiges est de 3 à 4 m afin d'atteindre une densité de 1200 tiges/ha.

En complément de ces pratiques sylvicoles d'amélioration du peuplement, un suivi phytosanitaire doit être réalisé régulièrement afin de traiter si le besoin s'en fait sentir.

L'annexe 8 précise le calendrier général (pour un reboisement classique) des interventions avant et après le reboisement, il permet de donner une idée pour un réaménagement forestier de l'étalement dans le temps de l'entretien nécessaire.

Dans les carrières visitées et dont le carrier à la maîtrise foncière, l'entretien est souvent réalisé par une entreprise extérieure (souvent par l'ONF) dans ce cas, un contrat précis doit lier l'entrepreneur forestier et le carrier. Sur le grand site forestier de Bernières[140] [F1 m] 270 ha reboisés avec 320000 arbres, le carrier a acquis le matériel nécessaire à l'entretien et un employé est chargé entièrement de l'entretien des plantations.

La réussite d'un reboisement dépend pour une part importante, après l'absence de compaction des sols remis en place :
- de la qualité des plants : espèce adaptée, plant de qualité, plant transporté dans de bonnes conditions...
- des capacités d'installation et de reprise rapide du plant après la plantation : taille du trou de plantation adapté, racines en bon état et bien installées, période de plantation adaptée au régime climatique de la région, protection contre le gibier ;
- de la qualité de l'entretien et en particulier de la limitation de la concurrence herbacée.

La qualité du bois produit dépendra principalement de l'entretien et des pratiques sylvicoles pratiquées (taille, élagage, dépressage, éclaircie).

139 C'est-à-dire moins de 1500 tiges/ha.
140 Alors que le carrier n'est pas propriétaire du site.

PLANCHE 8 . Exemples de plantations forestières de qualité.



[F1m] *Photo Cemagref Delory I.*
Parcelle à vocation ligneuse plantée en 1989 en pins laricio. Au bout de 10 ans, ils mesurent 5 m. Aucun élagage n'a été effectué.



[F1m] *Photo Cemagref Delory I.*
Parcelle à vocation ligneuse plantée en 1991 avec des érables sycomores. Un premier élagage total a eu lieu au bout de 4 ans puis il est réalisé une rangée sur deux quand c'est nécessaire (suivi par un employé de la société).

CHAPITRE 8

INTEGRATION DU REAMENAGEMENT

I - LE CAS PARTICULIER DU BOISEMENT DES BASSINS DE DECANTATION

1 - LES BASSINS DE DÉCANTATION DE LAVAGE DE GRANULATS

Dans de nombreux cas, les bassins de décantation ont été dans le passé laissés en état et ils ont fait l'objet d'une étude spécifique [TPG 3] sur leur colonisation naturelle[141] au cours de 0 à 20 ans d'évolution. Au vu des conclusions de cette étude, il apparaît que pour une végétalisation à caractère écologique ou paysager, la colonisation naturelle est très efficace et permet d'obtenir des taux de boisement et de fermeture du milieu tout à fait satisfaisants[142]. En effet, dès que le sol apparaît, même encore saturé d'eau, une première végétation de milieu humide s'installe (Typha, phragmites, roseau...) avec l'assèchement progressif des strates herbacées et ligneuses s'installent. La vocation ligneuse des bassins de décantation devrait souvent être préférée à des réaménagements agricoles qui seront, vu les contraintes de sol, de médiocre qualité [F3 m].

Les facteurs défavorables à l'installation d'un peuplement ligneux sont [TPG 3] :
- les risques d'instabilité structurale liée à la texture moyenne limoneuse des boues de décantation et leur déficit en matière organique ;
- la présence massive de calcaire actif qui peut induire des chloroses et un blocage de l'alimentation en phosphore.

Les seuls cas de blocage de la succession ont été trouvés sur des bassins à substrat sableux qui souffrent de déficit hydrique quand les espèces ne trouvent pas une nappe d'eau à proximité des racines.

L'étude des espèces trouvées suite à la colonisation naturelle permet de connaître les espèces adaptées au boisement volontaire des bassins de décantation.

Les essences trouvées dans ces bassins de décantation sont dans l'ordre décroissant de leur fréquence [TPG 3] :
- les saules (*Salix alba, Salix purpurea, Salix viminalis, Salix cinerea, Salix eleagnos, Salix triandra, Salix aurita*) ;
- le peuplier (*Populus nigra*) et le bouleau (*Betula verrucosa*) ;
- l'aulne (*Alnus glutinosa*) et le robinier (*Robinia pseudo-acacia*) ;
- de manière moins fréquente, certaines espèces sont également présentes : le frêne (*Fraxinus excelsior*) et le chêne (*Quercus pedonculata*) ;
- des arbustes sont également présents : le cornouiller mâle (*Cornus mas*), le sureau (*Sambucus nigra*), le noisetier (*Corylus avellana*).

Les conclusions de l'étude indiquent que les peupliers et les aulnes permettent des perspectives de valorisation par boisement en raison de leur croissance rapide.

---

141 Cette étude a porté sur 664 sites.

142 Taux de boisement de 100 % à Mantes avec un boisement spontané de saule de 8 m de haut, et plusieurs autres bassins à recouvrement de plus de 70 % avec des hauteurs de 5 à 6 m.

PLANCHE 9 . Bassin de décantation encore en activité.



[F3 m] *Photo Cemagref Delory I.*

Bassin de décantation arrivant à saturation. On aperçoit au bord du bassin à droite, les fentes de retrait du limon (fines de décantation) qui sèche.
Un tel bassin devrait servir de source de fines de décantation pour améliorer l'ensemble des sols à réaménager plutôt qu'être réaménagé lui-même après ressuyage (au bout de 5 à 10 ans).

2 - LES BASSINS DE DÉCANTATION DE TERRES DE SUCRERIE

En ce qui concerne les bassins de décantation des terres de sucrerie, leur boisement paraît plus favorable que leur réaménagement agricole car l'instabilité du substrat empêche pendant 5 ans au moins l'entrée sur la parcelle d'engins agricoles (voir le livre «*Réaménagement agricole des carrières de granulats*»).

3 - BOISER OU NE PAS BOISER

Dans le contexte des bassins de décantation, vu la rapidité de colonisation naturelle, la question de boiser ou non doit être étudiée sérieusement. En effet, quelle que soit la nature des boues prélevées et l'âge des bassins étudiés, la revégétalisation naturelle des boues de décantation a toujours été constatée.

Seuls les bassins à substrat sableux éloignés de la nappe pourraient faire l'objet d'une intervention afin de se substituer à une colonisation naturelle défaillante. Les conclusions de l'étude proposent d'installer dans ces bassins une végétation herbacée utilisée dans le reverdissement des digues (*Phalaris arundinacea, Calamagrostis epigeios, Calamagrostis littoria, Festuca rubra, Festuca ovina, Festuca arundinacea*).

Quand un objectif de production est affiché, des peupliers peuvent être plantés si une nappe est proche. Un bilan économique doit être fait afin d'évaluer l'intérêt de boiser ou de laisser la cicatrisation naturelle se faire.

Pour des bassins encore en eau une expérimentation de mise en place de bambous devait être tentée mais des problèmes de fourniture de plants n'ont pas permis sa réalisation avec suffisamment de plants.

II - INTEGRATION ECOLOGIQUE ET PAYSAGERE

1 - MAINTIEN DE LA BIODIVERSITÉ

Nous avons vu que la tendance actuelle des reboisements était l'utilisation d'espèces feuillues en peuplement plurispécifique ce qui permet de garantir une meilleure diversité à la fois en espèces ligneuses mais aussi en espèces herbacées.

En effet [F1 m], à âge égal (8 ans) sous couvert de feuillus (Erables) élagués à 4 ans, le couvert herbacé est à la fois plus dense et plus riche (34 espèces) que sous couvert de résineux élagués à 7 ans (16 espèces). C'est la plus grande lumière arrivant au sol sous les feuillus élagués qui explique la plus grande richesse en effet, les espèces herbacées héliophiles y sont en plus grand pourcentage.

Les feuillus, de part leur litière améliorante favorisent également un plus grande diversité dans la faune du sol que des résineux.

Cette biodiversité peut également être augmentée par la mise en place de plusieurs strates de végétation : herbacée, arbustive et arborée. L'incorporation dans les plans de reboisement d'arbustes permet d'augmenter la richesse floristique des peuplements mais aussi en fournissant abri et nourriture, d'augmenter la diversité animale (oiseaux et insectes principalement).

La diversité végétale peut être menacée sur les sites où des mouvements de terre ont lieu (donc sur les sites de carrière à réaménager) par l'installation de plantes invasives. Quand le sol est nu, ces espèces, principalement dispersées par le vent (mais aussi parfois propagées par des morceaux de tiges souterraines transportés par les engins de manipulation de la terre), vont pouvoir s'installer facilement et rapidement envahir le terrain. Il peut s'agir du buddleia, de la renouée du Japon, de l'ambroisie[143], du séneçon du Cap, de la balsamine de l'Himalaya...

La prolifération de ces espèces à fort taux de croissance et de reproduction (ou de multiplication végétative), fait disparaître les espèces locales à plus grand intérêt patrimonial. Il est indispensable de ne jamais planter de manière volontaire ces espèces.

143 Qui présente en plus un réel danger de santé publique en raison des allergies qu'elle provoque.

Dans un objectif global à l'échelle d'une région de ne pas permettre l'extension de ces spèces qui peuvent être considérées comme des pestes végétales, des destructions de ces plantes présentes sur les carrières pourraient être intéressantes. En effet, les carrières sont l'objet d'un fort trafic de camions venant prendre livraison des granulats et la dissémination sur de nouveaux sites pourrait être ainsi facilité (transport de graines ou de fragments de tige). Il s'agirait ici de mettre en avant la réalisation d'une action favorable à la protection de l'environnement menée par les carriers comme la profession l'a déjà fait pour d'autres types de réaménagement (en eau et écologiques).

2 - INTÉGRATION PAYSAGÈRE

La réflexion sur l'intégration paysagère du boisement peut tout à fait rejoindre les indications favorables à la reprise de plants mis en place. Nous avons vu en effet, que l'installation d'un rideau de protection est favorable à la plantation en protégeant les plants contre le vent, la trop grande exposition au soleil et à la poussière. La constitution d'une lisière véritable peut à la fois répondre à ce besoin et permettre une meilleure intégration paysagère du peuplement.

Raisonner le réaménagement comme une mosaïque de milieux ouverts et fermés et en eau, permet également d'augmenter à la fois la biodiversité paysagère et spécifique et d'assurer un reboisement de meilleure qualité car disposant de plus d'horizon organo-minéral et avec un drainage possible vers un exutoire.

CONCLUSION

Les fonds de fouille et carreaux d'exploitation permettent des réaménagements forestiers de qualité, tant à vocation de production ligneuse qu'à vocation écologique et paysagère.

Les principaux facteurs de réussite d'un réaménagement forestier sont :

La remise en place de l'horizon minéral et de l'horizon organo-minéral sans compactage sur une profondeur de 1,5 à 2 m afin d'assurer aux arbres un espace racinaire capable de subvenir à leur développement jusqu'à l'âge adulte : ceci est assuré par des manipulations de terre sèche et avec des engins adaptés (pelle plutôt que scrapper) et à faible pression au sol ;

La reconstitution du sol prospectable par les racines avec suffisamment d'épaisseur de remblai afin qu'il soit hors d'eau, c'est-à-dire hors des remontées de nappe phréatique même lors des crues cinquantenaires, et sans compactage superficiel afin d'éviter la constitution de nappe perchée par manque d'infiltration des eaux de pluie ;

La préparation très en amont du projet en prenant des contacts précoces avec des pépiniéristes afin de leur faire produire exactement les plants souhaités (en quantité mais surtout en qualité), un cahier des charges très précis doit être rédigé afin d'obtenir une assurance de bonne pratique à tous les stades de la production des plants, de leur sortie de pépinière, de leur transport et de leur installation ;

Une bonne prise en compte des conditions locales (microclimat connu avec le plus de précision, fréquentation potentielle du site par du gibier...) afin de bien choisir les espèces (et leur provenance) et les protections à mettre en place ;

De bien évaluer les contraintes liées dans les 20 années suivant la plantation à l'entretien des jeunes plants afin de leur assurer des conditions de reprise et de croissance satisfaisantes permettant d'obtenir un peuplement de qualité. Il convient donc en particulier d'adapter les choix techniques de limitation de la concurrence herbacée dans les premières années aux possibilités d'entretien (plutôt mettre en place un isoplant si un manque de disponibilité pour désherber est prévisible).

PARTIE 3

REAMENAGEMENT DES BANQUETTES, TALUS ET MERLONS

CHAPITRE 9

CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES

Dans cette troisième partie, nous allons traiter des réaménagements de tous les secteurs d'exploitation de granulats qui ne sont pas de grandes surfaces planes[144] : il s'agit donc principalement des exploitations de roches massives à flanc de coteaux ou en dent creuse présentant des fronts de taille quasi-verticaux séparés par des banquettes horizontales de faible largeur, et des exploitations en talus de roches meubles dans des croissants morainiques de plusieurs dizaines de mètres de haut ou des exploitations de gisements alluvionnaires de hautes terrasses. Nous traiterons également des merlons de protection mis en place dans les carrières de roche massive pour protéger des chutes de pierre mais aussi des merlons de protection visuelle, phonique et contre la poussière qui peuvent être mis en place autour de tous types de carrières.

Tous ces éléments à boiser sont caractérisés par des contraintes fortes vis-à-vis de l'accès des engins, de la quantité et de la qualité des horizons de surface et des potentialités de croissance des végétaux. En raison de ces contraintes et malgré elles, un réaménagement envisageable est une végétalisation boisée, arbustive ou herbacée ou bien de choisir de ne rien planter (pour des motifs paysagers, écologiques... que nous n'abordons pas dans cette étude).

I - CARACTERISTIQUES DU FRONT DE TAILLE

Les fronts de taille résultant d'une exploitation de roches massives sont des parois subverticales à verticales de roche calcaire [F2 M, F5 M, F7 M, F9 M, F12 M] ou de roche métamorphique [TPG 10]. Dans la phase terrain, seules des carrières de calcaire ont été visitées car la banquette réaménagée en 1985 de la carrière de Le Puix-Gy [TPG 10] s'est effondrée et les reboisements n'existent plus ou sont inaccessibles.

Les caractéristiques importantes en ce qui concerne les possibilités de végétalisation des fronts de taille sont :
- la localisation de la carrière (en zone méditerranéenne la majorité des carrières de granulats sont exploitées en front de taille et ont des contraintes très fortes en ce qui concerne la végétalisation) ;
- la nature de la roche ;
- le degré de fragmentation et de rugosité de la roche (existence de diaclase, d'aspérité ou une roche lisse) ;
- le degré de verticalité (50° [TPG 10], 90° [TPG 11]) ;
- la hauteur de chaque gradin et la hauteur totale de l'exploitation ;
- l'exposition (d'importance fondamentale et encore accentuée par la couleur claire des roches calcaires qui provoque une forte réverbération) ;
- l'accessibilité des différents gradins.

L'examen de ces différentes contraintes devra orienter le choix de végétaliser ou non le front de taille. Et si on choisit la végétalisation, de savoir si elle s'effectuera par projection, installation de plantes grimpantes ou retombantes...

144 Qui ont fait l'objet de la partie 2.

Cependant, c'est bien en amont au moment du projet d'ouverture de l'exploitation que ces contraintes devraient être prises en compte afin de permettre une végétalisation future. En particulier, un sens d'attaque du gisement perpendiculaire au sens du pendage des couches exploitées produira un front lisse quasiment impossible à végétaliser. Mais un sens d'attaque parallèle au pendage engendrera un front avec des anfractuosités et des failles plus facile à végétaliser.

Aucune installation d'arbre n'est possible sur les fronts de taille, nous ne développerons donc pas plus les points concernant leur éventuelle végétalisation. Cependant, les caractéristiques du front de taille vont avoir une influence énorme sur les potentialités de réaménagement des banquettes.

Les fronts de taille, parois quasi-verticales de roches massives plus ou moins fragmentées, ne peuvent pas faire l'objet d'un boisement. Ils ont par contre une grande influence sur les potentialités de reboisement des banquettes ou du carreau qu'ils dominent du fait des conditions microclimatiques qu'ils induisent.

II - CARACTERISTIQUES DES BANQUETTES

Les banquettes sont des espaces plats et linéaires de plus ou moins grande largeur (environ 10 m) entre deux gradins (de 10 à 15 m de haut). Leur constitution est imposée par la réglementation concernant la sécurité de l'exploitation.

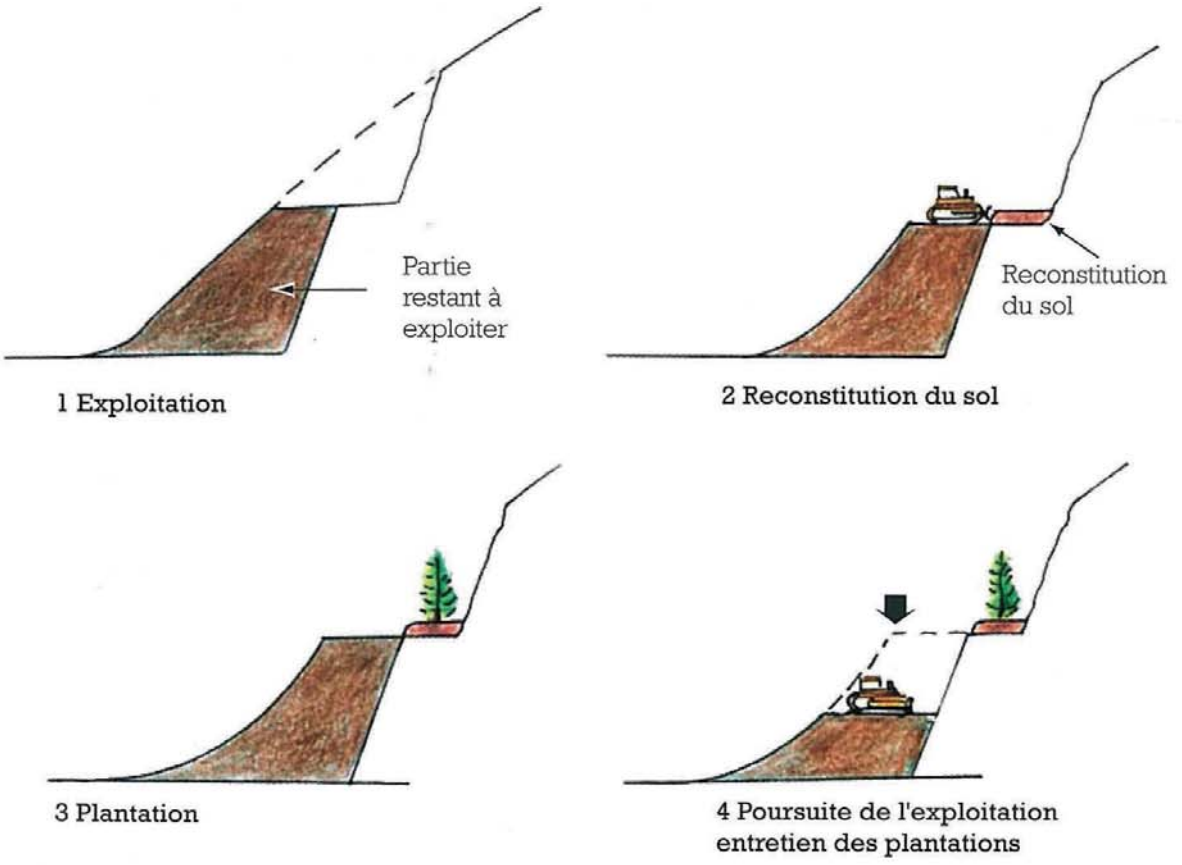
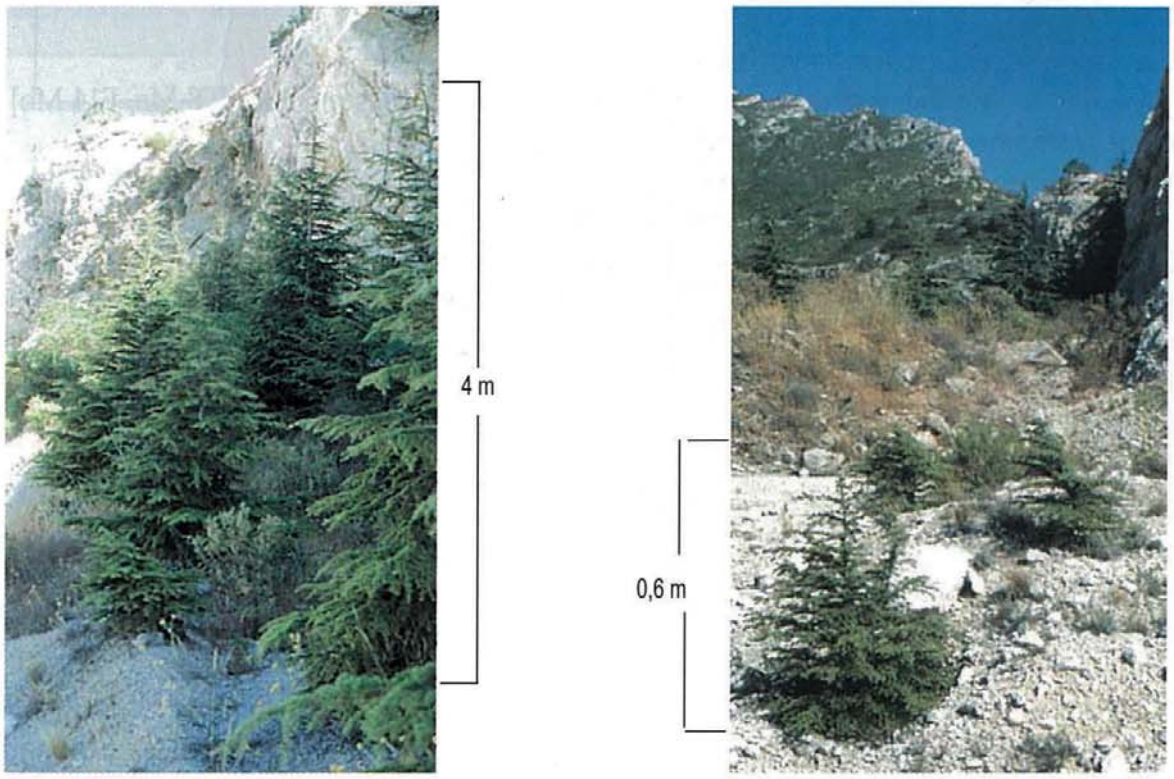


Figure 61 : Végétalisation d'une banquette en cours d'exploitation [75].

Très souvent elles sont, au moment de l'exploitation, réparties en marches d'escalier. Au moment des réaménagements, dans le passé, elles ont souvent été végétalisées en l'état, la réussite du boisement soulignant parfois de manière exagérée ce relief anthropique. Actuellement un modelage des banquettes et du front de taille est réalisé de manière à créer un relief s'intégrant mieux dans le paysage et créant également, sur certains secteurs talutés du front de taille, des conditions plus favorables pour les boisements. Les derniers tirs de mines doivent permettre de réaliser ce talutage. Il est cependant préférable que ce soit l'exploitation elle-même qui conduise à une topographie satisfaisante. Dans ce cas le réaménagement en cours d'exploitation sera possible et facilitera les opérations de reconstitution du sol de la banquette et de plantation (figure 61).

Les caractéristiques des banquettes influençant sur les potentialités de végétalisation concernent :
- la nature de la roche et en particulier sa fragmentation qui pourra permettre la croissance des racines ;
- l'épaisseur de substrat meuble prospectable par les racines qu'il sera possible de déposer sur la banquette ;

PLANCHE 10 . Importance de l'exposition dans le reboisement de banquettes en roche massive en milieu méditerranéen.



[F11M] Photo Cemagref Delory I. *F11M] Photo Cemagref Delory I.*

Les deux photos présentent des cèdres plantés la même année, en 1991, sur une même banquette, mais dans des conditions d'exposition très différentes. La photo de gauche montre des arbres exposés sud-est, protégés du vent par le front de taille et à l'ombre dans l'après-midi. Ces arbres mesurent 4 m. La photo de droite montre des plants exposés plein sud, en plein mistral et ne bénéficiant d'aucune ombre en journée. Au bout de 8 ans, ils sont nanifiés et mesurent 0,60 m.

- l'exposition au soleil, à la réverbération du front de taille et au vent qui créeront des micro-climats très contrastés au sein d'une même exploitation [F11 M] ;
- le climat local et en particulier le régime hydrique ;
- l'accessibilité de la banquette qui permettra ou non une bonne préparation du sol reconstitué et les entretiens ultérieurs ;
- la largeur de la banquette en fonction de la hauteur de la paroi qui la surplombe ;
- la pente qu'il est possible de donner à la banquette afin de maximiser l'infiltration des précipitations ;
- l'environnement de la carrière à dominante minérale ou boisée qui devra guider dans le choix des espèces adaptées au milieu et permettant une meilleure cicatrisation paysagère.

Les banquettes permettent, quand le réaménagement est bien mené (avec une épaisseur de sol suffisante), une réussite de la végétalisation souvent plus facile avec des arbustes qu'avec des arbres (ou avec des arbres qui auront une croissance limitée).

III - CARACTERISTIQUES DES TALUS

Les talus peuvent provenir de deux origines :
- résulter de l'exploitation d'un croissant morainique de roches meubles [F8 Mo, F14 Mo] ou de matériaux alluvionnaires en haute terrasse ;
- résulter d'un talutage d'un front de taille en roche massive.

Dans ces deux cas, la principale contrainte affectant les talus est leur stabilité, qui dépend principalement de la nature et de la cohésion du matériau et de la pente du talus. Dans une moindre mesure, le régime hydrique interviendra, un talus soumis à des pluies de forte intensité étant plus soumis à un risque d'érosion.

En exploitation de croissant morainique et en haute terrasse alluvionnaire, la pente du talus est réalisée par l'exploitation. Pour une même hauteur de dépôt exploité une pente plus forte permettra l'extraction d'un volume plus important de granulats. Un compromis sera donc à trouver entre le volume exploité et les potentialités de réaménagement dans de bonnes conditions de stabilité.

Ainsi sur un talus de 70 m de haut, exploiter jusqu'à obtenir une pente de 35° (meilleure stabilité) plutôt que 38° a conduit à une perte de matériau exploitable de 85000 m^3 (pour 600000 m^3 exploité) [F14 Mo] mais à un reboisement de qualité qui ne se distingue pas de l'environnement non perturbé (figure 62).

Dans le cas de talutage de gradins par écrêtage par minage, la pente obtenue peut dépendre également d'un compromis entre exploitation et stabilité du talus (figure 63). La pente maximale à établir doit toujours être inférieure à la pente d'équilibre du matériau établie par une étude de mécanique des sols [75].

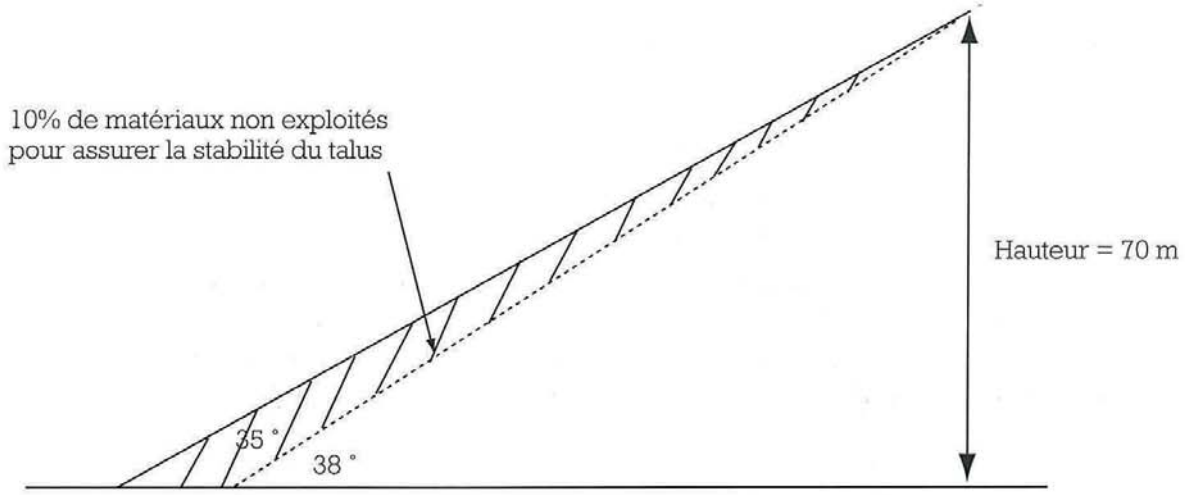


Figure 62 : Réduction de la pente d'un talus et perte en matériau [F14 Mo].

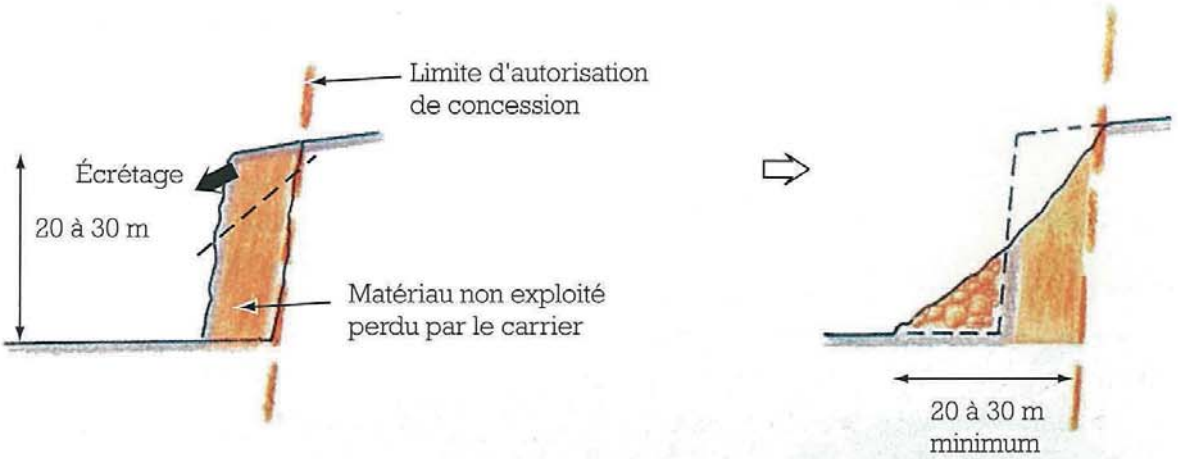


Figure 63 : Ecrétage d'un front de taille engendrant une perte de matériau exploitable [75].

Quand un front de taille se présente comme une succession de gradins et de banquettes au moins aussi larges que la hauteur du gradin qui la surplombe, le minage des gradins permet d'obtenir deux profils de réaménagements (figure 64).

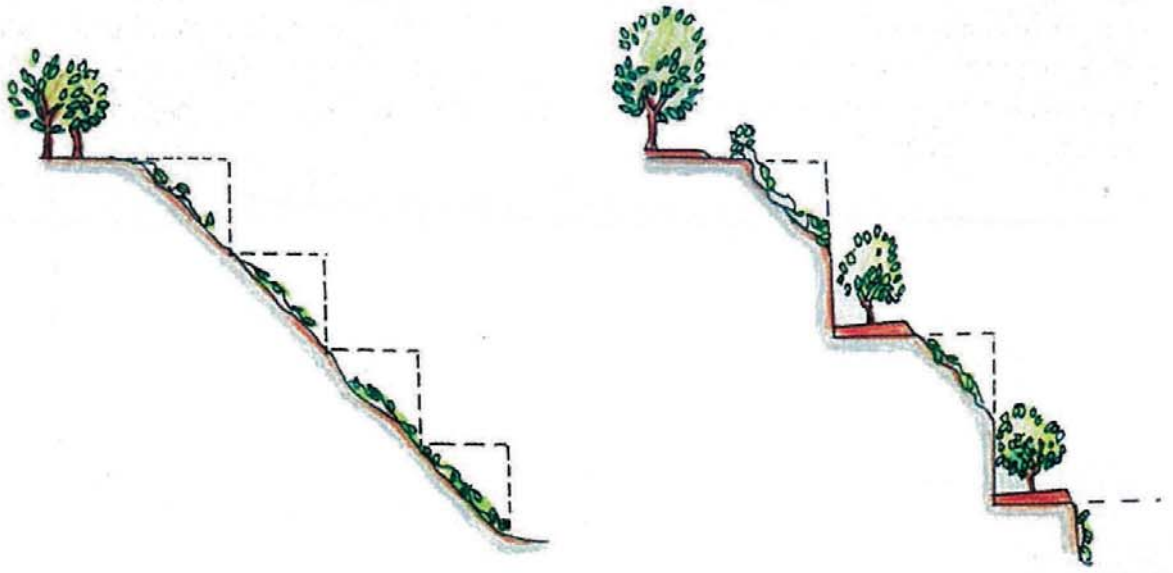


Figure 64 : Profils rectifiés par écrêtage de gradins [75].

Un autre moyen de créer des talus consiste à déverser des stériles depuis le haut du front de taille par déversement (figure 65).

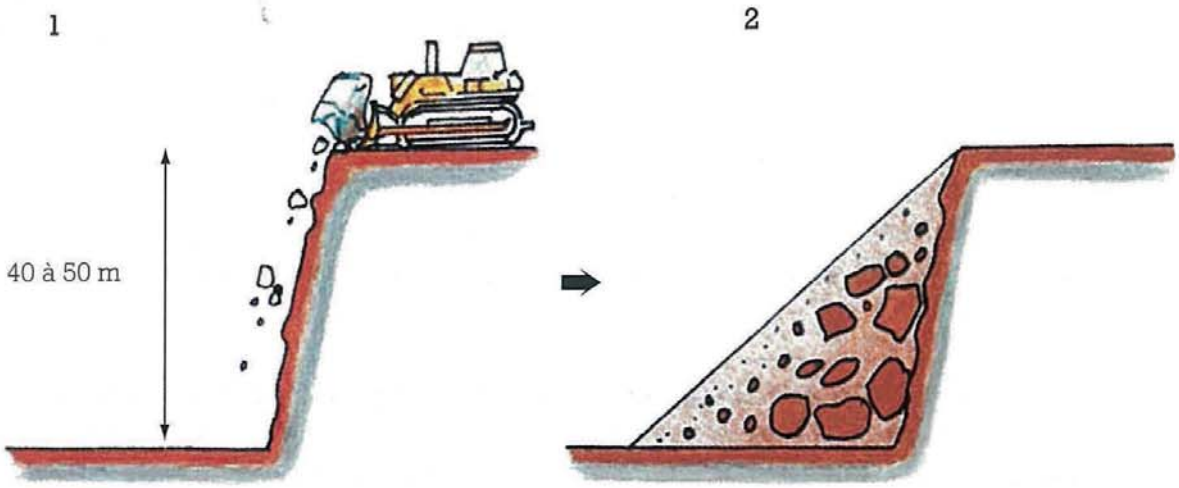


Figure 65 : Talutage depuis le haut par déversement [75].

PLANCHE 11 . Exemple d'un talus reboisé.



[F14Mo] *Photo Cemagref Delory I.*

Talus de 70 m de haut, à pente de 36° issu de l'exploitation d'un croissant morainique. Il a été réaménagé en 1990 avec 1,50 m de stériles de découvertes et de 0,20 à 0,80 m de terre végétale. 12 espèces d'arbres ont été plantées et regroupées en bouquets afin d'éviter des plantations trop rectilignes. Il s'agit de peupliers (plantés à racines nues et mesurant 4 m de haut), de chênes rouges, de sorbiers âgés d'un an. La mise en place des arbres s'est faite à la main (à la barre à mine ou à la pioche) en plaçant 3 ou 4 galets autour du plant pour le tenir droit. Les plantations ont eu lieu en septembre. Le résultat actuel est de très bonne qualité et ne laisse plus deviner qu'il s'agissait d'une exploitation de granulats.

Dans certaines carrières en roche massive la grande quantité de stériles produite permet ce remodelage.

Les principales caractéristiques des talus influençant le succès d'un réaménagement forestier concernent :
- la pente qui conditionne à la fois la stabilité des sols mais aussi les capacités d'installation d'un peuplement forestier stable ;
- l'épaisseur de substrat prospectable par les racines ;
- le bilan hydrique que l'on pourra assurer dans le sol (à la fois en terme d'excédent hydrique afin d'éviter les érosions et les ravinements et en terme d'alimentation en eau suffisante des plants).

De par son mode de mise en place, le substrat du talus n'est généralement pas compacté.

Les talus peuvent présenter des conditions tout à fait favorables à un reboisement parfaitement réussi [F14 Mo].

Les talus, quelle que soit leur origine, présentent généralement des épaisseurs de sol prospectable par les racines importantes. Si la pente du talus n'est pas trop forte (35°) et n'induit pas des phénomènes d'érosion et de ravinements, les talus permettent un boisement de qualité.

IV - CARACTERISTIQUES DES MERLONS

Les merlons sont constitués du dépôt en tas de plus ou moins grande hauteur des terres de découverte ou des stériles d'exploitation. Il sont assez fréquemment mis en place au début de l'exploitation et ils sont boisés afin de constituer des écrans (visuels, phoniques et contre la poussière). Leur mise en place et leur boisement précoce est généralement bénéfique (figure 66) pour les plantations qui seront faites par la suite soit sur le carreau de l'exploitation soit sur un talus en bas de front de taille (ombrage et protection contre le vent).

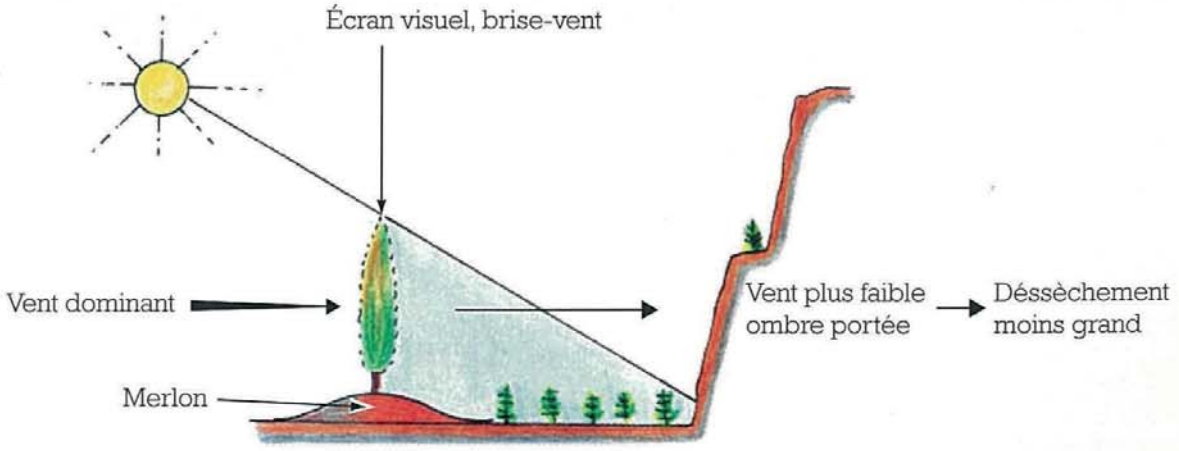


Figure 66 : Effet bénéfique du boisement d'un merlon [75].

Les caractéristiques du merlon influençant le réaménagement sont :
- la nature et l'épaisseur du substrat ;
- l'absence de compaction du sol (et la mise en place des merlons peut être source de compactage) ;
- la réserve utile en eau.

Généralement les boisements écrans sur merlon sont réalisés avec des arbres à croissance rapide (peupliers, robiniers...) et sont de bonne qualité.

Il peut ainsi arriver d'avoir à détruire un peuplement réussi (de 10 m de haut) constitué au début de l'exploitation pour réaménager un autre secteur de la carrière [F8 Mo] avec le stock de terre du merlon.

Les merlons permettent aussi des boisements réussis car l'épaisseur de terre est importante.

Les fronts verticaux ou sub-verticaux ne peuvent pas être boisés. Dans les meilleures conditions (exposition favorable et présence d'une roche fissurée avec de nombreuses anfractuosités) une végétalisation herbacée ou arbustive peut être mise en place. Le traitement des fronts est à réfléchir de manière globale afin de profiter de la fin de l'exploitation pour créer une topographie qui se fonde mieux dans le paysage et n'offre pas de fronts trop hauts ni trop rectilignes.

Les banquettes seront d'autant plus facilement végétalisables qu'elles seront larges et qu'il sera possible d'y installer une épaisseur de substrat importante. L'exposition et les capacités à retenir au maximum des précipitations seront également déterminantes.

Les talus et merlons permettent de réussir des boisements de qualité dans la mesure où leur stabilité est assurée par une pente pas trop forte (35°). L'épaisseur importante de sol de ces profils permet en effet un bon enracinement et une bonne alimentation hydrique des plants.

CHAPITRE 10

METHODE DE REMISE EN ETAT DES SOLS

Encore plus que pour les autres types de carrières, les carrières de roches massives exploitées à flanc de coteau sont à chaque fois des cas particuliers.

I - PREPARATION DE LA REMISE EN ETAT

A - LES CARRIERES DE ROCHE MASSIVE A FLANC DE COTEAU

Nous avons précisé dans le chapitre 9, l'intérêt (tant pour l'intégration paysagère de la carrière réaménagée que pour les chances de réussite du boisement), de modeler le profil du front de taille afin de ne pas conserver des gradins réguliers séparés par des banquettes étroites. Au contraire, plus le profil est irrégulier et varié, plus il y aura des conditions variées pour l'installation des plants. Les profondeurs de sol seront variables ainsi que les micro expositions (un talus peut créer un ombrage bénéfique sur la banquette). Cette pratique commence à se répandre en zone méditerranéenne [F7 M, F12 M]. En Grande-Bretagne [49, 55] une politique de recréation de topographie en accord avec des falaises naturelles est proposée (restoration blasting : restauration à l'explosif).

1 - PRÉPARATION DE LA TOPOGRAPHIE DÉFINITIVE

Le moyen le moins onéreux de préparer une topographie satisfaisante pour le réaménagement, est de la créer pendant l'exploitation en choisissant de ne pas constituer des gradins rectilignes mais en créant des zones d'éboulement et des gradins de hauteur variable [F7 M]. Si cela n'est pas possible, c'est les derniers tirs d'exploitation qui devront remodeler le front de taille.

En région méditerranéenne, il est préférable de créer des banquettes larges légèrement pentues (2 à 4 %) vers le front de taille (banquette en dévers amont) afin de favoriser la rétention des eaux de pluie et de faciliter la reconstitution du sol.

Le déversement de stériles ou de terre de découverte depuis le haut du front de taille afin de créer des zones de talus ou d'éboulis peut permettre de « salir » le front de taille et de réduire son impact visuel [F7 M, F9 M]. L'accrochage de substrat dans les anfractuosités de la paroi peut également favoriser leur colonisation naturelle par des végétaux de falaises ou de vieux murs.

Afin de taluter le front de taille avec une pente inférieure à 45° (pente maximum pour assurer la stabilité d'un substrat bien cohérent) il est nécessaire qu'au départ la largeur des banquettes soit supérieure à la hauteur du gradin.

En Grande-Bretagne, en adéquation avec la forme des falaises naturelles, la restauration à l'explosif a pour but de réduire la hauteur apparente du front de taille, en créant à l'explosif, des éboulis et d'indenter la ligne de crête du front de taille afin d'obtenir un profil plus proche d'une falaise naturelle [49]. Les éboulis créés vont couvrir certains secteurs du front de taille avec des hauteurs variables (au maximum les 2/3 du front de taille sont masqués par un éboulis), ceci en outre a pour avantage de réduire les surfaces verticales productrices de chutes de pierre.

PLANCHE 12 . Exemple de banquettes difficiles à réaménager en climat méditerranéen.



[F2M] *Photo Cemagref Delory I*

Banquette réaménagée en 1990, peu de plants ont survécu. L'exposition sud, le manque de terre et d'eau, l'exposition au vent sont des conditions extrêmes pour des plantations d'espèces arborées issues de pépinières. Une colonisation naturelle par des espèces de garrigue a eu lieu. Utiliser de telles espèces peut être une piste intéressante à expérimenter.



[F7M] *Photo Cemagref Delory I*

Le talutage des banquettes peut être une très bonne solution pour casser l'effet d'escalier créé par une exploitation en roche massive. Les banquettes sont explosées à certains endroits, puis talutées. Ainsi, des épaisseurs supérieures de stériles peuvent être obtenues dans certaines zones d'éboulement.

Les angles variés obtenus par ces différents amoncellement contrastent et s'intègrent mieux qu'un front de taille rectiligne[145] issu d'une exploitation classique. L'indentation de la ligne de crête par des entailles semi-circulaires permet d'imiter les cônes naturels d'effondrement existant sur des falaises calcaires.

2 - PRÉPARATION DES BANQUETTES

Le soubassement de la banquette est constitué de roche brute généralement compacte, un rippage permet de décompacter et de fissurer la roche [TPG 11]. Dans d'autres cas, avec des roches calcaires très dures un pétardage ou un défoncage au brise-roche s'avère nécessaire. En région méditerranéenne, si le profil de la banquette n'est pas en dévers, un nivellement permettra de créer cette légère pente (figure 67).

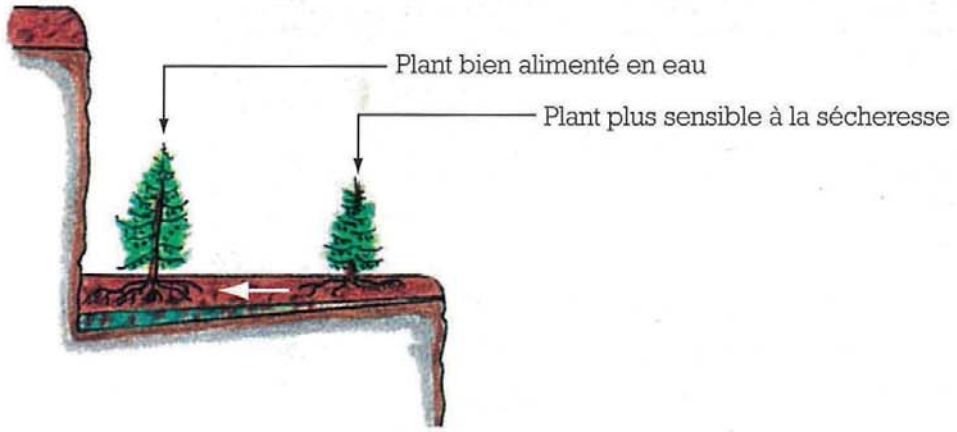


Figure 67 : Banquette en léger dévers amont [75]

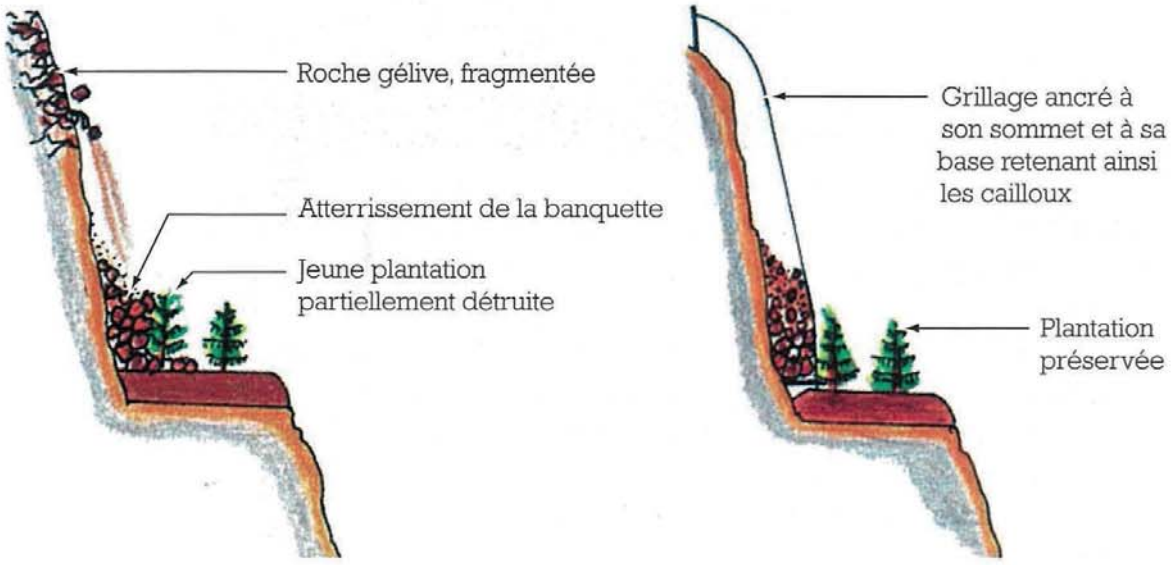
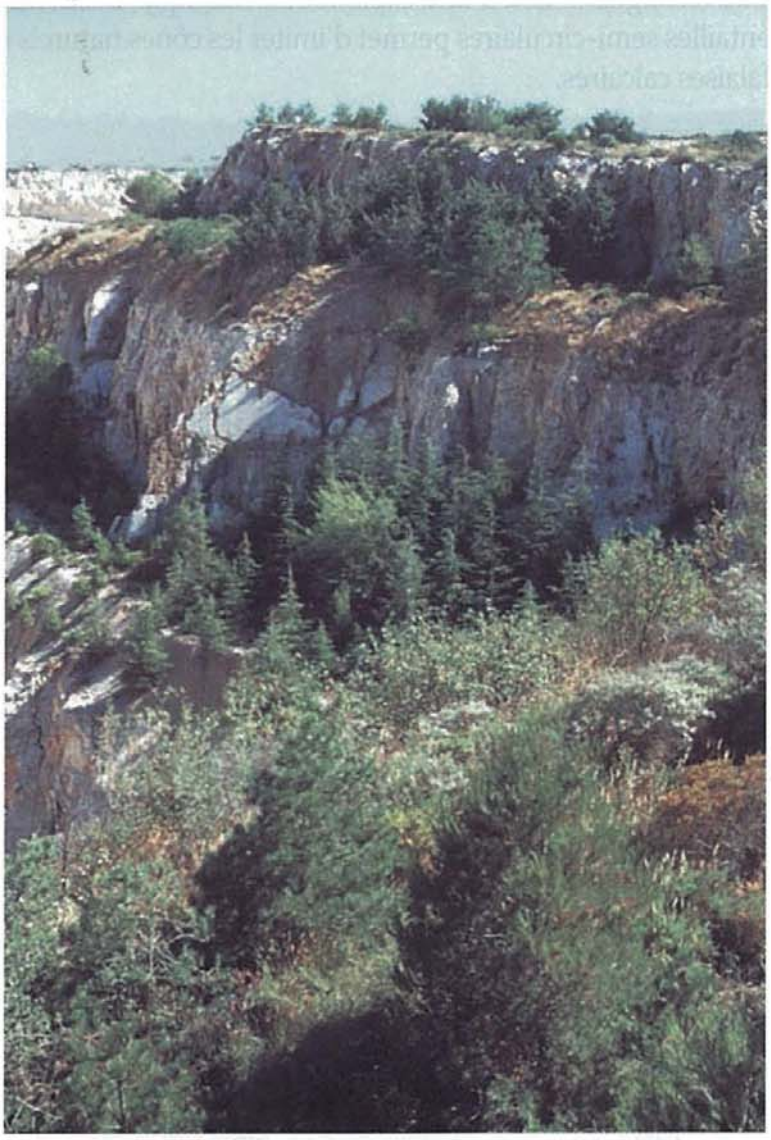


Figure 68 : Protection contre les chutes de pierre du front de taille [75].

145 Ceci dépend cependant de l'aspect naturel des falaises dans le secteur concerné, dans certaines régions françaises, un front de taille rectiligne sera plus en accord avec le paysage naturel.

PLANCHE 13 . Un réaménagement de qualité d'un front de taille.



[F2M] *Photo Cemagref Delory I*

L'exposition favorable de ce front de taille a favorisé la reprise et le développement des plants. La hauteur pas trop importante des fronts de taille permet leur masquage par les résineux mis en place.

Quand le climat est au contraire pluvieux, une tranchée amont au pied du gradin permet d'évacuer les eaux excédentaires vers un exutoire et sert de piège à cailloux afin de protéger les plants des chutes de pierres provenant du gradin [TPG 10]. Dans certains cas de front de taille dans une roche gélive ou fragmentée, les chutes de bloc peuvent détruire les plants installés sur la banquette en contrebas. Un grillage ancré en haut et en bas du gradin (figure 68) peut à la fois stocker les cailloux, donc protéger les plants et servir de tuteur pour des plantes grimpantes.

Un petit merlon doit être créé sur la partie de la banquette[146] bordant le vide afin de permettre de déposer une épaisseur suffisante de substrat et de terre sur la banquette (figure 69).

146 Possible si la banquette fait plus de 6 m de large.



Figure 69 : Banquette en préparation avec merlon aval et tranchée amont [TPG 11].

Car l'un des problèmes fréquemment rencontré est l'éboulement des banquettes et l'érosion des terres remises [F7 M].

Ce merlon empêche en effet les éboulements de terre en contrebas de la banquette. Il permet en outre un travail sur la banquette dans de meilleures conditions de sécurité.

Le modelage des banquettes avant la fin de l'exploitation permet de créer des topographies en accord avec le paysage environnant et des conditions d'exposition et de profondeur de sol variées. Sur les banquettes horizontales, la roche doit être fissurée et une épaisseur suffisante de sol doit être déposée afin de créer des conditions favorables pour la croissance des plantations.

B - LES TALUS ET MERLONS

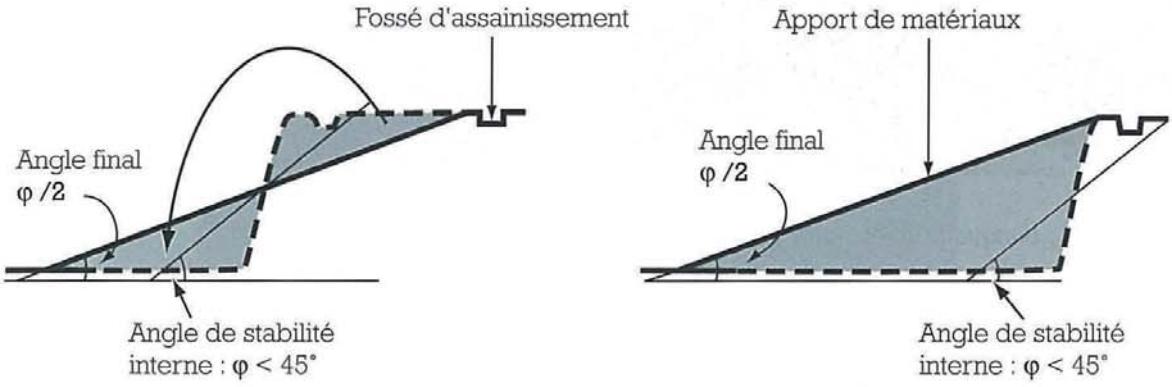
Le principal facteur d'échec de végétalisation de talus ou de merlon est leur manque de stabilité :
- stabilité de masse insuffisante qui provoque soit des arrachements de grandes loupes de terre (fréquemment observé sur les talus autoroutiers), soit des ravinements importants ;
- stabilité de surface engendrant l'érosion superficielle de l'horizon organo-minéral mis en place.

1 - PENTE DES TALUS ET MERLONS

En fonction de la nature des matériaux, une évaluation ou mieux une mesure de l'angle d'équilibre interne du matériau doit être faite afin de définir quelle sera la pente retenue. Cette pente doit toujours être inférieure à cet angle d'équilibre interne qui assure en théorie la stabilité de masse du talus. Cependant la végétalisation impose aussi qu'une stabilité superficielle soit possible et en particulier que la terre végétale puisse « s'accrocher » sur le substrat. Il est donc recommandé [TPG 2] d'atteindre un angle inférieur à la moitié de l'angle d'équilibre interne (figure 70).

Au Canada [90] en fonction des conditions climatiques, les talus ont des pentes comprises entre 18° et 26° : 26° est la pente maximum pour une stabilité à long terme et 18° est la pente maximum pour l'érosion. En Grande-Bretagne [71], la boue calcaire extraite du tunnel sous la Manche a été modelée avec une pente de 32°. En Italie [95] des pentes de 40° sont courantes.

En dessous de 35°, il y a peu de problèmes de stabilité de talus mais au-delà, des arrachements peuvent se produire.



Talutage par équilibre déblais-remblais *talutage par apport de remblais*

Figure 70 : Talutage pour atteindre un angle de la moitié de l'angle d'équilibre interne [TPG 2].

Dans les cas où le talus est constitué de stériles à fort taux de cailloux, l'érosion produira des dommages importants aux plants installés : déchaussement des plants, chocs des cailloux produisant des traumatismes physiques sur les plants (blessures de l'écorce, bris de plant), voire un enfouissement sous les pierres. Ainsi, sur un talus calcaire [48] où l'ONF a tenté une végétalisation sur substrat brut avec des aulnes plantés sur des banquettes créées dans la pente, plus de la moitié des plants ont été déracinés ou enfouis.

Afin d'améliorer la tenue de la terre végétale sur la pente (35°), un modelage a été fait en cours d'exploitation [F14 Mo] par paliers de 2,5 m de haut. Chaque petite banquette ainsi créée est remplie de terre végétale (figure 71). Si la couche de terre végétale avait été disposée directement sur une pente régulière, à la première précipitation elle aurait été en partie érodée.

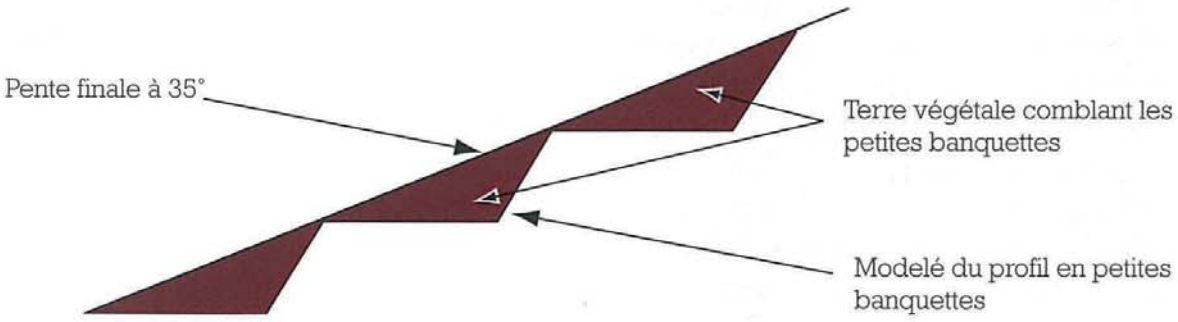
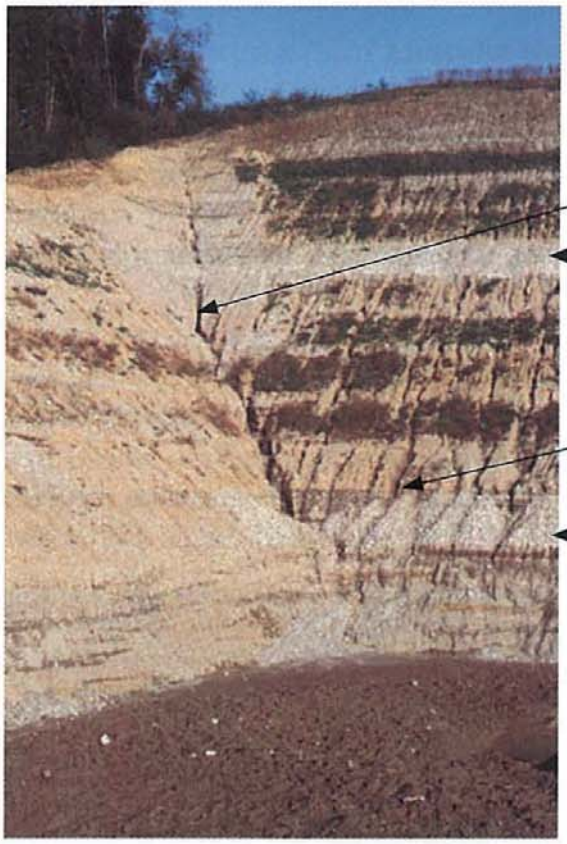


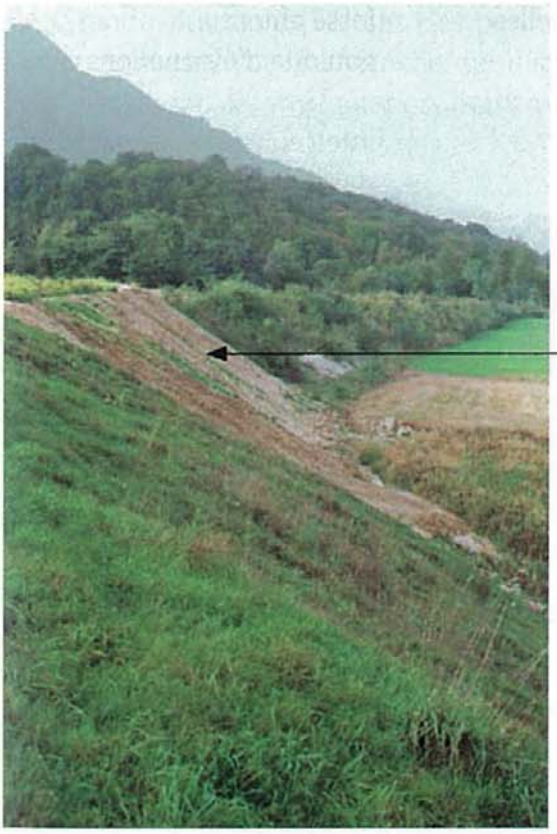
Figure 71 : Modelé du profil du talus et comblement par de la terre végétale.

PLANCHE 14 . Problèmes d'érosion sur des talus à pente trop forte.



Talus de 40° en cours de réaménagement. Sur la photo, des drains de galets sont bien visibles. Ils devraient permettre de limiter l'érosion en créant des zones d'infiltration d'eau. Cependant, entre juillet et octobre 1999, des ravinements ont eu lieu en raison de l'absence d'une couverture végétale suffisante.

[F8Mo] *Photo Cemagref Delory I*



Glissement de terrain sur une pente à 40° dont la végétalisation était pourtant correcte.

[F8Mo] *Photo Cemagref Delory I*

La planche 14 [F8 Mo] montre des talus en croissant morainique de pente à 40° qui ont fait l'objet entre juillet 1999 et octobre 1999 :
- de ravinement en absence de couverture végétale suffisante ;
- de glissement de terrain en présence d'une végétalisation correcte.

2 - ACTIONS POUR STABILISER LES PENTES

Pour stabiliser les pentes et les talus et éviter les ravinements et l'érosion, il faut agir sur plusieurs facteurs :
- diminuer l'érodabilité des sols superficiels dans leur masse ;
- protéger les surfaces avec des couverts végétaux ou des matériaux inertes ;
- maîtriser les eaux superficielles.

Les principales dispositions à prendre pour assurer la stabilité des talus de roches meubles ou de stériles sont indiquées figure 72.

Pour assurer	Conditions à respecter		Remarques et recommandations
la stabilité « en masse »	pente de talus inférieure à la pente d'équilibre du matériau		application classique des lois de la mécanique des sols
	éliminer les eaux	souterraines	drainage (tranchée, butée drainante)
		superficielles	fossé amont, goulotte d'évacuation
la stabilité « superficielle »	empêcher l'entraînement par l'eau des particules de sol		interception des eaux de ruissellement amont : fossé amont, goulotte d'évacuation, rigoles... réalisation de banquettes (terrassées, grillagées...) revégétalisation (avec ou sans mulch)

Figure 72 : Dispositions pour assurer une stabilité des talus [TPG 2].

En France [59], les principales études sur les stabilisations de talus concernent les talus routiers ou d'emprise ferroviaire, donc avec des contraintes plus fortes (en terme de sécurité et de maîtrise de l'érosion) mais avec aussi des moyens financiers beaucoup plus importants que dans le réaménagement de carrière. Cependant, les solutions utilisées en talus routiers méritent d'être citées, elles peuvent dans certains cas s'appliquer pour des secteurs particulièrement sensibles de carrières.

Le laboratoire central des Ponts et Chaussée (annexe 9) propose ainsi :

* *POUR DIMINUER L'ÉRODABILITÉ DES SOLS SUPERFICIELS DANS LEUR MASSE :*
- d'utiliser des amendements organiques : lisiers, fumiers, engrais verts, empaillage (mulch), déchets végétaux et composts, boues de station d'épuration ;
- d'utiliser des amendements minéraux pour augmenter le pH : chaux vive éteinte, marne, calcaire broyé ;
- de compacter les bords du remblai.

* *DE PROTÉGER LES SURFACES AVEC DES COUVERTS VÉGÉTAUX :*
- de mettre en place des engazonnements : une graminée à 100% de recouvrement du sol permet de limiter considérablement les eaux de ruissellement ;
- de planter des ligneux, éventuellement en utilisant des paillassonnages de branches (qui dans un premier temps protègent mécaniquement le sol et sont ensuite colonisés par la végétation) ou des fascines de boutures de saule qui prendront racines.

* *DE PROTÉGER LES SURFACES AVEC DES MATÉRIAUX INERTES :*
- avec des protection légères végétalisables : mulch, broussailles broyées, filets de jute, géotextiles, paillages plastiques, grillages.

* *DE MAÎTRISER LES EAUX SUPERFICIELLES :*
- en filtrant les ruissellements ;
- en évacuant les eaux collectées : par des fossés, par un collecteur spécial éventuellement placé sur le talus à un endroit sensible.

En Grande-Bretagne [71] sur des pentes de 20 à 32° créées avec les boues calcaires issues du tunnel sous la Manche, un dispositif expérimental a comparé l'efficacité pour l'établissement de la végétation herbacée de 8 matériaux naturels et synthétiques de protection de pente[147].

Les résultats de l'expérimentation montrent que 4 mois après le semis :
- sur pente non stabilisée et non fertilisée le taux de recouvrement par la végétation n'est que de 7% ;
- sur pente non stabilisée et fertilisée, il est de 25 %
- sur pente stabilisée quel que soit le traitement, il est au moins de 50 % ;
- la toile de jute, le paillage et les traitements « géomat » et « géocell » présentent les meilleurs taux de recouvrement herbacé.
La contribution de la végétation à la stabilité est plus importante pour la toile de jute et la paille qui se dégradent naturellement en quelques mois après l'établissement de la végétation.

En Italie [95] sur une pente d'argile de 40° les traitements testés[148] mettent en évidence (figure 73) au bout de trois ans :
- l'intérêt d'un mulch de paille et de goudron ;

147 Détails sur les matériaux et les espèces semées en annexe 10.
148 Détail sur les traitements et les espèces semées en annexe 11.

- la bonne efficacité d'une toile de jute placée après un labour à 5 cm de profondeur, que le semis soit fait à la main ou par hydroseeding ;
- au bout de trois ans, les traitements sans stabilisation du talus montrent des taux de couverture du sol bien inférieurs. En outre, le haut de pente est à nu et seul le bas de pente présente un taux de recouvrement de 20 % ce qui montre que les graines ont été entraînées vers le bas par l'érosion.

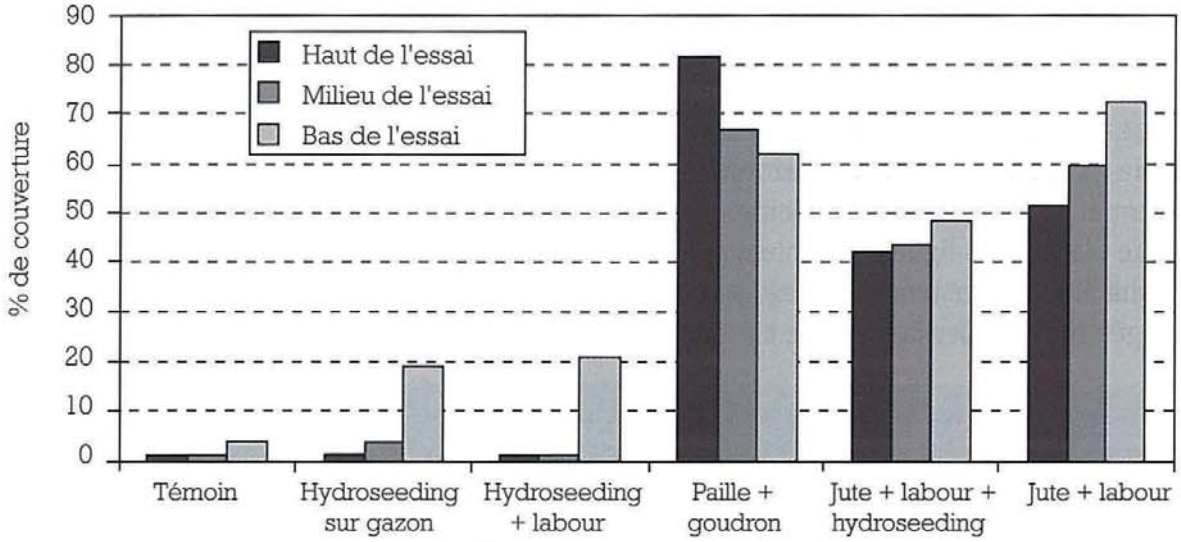


Figure 73 : Variation du taux de recouvrement 3 ans après le semis [95].

Les matériaux tels les toiles de jute ou les géotextiles sont fréquemment utilisés dans les revégétalisation de pentes importantes (talus routier, piste de ski, berge de canal...) avec une très bonne efficacité.

Piste de recherche

En réaménagement de talus en carrières, il faudrait évaluer sur plusieurs années, le coût et la réussite en terme de couverture du sol et de croissance des plants d'une végétalisation sans traitement de stabilisation et avec traitement de stabilisation : toile de jute, fibre de coco, géotextile.

3 - DRAINAGE

Il a pour but de limiter les ruissellements superficiels et les circulations d'eaux souterraines afin d'éviter l'érosion de la terre végétale, la création de ravinement ou la formation de loupes d'arrachement et de glissement de terrain.

En carrière, assez souvent, un fossé d'assainissement est creusé en tête de talus afin de canaliser les eaux arrivant en haut du front de taille (figure 74). Ce fossé doit diriger les eaux vers un exutoire permettant leur évacuation hors de la carrière ou éventuellement, en zone méditerranéenne, les diriger vers un bassin de stockage[149] pouvant servir de réserve pour l'irrigation.

149 Non pratiqué pour l'instant en carrière de granulats mais, en reboisements de terril (Baux-de-Provence) ou de carrière de calcaire pour cimenterie (Septeme-le-Vicat) [75].

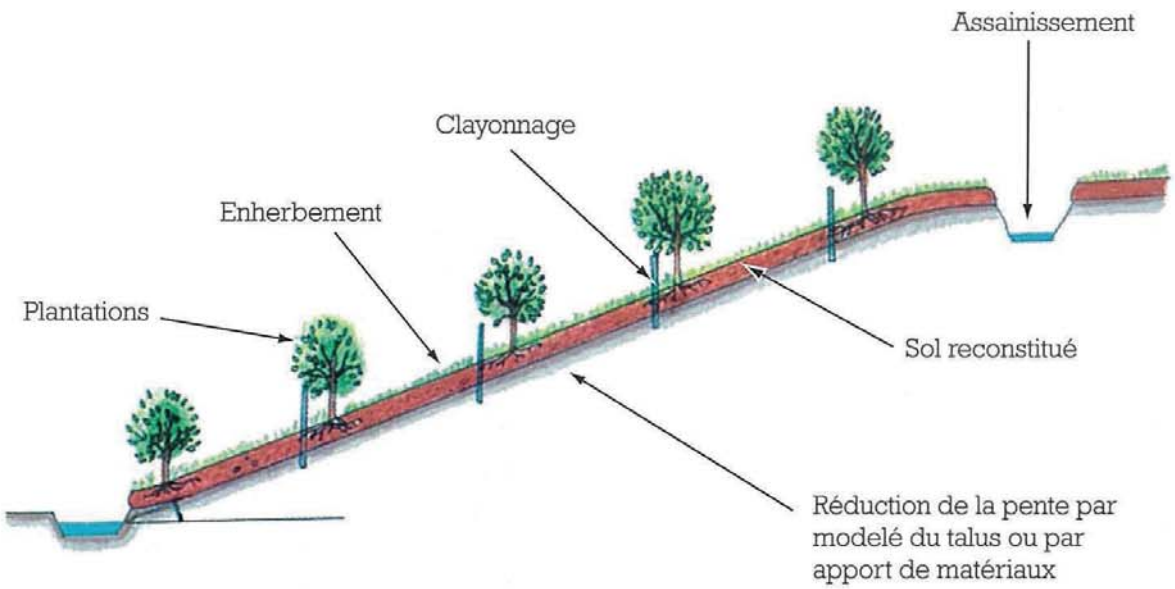


Figure 74 : Fossé d'assainissement en tête de talus [TPG 2].

Des drains de galets ou de graviers peuvent être disposés en bande à espacement régulier tout le long de la pente (70 m de dénivelée totale) afin de permettre l'infiltration des eaux de pluie et de ruissellement [F8 Mo, F14 Mo]. Ces drains sont placés dans des petites banquettes de 2,5 m en alternance avec la terre végétale (figure 75). Ainsi, pour le talus de Sonnaz [F14 Mo], 5000 tonnes de galets ont été utilisées.

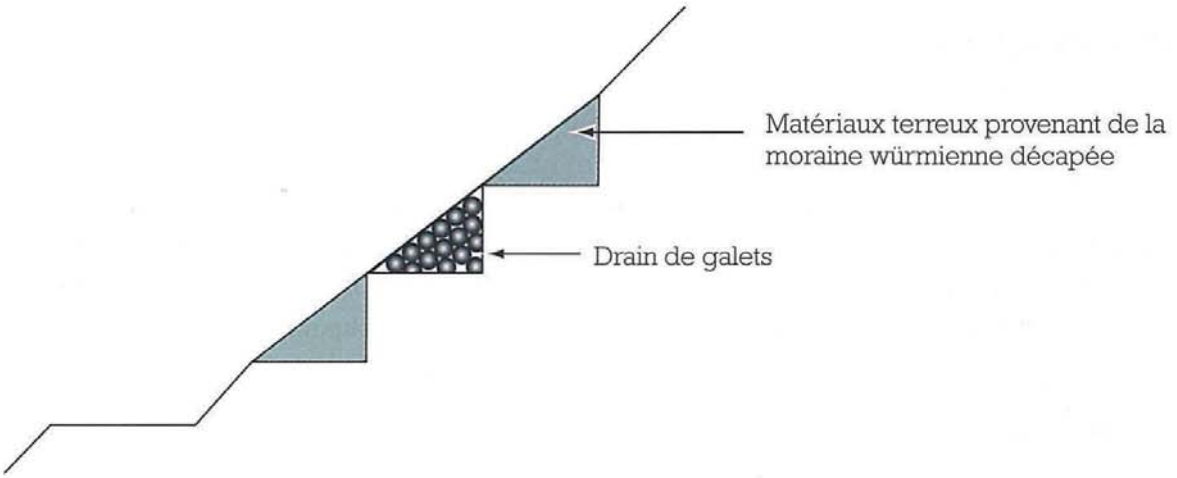


Figure 75 : Réalisation des drains en galets à flanc de pente [F14 Mo].

Cependant, un autre talus réaménagé de manière analogue [F8 Mo] avec des drains de galets mais non encore végétalisé, a subi des phénomènes d'érosion lors des pluies de la fin de l'été 1999 (planche 14). Une couverture végétale rapide du sol est donc nécessaire afin que l'efficacité des drains puisse s'exercer.

Sur talus, le drainage et le recouvrement rapide du sol (par la végétation ou par la végétation sur un support de stabilisation) sont les conditions essentielles de la maîtrise de l'érosion et donc, en retour, de la réussite d'un réaménagement forestier à long terme.

II - QUALITE ET QUANTITE DES MATERIAUX

1 - CHOIX DES MATÉRIAUX

Nous ne reviendrons pas en détail sur les types de matériaux utilisables, ce point a été développé dans le chapitre 5. Nous soulignerons simplement les particularités des réaménagements de banquettes, talus et merlons.

En zone méditerranéenne, la couche organo-minérale du sol sous la garrigue qui occupait souvent l'emplacement de l'exploitation, est généralement très mince. L'une des principales contraintes sera alors de réussir à reconstituer une couche suffisamment épaisse de sol meuble, à richesse organique et réserve en eau suffisantes pour supporter la croissance de végétaux ligneux. Le besoin en eau est le point le plus crucial car les apports climatiques sont faibles, mal répartis dans l'année, souvent sous forme d'orages qui ne permettent pas une bonne infiltration. L'évapotranspiration est intense en été. Dans les carrières, selon l'exposition et la nature du front de taille, l'évapotranspiration peut encore être exacerbée par rapport au milieu environnant.

Selon la nature de l'exploitation, les volumes de stériles peuvent être importants (parfois stockés sous forme de terrils de grande taille) et permettent un apport de sol meuble de 1 m à 1,5 m d'épaisseur. Ces stériles seuls n'ont pas de réserve utile potentielle ni de fertilité permettant la croissance d'arbres[150], ils doivent être améliorés par des apports de fines de décantation et de matière organique pour reconstituer un sol acceptable.

Encore plus que dans les autres carrières, les fines de décantation, quand la carrière en produit, doivent être incorporées aux stériles afin d'améliorer leur réserve en eau potentielle. A Lepuix-Gy [TPG 10] une parcelle d'essai a été reconstituée avec 0,30 m de fines de décantation en sous-couche sur la banquette. Le bilan à court terme de cette technique (après 4 ans) montre une bonne survie des plants liée à une réserve en eau supérieure au sol reconstitué sans fines pendant les périodes de sécheresse. Cependant, les plants ne sont pas en très bonne santé, les aiguilles des résineux sont jaunâtres ce qui traduit un engorgement par temps pluvieux.

Piste de recherche

Tester en zone méditerranéenne et sous d'autres climats les différentes techniques d'incorporation des fines pour reconstituer un sol à meilleure réserve en eau.

2 - EPAISSEUR DE MATÉRIAUX

La principale difficulté dans le réaménagement des banquettes est de pouvoir y installer une épaisseur suffisante de sol. Trop souvent dans le passé, des plants ont été mis en place sur des banquettes de roche massive recouvertes d'une couche trop mince de sol meuble (0,50 m [TPG

150 Nous verrons cependant dans le chapitre 11 que l'amélioration biologique (plantes fixatrices d'azote associées à des plants mycorhizés) est une voie à expérimenter pour la revégétalisation sur sol brut.

10], 0,60 m [TPG 12], 0,80 m [TPG 11]). Les plants peuvent, dans ces conditions, se développer pendant une dizaine d'années, tant que leurs racines prospectent le sol meuble et dépérir brusquement quand leurs racines atteignent la roche non fissurée. L'expérimentation menée à Lepuix-Gy [TPG 10] avec des épaisseurs de sol de 1 m et 1,5 m n'a malheureusement pas pu être évaluée en raison de l'effondrement de la partie de la banquette portant ces essais.

Dans les sites visités, les stériles (provenant du carreau de l'exploitation, des produits de précriblage ou venant de l'extérieur) sont utilisés en couche de 0,80 à 1 m [F2 M, F5 M, F7 M, F12 M].

Les talus et les merlons ne présentent généralement pas de problème d'épaisseur de sol prospectable par les racines. En effet, les talus issus de l'exploitation de croissant morainique ou d'alluvions en haute terrasse sont constitués de sables et de graviers meubles et généralement le dépôt peut être couvert d'une couche épaisse de matériaux de découverte. Par exemple, à Sonnaz [F14 Mo], les 15 m de terre de découverte ôtés du sommet du gisement (épais de 55 m), permettent de remplir les petites banquettes du profil avec cette terre de découverte. Pour les talus produits par l'éboulement des gradins ou des banquettes, il convient d'essayer de disposer les matériaux du plus grossier en bas de talus au plus meuble en surface (figure 76).

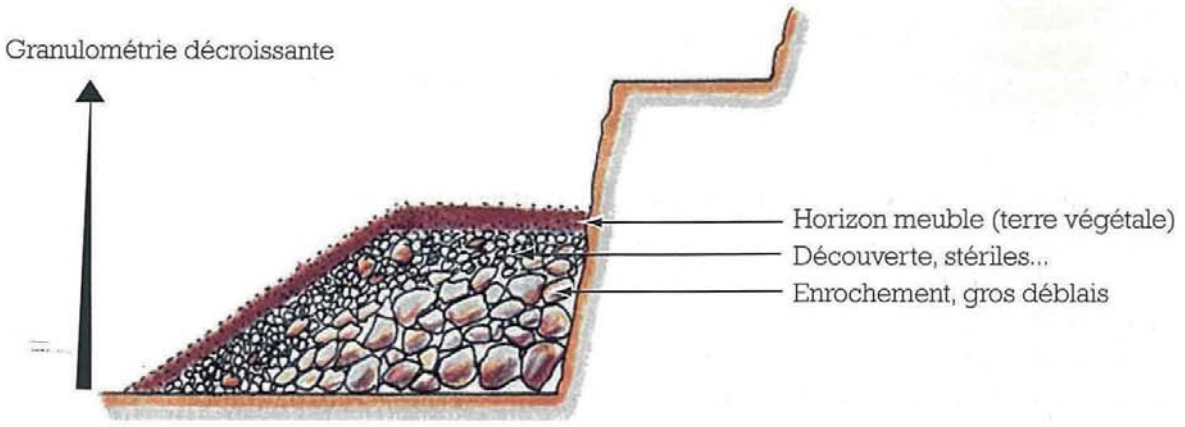


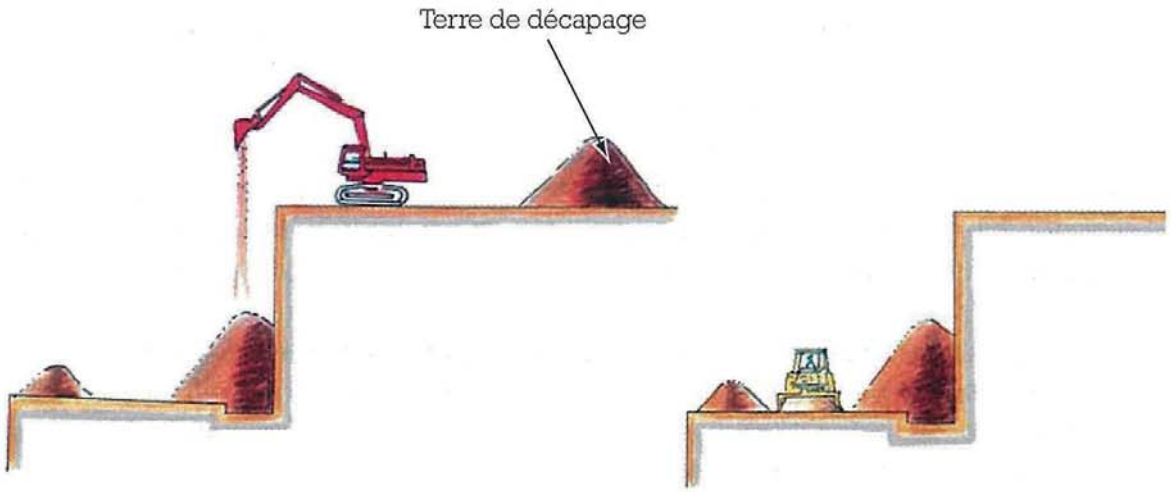
Figure 76 : Composition granulométrique optimale d'un talus en pied de front de taille [75].

Sur les banquettes et en particulier dans la zone méditerranéenne, le principal facteur limitant la reconstitution des sols est la faible épaisseur de sol disponible alors que les besoins en réserve en eau sont très importants et nécessiteraient une grande épaisseur de sol prospectable par les racines. L'incorporation de fines de décantation permet à la fois d'augmenter l'épaisseur du sol et sa réserve en eau.

III - MISE EN PLACE ET ASSAINISSEMENT DES MATERIAUX

L'exiguïté des banquettes gêne fréquemment l'utilisation des engins pouvant déposer le sol et peut entraîner des phénomènes de compaction qui seront difficiles à supprimer. Le déversement des différentes couches de matériaux depuis le haut du front de taille

[F7 M, TPG 11] permet d'éviter la circulation de camions sur pneus sur la banquette. Une pelle mécanique sur chenille ou un chargeur installé sur la banquette peut alors étaler le substrat (figure 77).



Déversement de la terre par le haut *Régalage des terres déversées*

Figure 77 : Déversement gravitaire [TPG 10].

Le réaménagement pendant que l'exploitation se poursuit (figure 61) permet également de reconstituer le sol dans de bonnes conditions.

Toutes les conditions de non compactage de sol décrites dans le chapitre 5 doivent être appliquées en reconstitution de sol sur les banquettes (manipulation de la terre en condition sèche, engins adaptés...). Si un compactage des couches a pu se produire, un rippage de chaque couche est nécessaire.

Sur les talus morainiques et les alluvions de haute terrasse, l'exploitation du granulat et la mise en place de la couche organo-minérale se fait à la pelle mécanique sans aucune compaction.

L'horizon le plus humifère doit être déposé en dernier en évitant également tout compactage.

Les opérations de modelage du front de taille afin de briser la régularité de banquettes et de gradins sont lourdes et elles doivent être faites lors des derniers tirs d'exploitation afin de ne pas être trop coûteuses. Ce modelage permet d'améliorer les conditions de réaménagement par végétalisation et boisement en augmentant les épaisseurs de substrat disponible et en variant les expositions.

En zone méditerranéenne, les conditions très sèches du climat devront conduire à essayer d'augmenter la réserve utile des sols (par la pente dévers des banquettes, par l'incorporation de fines).

AMÉLIORATION DU SUBSTRAT

Pour les talus et merlons, le point principal à traiter avec soin est la stabilité de l'ensemble du talus et de la couche superficielle déposée dessus : pente pas trop forte, drainage pour diminuer les infiltrations d'eau et utilisation éventuelle de traitements de stabilisation (toile de jute, toile de coco, paillage ou géotextiles). Il est indispensable d'installer très rapidement un couvert végétal afin de limiter les phénomènes d'érosion.

Sur les banquettes, une épaisseur de sol suffisante doit être mise en place (au moins 1 m) derrière un merlon aval qui empêche les éboulements de terre. La mise en place par déversement gravitaire depuis le haut de la carrière ou pendant l'exploitation permet de limiter les compactions du substrat.

CHAPITRE 11

AMELIORATION DU SUBSTRAT

Nous avons indiqué dans le chapitre 6 que les amendements organiques avaient surtout un intérêt en carrière de roche massive en zone méditerranéenne. Cependant, les voies biologiques d'amélioration des sols (chapitre 6) sont elles aussi, d'une grande importance pour le réaménagement des banquettes, talus et merlons.

I - L'AMELIORATION BIOLOGIQUE DES SOLS

Les éléments de référence sur ce paragraphe figurent dans le chapitre 6, nous évoquerons ici les points particuliers se rapportant aux banquettes, talus et melons.

1 - LES ENGRAIS VERTS

Sur les talus et merlons, pour lutter contre l'érosion, une couverture rapide du sol par de la végétation herbacée est souhaitable afin de limiter les ruissellements d'eau. En outre, les racines vont stabiliser et structurer le sol. Il peut donc être intéressant de semer ou d'installer juste après la reconstitution des sols, une couverture herbacée appropriée : en particulier un mélange de graminées et de légumineuses fixatrices d'azote qui amélioreront le sol et faciliteront la croissance future des plants (figure 42).

Dans le contexte climatique méditerranéen, il faut préférer :
- des légumineuses inoculées qui auront une meilleure efficacité sur des sols pauvres et secs ;
- des plantes qui couvrent bien le sol ;
- des plantes qui ne laissent pas en été de résidus secs (hampes florales ou feuillage séché) trop importants en raison des risques d'incendie ;
- des plantes qui ne sont pas appétentes pour les lapins entre autre.

L'une des difficultés de l'organisation d'une opération de reconstitution des sols et de reboisement, est la concordance entre les différentes phases aux exigences parfois contradictoires :
- reconstituer le sol doit se faire en conditions sèches ;
- planter doit se faire sur un sol qui a pu accumuler une réserve en eau ;
- entre la reconstitution du sol et la plantation il faut laisser le sol se tasser, mais si le sol est nu l'érosion peut être préjudiciable.

Mettre en place pendant quelques mois une couverture herbacée peut permettre de faciliter l'organisation d'un chantier de reboisement en étant moins soumis aux aléas climatiques. De plus, ce recouvrement herbacé dense pourra faire obstacle à l'installation de plantes invasives[151] à fortes capacités colonisatrices.

151 On appelle plantes invasives, des plantes exotiques introduites en France (volontairement pour les jardins ou involontairement) et qui connaissent en France une très grande explosion démographique souvent au détriment de la flore locale : en zone méditerranéenne, on trouve le séneçon du Cap, le buddléia. Les terres remaniées et les sols nus sont des milieux très favorables au développement et à l'extension de ces espèces.

Cette pratique n'est pas encore très répandue en France, elle a été testée par M. Cleyet-Marel dans la carrière de Poussan (près de Sète) sur des stériles bruts : la mise en place pendant plusieurs années d'un tapis de légumineuses devant permettre soit la meilleure reprise des plants installés en même temps, soit la mise en place ultérieure de plants dans un milieu qui sera plus riche. Sur un autre site, une mise en place conjointe de légumineuses inoculées arborescentes et de plants forestiers (certains fixateurs d'azote et d'autres non) donne également de bons résultats.

Les plantes utilisées dans ces conditions sont des légumineuses couvrantes permettant de limiter l'érosion et l'arrivée d'espèces invasives :
- *Astragalus monspessulanus* : plante qui s'étend sur le sol en larges rosettes ;
- *Coronilla glauca, Coronilla minima* : plantes couvrantes pas ou peu mangées par les lapins, bonne capacité de resemis ;
- *Dorycnium pentaphyllum* : plante mellifère de la garrigue, lente à pousser mais persistante ;
- *Dorycnium hirsutum* : plante couvre sol qui favorise la microflore et microfaune du sol ;
- *Medicago arborea* : luzerne arborescente, forme un arbuste de 2 m de haut et se resème facilement ;
- *Medicago sp.* : les luzernes annuelles germent en automne et font une couverture du sol importante en hiver et au printemps. Elles forment des gousses et disparaissent avant l'été, elles n'occasionnent donc pas de concurrence pour l'eau en été. Leurs graines à dureté et à période de germination différentes augmentent les chances de resemis ;
- *Ononis repens* : légumineuse qui se resème bien, pas très haute ;
- *Ononis natrix*
- *Vicia cracca* : plante qui présente l'avantage de n'avoir aucun résidu après la floraison (important en cas de risque d'incendie) ;

Piste de recherche

Tester l'efficacité de l'installation préalable d'une couverture végétale de légumineuses (ou de légumineuses et de graminées) sur le sol des banquettes, talus et merlons à la fois en terme de :

- lutte contre l'érosion par rapport à un sol resté nu ;
- d'amélioration de la structure et de la richesse du sol ;
- d'amélioration de la reprise et de la croissance des plants installés après ;
- mais aussi, en souplesse d'organisation du chantier de reboisement.

En zone méditerranéenne, la concurrence pour l'eau est très intense, il faudra également trouver un moyen de supprimer ce tapis herbacé au moins à proximité immédiate des plants mis en place (enfouissement, désherbage chimique, protection individuelle des plants... seront à tester).

Les conditions optimales d'installation de la couverture herbacée seront aussi à expérimenter.

2 - LE BOIS RAMÉAL FRAGMENTÉ

Il peut être utilisé comme mulch au moment de la plantation mais généralement le défrichement sur des carrières de roche massive a lieu bien avant le début de la remise en état et il n'y aura pas forcément de matière première disponible.

Sauf à pouvoir disposer d'une source de rameaux de bois à proximité de la carrière, son utilisation n'est pas à préconiser dans le contexte des carrières de roche massive. Par contre pour les talus issus de l'exploitation de moraines ou d'alluvions de haute terrasse, il peut être utilisé dans les mêmes conditions que celles développées au chapitre 6.

3 - L'UTILISATION DE LOMBRICIENS

Sur le site de Marchaux [TPG 11] des introductions de lombriciens avaient été prévues mais non réalisées parce que la terre végétale, même stockée longtemps, contenait des vers de terre capables d'ensemencer le sol reconstitué sur les banquettes. Cependant, vu la faible épaisseur de sol sur les banquettes, un été très sec peut se révéler très néfaste aux populations de lombriciens car ils ne peuvent pas s'enfouir suffisamment profond pour échapper à la sécheresse du sol. La survie et le développement des populations afin de leur permettre de jouer un rôle dans le brassage du sol ne sont pas assurés dans ces conditions. En zone méditerranéenne, la sécheresse sur les banquettes ne permet pas d'envisager le développement de populations de vers de terre.

Pour les talus issus de l'exploitation de moraines ou d'alluvions de haute terrasse, l'utilisation de lombriciens peut être préconisée dans les mêmes conditions que celles développées au chapitre 6.

Le bois raméal et l'introduction de lombriciens ne peuvent pas être utiles en réaménagement de banquettes. Pour les talus et les merlons, se reporter au chapitre 6.

L'autre voie d'amélioration des substrats est l'apport d'amendement organique. En terrains dégradés (talus routiers, pistes de ski...) très fréquemment des sols sont reconstitués à partir d'amendements organiques [1, 9, 40].

L'apport d'amendement organique sera calculé en fonction de l'état et de la nature du sol reconstitué. Un amendement organique est fortement recommandé si la découverte des sols reconstitués n'a pas été sélective (pas d'horizon organominéral reconstitué) ou si le sol reconstitué est peu profond.

Pour améliorer les sols, un apport de matière organique est donc prépondérant, pour le choisir, un certain nombre d'éléments doivent être pris en compte :
- la disponibilité des éléments à proximité de l'exploitation ;
- la composition du substitut de sol, au niveau physique, chimique, biologique ;
- les caractéristiques générales des sols à réhabiliter, afin de déterminer la meilleure combinaison de matériaux utilisables ;
- la localisation du site (proximité de zone vulnérable, cours d'eau, captage...) ;
- la topographie (attention au risque d'érosion) ;

- les caractéristiques physiques des sols (risque de lessivage) ;
- les contraintes réglementaires.

II - LES COMPOSTS

Les apports de compost, quelle que soit sa nature, permettent un apport massif de matière organique au sol et de réaliser un ensemencement biologique[152]. Ces produits ont une vitesse de minéralisation lente et sont précurseurs d'humus stable [1]. En zone méditerranéenne où les besoins en eau sont importants, ils permettent aussi d'améliorer la réserve en eau du sol.

Dans le cas du réaménagement forestier, les apports de compost sont moins souples qu'en réaménagement agricole en raison de l'impossibilité de fractionner les apports. Un apport doit être fait uniquement avant la plantation.

Plusieurs essais ont été menés en reboisement forestier en zone méditerranéenne [26] en particulier, des apports de compost urbain[153] pour reconstituer des sols ou améliorer des sols forestiers. Selon les essais, les doses testées ont varié de 50 à 1000 t/ha. Elles ont été épandues :
- manuellement au pied de chaque plant ;
- à l'épandeur à fumier ;
- régalées au bulldozer ;
- étalées au chargeur ;
- projetées par un tapis roulant.

Les conclusions de cette étude sont intéressantes :
- un compost mûr doit être privilégié car il évolue et s'incorpore mieux dans le sol et la phase de fermentation qu'il a subi détruit les graines d'adventices (tomate en particulier) ;
- pour l'utilisation sous boisement le compost doit être débarrassé de ses plastiques avant le criblage à 25 mm afin d'avoir un aspect esthétiquement plus acceptable ;
- des doses de 500 t à 1000 t/ha donnent des résultats satisfaisants ;
- l'emploi de compost à ces doses augmente notablement la matière organique du sol, diminue le rapport C/N ce qui traduit une amélioration du sol ;
- il induit un déséquilibre entre le magnésium et le potassium qui nécessite un apport fertilisant de MgO ;
- il n'apporte pas de quantité suffisante de phosphore assimilable par les arbres.

Les premiers essais menés ont permis d'affiner les modes opératoires en ce qui concerne l'apport de compost :
- le compost doit être épandu sur le sol et le sous-solage de la parcelle doit intervenir

152 En microorganismes, mais pas en vers de terre efficaces pour l'amélioration de la structure du sol (car les vers qui sont dans les composts sont des vers épigés de surface, ils ne contiennent pas de vers anéciques, fouisseurs).
153 Compost urbain criblé à la maille de 25 mm, ce qui correspondant au type «compost urbain moyen» de la norme NF U 44 051.

ensuite (pour faciliter l'épandage mais surtout pour ne pas accumuler le compost dans la raie de sous-solage qui sera la future ligne de plantation ;
- un délai d'au minimum 6 mois est à respecter entre l'épandage et les plantations (un délai de 20 mois s'est révélé très favorable) ;
- pour les doses moyennes (200 à 500 t/ha) l'épandeur à fumier convient, au delà il faut recommander le chargeur ou un appareil de projection par tapis.

Ces études ont permis de proposer un calendrier des opérations entre la préparation du sol, l'épandage et la plantation (figure 78).

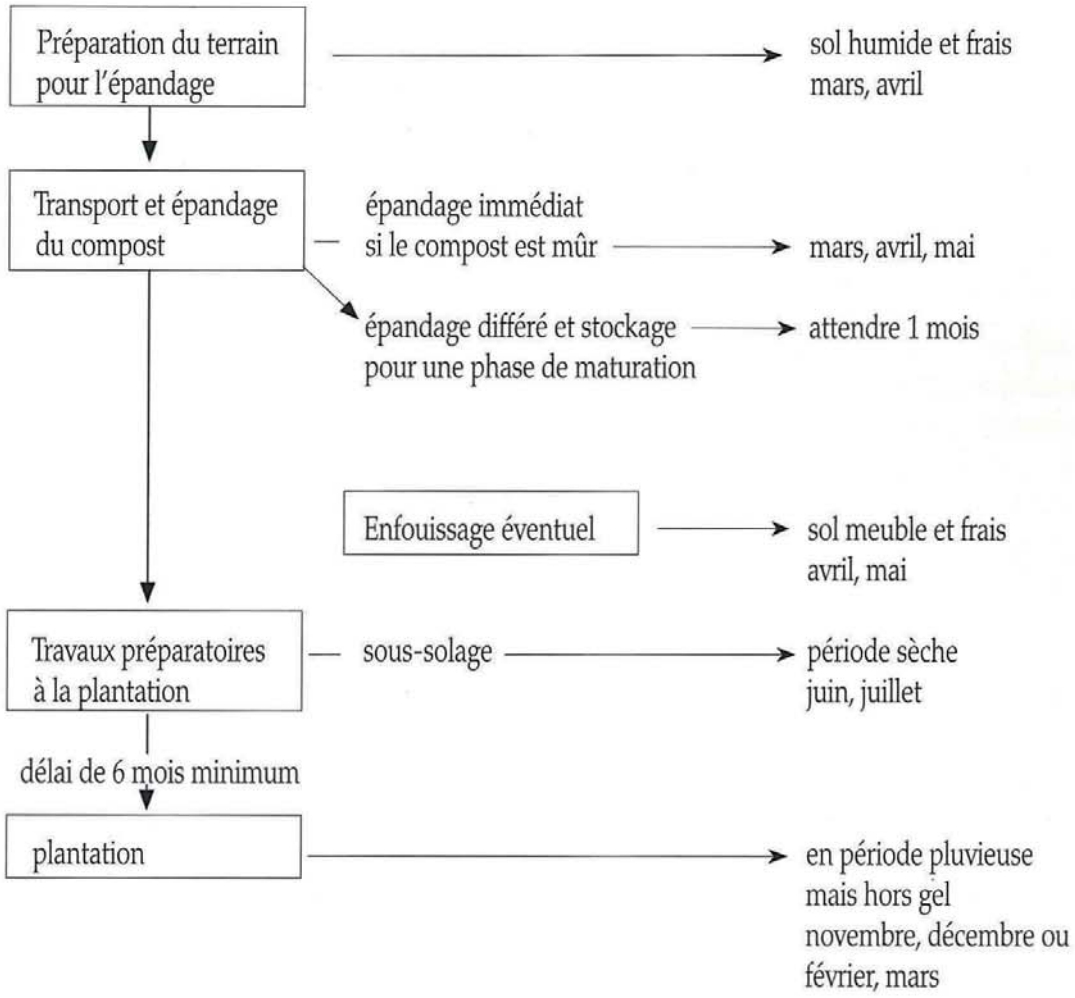


Figure 78 : Calendrier des opérations d'épandage de compost et de plantation [26].

Planter tout de suite après l'épandage du compost provoque une mortalité très forte des plants encore accrue si le plant est mis dans un trou rempli de compost en raison de la salinité du compost qui provoque des brûlures de racines.

Tous les essais donnent des résultats concordants en ce qui concerne la survie et la croissance des plants :
- en année à pluviométrie normale il n'y a pas d'effet de l'épandage de compost sur la survie des plants ;

- en année sèche (ici survenant un an après la plantation), l'apport de compost a un effet négatif sur la survie des espèces les plus exigeantes en eau ;
- pour des doses de 700 à 1000 t/ha de compost, les gains de croissance sont de +50 à + 60% par rapport au témoin, cet effet est d'autant plus marqué pour les espèces exigeantes et pour les sols pauvres ;
- l'apport de compost entraîne un réchauffement plus rapide du sol (du à sa couleur sombre), il provoque le débourrement plus précoce des bourgeons et il peut de ce fait induire des destructions de bourgeons en cas de gelées tardives.

L'effet négatif du compost sur la survie des plants en année sèche est expliqué par une compétition pour l'eau entre la matière organique du compost très hygrophile et les racines du jeune plant : le compost étant dans les premiers centimètres du sol, il capte et retient les pluies de faible intensité et ne permet pas la pénétration de l'eau jusqu'aux racines. Une expérimentation sur carrière [TPG 8] met en évidence que l'apport de compost exacerbe les facteurs climatiques : en année climatique anormalement défavorable (gel ou sécheresse) les résultats sont inférieurs sur les parcelles ayant reçu un apport de compost.

Des apports raisonnés et bien préparés de compost permettent d'assurer une bonne croissance des plants. Pour supprimer les effets négatifs sur la survie en période de sécheresse, des arrosages peuvent être prévus.

L'épandage peut se faire avec un épandeur à fumier sur les banquettes. Le mélange s'effectue ensuite par sous-solage au minimum 6 mois avant la plantation. Le compost doit rester en surface, car il va aider à constituer l'humus du sol. En cas d'utilisation par épandage sur sol nu sans enfouissement, la mise en place rapide d'un couvert végétal est nécessaire afin d'éviter les lessivages de compost hors de la parcelle [1]. Sur les talus, de faible hauteur l'épandage peut s'effectuer avec un épandeur à fumier à projection latérale. Pour des talus hauts (jusqu'à 35 m avec une pente de 45°) du matériel spécifique avec projection par un tapis roulant existe [1, 26].

Dans le cas où le compost va participer à la reconstitution du sol (mélange 1/2 compost et 1/2 fines de décantation) comme à Eze [62] les quantités à apporter sont beaucoup plus importantes (1800 t/ha) et sont mises en place à la pelle ou au chargeur. Dans le cas d'une faible épaisseur de compost à régaler, la benne du camion doit être déchargée en plusieurs fois, afin que la pelle n'ait pas à régaler sur une trop longue distance.

La stabilité structurale est fortement améliorée par l'apport de compost. Il y a un enrichissement en éléments majeurs et en oligo-éléments, entraînant généralement une baisse du rapport C/N. Par contre il engendre un déséquilibre entre le potassium et le magnésium parce qu'il apporte beaucoup plus de potassium.

Le compost attire les insectes décomposeurs de matière organique et active la décomposition, permettant la colonisation de milieux pauvres ou stériles. Cependant dans certains cas, en fonction du degré de maturation du produit [1], il peut se produire un blocage de l'azote minéral dans le sol et donc une absence de disponibilité de l'azote pour la plante (faim d'azote).

Sur reboisement [26], un effet très négatif a été signalé : l'épandage de compost attire les sangliers. Dans un essai ils ont soigneusement labouré les rangs avec compost arrachant et détruisant les plants de feuillus. Ils n'ont pas touché aux rangs témoins sans compost.

Les composts présentent différentes caractéristiques selon les matières premières mises en œuvre. Les principaux éléments cités ici sont issus d'un guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des déchets organiques en végétalisation [0] (publié par l'ADEME).

D'un point de vue réglementaire, les différents types de composts doivent respecter la norme NF U 44-051 « amendements organiques » de 1981 qui est peu contraignante. Elle impose principalement des obligations d'étiquetage. Cette norme fixe des spécifications minimum, quelques teneurs maximales en métaux lourds ou en éléments indésirables et impose un étiquetage particulier des produits.

Par contre, de manière volontaire de la part des exploitants d'unités de compostage, les produits peuvent répondre à des chartes de qualité ou à des labels plus exigeants[154] (Charte Régionale Rhône-Alpes, Label Ecologique Européen, ...). Le produit qui portera cette marque ou ce label sera de meilleure qualité.

Les composts permettent un apport de matière organique très intéressant si une filière de compostage n'est pas trop éloignée du site à réaménager. Ils peuvent être utilisés en amélioration du sol (doses de 5 à 200 t/ha) ou pour reconstituer un sol organique à partir de stériles et de fines de décantation (doses à partir de 500 t/ha). Le choix du type de compost sera influencé par son coût et ses éventuels inconvénients (présence d'éléments indésirables ou polluants...). Les produits labellisés sont de meilleure qualité.

1 - LES COMPOSTS DE DÉCHETS VERTS

Les matières premières sont des déchets issus de l'entretien des espaces verts (produits issus de la taille des arbres et arbustes et de la tonte des pelouses). Pour obtenir un compostage de qualité, les différents déchets[155] sont mélangés et broyés

Du point de vue réglementaire, les composts de déchets verts doivent répondre à la norme NF U 44 051 sur les amendements organiques.

Les caractéristiques du produit dépendent principalement de son criblage, de sa teneur en eau[156] et de son degré de maturité.

Ce type de produit est moins sujet à des risques de contamination par des métaux lourds et des polluants que les autres types de compost, il peut cependant y avoir des traces de produits

154 Voir en annexe 12 la comparaison des spécifications de la norme NF U 44-051, de la marque NF « compost urbain » et du Label Ecologique Européen.
155 En fonction de leur teneur en eau et en éléments ligno-cellulosiques (produits rapidement fermentescibles).
156 Liée principalement aux conditions de stockage du compost mûr.

phytosanitaires ou de plomb (dépôt sur les végétaux issus de la circulation automobile). Il peut contenir un peu de produits inertes à impact visuel négatif (plastiques).

En reconstitution de sol, les doses recommandées sont de l'ordre de 800 à 1000 m^3/ha.

Du compost de déchets verts (résidus de taille, de tonte des pelouses et d'élagage) du district urbain de Chambéry a été utilisé, à la dose de 270 m^3/ha sur des pistes de ski à végétaliser (Orcières-Merlette) [1]. Cette expérimentation visait à comparer les effets d'apports de boues de station d'épuration, de fumier et de compost de déchets verts. C'est le compost de déchets verts qui a été jugé le plus intéressant tant du point de vue des résultats de l'épandage que sur le comportement de la végétation semée (150 kg/ha appliquées à l'hydroseeder). En particulier, une profondeur plus grande d'enracinement est notée ainsi qu'un meilleur développement des plantes.

2 - LES COMPOSTS URBAINS

Ces composts font aussi partie de la norme NF U 44 051 sur les amendements organiques. Pour ces produits, la marque NF «compost urbain», charte de qualité, est plus contraignante que la norme de base ; elle fixe entre autres :

* *LA TENEUR MAXIMALE EN IMPURETÉS (en % de la matière sèche) :*
- 0,5 % pour les films plastique et polystyrène expansé (> 5 mm),
- 6 % pour les lourds (> 5 mm),
- 20 % pour les inertes totaux.

* *LA TENEUR MAXIMALE EN ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (en mg/kg de la matière sèche) :*
- 800 mg/kg pour le plomb,
- 8 mg/kg pour le mercure,
- 8 mg/kg pour le cadmium,
- 200 mg/kg pour le nickel.

Le compost d'ordures ménagères a pour avantage un apport massif de matières organiques. C'est un amendement peu cher et disponible facilement. Les doses à apporter sont de l'ordre de 800 à 1000 m^3/ha. Les composts urbains classiques sans tri à la source présentent des éléments indésirables et des risques d'éventuelle contamination par des métaux lourds. Les teneurs fixés par la marque NF « compost urbain » permettent de limiter ces risques.

L'emploi des composts d'ordures ménagères sans tri à la source entraîne l'apport au sol d'éléments inertes (plastiques, morceaux de verre...) dont la trop forte quantité peut nuire à la qualité du réaménagement. Il en résulte une pollution visuelle importante (plastique).

Dans les essais réalisés par l'ONF [26], les différents composts utilisés avaient été tamisés à une maille de 25 mm, ce qui permet de réduire le taux d'indésirables (42% d'indésirables). Pour certains, un tri préalable des plastiques avait été demandé.

Le lombricompost à partir d'ordures ménagères broyées possède des qualités agronomiques supérieures au compost classique et une proportion d'inertes (verres, plastiques) nettement moins importante (il faut faire des andains de taille importante (1,5 m) d'ordures brutes non concassées). Le lombricompostage élimine les métaux et les plastiques, mais pas les verres.

Peu d'articles font état de l'utilisation de cet amendement, les boues sont beaucoup plus utilisées à l'étranger que ne le sont les composts d'ordures ménagères.

3 - LES COMPOSTS DE FRACTION FERMENTESCIBLE D'ORDURES MÉNAGÈRES

Actuellement, une nouvelle filière de compostage des ordures ménagères commence à se mettre en place avec un tri avant compostage pour n'en utiliser que la fraction fermentescible. Il s'agit donc de filière de compostage de déchets fermentescibles triés à la source (par les ménages, les entreprises de restauration, les grandes surfaces). Les matières premières sont donc majoritairement des déchets de cuisine qui sont parfois mélangés à des déchets verts (tonte, déchets de taille) pour favoriser le compostage. Cependant, d'un point de vue réglementaire, ils ne sont pas distingués des composts urbains classiques de la norme NF U 44-051.

Des variations des matières premières peuvent influencer les caractéristiques du compost de FFOM (fraction fermentescible d'ordures ménagères). Une analyse des caractéristiques du produit doit être demandée à l'exploitant de l'unité de compostage pour chaque lot homogène employé. Les apports conseillés sont les mêmes que les composts de déchets verts (de l'ordre de 800 à 1000 m^3/ha).

4 - LES COMPOSTS DE DÉCHETS AGRICOLES

En Israël [29], une étude a porté sur l'utilisation de compost à base de fumier de vache et de compost à base de déchets de grappes de raisin pour la culture en pot de plantes ornementales (en mélangeant un volume de compost et un volume de tourbe). Les résultats sont favorables, le compost de la fraction solide du fumier de vache donne de meilleures croissances que le compost à base de résidus de vinification. Ces deux composts ont été testés comme supports de culture mais ils pourraient être également utilisés comme amendement organique permettant l'amélioration d'un sol reconstitué.

En Allemagne, des essais de réactivation biologique de sols de mines ont utilisé du compost de fumier [46] afin de rétablir une communauté active d'organismes du sol. Le compost a été déposé en couche de 0,30 m d'épaisseur sur le sol (de 50 à 100 t de matière sèche/ha), il permet une augmentation de la masse microbienne du sol et une augmentation de l'activité enzymatique.

5 - LES COMPOSTS MIXTES

Beaucoup de composts sont en fait issus de mélanges de différentes matières premières. Si l'une de ces matières est issue d'une station d'épuration ou d'une installation classée, le compost qui en résulte est soumis à la réglementation applicable à cette matière première pure. C'est-à-dire que si un compost est composé pour partie d'eaux résiduaires ou de boues

de station d'épuration, au titre de la réglementation sur les boues, il est «interdit sur le site d'ancienne carrière».

En Savoie, en revégétalisation de pistes de ski [41], des composts mixtes ont donné de bons résultats, à la dose de 150 t/ha, pour reconstituer un sol sur un milieu minéral. Le compost était fabriqué à partir de 40% de sciures, 35% de fumier de bovin, 25% de matière organique d'eaux résiduaires. Il possédait les caractéristiques suivantes : C/N = 15, pH = 6,8. En revégétalisation de pistes de ski [40], le compost permet un démarrage beaucoup plus rapide de la végétation.

Ces produits présentent un grand intérêt dans la reconstitution de sols en bon état de fonctionnement quand la terre végétale a été mal conservée et qu'une augmentation du taux de matière organique et une réactivation biologique du sol sont indispensables. En zone méditerranéenne, la faible épaisseur des sols, les conditions climatiques difficiles rendent l'utilisation de compost tout à fait intéressante et d'autant plus efficace que le sol est pauvre.

Les quantités à apporter sont importantes entre 800 à 1000 m^3/ha. Un compost bien mûr est à préférer sinon il faudra le laisser terminer sa fermentation avant de l'enfouir. Un délai de 6 mois est nécessaire entre l'enfouissement du compost et la plantation.

Il est très important aussi, pour l'emploi des différents types de compost, de bien préciser la composition et les caractéristiques du compost que l'on accepte, au besoin par une contractualisation avec l'exploitant de l'unité de compostage. Si une entreprise extérieure se charge de la mise en place, là aussi une contractualisation est nécessaire fixant en particulier les conditions de stockage qui peuvent influencer la teneur en eau du produit et donc sa facilité de mise en œuvre.

Dans le cas de reconstitution de sol à bonne qualité organique à partir de sol purement minéral et de compost (1 volume de compost pour 2 à 4 volumes de terre minérale), une expérimentation a été très satisfaisante tant du point de vue des résultats de la végétalisation que du coût de l'opération (15 F/m^2 traité alors qu'acheter la quantité nécessaire de terre végétale à l'extérieur aurait coûté 30 F/m^2).

III - LES AUTRES AMENDEMENTS

1 - LES BOUES DE PAPETERIE

Voir le chapitre 5, il n'y a pas de particularité pour ce type de réaménagement.

2 - LES BOUES DE STATION D'ÉPURATION

* *RÉGLEMENTATION ET ASPECT INTÉRESSANT DE CES PRODUITS*

A l'heure actuelle, il n'y a pas de législation européenne en ce qui concerne les boues de station d'épuration, un guide européen est en préparation par le comité technique CEN/TC 308 sur la caractérisation des boues et des produits dérivés (composts), sa sortie est prévue au printemps 2001.

En France, le décret 97-1133 du 8 décembre 1997 [67] dans son article 17 prévoit que «l'épandage des boues est interdit sur le site d'anciennes carrières». Cette interdiction s'applique également aux boues stabilisées (article 12 de l'arrêté du 8 janvier 1998) [68] ainsi qu'à tout produit à base de boues[157].

Néanmoins, il est intéressant de ne pas laisser de côté des expériences passées de réaménagement utilisant de tels produits, qui ont permis des reconstitutions de sols impossibles sans cet apport organique à faible coût. Par ailleurs, dans d'autres pays leur usage est autorisé.

La qualité des boues (caractéristiques biologiques, chimiques et physiques) dépend de la composition de l'eau qui a été utilisée et des traitements qu'elle reçoit. L'intérêt des boues réside dans leur taux de matière organique élevé, notamment le carbone organique (stimulation des communautés microbiennes, rétention des substances nutritives, régulation du pH). La matière organique [9] améliore la structure et la stabilité du sol, la perméabilité du substrat et la capacité de rétention en eau. Les boues jouent également le rôle d'engrais, en libérant lentement des substances nutritives sous forme minérale (azote et phosphore). Ces apports nutritifs sont d'un coût faible si le site de production est proche de la zone à réaménager (sinon le coût du transport devient prohibitif). Elles peuvent être utilisées comme améliorant du sol (par application puis incorporation) ou pour créer un substitut d'humus (en mélange avec d'autres matériaux).

Cependant, en fonction des doses apportées, les boues peuvent également avoir des effets négatifs : pollution par ruissellement ou par lessivage, libération de métaux lourds, présence de germes pathogènes.

Par conséquent, la qualité des boues et la quantité des apports doivent être soigneusement régulés. Pour cela, la caractérisation des boues permet d'évaluer leur aptitude à être utilisées et les doses à apporter.

L'épandage de boues liquides exige des précautions spéciales qui réduisent leur intérêt en reconstitution de sols. Mais elles peuvent être utilisées sur talus associées à de l'hydroseeding [1] afin de mettre en place une couverture herbacée. En effet, les boues liquides sont faciles à appliquer et sont d'un faible coût. Leur minéralisation est plus rapide qu'avec des produits solides mais le résultat est similaire au bout de quelques années. Par contre, elles présentent une nuisance olfactive et peuvent présenter des risques de ruissellement sur pente raide.

* *LES COMPOSTS À BASE DE BOUES DE STATION D'ÉPURATION*

L'avis[158] du ministère de l'Agriculture du 6 janvier 1999, précise que «tout produit constitué en tout ou partie de boues d'épuration ayant ou non subi une transformation est considéré

157 Décret n°97-1133 du 8 décembre 1997, avis aux responsables de la mise sur le marché de matières fertilisantes et supports de culture du 6 janvier 1999.
158 L'avis aux responsables de la mise sur le marché de matières fertilisantes et supports de culture du 6 janvier 1999.

comme des boues» et est donc soumis à la même réglementation que les boues donc «interdit sur le site d'anciennes carrières».

Cependant, bien que l'usage de ces produits soit actuellement interdit en France, leur utilisation est décrite ci-dessous puisque des expérimentations ont été menées.

Dans les cas de végétalisation ou de reconstitution de sols hors site d'anciennes carrières, les composts de boues de station d'épuration doivent répondre, selon le cas, à l'une de ces trois réglementations :
- détenir une homologation ou une autorisation provisoire de vente délivrée par le ministre chargé de l'agriculture ;
- satisfaire à la loi sur l'eau si le compost est réalisé sur le site de la station d'épuration ;
- satisfaire à la loi sur les installations classées si le compost est réalisé ailleurs que sur le site de la station d'épuration.

Dans ces deux derniers cas, le préfet applique à ces composts les dispositions prévues par l'arrêté sur l'épandage des boues du 8 janvier 1998.

Des expérimentations ont été menées pour la reconstitution de sols de pistes de ski (Orcières Merlette). Et à plus grande échelle, des talus et zones végétalisées de l'autoroute de Maurienne [1, 111], ont été amendés par des composts à base de boues de station d'épuration (62 ha de terre traités avec 13 400 m^3 de compost).

* *UTILISATION DES BOUES DE STATION D'ÉPURATION OU DE LEURS DÉRIVÉS*
A Carpiagne près de Marseille [20] des boues de station d'épuration conditionnées thermiquement ont été utilisées à différentes doses pour reconstituer des sols forestiers. Ces boues présentent l'avantage d'être constituées de matière organique stable (car la partie de la matière organique facilement biodégradable a été détruite lors du traitement thermique). Ces boues ont permis l'installation d'un tapis herbacé dense dont les racines ont structuré le sol et ont permis l'enrichissement du sol en matière organique. Le principal effet des boues a été l'augmentation de la capcatité de rétention en eau du sol (figure 79). Cette capacité est mesurée en m^3/ha d'eau retenue dans une épaisseur de 0,40 m de sol.

Tonnage de boue apporté	Capacité de rétention en eau du sol
Témoin pas de boue	500 m^3/ha
100 t/ha de boue	600 m^3/ha
200 t/ha de boue	660 m^3/ha
400 t/ha de boue	1000 m^3/ha

Figure 79 : Effet de l'apport de boue sur la capacité de rétention en eau [20].

Comme pour les apports de compost, les apports de boue ont montré un effet :
- négatif sur la survie des plants ;
- positif sur la croissance.

A Marchaux [TPG 11], des boues de station d'épuration ont été utilisées sur une banquette à la dose de 200 t/ha. Le protocole prévoyait de placer sur la banquette 0,40 m de terre végétale issue d'un stockage, 0,10 m de boues et 0,30 m de terre végétale fraîchement décapée. La mise en œuvre des boues s'est révélée difficile car elles se sont gorgées d'eau et le terrain est devenu impraticable, les plantations ont du être différées d'une année[159]. Le bilan fait 5 années après l'épandage montre que les conditions de sol dans la partie amendée par les boues ne sont pas plus favorables que dans le sol témoin. En effet, l'apport de potassium et de magnésium par les boues a provoqué un déséquilibre entre ces deux éléments, une déficience en azote pour les plants liée à une dénitrification et le développement d'une végétation adventice forte.

La mortalité des plants au bout de 4 ans a été plus forte sur la placette ayant reçu des boues :
- 21 % de survivants pour les feuillus sur le sol témoin ;
- 8 % de survivants pour les feuillus sur le sol avec boues.

Les meilleurs taux de survie de feuillus sont de 50 % pour des robiniers et des aubépines sur sol témoins et 20 % pour des robiniers et des érables champêtre.

Pour les résineux les résultats au bout de 4 ans, vont dans le même sens (figure 80)

espèce		sol avec boue	sol témoin
Pin noir	survie en %	78	84
	hauteur en cm	69,8	78,4
Pin à crochet	survie en %	66	82
	hauteur en cm	32,1	39,7
Cèdre	survie en %	50	66
	hauteur en cm	112,3	147,8

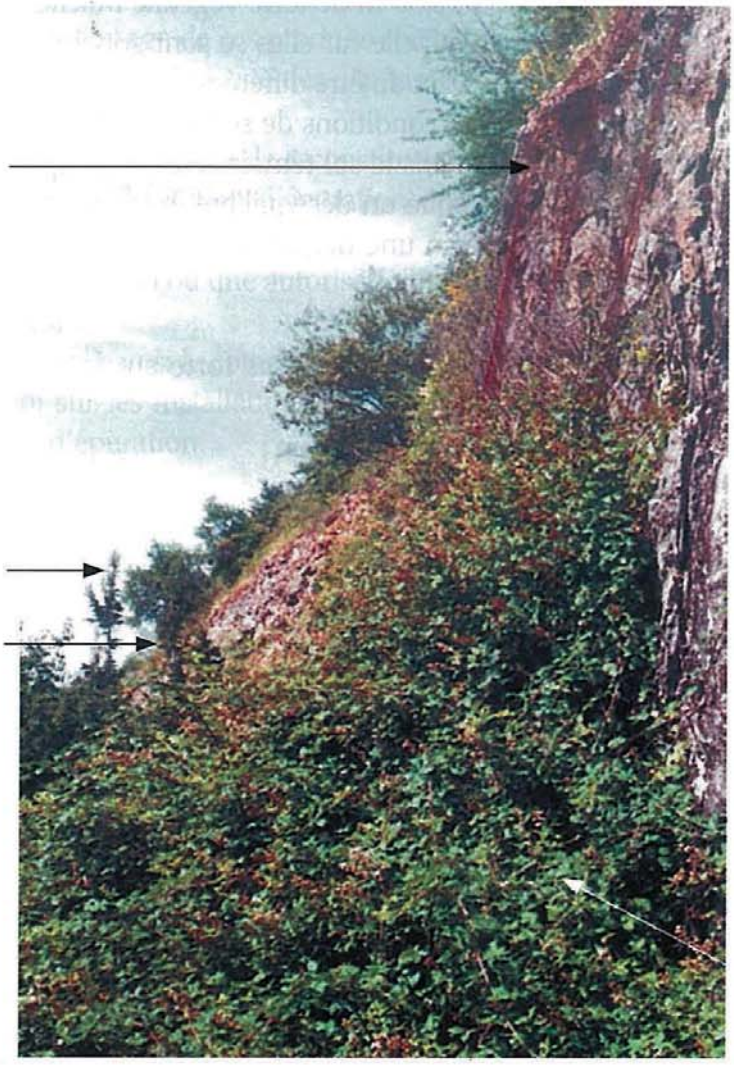
Figure 80 : Comparaison des hauteurs et des taux de survie à Marchaux [TPG 11]

Par contre, sur les plantes grimpantes plantées sur la banquette en vue de masquer le front de taille, l'apport de boue a été bénéfique pour la croissance du lierre, du Polygonum et de la clématite.

En 1997, une analyse de la végétation de la banquette a été faite. Il en résulte que :
- la banquette amendée et plantée présente une végétation largement dominée par un roncier (qui empêche tout accès désormais sur la banquette) et présentant des espèces banales de milieux modifiés par l'homme (26 espèces en dehors des espèces plantées) ;
- la banquette pas du tout réaménagée présente une végétation quasi naturelle de pelouse pionnière ;
- la banquette amendée et non plantée présente une flore de 45 espèces de pelouse évoluée qui peuvent mener à une colonisation forestière naturelle.

159 Ce qui au vu des résultats sur le compost, a peut être été bénéfique.

PLANCHE 15 . Manque d'entretien et de suivi sur une banquette de roche massive réaménagée.



[F9M] *Photo Cemagref Delory I*

Banquette réaménagée en 1981 avec 0,40 m de terre de découverte caillouteuse provenant d'un stock ancien, de 0,30 m de terre végétale fraîchement décapée et de 0,10 m de boues de station d'épuration urbaine.
Différentes plantations expérimentales ont eu lieu pour masquer le front de taille :
- sur la banquette :
** une rangée de feuillus ;*
** une rangée de résineux ;*
- sur le front de taille :
** en bas, des plantes grimpantes ;*
** en haut, des plantes retombantes ;*

En 1999 :
- Les arbres plantés en 1981 ont une hauteur de 6 m environ ;
- Un roncier important (stimulé par l'apport de matières organiques des boues) étouffe les plantations ;
- Les plantes grimpantes et retombantes ont complètement disparu.

Au vu de ces résultats, la commission des carrières a demandé pour la suite des réaménagements à Marchaux de ne plus mettre en place des plantations mais de projeter des graines locales par hydroseeding afin d'instaurer un processus de colonisation naturelle puisque le site est dans une ambiance forestière (des semenciers sont donc présents). Dans le contexte de Marchaux, les boues ont eu un effet négatif.

Les boues sont utilisées en France [40] dans la revégétalisation d'espaces dégradés en altitude (piste de ski, zone érodée...). Les boues ne sont généralement pas utilisées brutes mais maturées (un an) ou compostées.

Les boues maturées sont issues du stockage en couche de 0,50 à 0,80 m d'épaisseur pendant 2 à 3 ans de boues déshydratées (nauséabondes et collantes). A l'issue de ce séchage, il y a perte d'eau et modification de la structure liée à l'évolution biologique de la matière organique (produit pulvérulent sans odeur). Ces boues maturées peuvent alors être reprises au chargeur et mises en place avec un épandeur à fumier à raison de 150 t/ha de matière sèche pour une reconstitution de sol sur une surface minérale stérile.

Le compostage produit en quelques mois une stabilisation aérobie des boues (seules ou mélangées à des déchets carbonés). La maturation dure 3 ans en andains de 1,5 m de haut. Ces étapes aboutissent à un produit stable, riche en composés humiques (C/N de l'ordre de 15) et inodore.

L'utilisation de boues de station d'épuration se fait aux USA sous forme solide ou liquide, sous forme d'engrais par épandage.

En Allemagne [46], des essais entre différents matériaux ont montré que des apports de boues de station d'épuration compostées ont un effet à long terme dû à la fragmentation de la matière organique. A court terme, les boues compostées induisent un développement relativement stable des bactéries (avec des boues fraîches, il y a un fort pic démographique des bactéries puis un effondrement de la population).

3 - LES ORDURES MÉNAGÈRES BROYÉES

Un essai de reconstitution d'une végétation forestière en zone méditerranéenne a été mené sur un substrat composé d'un mélange en couches alternées d'ordures ménagères broyées et de déblais marneux sur une épaisseur de 1 m [126]. Les résultats montrent qu'en 4 ans ce substrat évolue vers un bon sol calcaire riche en matière organique (8 % soit équivalente à un sol de serre) avec une fertilité équilibrée et une bonne réserve utile. Cependant des tassements importants se produisent et ils sont proportionnels au pourcentage d'ordures utilisées. Partant d'une hauteur initiale de 1 m, au bout de 4 ans les épaisseurs de sol sont :
- 0,70 m pour le mélange 50 % ordures, 50 % déblai ;
- 0,60 m pour le mélange 80 % ordures, 20 % déblai ;
- 0,45 m pour les ordures seules.

Les conclusions de l'étude indiquent que pour reconstituer un sol forestier il faudra mettre en place 3 m de substrat avec une proportion 1/1 d'ordures ménagères et de déblai mais que

le compost d'ordure ménagère serait à préférer (limitation des nuisances visuelles et des risques de pollution).

4 - APPORT D'AMENDEMENTS ORGANIQUES SUR TALUS

Un suivi a été mené sur des reconstitutions de sols dégradés sur talus autoroutier [1], ces expérimentations ont comparé :
- un talus témoin non traité ;
- un talus recevant un épandage de boues liquides aérées ;
- un talus recevant un épandage de boues liquides anaérobies ;
- un talus recevant un épandage de boues solides ;
- un talus recevant un épandage de compost.

Les traitements ont été faits en deux fois à un an d'intervalle. Les apports de matière organique étaient associés à un mélange de graines[160] adaptées au milieu.

L'effet de l'apport de déchets organiques sur le taux de couverture du sol est très net (figure 81), les risques d'érosion ont donc diminué. La fertilité des sols a été améliorée (azote, phosphore et potassium).

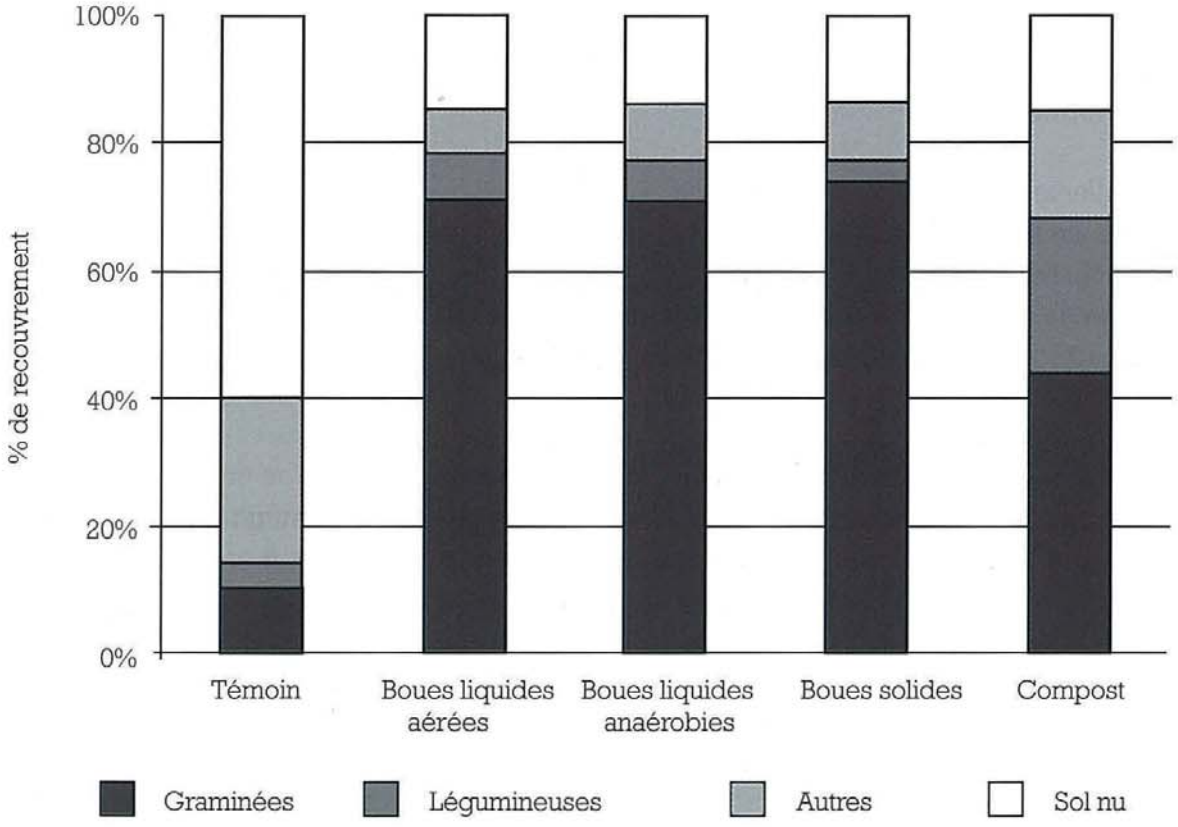


Figure 81 : Effet d'apport de matière organique sur la végétation d'un talus [1].

160 Directement dans les amendements liquides ou par hydroseeding une fois les épandages de produit solide effectué.

Selon les contraintes du milieu l'un ou l'autre des modes d'apport de la matière organique est mieux adapté (figure 82).

Nature de l'amendement	Avantages	Inconvénients
compost	adapté aux zones à forte pierrosité avec de faibles	coût élevé, risques de pollution risque d'érosion (éolienne, pluviale)
boues solides	bonne accroche sur les pentes raides et pierreuses	très contraignantes à mettre en œuvre
produits liquides	facilité d'application, faible coût, meilleure maîtrise des faibles doses	forts risques de ruissellement sur sols tassés et pentes raides

Figure 82 : Adéquation condition de milieu et type de matière organique [1].

L'utilisation d'amendement organique est indispensable en zone méditerranéenne quand il s'agit d'une reconstitution de sol à partir d'éléments uniquement minéraux (stériles, fines de décantation, boues minérales) ou une très faible épaisseur de sol. Des précautions sont cependant à prendre en fonction du milieu (risque de fréquentation du site par des sangliers, risque de gelées tardives...). En particulier l'apport de matière organique doit être fait au moins 6 mois avant la plantation. En absence d'arrosage, en année sèche l'apport de matière organique peut avoir un effet négatif sur la survie des plants mais, il a un effet positif sur la croissance. Cet effet est d'autant plus marqué que les sols sont pauvres et les espèces installées exigeantes.

Le choix du type d'amendement doit être dicté par les caractéristiques du produit (degré de maturation, diamètre du criblage, absence d'éléments indésirables, degré d'humidité) mais aussi par la proximité d'une installation de compostage. Dans tous les cas, il est souhaitable qu'un cahier des charges précis soit accepté par le carrier, l'exploitant de l'unité de compostage et la société mettant en œuvre le cas échéant le produit. Le coût de mise en œuvre dépend pour beaucoup de la distance de transport mais aussi des conditions financières que l'exploitant de l'unité de compostage accepte[161].

En dehors de la zone méditerranéenne, le seul exemple de réaménagement de banquettes avec des boues ne s'est pas révélé intéressant et en outre cette pratique est actuellement interdite.

Pour la végétalisation de talus, les épandages d'amendements organiques associés à un hydroseeding de graines adaptées au milieu sont très efficaces.

161 Dans certains cas, pour des gros volumes mis en œuvre, l'exploitant peut participer financièrement si la demande habituelle est faible.

IV - RECONSTITUER UN SOL OU PLANTER SUR STERILES ?

Ce paragraphe concerne les carrières de roches massives en fosse ou à flanc de coteau de la zone méditerranéenne qui sont les milieux les plus difficiles à revégétaliser.

Les conditions extrêmes du milieu (déficit hydrique, forte évapotranspiration, vent, exposition au soleil, faible épaisseur de sol, pauvreté du sol) rendent le réaménagement des carrières en fosse ou à flanc de coteau difficile. De nombreux échecs ont été relevés :

- mortalité rapide des plants (plus de 80 % des plants morts dans les 4 premiers mois au Redon [TPG 12]) ;
- mortalité différée au moment où le plant a le système racinaire qui quitte les 0,60 m de remblai installés sur la banquette et ne peut pas pénétrer la roche calcaire dure de la banquette ;
- croissance très faible (arbres « bonzai ») en exposition sud et au vent [F11 M].

Dans ces situations [F2 M, F5 M, F7 M, F12 M], les sols remis en place étaient des stériles (de 0,6 à 1 m d'épaisseur) recouverts ou non de 0,20 m de terre végétale. Les contraintes, principalement hydriques, étaient trop fortes pour permettre une bonne survie et une bonne croissance des plants : les sols n'étaient pas aptes à alimenter les plants.

Or un réaménagement réussi doit permettre d'installer des végétaux à survie et croissance durable en absence[162] d'intervention humaine. Deux grandes voies sont possibles pour arriver à ce résultat :
- reconstituer un sol profond ou des plants forestiers classiques pourront se développer ;
- utiliser des plantes qui pourront se développer et prospérer sur un substrat brut.

1 - RECONSTITUER UN SOL AUTOSUFFISANT ?

Nous avons vu dans le chapitre 11 qu'il est possible techniquement, en utilisant des tonnages importants de matière organique de reconstituer un sol profond (1,5 m), meuble, à bonne capacité de réserve en eau, et avec un bon niveau de fertilité. Au vu des résultats de reconstitution de sols en terrain dégradé [1, 40] et en conditions de haute altitude (donc tout aussi contraignants que la zone méditerranéenne), la végétalisation par des espèces herbacées est possible et donne de bons résultats. Les travaux menés [26] sur le reboisement en zone méditerranéenne montrent pour les 4 années du suivi, une bonne efficacité des apports de matière organique, corrigée éventuellement par des fertilisations complémentaires en MgO pour la croissance de plants forestiers. Cependant, sur ce type de sol, les conditions de croissance de la végétation herbacée seront bonnes et elle entrera en concurrence pour l'eau avec les plants.

162 Une fois passées les premières années où un entretien est nécessaire (lutte contre la concurrence herbacée principalement).

Dans les études et documents publiés, c'est jusqu'à présent la voie qui a été privilégiée à la fois dans les recommandations des scientifiques, dans le souhait des carriers[163] d'installer de essences nobles [TPG 12] et dans les exigences de l'administration.

Cependant, les sites étudiés lors de la phase de visite ne pratiquent pas cette amélioration du sol et les plantations d'essences nobles (cèdres en particulier) n'ont guère donné de résultats satisfaisants. Nous ne pouvons donc pas dire si en carrière, ce procédé est efficace et à quel coût.

Piste de recherche

Vraiment recréer en carrière un sol avec des apports de 500 à 1000 tonnes de compost (puisque les boues ne sont désormais plus utilisables) selon les recommandations faites plus haut. Et évaluer la réussite des plantations d'essences forestières adaptées sur ces sols reconstitués.

Dans les années 1980, dans les dossiers de réaménagement ou dans les réactions de la profession à des propositions de scientifiques, l'idée d'utiliser les espèces de garrigue en reboisement de carrière était fortement rejetée. Cette idée était refusée aussi par l'administration délivrant l'autorisation d'exploiter qui exigeait des plantations d'arbres. Pourtant les scientifiques mettaient en évidence que la végétalisation serait plus facile avec des espèces de garrigue capables de coloniser naturellement le milieu et adaptées aux conditions extrêmes des abords de la carrière.

Actuellement, les entretiens réalisés pendant la phase terrain, mettent en évidence que l'opinion des carriers a changé, ils ont envie désormais d'utiliser des espèces à la fois adaptées écologiquement et s'intégrant mieux dans l'ambiance paysagère du site. Pour ces espèces, il n'est pas forcément utile de recréer un sol très fertile, car elles sont capables de se développer sur des sols superficiels.

2 - PLANTER SUR STÉRILES ?

Des expérimentations menées [TPG 7] avaient mis en évidence la réussite de plantations sur un substrat tout venant caillouteux et meuble mis en couche épaisse de 3 m. Ce substrat très profond a assuré aux plants une bonne réserve en eau et une absence de concurrence herbacée les premières années et a permis une survie et une croissance satisfaisante de cèdres.

En outre depuis quelques années, des recherches sur les associations symbiotiques ont trouvé des pistes intéressantes de couples plante/bactérie fixatrice d'azote capables de se développer sur des substrats bruts. Ces espèces une fois installées améliorent la fertilité des sols et permettent le développement d'espèces plus exigeantes. Des expérimentations ont eu lieu sur des terrains très pentus dans le but de limiter l'érosion, sur des berges de plans d'eau et sur quelques sites de carrière. De nouvelles expérimentations se mettront prochainement en place dans des carrières en zone méditerranéenne (Cleyet-Marel, com.pers.).

163 Pour les dossiers des années 1980.

Les premiers résultats après 2 ans de plantation conjointe de légumineuses arbustives méditerranéennes, d'aulnes et de robinier fixateurs d'azote et de plants forestiers (*Arbutus unedo, Quercus ilex, Quercus pubescens*) sont tout à fait intéressants (figure 83) et méritent d'être étendus à d'autres sites.



Figure 83 : Végétalisation mixte légumineuses arborescentes et plants forestiers [photo Cleyet-Marel].

Cette végétalisation a été faite sur stériles bruts sans aucune préparation du sol ni aucun apport. Les plants de légumineuses inoculés ont en deux ans atteint une hauteur de 2 à 3 m. Par exemple, *Colutea arborescens* (figure 84) est un arbrisseau de 2-3 mètres, non épineux des coteaux calcaires de l'Est et du Midi qui fixe l'azote atmosphérique. Il est photographié après 2 ans de plantation.



Figure 84 : Colutea arborescens 2 ans après sa plantation [photo Cleyet-Marel].

Cette voie de végétaliser des substrats bruts avec des plantes adaptées aux conditions méditerranéennes est donc ouverte désormais par des scientifiques qui, à l'échelle de la production de plants au laboratoire et en pépinière administrative, ont montré qu'elle était tout à fait

intéressante. Des expérimentations en carrière vont se mettre en place, pour passer au stade de l'utilisation plus fréquente en réaménagement, il faudra trouver des partenariats avec des pépiniéristes motivés pour ce transfert de connaissances et de pratiques, comme cela s'est déjà fait dans le domaine des plants forestiers mycorhizés.

Piste de recherche

Développer ces expérimentations sur d'autres sites avec des conditions de milieu différentes, évaluer les espèces les plus adaptées selon les situations, voir à long terme comment se fait le passage entre cette végétation pionnière introduite et une éventuelle colonisation naturelle par des semenciers présents autour du site réaménagé. Comparer cette technique avec la plantation sur sol reconstitué avec des amendements organiques.

Engager une concertation avec le laboratoire de recherche et des pépiniéristes afin de transférer les connaissances et les techniques.

Des possibilités techniques de reconstitution d'une épaisseur suffisante de sols existent en utilisant des amendements organiques. Pour la zone méditerranéenne et des carrières de calcaire massif exploitées à flanc de coteau, une autre voie est possible : planter directement sur stériles avec des plantes spécifiques mycorhizées ou inoculées. Une analyse globale comparée de ces deux possibilités appliquées aux mêmes sites doit être mise en place afin de pouvoir savoir laquelle est la plus efficace en termes écologiques et paysagers, mais aussi économiques.

CHAPITRE 12

LES TECHNIQUES DE PLANTATION ET CHOIX DES ESPECES

En raison des conditions d'accès, d'exiguïté et de pente sur les banquettes, sur les merlons et les talus, la mécanisation des opérations de préparation du sol et de plantation est difficile. Les surfaces à réaménager et le nombre de plants à mettre en place sont généralement faibles et permettent un travail manuel.

I - PREPARATION DU SOL

La préparation du sol en région méditerranéenne a pour objet de faciliter l'alimentation hydrique des plants mais aussi de limiter les phénomènes d'érosion en cas de fortes pluies. Il est possible ainsi sur un talus de modeler de petits gradins (de 1 à 5 m de long), petit espace plan entouré de bourrelets (figure 85), ils peuvent emmagasiner de l'eau de pluie en étalant son infiltration dans le temps. Les plants seront installés au centre de ces gradins afin de bénéficier des meilleures conditions hydriques.

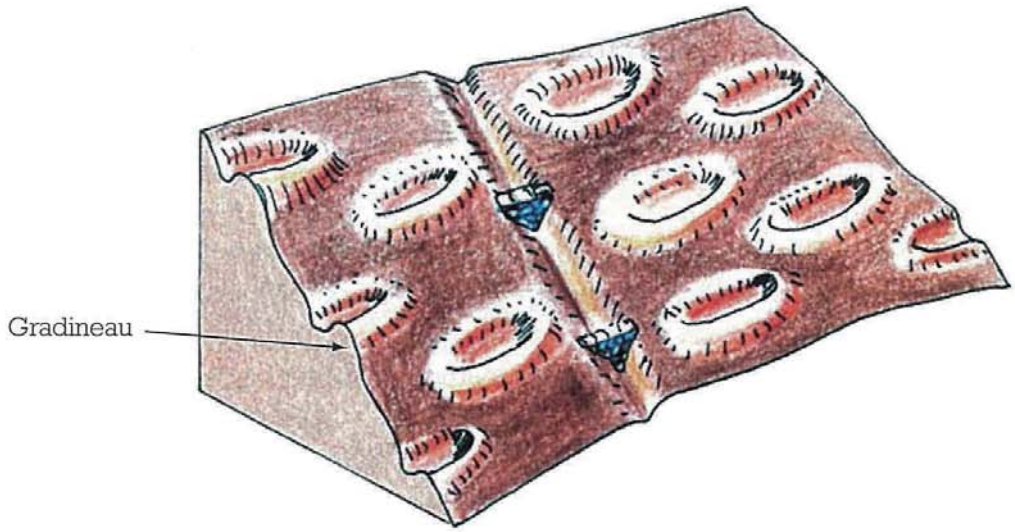


Figure 85 : Réalisation de petits gradins sur une pente [27].

Si un amendement organique a été épandu, un sous-solage doit avoir lieu juste après, un engrais vert doit être semé afin de couvrir le sol et un labour doit intervenir avant la plantation pour enfouir sur la ligne de plantation, l'engrais vert.

Les sols sont souvent carencés en potassium et magnésium, un apport d'engrais peu soluble ou à libération retardée peut être préconisé. La mise en place de l'engrais au fond du trou de plantation est à recommander pour des plantations à faible densité.

II - LE CHOIX DU MATERIEL VEGETAL

Les conditions de reprise très difficiles imposent de n'utiliser qu'un matériel végétal de la meilleure qualité possible. Toutes les recommandations développées dans le chapitre 3 en ce qui concerne le choix de la pépinière, le choix du type de plant, l'établissement d'un cahier des charges très précis, les conditions de transport et d'attente avant la plantation, sont à respecter afin d'être sûr de mettre en place un plant qui n'ait pas de handicap au départ.

Retarder la plantation d'un ou deux ans après la reconstitution du sol (chapitre 11) en mettant en place un engrais vert permet de s'affranchir un peu des aléas de l'organisation du chantier de remise en place des sols, climatique et de la production en pépinière En effet, dans certains cas, la production de plants a été prévue trop tard [F12 M] et les plantations optimales en novembre afin de profiter des pluies de l'hiver n'ont pu être effectuées qu'en février.

1 - SÉLECTION DES ESPÈCES ADAPTÉES

* *EN RÉGION MÉDITERRANÉENNE :*
Les espèces mises en place doivent être capables de résister au climat méditerranéen parfois encore accentué dans les carrières de front de taille, par la réverbération et la circulation de vent accrue.

Beaucoup d'espèces ont été utilisées lors des réaménagements, la plupart des résineux originaires de la méditerranée :
- des cèdres (*Cedrus atlantica, C. deodora*) : [F2 M, F12 M], des plantations [F12 M] ont permis de voir la grande sensibilité du cèdre de l'Atlas à l'exposition (planche 10). En exposition sud les cèdres plantés en 1991 sont nains, ils ne dépassent pas 0,60 m alors que sur la même banquette mais en exposition sud-est (protégés du vent et dans l'ombre du front de taille l'après-midi), ils font 4 m de haut.
- des pins (pignon, d'Alep, brutia, Eldar, noir d'Autriche, noir Laricio, noir de Salzman...) ;
- des cyprès (vert, d'Arizona...) : ils ont montré une très grande sensibilité au gel

A Gourdon [TPG 8], les conclusions de l'étude mettent en évidence que les espèces les plus performantes[164] pour la cicatrisation paysagère sont :
- l'eucalyptus gunii ;
- le robinier faux acacia ;
- l'aulne cordé ;
- l'olivier de Bohème.
Les trois dernières espèces étant fixatrices d'azote atmosphérique.

Cette expérimentation avait mis en évidence que les principaux facteurs de réussite ou d'échec concernaient :
- l'alimentation hydrique des plants : contrôlée par la granulométrie des stériles utilisés plus que l'épaisseur remise en place, influencée par la concurrence herbacée, et ici l'apport bénéfique du compost en terme d'augmentation de la réserve utile a été supprimé par l'augmentation de la concurrence herbacée ;
- la résistance au gel à l'état juvénile.

Les espèces recommandées pour une cicatrisation rapide sont :
- sur stériles grossiers : *Alnus cordata* et *Eucalyptus gunii* ;
- sur stériles fins : *Alnus cordata, Eucalyptus gunii* et *Robinia pseudoacacia* ;

164 En tenant compte à la fois du taux de survie et de la croissance.

Pour une cicatrisation à plus long terme (10 ans et plus), les essences suivantes peuvent être intéressantes :
- *Quercus ilex* (chêne vert) ;
- *Abies numidica* (sapin d'Algérie), *Abies cephalonica* (sapin de Grèce) ;
- *Cedrus atlantica* (cèdre de l'Atlas).

Les plantations récentes [F2 M, F7 M, F12 M] concernent aussi des arbustes méditerranéens : pistachier lentisque, laurier tin, philaire à feuilles étroites, tamaris, genêt d'Espagne...

* *EN FRANCHE-COMTÉ ET RÉGION RHÔNE-ALPES :*
Les conditions de milieu sont moins contraignantes et la fertilité du sol aura plus d'importance que l'alimentation en eau.

Sur des banquettes en Franche-Comté reconstituées avec de la terre végétale et 500 t/ha de compost [TPG 10], les espèces recommandées sont l'érable sycomore, le hêtre et le douglas. Par contre à Marchaux [TPG 12], les nouvelles recommandations prévoient l'absence de plantation afin de laisser se faire la recolonisation naturelle.

Sur talus morainique en région Rhône-Alpes [F14 Mo], de nombreuses espèces ont eu de bons résultats : pins noirs d'Autriche, mélèzes, épicéas, peupliers d'Italie, bouleaux, charmes, sorbiers, chênes, érables, frênes, merisiers.

2 - AGE, TAILLE ET CONDITIONNEMENT DES PLANTS

Les plants à racines nues sont à déconseiller en région méditerranéenne, la crise de transplantation risquant d'être fatale aux plants. En effet, si un déficit en eau intervient dans les semaines qui suivent la plantation, le plant peut se dessécher très rapidement. De plus ils sont très fragiles entre leur arrachage en pépinière et la plantation.

Les plants en conteneurs doivent être préférés, ils présentent une moins grande sensibilité au moment du transport, de l'attente de la plantation et de la plantation elle-même. Il faut noter cependant qu'un échec de plantation peut être dû à un stockage inadéquat (en intérieur et trop longtemps) des plants (cèdres stockés 50 jours dans un atelier) [TPG 12].

Il n'y a pas de particularités en ce qui concerne l'âge et la taille des plants (voir le chapitre 7).

3 - MYCORHIZATION DES PLANTS

Peu d'expérimentation mises en place avec des plants mycorhizés ou inoculés comparent la même espèce avec et sans inoculation par des mycorhizes ou la bactérie symbiotique. Un essai a cependant été mis en place [TPG 8] avec de l'olivier de Bohème (*Eleagnus bohemica*) afin de comparer la survie de plants non inoculés et de plants inoculés (nodulation contrôlée avec une souche de Frankia extraite d'argousier) :
- taux de survie de 72 % pour les plants inoculés ;
- taux de survie de 47 % pour les plants non inoculés.

En substrat stérile, les espèces capables de fixer l'azote atmosphérique se sont toujours révélées très performantes. Ainsi, à Gourdon [TPG 8] de telles espèces sont les plus intéressantes. A Voglans [TPG 4], des comparaisons ont porté sur différentes souches de Frankia et sur deux espèces d'aulne (*Alnus cordata* et *Alnus incana*). L'étude met en évidence l'absence d'effet souche dans la survie de ces deux espèces.

Par contre en ce qui concerne la croissance des aulnes cordés au cours des 3 ans suivant la plantation, un effet souche est très net :
- les plants issus de pépinière et qui n'étaient pas nodulés, ont un accroissement total de 0,30 m ;
- les plants inoculés avec une souche de Frankia isolée du sol (souche naturelle) ont un accroissement de 0,55 m ;
- les plants inoculés avec des souches sélectionnées au laboratoire pour leur efficacité ont un accroissement de 0,80 m.

Cette étude montre l'intérêt d'utiliser des souches de Frankia sélectionnées pour obtenir une croissance rapide des plants. En effet, les plants non nodulés ont une croissance très faible au cours de ces trois années, la nodulation ne s'est pas faite dans le sol après la plantation[165].

Piste de recherche

Définir de manière précise des protocoles de production de plants inoculés en pépinière (en particulier sur l'absence de fertilisation azotée et les concentrations maximales en phosphore).
Isoler des souches performantes adaptées à différentes espèces et à différentes conditions de sol et de climat.
Tester sur d'autres sites la supériorité en terme de croissance des plants inoculés avec des souches efficaces.

III - TECHNIQUES DE PLANTATION

L'étude de Gourdon [TPG 8] en mettant en évidence des groupes d'espèces à capacité de cicatrisation plus ou moins rapide du paysage (5 ans ou plus de 10 ans) conseille de réfléchir le dispositif de plantation en fonction de ces éléments afin d'agencer au mieux la répartition des différents groupes d'espèces. Sur les banquettes, les espacements entre plants sont souvent réduits entre les plants (2 m x 2 m) ce qui correspond à des densités ramenées à l'hectare élevées (de l'ordre de 4000 plants/ha).

1 - EPOQUE DE PLANTATION

En zone méditerranéenne, la saison la plus favorable est l'automne (à partir de novembre) afin que les plants puissent profiter de conditions hydriques favorables pendant les premiers

165 Il a été constaté à l'arrachage de ces plants, qu'ils n'étaient pas nodulés après 3 ans passés sur le site.

mois. Cependant, les risques de gel peuvent être accrus par les conditions locales de certains secteurs de carrière, si tel est le cas, un compromis sera à trouver entre la sensibilité des plants au gel et l'intérêt d'une plantation précoce pour l'alimentation en eau.

Pour les autres secteurs, se reporter au chapitre 7.

2 - MODE OPÉRATOIRE

La difficulté d'accès des talus impose souvent une plantation manuelle à la pioche en fente ou au potet pour les plants en conteneur. Il est ici très important de bien tasser le sol autour du plant et éventuellement de maintenir le collet vertical avec des galets posés à sa base.

Pour les plantations sur banquettes, les potets doivent être creusés à la pelle mécanique. Dans certains dossiers anciens, des trous sont creusés au brise roche hydraulique ce qui a l'inconvénient très important de tasser énormément les parois et de risquer d'induire un chignon ou des enroulements du système racinaire qui restera contenu dans ce trou. Une expérimentation à Gourdon [TPG 8] a montré pour certains sols, l'intérêt du pétardage de la banquette (technique d'ameublissement du sous-sol) afin d'augmenter l'espace prospectable par les racines. Cependant, cette technique très lourde est à réserver aux carrières où peu de stériles sont disponibles et où la roche est très compacte.

IV - L'ENTRETIEN DE LA PLANTATION

1 - PROTECTION DES ARBRES CONTRE LE GIBIER

Les mêmes dispositions sont à prendre que pour les réaménagements de surfaces planes si du gibier fréquente la parcelle. Installer au préalable une couverture herbacée comme engrais vert peut favoriser la fréquentation du site par des lapins, des manchons de protection individuels sont à utiliser.

2 - LIMITATION DE LA CONCURRENCE HERBACÉE

En zone méditerranéenne encore plus qu'ailleurs, la concurrence de la végétation pour l'eau est le principal facteur limitant les réussites des reboisements. Comme l'accès est souvent difficile, des dispositifs de limitation de la concurrence herbacée ont un grand impact sur le taux de reprise.

Les paillages plastiques de toute la ligne de plantation sont à utiliser avec précaution car ils peuvent occasionner des échauffements trop importants du collet des plants. Il faut plutôt préférer des dispositifs individuels type isoplant ou éventuellement du paillage plastique individuel disposé de manière à permettre la récupération de la pluie au pied du plant [TPG 8]. Les mulchs sont également à déconseiller car ils peuvent empêcher la recharge en eau du sol lors de faibles pluies (la pluie restant prisonnière du mulch puis s'en évaporant sans que le plant ne puisse l'utiliser [26]).

Sur talus, des dispositifs tels que les toiles de jute ou de coco ou les géotextiles peuvent à la fois intervenir dans la stabilisation des talus et la limitation de la concurrence herbacée.

Si de tels dispositifs préventifs ne sont pas mis en place ou s'ils sont inefficaces, un désherbage soigneux doit être fait en particulier si un apport de compost a été effectué. Plus le milieu sera riche, plus le tapis herbacé se développera et nuira aux plants. C'est pourquoi les plantations sur une couche épaisse de stériles fins sans amendement et parfois sans terre végétale peuvent donner de bons résultats car le milieu est trop pauvre pour permettre l'installation de plantes concurrentes [TPG 12].

3 - ARROSAGE

Des arrosages des plants les 3 à 4 premières années peuvent être utiles et très efficaces pour améliorer la survie du plant. Pour certaines expérimentations, 1 à 2 arrosages par mois ont ainsi été réalisés en été [TPG 8].

Un bassin de réserve d'eau récupérant les eaux de ruissellement peut être mis en place sur le carreau. En période de sécheresse, l'eau y sera pompée. Cependant la fréquence et la quantité des apports devront être calculés en fonction des précipitations et de l'évapotranspiration et juste apporter la quantité permettant au plant de ne pas se dessécher. En cas d'arrosage trop fréquent et trop abondant, les plants ne mettront pas en place un système racinaire suffisamment développé. Une diminution et un espacement des arrosages doit alors permettre de rendre les plantations autonomes [75].

4 - LES TECHNIQUES SYLVICOLES APPLIQUÉES

Le regarnissage des plants morts est à faire afin de maintenir un reboisement homogène. Cependant au vu de dossiers de suivi [TPG 8], il apparaît difficile pour les feuillus tout au moins, de reconnaître si le plant est mort. Certains plants comptés morts car leur feuillage était totalement desséché, ont rejeté de souche et étaient en bonne santé au comptage suivant. Eventuellement un recépage peut être utile afin de faire repartir un plant à faible croissance.

Les boisements de banquette ne pouvant pas être à objectif de production, les techniques sylvicoles n'ont pas lieu d'être. Seul le dégagement des plants d'une végétation arbustive envahissante est à recommander (cas du roncier de Marchaux [F9 M] qui a envahi les plants).

En réaménagement de carrières de roche massive en fosse ou à flanc de coteau, les conditions climatiques difficiles et les sols à faible réserve en eau induisent des déficits fréquents d'alimentation hydrique des plants pouvant très facilement les éliminer. Toute la reconstitution et la préparation du sol, le choix des espèces et du type de plant doivent avoir pour but d'assurer la meilleure alimentation en eau possible :
- en limitant la consommation d'eau par d'autres espèces que celles plantées ;
- en favorisant au maximum l'infiltration des précipitations et en réduisant le ruissellement ;
- en reconstituant un sol épais capable d'avoir une réserve en eau correcte ;
- en choisissant des plants en conteneur plantés à l'automne et capables d'avoir une croissance rapide pendant la saison la plus favorable.

CONCLUSION

Par rapport aux premiers réaménagements forestiers menés dans les années 1980, les producteurs de granulats ont fait de gros efforts pour améliorer la qualité des boisements forestiers réalisés, surtout en terme de meilleure intégration dans l'environnement. Ces efforts doivent être poursuivis surtout dans les réaménagements des carrières de roches massives à flanc de coteau qui sont les plus difficiles à réussir, tout particulièrement en zone méditerranéenne. Comme la législation et les pratiques actuelles risquent de conduire à une augmentation des exploitations en roches massives par rapport aux exploitations de gisements alluvionnaires, il est important d'approfondir les recherches et les expérimentations sur ce type de réaménagement.

Pour les réaménagements de fonds de fouille et de carreaux, les principaux points techniques qui pourraient être améliorés dans la pratique des carriers concernent :

- le respect impératif de conditions sèches pour manipuler l'horizon minéral et l'horizon organo-minéral ;
- l'ensemencement des stocks de terre (par des graminées et de la luzerne) ;
- la meilleure utilisation des fines de décantation pour améliorer la réserve utile en eau : des expérimentations seraient à mettre en place pour définir les meilleures conditions de prélèvement, de ressuyage et d'incorporation des fines dans l'horizon minéral des sols à remettre en place ;
- la définition dès le début de l'exploitation, d'un cahier des charges précis concernant la quantité et la qualité des plants à commander afin de pouvoir sélectionner le pépiniériste y répondant le mieux et garantir la livraison ultérieure de plants de qualité ;
- un contrôle efficace de la concurrence pour l'eau par la limitation du développement des plantes herbacées dans la proximité immédiate du plant.

Pour les réaménagements de talus (morainiques ou alluvionnaires sur hautes terrasses ou encore créés par le talutage de fronts de taille) les principaux points à améliorer concernent :

- le respect d'une pente pas trop importante (entre 35 ° et 38° maximum) ;
- la stabilisation du talus permettant de limiter érosion et ravinement.

Pour les réaménagements de banquettes issues de l'exploitation de carrières de roche massive à flanc de coteau ou en fosse non comblée, les facteurs limitant la réussite de nombreuses plantations effectuées dans le passé sont :

- le manque d'eau disponible pour les jeunes plants pendant la phase très sensible de la reprise après plantation (pendant les 2 à 3 premières années) ;
- le manque de profondeur de sol prospectable par les racines qui amène des dépérissements ultérieurs d'arbres installés depuis parfois plus d'une dizaine d'années.

Des expérimentations sont à mettre en place dans la région méditerranéenne afin de tester les conditions optimales (d'un point de vue réussite du boisement, écologique et paysager mais aussi économique) des deux options de réaménagement possibles :

- reconstituer une épaisseur de sol suffisante avec des fines et de la matière organique (issue de compost) ;
- planter directement sur stériles des plants inoculés d'espèces méditerranéennes fixatrices d'azote atmosphérique et des plants forestiers mycorhizés afin de créer par la voie biologique, un écosystème autosuffisant à long terme.

Pour ces réaménagements difficiles, la définition d'un cahier des charges très précis des plants souhaités est encore plus nécessaire.

Ces conclusions sont plus issues de l'analyse des réaménagements actuels de qualité et de la bibliographie (en particulier d'études étrangères sur le réaménagement de carrières, mines ou décharges mais aussi d'expériences d'aménagements de talus d'autoroute, de reconstitution de pistes de ski...) que du bilan 10 à 15 ans après des expérimentations mises en place dans les années 1980 avec l'aide du comité de la taxe parafiscale sur les granulats. En effet, ce bilan pratiqué en 1999 n'a pas pu atteindre totalement les objectifs fixés en matière de retour d'expériences sur les expérimentations mises en place par le comité de la taxe parafiscale sur les granulats dans les années 1980. Les conditions post-plantation sont bien souvent mal connues (entretien, arrosage éventuel...) et ont une influence forte sur le devenir de la plantation.

GLOSSAIRE

Actinomycètes : bactéries formant des filaments ramifiés dont certaines, les Frankia, sont capables de fixer l'azote atmosphérique soit de manière libre dans le sol (voie minoritaire) soit en symbiose avec des plantes supérieures.

Aérobie : toute réaction chimique ou biochimique qui se produit uniquement en présence d'oxygène.

Amendement : matière fertilisante apportée aux sols dont la fonction principale est d'améliorer leurs propriétés physiques et/ou chimiques et/ou leur activité biologique.

Amendement organique : matière fertilisante apportant principalement des substances d'origine végétale, mais pouvant contenir des déjections animales. Partiellement humifié et minéralisé sous l'action de la microflore du sol, il agit tout d'abord sur les composantes physiques et biologiques de la fertilité (structure du sol, activité microbienne) et, après minéralisation, sur les composantes chimiques (richesse du sol en éléments fertilisants).

Anaérobie : toute réaction chimique ou biochimique qui se produit uniquement en absence d'oxygène, il s'agit principalement de fermentations.

Anéciques (vers de terre) : vers de terre vivant dans le sol mais prélevant pendant la nuit la litière de surface qu'ils tirent dans leurs galeries. Leur activité pédogénétique est intense car ils rejettent en surface, sous forme de turricules, du sol profond (provenant des galeries qu'ils creusent).

Aoûté : plant dont les rameaux de l'année sont lignifiés et durcis à la fin de leur phase de croissance (en fin d'été en général).

Battance : destruction de la structure de la surface du sol sous l'effet de la pluie avec dispersion des colloïdes puis formation, lors du ressuyage et de la dessiccation, d'une croûte superficielle, continue et consistante (croûte de battance).

Billon : modelé du terrain en légères buttes séparées par des fossés de drainage.

Compactage : mécanisme de diminution de l'espace poral :
* mécanique : à teneur en eau constante, par la pression exercée par des engins circulant sur le sol ou par la charge animale.
* hydrique : avec perte d'eau par dessiccation,

Crise de transplantation : période où le plant à racines nues mis en place doit survivre malgré sa faible possibilité d'alimentation en eau et en éléments nutritifs. En effet, après l'arrachage et la plantation, les racines existantes sont mourantes et de nouvelles racines et radicelles doivent se créer avant que le plant puisse s'alimenter dans le sol. En climat difficile, cette crise de transplantation peut provoquer la mortalité d'un grand nombre de plants.

Débourrement : chute des écailles du bourgeon protégeant la nouvelle pousse et ouverture du bourgeon. A ce stade phénologique, les bourgeons et les très jeunes pousses sont très sensibles au gel.

Décapage : action d'enlever les couches superficielles du sol, le décapage est sélectif quand les différents horizons du sol (horizon humifère, horizon minéral) sont enlevés séparément.

Défrichement : action de couper les arbres en place pour libérer le sol de l'occupation forestière. Les souches doivent également être enlevées afin de permettre, dans le cas du réaménagement de carrière, le décapage du sol.

Dépressage : consiste à éliminer en une seule fois, en les coupant et en les abandonnant à terre, les tiges attardées ou les tiges dominantes mal formées. Le moment idéal pour intervenir est quand les arbres font de 4 à 7 m.

Elagage : consiste à couper des branches pour obtenir du bois sans nœuds sur une longueur déterminée de tronc droit et vertical (généralement sur 4 à 10 m de haut).

Endogés (vers de terre) : vers de terre qui vivent dans les 10 premiers centimètres du sol minéral où ils se nourrissent, ils ont un rôle sur le sol en ce qui concerne le brassage et le mélange de matière organique et minérale et la structuration des horizons organo-minéraux.

Engrais vert : culture qui sera enfouie dans le sol (souvent des légumineuses ou des crucifères). Elle a pour objectifs :
* l'amélioration de la structure du sol ;
* l'amélioration du niveau de fertilité du sol ;
* la protection du sol contre l'érosion ;
* la stimulation de la vie microbienne dans le sol.

Epigés (vers de terre) : vers de terre qui vivent uniquement dans la litière, ils n'ont aucune action sur le sol.

Espace racinaire : volume de sol prospectable par les racines. Les racines ne peuvent pas croître si elles rencontrent une barrière physique (couche de sol compactée, roche, nappe d'eau ou poche d'air).

Fines de décantation : matériau limoneux issu de la décantation dans un bassin des eaux résiduaires de lavage de granulats.

Flore adventice : flore indésirable à un endroit en raison de l'occupation du sol que l'homme souhaite à cet endroit. Le tapis herbacé est pour une plantation forestière une flore adventice car il entre en concurrence avec les espèces plantées par l'homme pour l'eau et la lumière.

Granulat : fragments de roche d'origine alluvionnaire, marine, calcaire ou éruptive. Ils sont issus des opérations de broyage-concassage, criblage et lavage des matériaux extraits du gisement. Ils sont utilisés comme matière première dans la construction et l'aménagement du territoire.

Horizon : couche grossièrement parallèle du sol dont l'existence est reconnue par l'observateur. Les horizons sont différents les uns des autres par leurs constituants, leur organisation et leur comportement.

Horizons organiques : horizons situés à la surface du sol et contenant essentiellement de la matière organique résultant de l'accumulation de débris ou fragments végétaux morts plus ou moins transformés. Ils sont constitués de manière fine par 3 horizons : litière OL, horizon de fragmentation OF, horizon d'humification OH.

Horizon d'humification : (OH) horizon formé de 70% en volume de matière organique fine (amas de déjections de la faune du sol et de micro-débris végétaux).

Horizon de fragmentation : (OF) horizon formé de résidus végétaux plus ou moins fragmentés et mélangés avec de la matière organique fine (les déjections de la faune du sol).

Horizon organo-minéral : horizon contenant en mélange de la matière organique et de la matière minérale, il est situé sous les horizons organiques.

Humifère (horizon) : qui contient une proportion élevée d'humus, c'est l'horizon supérieur du sol. Les synonymes sont terre végétale, horizon A ou horizon hémorganique.

Infestation : phase de la constitution de la nodosité fixatrice d'azote consistant en l'entrée de la bactérie dans la racine (invasion du poil absorbant) et le développement du nodule par prolifération des cellules de la racine.

Inoculation : opération qui met en contact par l'intermédiaire d'un substrat de culture l'extrémité des racines et un organisme symbiotique (bactérie ou champignon). L'inoculation est efficace s'il y a constitution d'un organe mixte racine/organisme symbiotique (nodosité ou mycorhize) efficace.

Litière : débris végétaux tombés au sol (feuilles, écailles de bourgeons, fleurs, fruits, petits rameaux...) peu évolués et en cours de fragmentation et d'incorporation par la faune et la flore du sol. Elle est aussi dénommée horizon OL.

Mature (espèce) : espèce qui intervient dans les stades les plus avancés de la succession végétale. Il s'agit d'espèces capables de supporter l'ombre dans leurs premières années et à longue durée de vie (hêtre, sapin...).

Minéral (horizon) : horizon du sol situé sous l'horizon humifère et qui contient moins de 20% en poids de carbone organique. Il est parfois enrichi en éléments fins ou amorphes : argile, oxydes de fer et d'aluminium. Le synonyme est horizon B.

Mouillère : partie d'un terrain de faible étendue affectée par apport d'eau localisé et de durée variable. Les mouillères temporaires peuvent résulter de la concentration des eaux pluviales par ruissellement ou écoulement peu profond :
- soit du fait d'irrégularités (métriques à décamétriques) de la surface du sol (microdépression, changement de pente).
- soit du fait de la profondeur faible (< 1m) et irrégulière du sommet d'un horizon peu perméable (par exemple compacté),

Mycorhize : organe mixte situé sur les racines des végétaux formé par la juxtaposition de deux types d'organismes : la plante supérieure et les filaments souterrains (les hyphes) du champignon. La mycorhize joue un rôle essentiel dans l'absorption par les végétaux qui l'hébergent, de l'eau et des minéraux du sol.

Nodosité : organe spécifique formé par la prolifération simultanée des cellules de la racine d'une légumineuse et de bactéries du genre Rhizobium. Cette nodosité grâce à une protéine spécifique, la leghémoglobine, peut fixer l'azote atmosphérique et le transférer à la plante sous forme assimilable par la racine (on utilise aussi ce terme pour les symbioses avec Frankia).

Peuplement abri : mise en place d'espèces pionnières à croissance rapide, qui permettront le développement sous leur ombrage d'espèces matures installées en même temps qu'elles.

Phytocide : produit chimique permettant la destruction de la végétation à la fois herbacée (herbicide) mais aussi de ligneux arbustifs (ronces, genêts...).

Pionnière (espèce) : espèce apte à coloniser des terrains nus et participant donc aux stades initiaux d'une succession végétale. Ces espèces peuvent germer et se développer en pleine lumière (bouleau, saules, pins...).

Recépage : action de couper un plant sous le départ des premières ramifications afin de lui permettre de refaire une nouvelle tige (s'applique dans le cas de plants malformés ou de faible vigueur). Cette opération permet dans certains cas de ne pas remplacer le plant.

Régaler : action d'étaler la terre pour aplanir le terrain

Regarnissage : opération consistant si le nombre de plants morts est trop important, à replanter de nouveaux plants afin d'obtenir la densité d'arbres souhaitée.

Repiquage : action en pépinière de changer le plant de substrat pour arrêter la croissance de sa racine principale et favoriser le départ de racines secondaires. Il doit être effectué par conditions sèches afin que la racine soit sectionnée et non arrachée (cela occasionnerait des attaques parasitaires et des déformations du système racinaire).

Réserve utile en eau : fraction de l'eau contenue dans le sol et disponible pour les végétaux : les deux tiers de cette réserve sont facilement utilisables, le mécanisme de défense de la plante contre la sécheresse intervient quand la fraction facilement utilisable est consommée. La réserve utile d'un sol dépend en partie de sa densité apparente, de sa teneur en terre fine et de la profondeur d'enracinement de la plante.

Rhizobium : bactérie qui crée une symbiose avec les plantes de la famille des légumineuses sous forme de nodosités racinaires et qui fixe l'azote atmosphérique pour le transférer à la plante.

Soulevage : action en pépinière, de passer à 15 cm sous le sol une lame qui sectionne la racine pivotante des jeunes semis afin d'arrêter la croissance du pivot.

Stades phénologiques : ils traduisent le calendrier de la vie de la plante : époque d'ouverture des bourgeons, de la floraison, de la fructification, de la chute des feuilles... Ces caractéristiques sont liées à l'espèce mais aussi à la provenance de la graine. Le calendrier est piloté par des besoins en chaleur qui sont satisfaits plus ou moins tôt selon les années en fonction du climat.

Stérile : matériau qui recouvre un dépôt exploitable et que l'on enlève en vue de l'exploitation du gisement. Un synonyme est terre de découverte.

Structure : arrangement spatial des particules minérales du sol.

Succession végétale : suite des groupements végétaux qui se remplacent au cours du temps en un même lieu.

Symbiose mycorhizienne : association au bénéfice des deux partenaires entre un arbre et un champignon. L'arbre nourrit le champignon en sucres et le champignon explore le sol à grande distance de la racine (plusieurs dizaines de centimètres), il extrait l'eau et les éléments nutritifs et les transfère à l'arbre. Le champignon peut solubiliser des formes de phosphore et d'azote inaccessibles aux racines. Il peut pénétrer des pores du sol plus fins que les racines et donc améliorer la fourniture en eau en cas de sécheresse.

Taille de formation : consiste à supprimer les têtes doubles ou multiples et les branches qui se redressent et concurrencent la cime du plant.

BIBLIOGRAPHIE

RAPPORTS FINANCES PAR LA TAXE PARAFISCALE SUR LES GRANULATS

[TPG 1] Le reboisement des carrières et déblais miniers : le constat avant exploitation, 1982, Cemagref - 031.EG.074

[TPG 2] Revégétalisation des carrières : principes généraux applicables aux reboisements, 1984, Cemagref - 049.EG.109

[TPG 3] Utilisation des boues de lavage dans le réaménagement des carrières, végétalisation des boues, 1986, Cemagref, CETE , LRPG - 041.EG.098

[TPG 4] Un procédé exemplaire de réaménagement et de reverdissement des carrières : l'emploi des espèces fixatrices symbiotiques d'azote atmosphérique, rapport final, 1991, Université Claude Bernard Laboratoire d'écologie microbienne - 060.EG.161

[TPG 5] Réaménagement pilote de gravières avec des ordures ménagères brutes et traitées dans la vallée de la Moselle à Pont-à-Mousson, 1984, ANRED, BRGM - 021.054.013

[TPG 6] Evaluation des potentialités écologiques des sites de carrières après exploitation et modalités de leur restauration écologique, document de synthèse, 1985, Sauveterre - Ingénieurs Conseil - 045.EG.088

[TPG 7a] Expérience de revégétalisation en climat méditerranéen carrière de calcaire Jean Lefebvre à Chateauneuf-les-Martigues, rapport d'exécution des travaux 1ère année, 1984, Délégation régionale aux granulats unicem PACA

[TPG 7b] Expérience de revégétalisation en climat méditerranéen carrière de calcaire Jean Lefebvre à Chateauneuf-les-Martigues, rapport final 2ème année, 1985, Délégation régionale aux granulats unicem PACA

[TPG 7c] Expérience de revégétalisation en climat méditerranéen carrière de calcaire Jean Lefebvre à Chateauneuf-les-Martigues, rapport de pousse de 3ème année, 1985, URPG

[TPG 8] Revégétalisation de carrières en climat méditerranéen essai à Gourdon (06), rapport final, 1990, Cemagref - 044.EG.725

[TPG 9] Reboisement de terrains dégradés : essai à Jablines (77), 1990, Cemagref - 043.EG.724

[TPG 10] Revégétalisation des carrières de roches massives, essai à Le Puix Gy, rapport final, 1990, Cemagref - 048.EG.726

[TPG 11a] Réaménagement de carrière en milieu boisé : essai de revégétalisation de front de taille, Marchaux, rapport de suivi 1985, Cemagref - 043.EG.723

[TPG 11b] Revégétalisation des carrières de roches massives (Marchaux), rapport de synthèse, 1987, Cemagref - 035.EG.723

[TPG 11c] Ecrans paysagers et revégétalisation des carrières : bilan des essais réalisés à Marchaux (Doubs), rapport de synthèse, Cemagref - 035.EG.723

[TPG 11d] Carrière de Marchaux (Doubs) rapport d'expertise phytoécologique, 1997, Ferrez Y. Weidmann J.C., Sablières du Doubs

[TPG 12a] Réintégration paysagère expérimentale sur un gradin de la carrière de Saint-Tronc et sur un gradin et trois fronts de taille de la carrière du Redon (commune de Marseille), rapport final 1ère année, 1982, Délégation régionale aux actions granulats unicem PACA, INRA Châlons-sur-Marne

[TPG 12b] Réintégration paysagère expérimentale sur un gradin de la carrière de Saint-Tronc et sur un gradin et trois fronts de taille de la carrière du Redon (commune de Marseille), rapport final 2ème année, 1983, Délégation régionale aux actions granulats unicem PACA, INRA Châlons-sur-Marne

[TPG 12c] Réintégration paysagère expérimentale sur un gradin de la carrière de Saint-Tronc et sur un gradin et trois fronts de taille de la carrière du Redon (commune de Marseille), rapport final 3ème année, 1984, Délégation régionale aux actions granulats unicem PACA, INRA Châlons-sur-Marne

[TPG 13a] Projet d'expérimentation de boisement d'un fond de gravière à Sierentz (Haut-Rhin), janvier 1980, Chambre d'agriculture du Haut-Rhin - 022.068.010

[TPG 13b] Boisement du fond de carrière à Sierentz (Haut-Rhin), 1980, Chambre d'agriculture du Haut-Rhin, SUA Développement Forêts - 022.068.010

[TPG 13c] Reboisement du fond de gravière à Sierentz (Haut-Rhin), rapport de visite du 24 septembre 1980, Sablières de Sierentz, Chambre d'agriculture du Haut-Rhin, CRPF Lorraine-Alsace - 022.068.010

[TPG 13d] Opération pilote de démonstration de réaménagement agricole et forestier de carrières pour la région Alsace, à Sierentz (Haut-Rhin), rapport de visite du 23 juin 1981, Sablières de Sierentz, Chambre d'agriculture du Haut-Rhin, CRPF Lorraine-Alsace - 022.068.010

[TPG 13e] Essai de réaménagement forestier de la carrière de Sierentz (Haut-Rhin), note de synthèse sur l'expérience de peupliers et essences diverses, 1984, INRA - 022.068.010

[TPG 13f] Essai de reverdissement de la sablière de Sierentz (Haut-Rhin), rapport, 1986, CRPF Lorraine-Alsace - 022.068.010

[TPG 14] Essai de revégétalisation après exploitation par des essences forestières carrière de la forêt communale de Sündhoffen (68), rapport de synthèse, 1986, Cemagref - 033.EG.072

[TPG 15] Etude des possibilités de remise en état agricole à l'avancement d'une carrière remblayée en phase liquide avec des terres de sucrerie (Beauchamp), mars 1985, DRIRE Picardie, BRGM, BDPA - 047.080.009

DOCUMENTS SUR DES REAMENAGEMENTS

Lafarge, Carrière de Bernières-sur-Seine Eure.

UNPG, Bernières-sur-Seine, réaménagement écologique et forestier (27), fiche tirée de Paysage Carrière Environnement

Jean Lefebvre Méditerranée, Carrière de Chateuneuf-les-Martigues, Jean Lefebvre Méditerranée, Aix-en-Provence, 5 p.

UNPG, Chateauneuf-les-Martigues, réaménagement par reboisement (13), fiche tirée de Paysage Carrière Environnement

UNPG, Cuiry-les-Chaudardes, boisement forestier - zone agricole (02), fiche tirée de Paysage Carrière Environnement

UNPG, Ecuelles, réaménagement agricole et forestier (77), fiche tirée de Paysage Carrière Environnement

Lafarge Bétons Granulats, Guernes (78) : affirmer le caractère rural de la boucle Saint-Martin-la-Garenne

UNPG, Guernes, boisement forestier - plan d'eau paysager et écologique - zone naturelle (78), fiche tirée de Paysage Carrière Environnement

Ecosphère, Agence des espaces verts de la région Ile-de-France, 1994 - Domaine régional de la boucle de Moisson (Yvelines) expertise écologique et propositions de gestion, 73 p.

Lafarge Bétons Granulats, Moisson-Freneuse (78) : régénération d'un espace forestier

Lafarge Bétons Granulats, Carrière de Moisson-Freneuse Yvelines

UNPG, Moisson-Freneuse (78), réaménagement forestier, fiche tirée de Paysage Carrière Environnement

Habrard S., 1998 - *Mémoire sur l'état des lieux de la carrière réaménagée en talus boisé et terre agricole, commune de Sonnaz (73)*, étude de cas Maîtrise de sciences de l'environnement, Université de Savoie, Le Bourget du Lac, 29 p.

ARTICLES SCIENTIFIQUES, RAPPORTS ET GUIDES DE BONNE PRATIQUE

[0] ADEME, Cemagref, 1999 - *Utilisation des déchets organiques en végétalisation, guide de bonnes pratiques, données et références*, Ademe éditions, Angers, 112 p.

[1] ADEME, Agrestis, Chambre d'Agriculture de la Savoie, Conseil Général de Savoie, n. d. - La végétalisation de sites dégradés avec utilisation de déchets organiques : l'expérience savoyarde

[2] Allen D.F., 1983 - Quarry site rehabilitation and afteruse, *Surface mining and quarrying, symposium*, october 1983, Bristol : 89-97

[3] Andersen A.N., Sparling G.P., 1997 - Ants as indicators of restoration success : relationship with microbial biomass in the Australian Seasonal tropics, *Restoration Ecology 5 (2)* : 109-114

[4] Andrés P., 1999 - Ecological risks of the use of sewage sludge as fertilizer in soil restoration : effects on the soil microarthropod populations, *Land Degradation and Development* **10** : 67-77

[5] Annen B., Dörflinger A., Grimm F., Kästli T., Teutsch R., 1991 - *Forêt et gravières : directives pour le reboisement des gravières désaffectées*, FSK- Schweiz. Fachverband für Sand und Kies, Bern, 43 p.

[6] Arnal G., Chevassu G., 1984 - Problèmes posés par le décapage et le stockage de la terre végétale, *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* **29** : 217-219

[7] Arnal G., Lamade E., 1987 - La reconquête par la végétation spontanée des anciennes carrières de sable de Fontainebleau, applications à la replantation de ces carrières, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* **152** : 9-116

[8] Ashby W.C., 1997 - Soil ripping and herbicides enhance tree and shrub restoration on stripmines, *Restoration Ecology 5 (2)* : 169-177

[9] Azcarate J., 1997 - Municipal sludge as a source of organic matter in land reclamation, European experiences and perspectives, Ayuntamiento de Madrid

[10] Bailey D., Gunn J., 1992 - Landform replication research in two English limestone quarries, achieving land use potential through reclamation, *9th annual national ASSMR meeting*, Duluth, Minnesota : 487-496

[11] Bailey D., Gunn J., Handdley J., Shaw S., 1991 - The construction of limestone ecosystems on quarried rock slopes, *Proceedings of the environmental workshop, australian mining industry council, Perth* : 13-25

[12] Bédécarrats A., nd - Mise au point et évaluation d'un matériel végétal performant à partir d'espèces fixatrices symbiotiques d'azote, rapport d'activité programme de recherche sur les risques naturels, XI ème plan état région Rhône-Alpes, 30 p.

[13] Biondini M.E., Bonham C.D., Redente E.F., 1985 - Relationships between induced successional patterns and soil biological activity of reclaimed areas, *Reclamation and Revegetation Research 3* : 323-342

[14] Brimont A., Chiron S., 1993 - Requalification des friches industrielles de Lorraine : bilan des plantations, Etablissement Public de la Métropole Lorraine, Association pour la recherche sur le bois en Lorraine, 41 p.

[15] Bruhier S., 1992 - *Méthodologie de réaménagement de carrière*, stage d'études ENGREF, Bureau d'études Pierre Blanc, Engref, Paris, 51 p + annexes

[16] Brun J.J., Cluzeau D., Trehen P., Bouché M.B., 1987 - Biostimulation : perspectives et limites de l'amélioration biologique des sols par stimulation ou introduction d'espèces lombriciennes, *Revue d'Ecologie et de Biologie des Sols* **24** *(4)* : 685-701

[17] Brunet Y., 1983 - Principaux aspects du réaménagement des carrières, *Cemagref Bulletin d'Information n°304* : 54-67

[18] Bureau d'études EI, n. d. - Régénération végétale des sites par la restructuration des sols, Avrigny, 14 p.

[19] Burrows F.J., 1986 - The effect of taproot lenght and soil disturbance on the growth of Angophora costata seedlings planted on dunes restored after mineral sand mining, *Reclamation and Revegetation Research* **4** : 167-182

[20] Cadillon M., Gruez J., Falconnet G., 1987 - Reboisement méditerranéen avec des boues résiduaires urbaines conditionnées thermiquement, bilans agronomique et forestier du boisement expérimental de Carpiagne, Cemagref Aix en Provence, 10 p.

[21] Canadian land reclamation association, 1987 - *Proceedings of the twelfth annual meeting, Laurentian university*, Sudbury, Ontario, 260 p.

[22] Cancelli A., Francani V., 1984 - Quarry reclamation in the lombardy plain, Italy, *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* **29** : 237-240

[23] Cemagref, 1982a - *Revégétalisation des terrains dégradés : éléments d'une méthodologie pour restaurer la fertilité des sols, application aux carrières*, Cemagref de Grenoble, étude n°184, 88 p.

[24] Cemagref, 1982b - Techniques de reboisement : réflexions générales, conception, *Note technique* n°**47**, 71 p.

[25] Cemagref, 1982c - Les semences forestières, *Note technique* n°**48**, 80 p.

[26] Cemagref, 1983 - *L'utilisation des déchets urbains pour la reconstitution des forêts méditérranéennes*, Cemagref Aix en Provence, 97 p.

[27] Cemagref, 1987-1991 - *Guide technique du forestier méditerranéen français*

[28] Cemagref, INRA, nd - *Recherche et développement en forêt méditerranéenne*

[29] Chen Y., Inbar Y., Hadar Y., 1988 - Composted agricultural wastes as potting media for ornamental plants, *Soil Science 145 (4)* : 298-303

[30] Chichester F.W., Hauser V.L., 1984 - Revegetation of minesoils constructed from lignite overburden in east central Texas, *Reclamation and Revegetation Research 3* : 137-152

[31] Chong C., 1999 - Experiences with the utilization of wastes in nursery potting mixes and as field soil amendments, *Canadian Journal of Plant Science 79* : 139-148

[32] Chong C., Hamersma B., Bellamy K.L., 1998 - Comparative rooting of deciduous landscape shrub cuttings in media amended with paper mill biosolids from four different sources, *Canadian Journal of Plant Science 78 (4)* : 517-526

[33] Craig G.F., 1985 - Mulches as aids in the growth of Acacia species used for coastal dune revegetation, *Reclamation and Revegetation Research 3* : 313-322

[34] Cuenca G., De Andrade Z., Escalante G., 1998 - Arbuscular mycorrhizae in the rehabilitation of fragile degraded tropical lands, *Biol. Fertil. Soils 26* : 107-111

[35] Cullen W.R., Wheater C.P., Dunleavy P.J., 1998 - Establishment of species rich vegetation on reclaimed limestone quarry faces in Derbyshire, UK, *Biological Conservation 84* : 25-33

[36] Defrance G., Mandil C., 1995 - circulaire interministérielle du 11 janvier 1995 concernant le schéma départemental des carrières, Paris, 18 p.

[37] Delschen T., 1998 - Impacts of a long term application of organic fertilizers on soil quality parameters in reclaimed loess soils of the Rhineland lignite mining area, communication personnelle, 28 p.

[37a] HMSO, 1996 - *Mineral planning guidance : the reclamation of mineral workings*, MPG7, The Stationery Office, London, 53 p.

[38] DERF, 1990 - *Boiser et après*, ministère de l'agriculture et de la forêt, 63 p.

[39] DERF, ONF, 1990 - *Réussir la forêt : contrôle et réception des travaux*, ministère de l'agriculture et de la forêt, 63 p.

[40] Dinger F., 1997 - *Végétalisation des espaces dégradés d'altitude*, Cemagref éditions, 139 p.

[41] Dinger F., Aubry F., 1998 - *The use of organic waste for seeding to grass and replanting disturbed land surfaces in rough terrain*, Cemagref, Agrestis, 1 p.

[42] Dinger F., Tardif P., 1996 - *Utilisation des boues de papeterie en végétalisation de carrières*, Cemagref, Grenoble, 16 p.

[43] Dobson M.C., Moffat A.J., 1993 - *The potential for woodland establishment on landfill sites*, HMSO, London, 88 p.

[44] Donnadieu M., 1983 - La cicatrisation des plaies paysagères le cas de la cicatrisation végétale naturelle, *Journées de formation en urbanisme Aix-en-Provence*, 12-14 avril 1983

[45] Dworschak U.R., 1997 - Earthworm populations in a reclaimed lignite open-cast mine of Rhineland, *European Journal of Soil Biology 33 (2)* : 75-81

[46] Emmerling C., 1998 - Kinetics of litter decomposition in restored forest soils, *Pedobiologia 42* : 185-191

[47] Entreprise Spada, Société du Canal de Provence, 1986 - *Utilisation des boues de lavage de granulats à des fins de reconstitution des sols*, 30 p.

[48] Faivre N., 1998 - *Bilan d'un an de revégétalisation d'une ancienne carrière par l'Office National des Foêts : la carrière de Montréal-la-Cluse (ain)*, mémoire Université Claude Bernard Lyon, 20 p.

[49] Gagen P., Gunn J., 1987 - Restoration blasting in limestone quarries, *Explosives Engineering autumn* : 14-15

[50] Garbaye J., Bonneau M., 1996 - Assurer une bonne nutrition minérale des arbres, condition d'une forêt durable, *INRA mensuel les dossiers 12* : 32-35

[51] Gibson D.J., Johnson F.L., Risser P.G., 1985 - Revegetation of unreclaimed coal strip mines in Oklahoma II plant communities, *Reclamation and Revegetation Research 4* : 31-47

[52] Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 1998 - *Le sol vivant, bases de pédologie biologie des sols*, Collection gérer l'environnement n°14, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 519 p.

[53] Gonzales C.M., Jimeno C.L., n. d. - Technicas de restauracion de graveras, Asociacion nacional espanoma de fabricantes de aridos (ANEF) : 361-382

[54] Grant C.D., Koch J.M., 1997 - Ecological aspects of soil seed banks in relation to bauxite mining. Twelve year old rehabilited mines, *Australian Journal of Ecology 22* : 177-184

[55] Gunn J., Bailey D., 1993 - Limestone quarrying and quarry reclamation in Britain, *Environmental Geology 21* : 167-172

[56] Harrington C.A., 1999 - Forests planted for ecosystem restoration or conservation, *New Forests 17* : 175-190

[57] Harris J.A., Birch P., Short K.C., 1989 - Changes in the microbial community and physico-chemical characteristics of topsoils stockpiled during opencast mining, *Sol Use and Management 5 (4)* : 161-168

[58] Harris J.A., Birch P., Short K.C., 1993 - The impact of storage of soils during opencast mining on the microbial community : a strategist theory interpretation, *Restoration Ecology june* : 88-100

[58a] Hasinger G., Keller L., Marendaz E., Neyroud J.A., Vökt U., Weisskopf P., 1993 - *Le sol cet inconnu*, Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage, Berne, 16 p.

[59] Henensal P., 1996 - La lutte contre l'érosion sur l'emprise routière : une contribution à la protection de l'environnement, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées 201* : 17-28

[60] Hewgill D., 1986 - Soil storage, *Mineral Planning 26* : 26-29

[60a] HMSO, 1996 - *The reclamation of mineral workings to agriculture*, HMSO, Londres, 148 p.

[61] Hodgson J.G., 1981 - The botanical interest and values of quarries in Ecological quarries, the importance of natural vegetation, *Workshop, february 1981, Huntingdon* : 3-11

[62] INRA, Cemagref, 1988 - *Contribution expérimentale à la revégétalisation des écosystèmes forestiers méditerranéens dégradés en zone karstique, exemple de la commune d'Eze*, 15 p.

[62a] Institut agricole de l'état de Fribourg, 1998 - *Directives concernant le décapage et la mise en dépôt de la terre végétale ainsi que la remise en culture de gravières et de décharges*, 15 p.

[63] Jabiol B., Brêthes A., Ponge J.F., Toutain F., Brun J.J., 1995 - *L'humus sous toutes ses formes*, ENGREF Nancy, 63 p.

[64] Jefferson R.G., 1984 - Quarries and wildlife conservation in the Yorkshire Wolds, England, *Biological Conservation* **29** : 363-380

[65] Jefferson R.G., Usher M.B., 1987 - The seed bank in soils of disused chalk quarries in the Yorshire Wolds, England : implications for conservation management, *Biological Conservation* **42** : 287-302

[66] Jimeno C.L., del Milagro Escribano Bombin, n. d. - Technicas de restauracion de canteras, Asociacion nacional espanoma de fabricantes de aridos (ANEF) : 383-404

[67] JO du 10 décembre 1997 : Epandage des boues issues du traitement des eaux usées, décret n°97-1133 du 8 décembre 1997

[68] JO du 31 janvier 1998 : Epandage des boues sur les sols agricoles, arrêté du 8 janvier 1998 en application du décret n°97-1133 du 8 décembre 1997

[69] Johnson D.B., Williamson J.C., Bailey A.J., 1991 - Microbiology of soils at opencast coal sites I short and long-term transformations in stockpiled soils, *Journal of Soil Science* **42** : 1-8

[70] Joinet H., 1998 - Boues d'épuration : des règles de sécurité renforcées, *Le Moniteur* **4925**

[71] Kershaw K.W., Mitchley J., Buckley G.P., Helliwell D.R., 1995 - Slope protection and establishment of vegetation on Channel Tunnel spoil in an environmentally sensitive coastal site, in Barker D. H. (ed) *Vegetation and slopes,* Institute of Civil Engineers, Thomas Telford, London : 117-126

[72] Lafarge Bétons Granulats, 1997 - *Lafarge Bétons Granulats et l'environnement : constat et ambitions,* Lafarge Bétons Granulats, Saint-Cloud, 55 p.

[73] Lavadou A., Verneau P., 1998 - Plantation des abords d'ouvrage de génie civil : optimisation du choix des espèces ligneuses, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* **213** : 91-114

[74] Laval M, 1995 - *Les carrières : nuisances et exemples de réaménagements,* rapport BRGM R 38789, Orléans, 28 p.

[75] Lebahy C., 1983 - *La réinsertion paysagère des carrières de roches massives par la revégétalisation,* mémoire de fin d'études ENITEF, Cemagref, 85 p.

[76] Lilin C., 1987 - *Techniques biologiques de conservation des sols en Haiti,* FAO, 36 p.

[77] Lippitt L., Fidelibus M. W., Bainbridge D.A., 1994 - Native seed collection, processing and storage for revegetation projects in the Western United States, *Restoration Ecology* **2** *(2)* : 120-131

[78] Loch R.J., Orange D.N., 1997 - Changes in some properties of topsoil at Tarong Coal Meandu Mine coalmine with time since rehabilitation, *Australian Journal Soil Ressource* **35** : 777-784

[79] Luke A., Brown D., Niles J., 1987 - Successful sand pit revegetation with woody plants, *Professional Horticulture* **1** : 106-111

[80] Marill R., 1992 - *Guide technique du forestier méditerranéen français : techniques de reboisement,* Cemagref, BRL, 46 p.

[81] Mathieu C., Pieltain F., 1998 - *Analyse physique des sols, méthodes choisies,* Tec et Doc Lavoisier, Paris, 275 p.

[82] Maubert F., Sauter M., 1985 - Expériences françaises de réaménagements de sites miniers, *Hydro-géologie* **2** : 159-167

[83] McCormack D.E., 1977 - Legislating soil reconstruction on surface-mined land in the United States, *Minerals and the Environment 6* :154-156

[84] McRae S.G., 1989 - The restoration of mineral workings in Britain - a review, *Soil Use and Management 5 (3)* : 135-142

[85] McRae S.G., 1997 - Land reclamation after open-pit mineral extraction in Britain, *International Conference on the Remediation and Management of Degraded Lands* Hong Kong december 1996, Ann Arbor Press : 1-16

[86] McRae S.G., 1998 - Heights of soil storage heaps, com pers., 1p.

[87] Merlin G., Di-Gioia L., Goddon C., 1999 - Comparative study of the capacity of germination and of adhesion of various hydrocolloids used for revegetalization by hydroseeding, *Land Degradation and Development 10* : 21-34

[88] Merrill S.D., Ries R.E., Power J.F., 1998 - Subsoil characteristics and landscape position affect productivity of reconstructed soils, *Soil Science Society of America Journal 62 (1)*

[89] Ministry of natural resources, 1984 - *Pit and quarry rehabilitation, the state of the art in Ontario,* 16 p.

[90] Ministry of natural resources, 1987 - *Sand and gravel pit rehabilitation in northern Ontario,* 24 p.

[91] Mitchley J., Buckley G.P., Helliwell D.R., 1996 - Vegetation establishment on chalk marl spoil : the role of nurse grass species and fertiliser application, *Journal of Vegetation Science 7* : 543-548

[92] Moffat A., Mac Neill J., 1994 - *Reclaiming disturbed land for forestry,* Bulletin 110, HMSO, London, 112 p.

[93] Morillon Corvol, n.d. - *Plan Environnement Entreprise,* Morillon Corvol, Rungis, 22 p.

[94] Mott J.B., Zuberer D.A., 1987 - Occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhizae in mixed overbunden mine spoils of Texas, *Reclamation and Revegetation Research 6* : 145-156

[95] Muzzi E., Roffi F., Sirotti M., Bagnaresi U., 1997 - Revegetation techniques on clay soil slopes in northern Italy, *Land Degradation and Development 8* : 127-137

[96] Odent B., Lansiart M., 1999 - *Remise en état des carrières : principes généraux, recommandations techniques et exemples par type d'exploitation,* BRGM, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 64 p.

[97] Ramsay W.J.H., 1986 - Bulk soil handling for quarry restoration, *Soil Use and Management 2 (1)* : 30-39

[98] Recyval, EDF, CNPE du Bugey, 1993 - *Valorisation agricole des boues minérales de la station d'épuration,* 31 p.

[99] Redente E.F., Doerr T.B., Grygiel C.E., Biondini M., 1984 - Vegetation establishment and succession on disturbed soils in northwest Colorado, *Reclamation and Revegetation Research 3* : 153-165

[100] Redente E.F., McLendon T., Agnew W., 1997 - Influence of topsoil depth on plant community dynamics of a seeded site in northwest Colorado, *Arid Soil Research and Rehabilitation 11* : 139-149

[101] Richardson J.A., 1993 - Long-term experiments on tree growth on colliery and limestone waste, *Quaterly Journal of Forestry 87 (3)* : 195-200

[102] Robin pépinières, 2000 - *Catalogue 2000,* 97 p.

[103] Roche S., Koch J.M., Dixon K.W., 1997 - Smoke enhanced seed germination for mine rehabilitation in the southwest of western Australia, *Restoration Ecology 5 (3)* 191-203

[104] Roelle J.E., Gladwin D.N., 1999 - Establishment of woody riparian species from natural seedfall at a former gravel pit, *Restoration Ecology 7 (2)* : 183-192

[105] Rosiere R.E., Engle D.M., Cadle J.M., 1989 - Revegetation of Tripoli quarries in the Ozark Highlands of Oklahoma, *Landscape and Urban Planning 17* : 175-188

[106] Saillet H., 1984 - *Utilisation des eaux usées par l'irrigation en forêt méditerranéenne à Cogolin,* mémoire de 3ème année ENSA Montpellier, Cemagref Aix en Provence, 94 p.

[107] Sawada Y., Gaunt E., Jasper D., Ward S., 1998 - Recovery of biological activity in reclaimed soil- an indicator of reclamation success ?, poster (ref 2561) présenté au *16ème congrès mondial de Sciences du Sol tenu à Montpellier (France)* 20-26 août 1998

[108] Schuster W.S., Hutnik R.J., 1987 - Community development on 35-year-old planted minespoil banks in Pennsylvania, *Reclamation and Revegetation Research 6* : 109-120

[109] Scullion J., Mohamed R.A., Richardson H., 1988 - Effect of storage and reinstatament procedures on earthworm populations in soils affected by opencast coal mining, *Journal of Applied Ecology 25* : 233-240

[110] Service cantonal de protection des sols Suisse, 1992 - *Le travail du sol : une synthèse,* 15 p.

[111] SFTRF, 1997 - *Autoroute de la Maurienne, respecter, intégrer valoriser l'environnement,* Société Française du Tunnel Routier du Fréjus, 15 p.

[112] Sionneau J.M., 1985 - Le reboisement des carrières : situations actuelles et perspectives, Industrie Minérale - *Mines et Carrières juin 1985* : 391-397

[113] Sort X., Alcaniz J.M., 1996 - Contribution of sewage sludge to erosion control in the rehabilitation of limestone quarries, *Land Degradation and Development 7* : 69-76

[114] Sort X., Alcaniz J.M., 1999 - Effect of sewage sludge amendment on soil aggregation, *Land Degradation and Development 10* : 3-12

[115] Station fédérale de recherches agronomiques de Zurich-Reckenholz, Association suisse des gravières, n. d. - *Exploitation du gravier et agriculture, directives relatives à la restitution de zones exploitées à l'agriculture,* 21 p.

[116] The Forestry Commission, nd - *Forest and water : guidelines,* Department of agriculture and fisheries of Great Britain, 24 p.

[117] Thomas H., 1992 - *Le réaménagement des carrières au travers de l'histoire de la Société GSM,* rapport de stage 2 ème année, ENGREF, Paris, 280 p.

[118] Thurber Consultants Ltd., Land Resources Network Ltd., Norwest Soil Research Ltd., 1990 - *Review of the effects of storage on topsoil quality,* Alberta Land Conservation and Reclamation Council Report n° RRTAC 90-5, 116 p.

[119] UNICEM, 1996 - L'exploitation des carrières régime juridique, *Matériaux de construction et produits de carrière* numéro spécial *683,* 48 p.

[120] Université de Laval (Canada), groupe de coordination sur les bois raméaux, 1997 - *Mémorandum de l'usage du BRF, le comment et le pourquoi*, 10 p.

[121] Université de Laval (Canada), groupe de coordination sur les bois raméaux, 1997 - *Comment améliorer le sol avec le bois raméal fragmenté*, 4 p.

[122] Université de Laval (Canada), groupe de coordination sur les bois raméaux, 1988 - *L'importance du bois raméal dans la « synthèse » de l'humus*, 29 p.

[123] UNPG, n.d. - Paysage Carrière Environnement.

[124] US environmental protection agency, n. d.- Erosion and sediment control, surface mining in the eastern USA, *EPA Technology technology transfer seminar publication*, 83 p.

[125] Valette A., 1988 - *Guide pour la végétalisation des carrières en région Centre*, mémoire ENITEF, 29 p. + annexes

[126] Ville de Marseille, Société du Canal de Provence, 1981 - *Expérimentation sur l'utilisation des déchets ménagers urbains pour la végétalisation du plateau de la Mure*, rapport de synthèse, 58 p.

[127] Watkin E.M., Watkin J., 1983 - Keep reclamation costs low with effective revegetation, *Canadian Mining Journal* **104** *(8)* : 33-36

[128] Wolf D.D., Blaser R.E., Morse R.D., Neal J.L., 1984 - Hydro-application of seed and wood fiber slurries to bind straw mulch, *Reclamation and Revegetation Research 3* : 101-107

ANNEXES

Annexe 1

Conseils de semis directs

Issue de la source bibliographique : [24] Cemagref, 1982b - Techniques de reboisement : réflexions générales, conception, *note technique n°47*, 71 p.

Compte tenu des avantages et inconvénients respectifs du semis et de la plantation évoqués précédemment, il s'avère que le semis n'est en pratique utilisable que dans deux cas :

- Lorsque les conditions du sol sont particulièrement favorables : c'est le cas de sols sableux très pauvres, peu pentus, car la création de conditions favorables à la germination y est facile et la concurrence herbacée y est faible. Certains reboisements à base de pin laricio de Corse ou de pin sylvestre sont effectués dans ce contexte mais les superficies concernées sont relativement faibles ;

- Lorsque les essences ont des exigences ou des caractéristiques qui pénalisent fortement la plantation. C'est le cas du pin maritime qui peut difficilement être planté, sauf en mottes ou en godets, donc à coût élevé et qui, en contrepartie, présente une très bonne croissance initiale. C'est aussi le cas des chênes dont le système racinaire pivotant supporte mal les repiquages de pépinière, et encore moins la mise en place de plants non repiqués, et dont les semences, vu leur grosseur, ne posent pas de problèmes de germination.

Préparation de la graine

Si les dégâts de rongeurs et d'oiseaux ne sont, sauf en cas d'explosion démographique des populations, que secondaires, ils sont néanmoins à l'origine d'un certain déchet qu'il serait souhaitable de résorber ou d'atténuer. Ceci est vrai pour les semis de printemps et l'est encore davantage pour les semis d'automne.

Plusieurs possibilités peuvent être envisagées mais la méthode qui consisterait à préparer la graine en l'enrobant avec un produit répulsif est, de loin, la plus attrayante. Il semble malheureusement qu'aucune matière active actuellement connue soit à la fois suffisamment dissuasive ou toxique pour les ravageurs, suffisamment inoffensive pour la graine et suffisamment persistante pour être conseillée. Les essais entrepris par le Cemagref dans ce domaine ont en tout cas presque toujours conduit à constater l'absence de supériorité - quand ce n'était pas une nette infériorité - des modalités étudiées sur les témoins non traités.

Epoque du semis

Le problème du choix de l'époque de semis est en relation directe avec celui des dégâts de ravageurs et avec celui de la conservation des graines.

Quand la conservation des semences ne présente pas de difficultés ce qui est, en gros, le cas de toutes les graines dites légères on aura tout intérêt à semer au printemps, de début mars à fin avril, voire début mai si la sécheresse d'été n'est pas à craindre.

Pour les graines lourdes à conservation délicate, le problème est différent. Certes des progrès substantiels ont été enregistrés ces dernières années dans ce domaine, notamment pour les glands ; le caractère aléatoire et partiel de cette conservation, autrefois si gênant, a pu être correctement maîtrisé surtout dans le cas d'une simple conservation hivernale. Mais un minimum d'équipement est nécessaire, qui oblige à des regroupements sur des lieux de traitement et de stockage et donc impose certaines sujétions pratiques et économiques ; il semble de ce fait qu'il soit préférable d'opter pour le semis d'automne et ce malgré les risques accrus de dégâts de prédateurs durant la phase hivernale de présence des graines en pleine terre. En plus des avantages qui viennent d'être évoqués, le semis d'automne laisse en effet au terrain le temps de se rasseoir pendant l'hiver et à la raie de semis le temps de se combler. Les éventuels traitements désherbants préventifs mettant en jeu des phytocides de prélevée (simazine) qui doivent être appliqués à la fin de l'hiver, donc de façon différée, présentent alors moins de risques de phytotoxicité que lorsqu'ils sont exécutés immédiatement après semis.

Densité de semis

Les quantités de graines à semer sont traditionnellement exprimées en poids (kg) par unité de surface (ha). Lorsque le semis est fait en bandes, il arrive que l'on se réfère à la notion de quantité de graines par hectare de bandes effectivement semée. Pour éviter toute ambiguïté, les quantités de graines annoncées dans les lignes qui suivent seront toujours rapportées à l'hectare cadastral c'est-à-dire à la surface qui est, en définitive reboisée même si le mode de semis adopté (poquet, ligne, bande) ne permet pas dans l'immédiat au jeune boisement d'assurer la fermeture totale du couvert.

Cela étant, il convient également de mettre l'accent sur le fait que deux lots de graines de la même espèce et de poids identique n'ont pas obligatoirement la même valeur culturale. Selon le pourcentage d'impuretés, la grosseur de la graine et selon la faculté germinative du lot, le nombre de germes vivants, qui est en fait la notion à laquelle on devrait normalement se référer, peut en effet varier à l'intérieur de fourchettes extrêmement larges. Lorsque pour ne pas déroger aux habitudes les quantités de graines sont évaluées en poids, il est bien entendu que les lots sont supposés pratiquement purs, de bonne faculté germinative et que les semences sont de dimensions normales. Si tel n'est pas le cas il convient de réviser en conséquence les valeurs indicatives annoncées.

Comme il a déjà été dit, les dégâts de rongeurs ou d'oiseaux et l'irrégularité de la levée inhérente aux aléas du semis direct obligent à effectuer des surdosages de graines. Schématiquement on peut dire qu'il convient de mettre en place de 5 à 10 fois plus de germes vivants que théoriquement nécessaire pour aboutir à la densité qui serait recherchée en cas de plantation. L'application de ce principe aboutit aux résultats figurant dans le tableau ci-dessous établi pour les principales essences reboisées par semis direct.

Essence	Densité théorique à rechercher à l'hectare	Coefficient multiplicateur	Nombre moyen de germes vivants au kg	Quantité de graines à semer (kg/ha)
Pin maritime	2 500	5 à 10	16 000	0.8 à 1.5
Chêne pédonculé	3 500	«	200	100 à 200
Chêne rouvre	4 500	«	250	100 à 200
Chêne rouge	2 500	«	180	75 à 150

Méthodes de semis

Plusieurs modes de localisation des graines peuvent être envisagés :
- semis en plein ;
- semis en poquets ;
- semis en lignes ;
- semis en bandes.

Le semis en plein a l'inconvénient de consommer des quantités importantes de semences découlant de la nécessité d'adopter un coefficient multiplicateur choisi nettement au-dessus de la fourchette définie au paragraphe précédent. Pour procéder aux indispensables entretiens on est par ailleurs obligé de créer des bandes par suppression des semis sur les axes de pénétration. Le semis en plein conduit donc à un gâchis regrettable de semences et doit être écarté.

Le semis en poquets est, à l'inverse du précédent, le mode le plus économe en graines. Il permet, en effet, d'adopter le coefficient multiplicateur le plus faible. Il a comme inconvénient de déboucher sur la formation de fausses cépées où chaque brin va voir le géotropisme de sa partie aérienne perturbé avec les conséquences qui vont en résulter sur la forme basale des tiges. Il est donc à réserver au cas où il existe une pénurie de graines ce qui peut notamment être le cas des chênes les années de mauvaises glandée.

Il ne reste donc à choisir, dans la majorité des cas, qu'entre le semis en bandes et le semis en lignes. Pour faciliter la discussion nous ne considérerons que le cas des bandes relativement larges (de l'ordre de 2 m) et laisserons de côté le cas des bandes étroites pour la bonne raison qu'il n'y a pas de solution de continuité entre la bande étroite et la ligne qui n'est jamais qu'une bande dont la largeur tend vers zéro. Les bandes de grande largeur (plus de 2 m) sont, elles aussi, à laisser de côté, car les entretiens y deviennent difficiles et l'on se retrouve dans une situation comparable à celle des semis en plein.

Le gros avantage du semis en bandes est sans aucun doute de permettre, grâce à une meilleure répartition territoriale des jeunes sujets qui limite les effets de lisière, d'obtenir des individus de meilleure forme. Le semis en lignes présente l'inconvénient inverse lié à une très forte dissymétrie entre espacements sur la ligne et écartements entre lignes ; mais cet inconvénient peut être réduit par l'adoption d'écartements raisonnables entre lignes. On lui reproche également de faciliter le repérage des graines qui sont alors plus intensément soumises aux dégâts des ravageurs. Cette accusation est surtout fondée en ce qui concerne les sangliers en cas de semis de glands. Mais nous verrons plus loin qu'en présence de sangliers il est de toutes façons indispensable de clore la parcelle à semer.

En contrepartie le semis en lignes :
- est d'exécution plus commode ;
- facilite grandement le suivi, les entretiens et les dépressages ;
- permet une économie certaine de graines.

Ces avantages du semis en lignes ont donc tendance à faire pencher la balance en sa faveur.

Matériel de semis
Les semoirs adaptés aux petites graines sont depuis longtemps utilisés et donnent satisfaction.

La division « Techniques de Reboisement » du Cemagref de Nogent-sur-Vernisson a mis au point un semoir à grosses graines adapté au cas des chênes. Le semis mécanique devrait ainsi rapidement se substituer au semis à la main, encore couramment pratiqué mais quelque peu anachronique. En plus des avantages qui en résulteraient vis-à-vis des rendements et de la pénibilité du travail, le semis mécanique doit en effet permettre une meilleure régularité et un meilleur réglage de la profondeur du semis. Notons à ce propos qu'on a, en général, tendance à enterrer trop profondément la graine, la bonne profondeur se situant entre deux et deux fois et demie la plus grande dimension de la semence.

Protection du semis
Si en l'état actuel des choses, il n'est pas possible d'assurer une protection contre les ravageurs par enrobage de la graine au moyen de produits répulsifs, d'autres moyens de protection peuvent être envisagés.

La recherche d'une limitation des populations de petits rongeurs par dissémination d'appâts empoisonnés (chlorophacinone, crimidine) est une voie intéressante mais, en pratique, peu efficace pour deux raisons :
- d'une part, les produits actuellement sur le marché sont peu actifs ;
- d'autre part il semble que la limitation des effectifs n'ait d'effet tangible que si le traitement est appliqué à des superficies bien supérieures à celles que l'on veut protéger. A défaut, la réinfestation permanente de la parcelle traitée par les populations voisines compense presque complètement la mortalité enregistrée.

Sauf année de pullulation exceptionnelle, les dégâts occasionnés par ces petits rongeurs sont néanmoins supportables.

Il n'en est pas de même des dégâts de sangliers. La présence même en petit nombre de ce gibier dans une forêt impose en pratique l'exécution d'une clôture périmétrale suffisamment résistante pour ne pas céder aux tentatives de pénétration qui ne manqueront pas de se produire.

Annexe 2

Normes CEE pour les plants forestiers

Issue de la source bibliographique : (39) DERF, ONF, 1990 – *Réussir la Forêt : contrôle et réception des travaux,* ministère de l'agriculture et de la forêt, 63 p.

NORMALISATION DIMENSIONNELLE DES PLANTS FORESTIERS
Normes de la communauté économique européenne - Normes quantitatives (âges et dimensions).

Espèces forestières autres que peupliers

Variétés	Plants normaux			Plants trapus		
	Age maximum (1) (années)	Hauteur (2) (centimètres)	Diamètre minimum au collet (millimètres)	Age maximum (1) (années)	Hauteur (2) (centimètres)	Diamètre minimum au collet (millimètres)
Abies alba	4	10 à 15	4	4	10 à 15	4
	5	15 à 25	5	4	15 à 20	5
	5	25 à 35	5	5	20 à 25	6
	5	35 à 45	6	5	25 à 35	7
	5	45 à 60	8	5	35 à 40	8
		60 et plus	10		40 et plus	10
Larix	2	20 à 35	4			
	3	35 à 50	5			
	4	50 à 65	6			
	4	65 à 80	7			
	5	80 à 90	8			
		90 et plus	10			
Picea abies	3	15 à 25	4	4	15 à 20	4
	4	25 à 40	5	5	20 à 30	5
	5	40 à 55	6	5	30 à 40	6
	5	55 à 65	7	5	40 à 50	8
	5	65 à 80	9	5	50 à 60	9
		80 et plus	10		60 et plus	10
Picea sitchensis	3	20 à 30	4			
	4	30 à 50	5			
	4	50 à 65	6			
	5	65 à 75	8			
	5	75 à 85	9			
		85 et plus	10			
Pinus sylvestris	2	6 à 15	3	2	6 à 10	3
	3	15 à 25	4	3	10 à 20	4
	3	25 à 35	5	3	20 à 30	5
	3	35 à 45	6	3	30 à 40	6
	4	45 à 55	7	4	40 à 50	7
				,	50 et plus	8

Variétés	Plants normaux			Plants trapus		
	Age	Hauteur (2)	Diamètre	Age	Hauteur (2)	Diamètre
Pinus nigra austriaca	2	6 à 15	3	2	6 à 10	3
	3	15 à 25	4	3	10 à 20	4
	4	25 à 35	5	4	20 à 30	5
	4	35 à 45	6	4	30 à 40	6
	4	45 à 55	7	4	40 à 50	7
				,	50 et plus	8
Pinus nigra (autres que *austriaca*)	2	5 à 10	3	3	10 à 15	4
	3	10 à 20	4	4	15 à 30	5
	3	20 à 30	5	4	30 à 40	6
	4	30 à 40	6	4	40 à 50	7
	4	40 à 50	7	4	50 et plus	8
		50 et plus	8			
Pinus strobus	2	6 à 10	3			
	3	10 à 20	4			
	4	20 à 30	5			
	4	30 à 40	6			
	5	40 à 50	7			
	5	50 à 60	8			
	5	60 et plus	10			
Pseudotsuga taxifolia	2	20 à 25	3	3	20 à 25	4
	3	25 à 30	4	4	25 à 35	5
	3	30 à 40	5	4	35 à 40	6
	4	40 à 50	6	4	40 à 45	6
	4	50 à 60	7	4	45 à 55	7
	4	60 à 70	8	4	55 à 65	8
	4	70 à 80	9	4	65 à 70	9
	4	80 à 100	12	,	70 et plus	12
	,	100 et plus	14			
Fagus sylvatica. Quercus	2	15 à 25	4			
	3	25 à 40	5			
	4	40 à 55	6			
	4	55 à 70	7			
	5	70 à 85	9			
	,	85 et plus	11			

Les critères relatifs aux âges et aux dimensions des plants ne sont pas applicables aux plants non repiqués.

(1) Age - Les âges sont exprimés en nombre entier d'années.
Toute période de végétation entamée compte pour une année entière.
La période de végétation est considérée comme entamée :
- pour les plants ayant développé une pousse terminale non encore munie de bourgeon terminal dormant lorsque cette pousse est supérieure ou égale au quart de la longueur de la pousse de l'année précédente ;
- pour les plants ayant développé une pousse terminale de longueur inférieure, lorsque celle-ci est munie d'un bourgeon dormant.
(2) Hauteur - La mesure de la hauteur est effectuée avec une approximation de 1 cm en plus ou en moins pour les plants de 30 cm de hauteur et moins, et de 2,5 cm en plus ou en moins pour les plants de plus de 30 cm de hauteur.

Peupliers (1)

Ages (2)	Endroit de mesurage du diamètre (mètre)	Numéro de classement	Diamètres (millimètres)	Hauteurs (mètres)	
				Minimales	Maximales
0 à 1 an	0,50	N1a	6 à 8	1	1,50
		N1b	8 à 10	1	1,75
		N1c	0 à 12	1	2
		N1d	12 à 15	1	2,25
		N1e	15 à 20	1	2,50
		N1f	20 et plus	1	,
Plus de 1 an	1	N2	8 à 10	1,75	2,50
		N3	10 à 15	175	3
		N4	15 à 20	1,75	3,50
		N5	20 à 25	2,25	4
		N6	25 à 30	2,25	4,75
		N7	30 à 40	2,75	5,75
		N8	40 à 50	2,75	6,75
		N9	50 et plus	4	,

(1) Les normes de dimensions ne sont applicables qu'aux plants de *Populus*, section *Aigeiros*.
(2) L'âge maximum admis est de quatre ans pour la tige et le cas échéant, cinq ans pour la racine.

Annexe 3

Normes FFN pour les plants forestiers

Issue de la source bibliographique : (39) DERF, ONF, 1990 - *Réussir la forêt : contrôle et réception des travaux*, ministère de l'agriculture et de la forêt, 63 p.

NORMALISATION DIMENSIONNELLE DES PLANTS FORESTIERS
Normes du Fonds Forestier National - Introduction.

L'exigence de ces normes n'est requise que pour l'acceptation administrative de plants financés ou subventionnés par le Fonds Forestier National.
Cependant, par extension, s'agissant de conditions plus sévères que celles de la CEE ce sont les normes communément admises.

Tolérance :
- au diamètre : nulle (le diamètre indiqué est le diamètre minimum)
- en hauteur :
±1 cm si hauteur inférieure ou égale à 30 cm
±2.5 cm si hauteur supérieure à 30 cm

Résineux (normalisés)

Essence	Age des plants	Catégories F.F.N. et hauteurs minimum et maximum de la catégorie (cm)	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (cm)	Réglettes à utiliser pour les hauteurs (tolérance de mesure)	Observations
Abies grandis	1 + 2 ou 2 + 1 ou 2 + 2 (1)	A 25-45	25 à 35 35 à 45	5 et + 6 et +	jaune jaune (à 2,5 cm près)	(1) 1 + 3 exclu, mais dérogation possible en cas de gel sous réserve que les plants soient soulevés
		US 45 - +	45 à 55 55 à 65 65 et +	7 et + 9 et + 10 et +	jaune jaune jaune	
Abies nordmanniana	2 + 1 ou 2 + 2 ou 2 + 3 ou 3 + 2	A 13-20	13 à 15 15 à 20	5 et + 6 et +	rouge rouge (à 1 cm près)	
		US 20 - +	20 à 25 25 à 35 35 et +	7 et + 8 et + 10 et +	rouge rouge jaune	

Essence	Age des plants	Catégories F.F.N. et hauteurs minimum et maximum de la catégorie (cm)	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (cm)	Réglettes à utiliser pour les hauteurs	Observations
Abies alba (pectinata)	2 + 1 ou 2 + 2 ou 2 + 3 ou 3 + 2	A 15-35	15 à 25	5 et +	rouge	
			25 à 35	6 et +	rouge	
		US 25 - +	25 à 35	7 et +	jaune	
			35 à 40	8 et +	jaune	
			40 et +	10 et +	jaune	
Picea abies (excelsa)	2 + 1 ou 2 + 2	A 25-40	25 à 40	5 et +	jaune	
		US 40 - +	40 à 55	7 et +	jaune	
			55 à 65	8 et +	jaune	
			65 à 80	9 et +	jaune	
			80 et +	10 et +	jaune	
	2 + 3 ou 3 + 2 (2)	A 30-45	30 à 40	6 et +	jaune	(2) 2 + 3 admis sous réserve que les plants soient soulevés après la 2ème année de repiquage
			40 à 45	7 et +	jaune	
		US 40 - +	40 à 65	8 et +	jaune	
			65 à 80	9 et +	jaune	
			80 et +	10 et +	jaune	
Picea sitchensis	1 + 2 ou 2 + 1 ou 2 + 2	A 30-50	30 à 50	5 et +	jaune	
		US 50 - +	50 à 65	7 et +	Jaune	
			65 à 75	8 et +	jaune	
			75 à 85	9 et +	Jaune	
			85 et +	11 et +	jaune	
Pinus nigra var. austriaca	1 + 1	A 6-10	6 à 10	3 et +	rouge	
		A 10-30	10 à 20	4 et +	rouge	
			20 à 30	5 et +	rouge	
	1 + 2 ou 2 + 1	A 10-40	10 à 20	4 et +	rouge	
			20 à 30	5 et +	rouge	
			30 à 40	6 et +	rouge	
	2 + 2	A 20-40	20 à 30	5 et +	rouge	
			30 à 40	6 et +	jaune	

Essence	Age des plants	Catégories F.F.N. et hauteurs minimum et maximum de la catégorie (cm)	Hauteur (cm)	Diamètre au collet (cm)	Réglettes à utiliser pour les hauteurs	Observations
Pinus nigra var corsicana ou calabrica	1 + 1 ou 1 + 2 ou 2 + 1	A 6-30	6 à 11	3 et +	rouge	
			11 à 20	4 et +	rouge	
			20 à 30	5 et +	rouge	
		US 20 - +	20 à 30	5 et +	rouge	
			30 à 40	6 et +	jaune	
			40 à 50	7 et +	jaune	
			50 et +	8 et +	jaune	
	2 + 2	A 15-30	15 à 30	5 et +	rouge	
		US 20 - +	20 à 40	6 et +	jaune	
			40 à 50	7 et +	jaune	
			50 et +	8 et +	jaune	
Pinus sylvestris	1 + 1	A 8 -15	8 à 15	3.5 et +	rouge	
		A 10 -35	10 à 25	4 et +	rouge	
			25 à 35	5 et +	rouge	
	1 + 2 ou 2 + 1	A 15-55	15 à 35	5 et +	rouge	
			35 à 45	6 et +	jaune	
			45 à 55	7 et +	jaune	
Pseudotsuga menziesii (douglasii) (taxifolia)	1 + 1 ou 2 + 1 ou 1 + 2	A 25-70	25 à 30	5 et +	jaune	
			30 à 45	6 et +	jaune	
			45 à 55	7 et +	jaune	
			55 à 70	8 et +	jaune	
		US 60 - +	60 à 80	9 et +	jaune	
			80 à 100	12 et +	jaune	
			100 et +	14 et +	jaune	
	2 + 2	A 40-70	40 à 55	7 et +	jaune	
			55 à 70	8 et +	jaune	
		US 60 - +	60 à 80	9 et +	jaune	
			80 à 100	12 et +	jaune	
			00 et +	14 et +	jaune	
Tsuga heterophylla	1 + 2 ou 2 + 1	A	40 à 65	7 et +	jaune	
			65 à 90	8 et +	jaune	
	ou 2 + 2 ou 2 + 3	US	65 et +	9 et +	jaune	

Résineux (non normalisés)

Nom Botanique	Age	Catégorie
Cedrus atlantica	1-OG 2-OG 1-1G	
Larix decidua	1-2 ou 2-1	20/35 30/50
Larix leptolepis	1-2 ou 2-1	30/50 50/80
Pinus insignis	1-0 1-1	
Pinus pinaster	1-0 1-0 à 3-0 (en mottes)	
Pinus strobus	1-2 2-2	8/15 15/30

Feuillus noyers

Essence	Age	Hauteur minimale (cm)
Juglans regia	1-0 2-0 1 + 1 1 + 2	15 60 35 120
Juglans nigra	1-0 2-0 1 + 1	20 90 40
Juglans Regia x Nigra (hybride)	1-0 2-0 1 + 1 1 + 2	30 90 60 150

Peupliers

Cultivars	Catégories
I-214	A1
Dorskamp	A2
Beaupré	A3
Unal	US
Robusta	A1
Ghoy	A2
	A3
	US
Tardif de Champagne	A1
Blanc du Poitou	A2
Fritzi Pauley	A3
I-45-51	US
Columbia river	
Trichobel	
Carolin	A1
	A2

a) Ages admis

L'âge maximum admis est de trois ans pour la tige et, le cas échéant, de quatre ans pour la racine.

Il est conseillé d'utiliser de préférence les plants de deux ans (tige) si l'on est obligé de recourir à des plants de 3 ans (tige), il est conseillé de veiller à ce que la pousse de troisième année soit bien développée.

b) Catégories et dimensions admises

Catégorie	Diamètre (mm) à 1 m du collet	Hauteurs minimales (mètres) Carolin	Autres peupliers
A1	25 à 30	3	3,25
A2	30 à 40	3,50	3,75
A3	40 à 50	4	4.5
US	50 et plus	4	5

Autres feuillus

Nom botanique	Age maximal	Hauteur minimale (cm)	Diamètre minimal au collet (cm)
Fagus sylvatica	2	30	cf normes
	4	50	CEE
(hêtre)	5	80	ci-après
(1). (2). (3)	5	100	11
Quercus petraea	2	30	cf normes
(Q. sessiflora)	3	50	CEE
(chêne rouvre)	3	80	ci-après
(1).(2).(3)			
Quercus robur	2	30	cf normes
(Q. pedunculata)	3	50	CEE
(chêne pédonculé)	3	80	ci-après
(1). (2). (3)			
Quercus rubra	2	30	cf normes
(Q. borealis)	3	50	CEE
(chêne rouge)	3	80	ci-après
(1). (2). (3)	5	100	11
Fraxinus excelsior	3	40	6
(frêne commun)	4	55	7
(1). (2)	4	70	9
	5	100	11
Acer pseudoplatanus	2	40	6
(érable sycomore)	3	55	7
(2)	3	80	9
	4	100	11

Nom botanique	Age maximal	Hauteur minimale (cm)	Diamètre minimal au collet (cm)
Prunus avium (merisier) origine française établie (2)	1 2 2 3	40 55 80 100	5 6 8 11
Prunus avium (merisier) autres origines (2)	1 2 2 3	40 55 80 100	5 6 8 11
Castanea sativa (châtaignier) (1)	1 2	25 40	5 7

(1) Les plants feuillus de cette essence devront être obligatoirement dépivotés ou repiqués au moins une fois avant leur arrachage. Cette disposition ne concerne pas le matériel élevé sur substrat artificiel. Le dépivotage devra être effectué suffisamment tôt pour que les plants aient pu refaire avant leur arrachage un système racinaire de remplacement.

Dépivotage = passage sous la planche de plants d'une lame travaillant dans un plan horizontal à une profondeur maximale de 20 cm.

(2) Les plants de cette essence ne doivent pas rester plus de 2 ans sans être soit repiqués, soit dépivotés.

(3) Les plants doivent respecter l'équilibre hauteur-diamètre au collet défini par les normes CEE suivantes :
30 à 40 cm de hauteur : 5 mm et plus au collet
40 à 55 cm de hauteur : 6 mm et plus au collet
55 à 70 cm de hauteur : 7 mm et plus au collet
70 à 85 cm de hauteur : 9 mm et plus au collet
plus de 85 cm : 11 mm et plus au collet
Les plants de hauteur minimale 30 cm sont à réserver à des chantiers avec préparation du sol et entretien suivi.

Annexe 4

Contrôle et réception des plants

Issue de la source bibliographique : (39) DERF, ONF, 1990 - *Réussir la forêt : contrôle et réception des travaux*, ministère de l'agriculture et de la forêt, 63 p.

Réception des plants

Attention !
Les conséquences d'un mauvais choix du matériel végétal peuvent être catastrophiques. C'est dans ce domaine que le contrôle et l'appréciation de la qualité sont les plus difficiles et requièrent le plus de discernement. Pour cette raison les procédures et les méthodes ont été normalisées afin de permettre au contrôleur de porter toute son attention sur les appréciations d'ordre qualitatif qui sont les plus délicates.

En pratique il faut :
- Assurer une présence permanente pendant toute la période d'arrivée des plants sur le chantier.
- Exiger la production, par le fournisseur, du document d'accompagnement du lot de plants convenablement rempli (exemple de modèle renseigné en annexe 4). Ce document doit être conservé.
- Réceptionner les plants à chaque arrivée, et dans l'heure qui suit, afin d'éviter leur dessèchement et le retard des livraisons suivantes.

Une attention particulière sera portée aux conditions de transport des plants (distance, véhicule fermé ou bâchage, emballage éventuel des plants, risques de gel...).

-Veiller à ce que les plants soient protégés du soleil, du vent et du dessèchement pendant la période (la plus courte possible) précédant la plantation (bottes déliées, mise en jauge saine à l'ombre, arrosage...). **Cette précaution est vitale.**

Plants exposés au soleil durée	Taux de reprise	Accroissement cumulé sur 5 ans (base 100)
0 mn	100%	100
6 mn	90%	25
10 mn	80%	20
30 mn	30%	15



Plants de chêne en jauge

1 Méthode de contrôle de la qualité extérieure des plants

Un lot de plants doit comporter au moins 95% de plants de qualité loyale et marchande. La qualité loyale et marchande est déterminée par des critères de conformation et d'état sanitaire ainsi que des critères d'âge et de dimensions.

1.1 Modalités pratiques du contrôle

La méthode de contrôle utilisée est une méthode statistique décrite ci-après :

Pour les plants en conteneurs, les modalités de contrôle du système racinaire doivent être fixées par le CCTP.

1.1.1 Prélèvement de l'échantillon

L'échantillon est constitué par un nombre entier de bottes prélevées au hasard dans le lot par la méthode suivante :
- Tirer au sort un chiffre compris entre 1 et 10. Si ce chiffre est par exemple 3, prélever à partir d'une botte choisie au hasard comme origine :
Si le nombre de bottes est inférieur à 100 : les bottes numéros 3,13, 23 etc.
Si le nombre de bottes est supérieur à 100 : les bottes numéros 3,103, 203 etc.

- Si le nombre de bottes prélevées par cette méthode est insuffisant pour permettre d'accepter ou de refuser le lot (voir ci-après), tirer un nouveau chiffre compris entre 1 et 10 et poursuivre le prélèvement sur la base de ce nouveau chiffre.

1.1.2 Le contrôle proprement dit

Le contrôle est conçu de telle manière que, par exemple :
- Un lot de plants renfermant 5% de plants non conformes aux normes de qualité extérieure a 95% de chances d'être accepté et 5% de chances d'être refusé ;
- Un lot de plants renfermant 11% de plants non conforme aux normes de qualité extérieure a 50% de chances d'être accepté et 50% de chances d'être refusé ;
- Un lot de plants renfermant 20% de plants non conformes aux normes de qualité extérieure a 5% de chances d'être accepté et 95% de chances d'être refusé.

En pratique :

- **Prélever** dans le lot, par la méthode indiquée au paragraphe1.1.1 une botte entière de plants.
Compter tous les plants de la botte.
- **Inscrire**
dans la colonne 2 du tableau de contrôle page 282 : le total cumulé des nombres figurant en colonne 1
(quand le contrôle porte sur la première botte : les nombres figurant aux colonnes 1 et 2 sont donc égaux).

Table statistique de contrôle général des plants avariés et plants non conformes aux normes.

Nombre de plants contrôlés	Nombre de plants éliminés		
	Accepter	Continuer	Refuser
1 à 9	-	0 à 2	3 et plus
10 à 18	-	0 à 3	4 et plus
19 à 27	0	1 à 4	5 et plus
28 à 36	0 à 1	2 à 5	6 et plus
37 à 45	0 à 2	3 à 6	7 et plus
46 à 54	0 à 3	4 à 7	8 et plus
55 à 63	0 à 4	5 à 8	9 et plus
64 à 72	0 à 5	6 à 9	10 et plus
73 à 81	0 à 6	7 à 10	11 et plus
82 à 90	0 à 7	8 à 11	12 et plus
91 à 99	0 à 8	9 à 12	13 et plus
100 à 108	0 à 9	10 à 13	14 et plus
109 et 117	0 à 10	11 à 14	15 et plus
118à 126	0 à 11	12 à 15	16 et plus
127 à 135	0 à 12	13 à 16	17 et plus
136 à 144	0 à 13	14 à 17	18 et plus
145 à 153	0 à 14	15 à 18	19 et plus
154 à 162	0 à 15	16 à 19	20 et plus
163 à 171	0 à 16	17 à 20	21 et plus
172 à 180	0 à 17	18 à 21	22 et plus
181 à 189	0 à 18	19 à 22	23 et plus
190 à 198	0 à 19	20 à 23	24 et plus
199 à 207	0 à 20	21 à 24	25 et plus
208 à 216	0 à 21	22 à 25	26 et plus
217 à 225	0 à 22	23 à 26	27 et plus
226 à 234	0 à 23	24 à 27	28 et plus
235 à 243	0 à 24	25 à 28	29 et plus
244 à 252	0 à 25	26 à 29	30 et plus
253 à 261	0 à 26	27 à 30	31 et plus
262 à 270	0 à 27	28 à 31	32 et plus
271 à 279	0 à 28	29 à 32	33 et plus
280 à 288	0 à 29	30 à 33	34 et plus
289 à 297	0 à 30	31 à 34	35 et plus
298 à 306	0 à 31	32 à 35	36 et plus
307 à 315	0 à 32	33 à 36	37 et plus
316 à 324	0 à 33	34 à 37	38 et plus
325 à 333	0 à 34	35 à 38	39 et plus
334 à 342	3 à 35	36 à 39	40 et plus
343 à 351	0 à 36	37 à 40	41 et plus
352 à 360	0 à 37	38 à 41	42 et plus
361 à 369	0 à 38	39 à 42	43 et plus
370 à 378	0 à 39	40 à 43	44 et plus
379 à 387	0 à 40	41 à 44	45 et plus
388 à 396	0 à 41	42 à 45	46 et plus
397 à 405	0 à 42	43 à 46	47 et plus
406 à 414	0 à 43	44 à 47	48 et plus
415 à 423	0 à 44	45 à 48	49 et plus
424 à 432	0 à 45	46 à 49	50 et plus
433 à 441	0 à 46	47 à 50	51 et plus
442 à 450	0 à 47	48 à 51	52 et plus
451 à 459	0 à 48	49 à 52	53 et plus
460 à 468	0 à 49	50 à 53	54 et plus
469 à 477	0 à 50	51 à 54	55 et plus
478 à 486	0 à 51	52 à 55	56 et plus
487 à 495	0 à 52	53 à 56	57 et plus
496 à 504	0 à 53	54 à 57	58 et plus
505 à 513	0 à 54	55 à 58	59 et plus
514 à 522	0 à 55	56 à 59	60 et plus
523 à 531	0 à 56	57 à 60	61 et plus
532 à 540	0 à 57	58 à 61	62 et plus
541 à 549	0 à 58	59 à 62	63 et plus
550 à 558	0 à 59	60 à 63	64 et plus

Se constituer un tableau de contrôle selon le modèle suivant :

Nombre de plants contrôlés		Nombre de plants à éliminer				Décision
par botte	cumulé	par botte			cumulé	
		avariés	non conformes à la commande	total 3 + 4		
1	2	3	4	5	6	7
Contrôle général						

- Eliminer

D'abord les plants ayant des défauts de conformation et d'état sanitaire (voir paragraphe suivant). Inscrire leur nombre dans la colonne 3 du tableau «avariés».

Ensuite, à l'aide de mesures faites à la réglette et au calibre, les plants qui ne répondent pas aux normes de dimensions en prenant soin de ne pas éliminer les plants appartenant à une catégorie supérieure (voir paragraphe suivant). Inscrire leur nombre dans la colonne 4 du tableau «non conformes à la commande».

- Porter

Dans la colonne 5 du tableau de contrôle : la somme des nombres figurant en colonne 3 et 4.

Dans la colonne 6 du tableau de contrôle : le total cumulé des nombres figurant dans la colonne 5 (quand le contrôle porte sur la première botte, les nombres figurant dans les colonnes 5 et 6 sont donc égaux).

- Se reporter dans la table statistique précédente

Repérer dans la colonne «nombre de plants contrôlés» de cette table la ligne qui contient le nombre total des plants contrôlés figurant colonne 2 du tableau de contrôle.

- Trois cas peuvent se produire

1) Si le nombre total de plants éliminés figurant à la colonne 6 du tableau de contrôle tombe dans la colonne «accepter» de la table, le lot est accepté, porter la lettre A dans la colonne 7 du tableau. Le contrôle est terminé.

Exemple :

Nombre de plants contrôlés		Nombre de plants éliminés				Décision
par botte	cumulé	par botte			cumulé	
		avariés	non conformes aux normes	total 3 + 4		
1	2	3	4	5	6	7
Contrôle général						
58	58	1	2	3	3	A

2) Si le nombre total de plants éliminés figurant à la colonne 6 du tableau de contrôle tombe dans la colonne «refuser» de la table. Le lot est refusé.
Porter la lettre R dans la colonne 7 du tableau. Le contrôle est terminé.

Exemple :

Nombre de plants contrôlés		Nombre de plants éliminés				Décision
par botte	cumulé	par botte			Cumulé	
		avariés	non conformes aux normes	total 3 + 4		
1	2	3	4	5	6	7
Contrôle général						
52	52	5	7	12	12	R

3) Si le nombre de plants éliminés figurant à la colonne 6 du tableau de contrôle tombe dans la colonne «continuer» de la table, porter la lettre C dans la colonne 7 du tableau et poursuivre le contrôle comme suit :
- prélever une nouvelle botte par la méthode indiquée au paragraphe 1.1.1. la contrôler comme la première en procédant aux mêmes opérations.
Ne pas oublier que les nombres totaux de plants contrôlés et de plants éliminés à comparer aux données de la table statistique sont les nombres cumulés figurant respectivement aux colonnes 2 et 6 du tableau de contrôle.
Ce contrôle aboutit à l'une des trois décisions suivantes :
- Accepter : porter la lettre A dans la colonne 7 du tableau.
- Refuser : porter la lettre R dans la colonne 7 du tableau.
- Continuer : porter la lettre C dans la colonne 7 du tableau et poursuivre le contrôle sur une nouvelle botte jusqu'à ce qu'il aboutisse à la décision « accepter » ou « refuser ».

Exemple :

Nombre de plants contrôlés		Nombre de plants éliminés				Décision
par botte	cumulé	par botte			Cumulé	
		avariés	non conformes aux normes	total 3 + 4		
1	2	3	4	5	6	7
Contrôle général						
55	55	3	3	6	6	C
102	157	4	7	11	17	C
46	203	1	2	3	20	A

1.2 Conséquence du contrôle

Lorsque le contrôle a conduit à la décision « accepter » cette décision doit être strictement appliquée.

Lorsque le contrôle a conduit à la décision « refuser », le lot de plants sera purement et simplement refusé.
Le refus d'un lot de plants est une décision grave qui provoque le retour des plants chez le fournisseur. Le matériel végétal subit alors trois transports, ce qui en altère irrémédiablement la qualité. En outre, le chantier se trouve retardé. Cette décision doit donc être sérieusement fondée : il est recommandé au contrôleur, dans ce cas, de procéder à un deuxième examen de l'ensemble des plants des bottes tirées au sort pour s'assurer de la validité du rejet. Le résultat de ce deuxième examen prévaudra sur le premier.
Il est évidemment exclu de procéder à ce deuxième contrôle sur de nouvelles bottes ou sur les seuls plants rejetés lors du premier examen.
Le tableau du contrôle rempli est transmis, signé des deux parties, au maître d'œuvre à titre de compte rendu.

2 Ages et dimensions

Les critères relatifs aux âges et aux dimensions des plants résultent, le cas échéant, des normes du Fonds Forestiers National répertoriées en annexe 3, sinon, impérativement, des normes de la CEE reproduites en annexe 2.

Remarque importante
Dans les normes de dimensions, on doit toujours commencer par mesurer la hauteur et non le diamètre car le diamètre indiqué est un diamètre minimum.

2.1 Mesure des hauteurs

Utiliser : une réglette rouge, graduée de 2 cm en 2 cm de 6 à 48 cm.
une réglette jaune, graduée de 5 cm en 5 cm de 15 à 90 cm. (1)

Ces deux derniers instruments tiennent compte des approximations de mesures de hauteur, c'est-à-dire ± 1 cm si la hauteur est inférieure ou égal à 30 cm, ± 2,5 cm si la hauteur est supérieure ou égale à 30 cm.

Pour les catégories de plants dont la hauteur est mesurée à 1 cm près, c'est-à-dire les plants de 30 cm de hauteur et moins, utiliser la réglette rouge.

Pour les catégories de plants dont la hauteur est mesurée à 2,5 cm près, c'est-à-dire les plants de plus de 30 cm de hauteur, utiliser la réglette jaune.

Placer le plant contre la réglette convenablement choisie, de telle façon que le bord inférieur de la réglette (et non pas la première graduation) se trouve au niveau du collet. La lecture du nombre inscrit au centre de la plage dans laquelle tombe l'extrémité du bourgeon terminal indique la hauteur.

Les réglettes ayant été conçues pour tenir compte des approximations des mesures indiquées ci-dessus, aucune tolérance ne doit être admise.

2.2 Mesure des diamètres au collet

Utiliser un calibre à onze encoches gradué de 3,5 à 14 mm.

Introduire le collet (extrémité inférieure de la tige) dans les encoches successives du calibre en commençant par l'encoche la plus large. S'il ne rentre pas dans cette dernière, il mesure plus de 14 mm de diamètre.

Dans l'hypothèse contraire, introduire le collet successivement dans toutes les encoches jusqu'à la rencontre d'une encoche dans laquelle il ne pénètre pas. La lecture du chiffre situé au droit de la première encoche refusant le plant indique le diamètre minimum de ce plant.

Par exemple si le plant pénètre dans l'encoche 8 mais non dans l'encoche 7, alors son diamètre est supérieur ou égal à 7 mm. Les largeurs des encoches ont été choisies de telle façon qu'un plant dont le diamètre est, par exemple, exactement égal à 7 mm ne pénètre pas dans l'encoche 7.

Il est donc inutile de forcer pour faire rentrer les plants dans les encoches.

Nota : il existe, pour les peupliers, des calibres à encoches spécifiques.

Exemple : Norme F.F.N.
Un Douglas de 3 ans et de 65 cm de hauteur doit avoir un diamètre au collet minimum de 8 mm pour être en catégorie A. Si le diamètre au collet mesuré est de 9 mm le plant contrôlé peut être classé en catégorie US.

---

(1) Ces réglettes ainsi que les calibres à encoches cités plus loin sont disponibles sur simple demande adressée à : CEMAGREF groupement de Nogent-sur-Vernisson, domaine des Barres - 45290 Nogent-sur-Vernisson Tél. 02 38 97 60 59



Mesure de la hauteur avec la réglette



Mesure du diamètre au collet avec le Calibre

3 Etat physiologique et sanitaire des plants

Attention !
Il s'agit ici, contrairement aux normes dimensionnelles, de critères subjectifs d'appréciation. En l'absence de méthodes simples de mesures de la « bonne santé » du plant, il convient donc d'être attentif et prudent.

3.1 Les défauts qui excluent les plants de la qualité loyale et marchande

Normes qualitatives CEE

- les lots comportent au moins 95 p. 100 de plants de qualité loyale et marchande.

La qualité loyale et marchande est déterminée par des critères de conformation et d'état sanitaire ainsi que des critères d'âge et dimensions.

- Conformation et état sanitaire :

Le tableau ci-après donne pour chaque genre et espèce considérés les défauts qui excluent les plants de la qualité loyale et marchande. Tous ces critères doivent être appréciés en fonction de l'espèce ou du clone considéré ainsi que de l'aptitude des matériels de reproduction au boisement :

Défauts excluant les plants de la qualité loyale et marchande	*Abies alba, Picea*	*Larix*	*Pinus*	*Pseudo-tsuga taxifolia*	*Fagus sylvatica, Quercus*	*Populus sp*
a) plants portant des blessures non cicatrisées :						
sauf blessures de coupe pour supprimer des flèches en surnombre	•	•	•	•	•	•
sauf blessures de coupe pour tailles culturales	•	•	•	•		•
sauf blessures de rameaux	•	•	•	•	•	•
b) plants partiellement ou totalement desséchés	•	•	•	•	•	•
c) tige présentant une forte courbure	•			•		•
d) tige multiple	•	•	•	•	•	•
e) tige présentant plusieurs flèches	•		•	•		•
f) tige et rameaux incomplètement aôutés	(1) •		(1) •			(2)•
g) tige dépourvue de bourgeon terminal sain	(1) •	(1)•	(1)•	(1) •		
h) ramification absente ou nettement insuffisante	•			•		
i) aiguilles les plus récentes gravement endommagées au point de compromettre la survie de la plante	•		•	•		
k) collet endommagé (4)	•	•	•	•	•	•(3)
l) racines principales gravement enroulées ou tordues (4)	•	•	•	•	•	
m) radicelles absentes ou gravement amputées (4)	•	•		•	(5) •	
n) plants présentant de graves dommages causés par des organismes nuisibles	•	•	•	•	•	•
o) plants présentant des indices d'échauffement, de fermentation ou de moisissure consécutifs au stockage en pépinière	•	•	•	•	•	•

(1) Sauf si les plants sont extraits de pépinière pendant la période de végétation
(2) A l'exclusion des clones Populus deltoides angulata
(3) Sauf pour les plants de Populus recépés en pépinière
(4) Sauf pour les plançons
(5) Sauf pour le Quercus borealis

3.2 Précisions et illustrations de ce tableau de critères

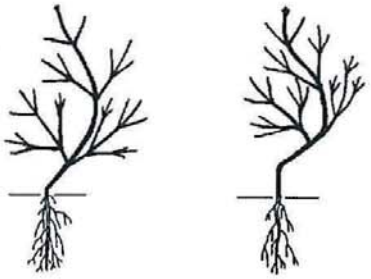
- les critères a, f et g n'appellent pas de commentaire
- le tableau de critères précise les essences auxquelles chaque critère s'applique

Critère a - plants portant des blessures non cicatrisées :
- sauf blessures de coupe pour les flèches en surnombre
- sauf blessures de rameaux

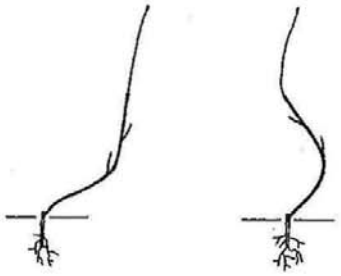
Sans commentaire particulier

Critère b - plants partiellement ou totalement desséchés : ne concerne que le dessèchement de la tige ou des parties racinaires à l'exclusion du dessèchement des aiguilles ou des feuilles traitées au critère i. L'état de fraîcheur des tiges et des racines peut être apprécié après grattage de l'écorce à l'ongle.

Critère c - tige présentant une forte courbure :
Les schémas joints illustrent ce genre de défaut. A noter qu'une courbure de la pousse terminale, en particulier chez le Douglas, ne peut être considérée comme un défaut rédhibitoire, de même qu'une courbure de la base de la tige ou une légère flexuosité chez le Peuplier :



Résineux - feuillus



Peupliers

Plants de qualité non loyale et marchande : Courbure de la tige (dues à des accidents en pépinière).
Plants refusés

Peupliers



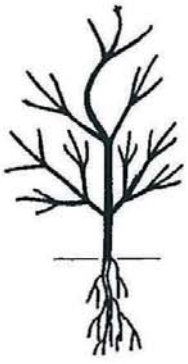
Courbure basale : 1 214. Blanc du Poitou, Ghoy…



Courbure basale et flexuosité : Trichocarpa



Déviation de la 2e pousse : Dorskamp, Flevo

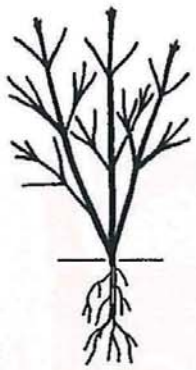


Courbure de la dernière pousse, sans conséquence (fréquent chez le Douglas)

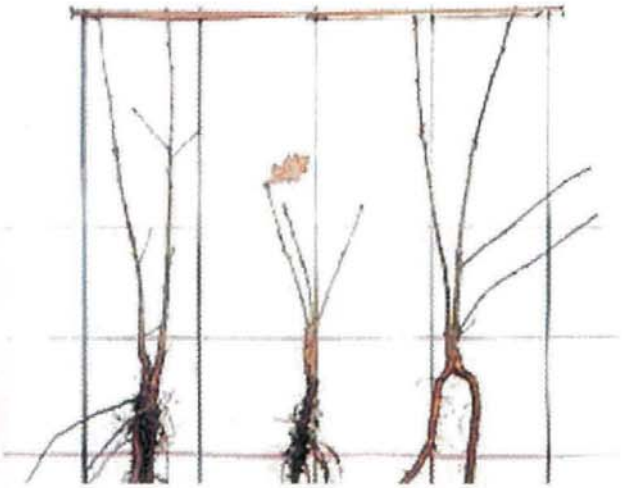
Plants de qualité loyale et marchande - ***Plants acceptés***

Plants acceptés

Critère d - tige multiple : il s'agit du cas où plusieurs tiges partent du collet du plant et sont susceptibles de se développer concurremment (voir schéma ci-après).

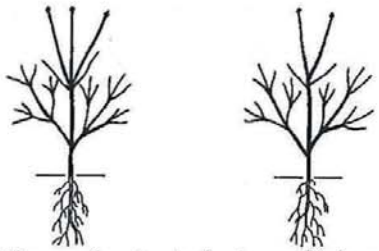


*Tige multiple - **Plant refusé***



*Tiges multiples sur chêne - **Plants refusés***

Critère e - tige présentant plusieurs flèches : voir schémas et photos ci-dessous. La taille des flèches en surnombre est autorisée (voir a) avant commercialisation pour toutes les espèces sous réserve de ne pas conduire à un déséquilibre des parties aériennes. Pour Pseudotsuga, Fagus et Quercus, la présence de plusieurs flèches (= pousses terminales) n'est pas un défaut excluant le plant de la qualité loyale et marchande.



Tiges présentant plusieurs flèches

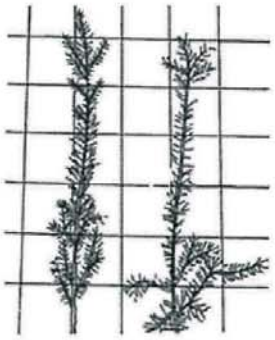


*Sur pins laricio – **Plants refusés***



*Sur chêne – **Plants acceptés***

Critère h - ramification absente ou nettement insuffisante



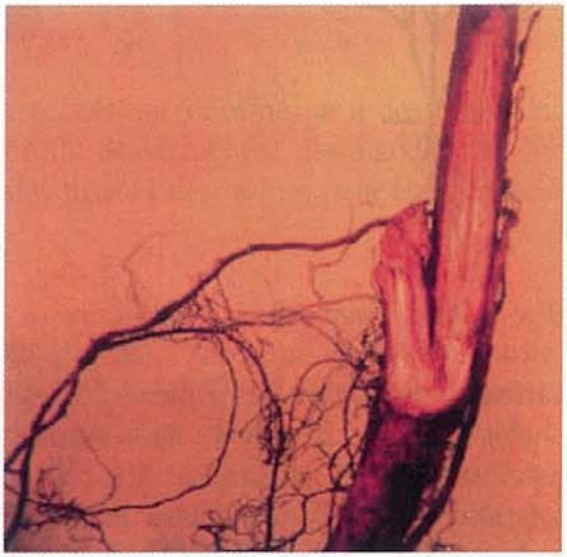
*Douglas - ramification insuffisante - **Plant refusé***

Critère i - aiguilles les plus récentes gravement endommagées au point de compromettre la survie du plant : pour que la survie du plant soit compromise, on admettra qu'il faut que plus d'un tiers des aiguilles de la dernière saison de végétation soient endommagées (desséchées par exemple).

Critère k - collet endommagé : il y a dommage notamment en cas de blessure au collet, dégâts d'insectes et d'animaux, étranglement (dû par exemple à une phytotoxicité d'herbicide).



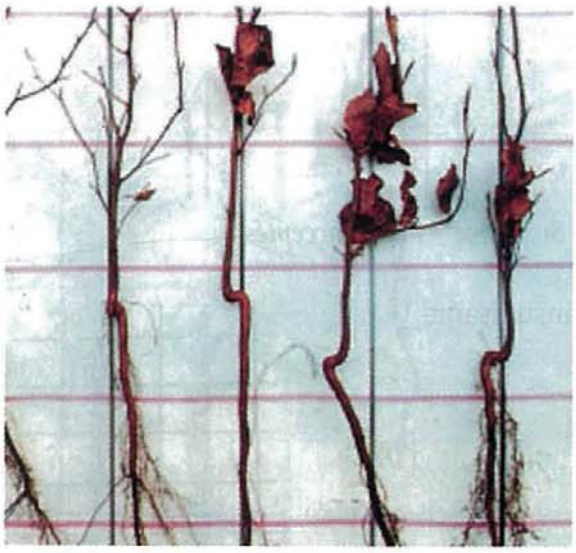
Peupliers



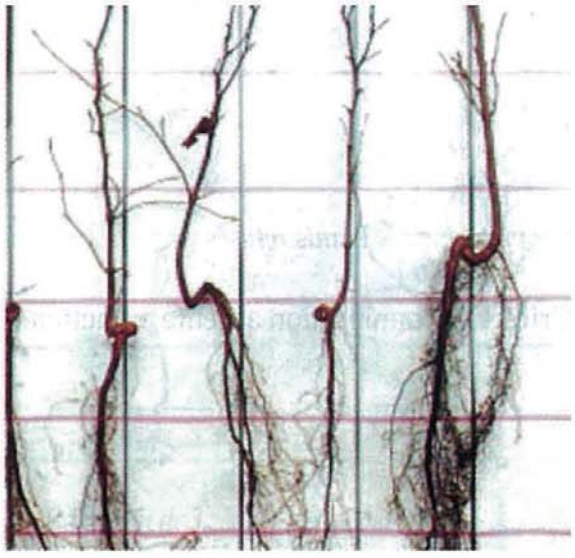
Chêne de 3 ans

*Collets endommagés – **Plants refusés***

Critère l - racines principales gravement enroulées ou tordues : il y a défauts rédhibitoires en cas de racine en cor de chasse, en S, en J et plus généralement racine formant un angle égal ou inférieur à 110° avec la tige.



Hêtre : déformations non rédhibitoires
Plants acceptés



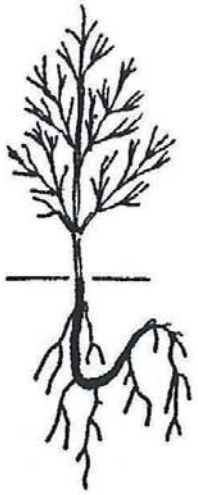
Hêtre : déformations rédhibitoires
Plants refusés

Déformations de la racine principale

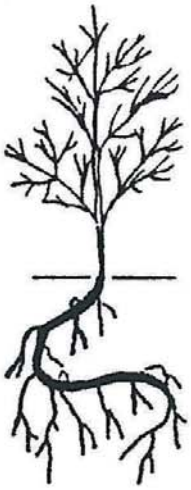
Résineux : Défauts rédhibitoires de la racine principale



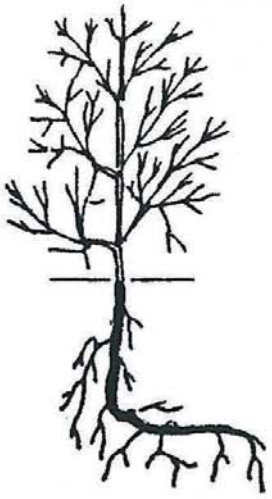
Racine en « cor de chasse «



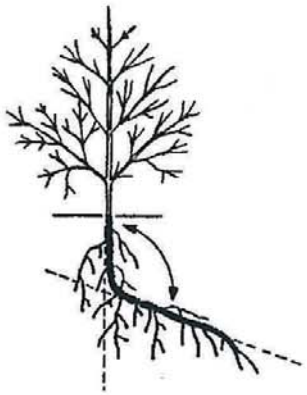
en « J »

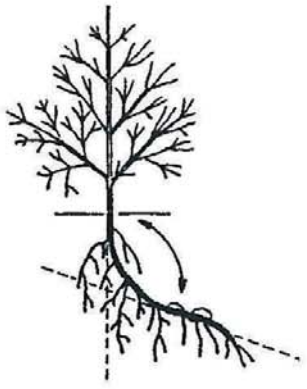


en « S »



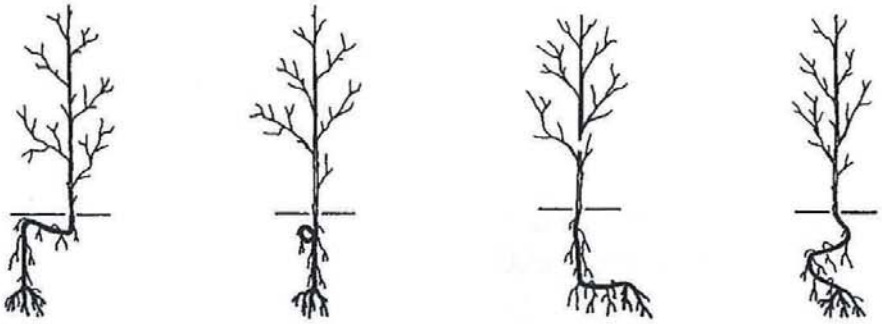
en « L »





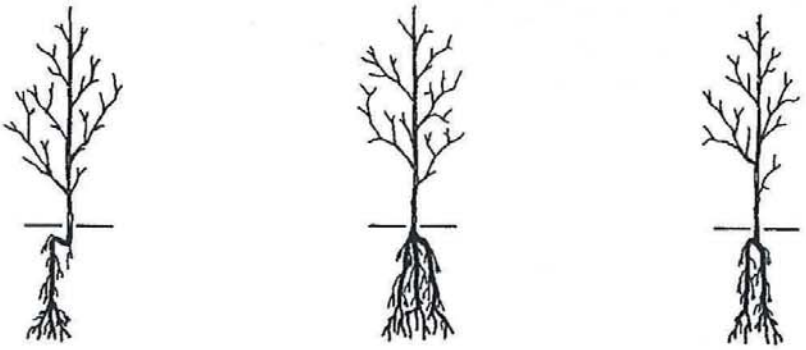
…et plus généralement, racine principale formant un angle égal ou inférieur à 110° avec la tige
Plants refusés.

Feuillus (chêne et hêtre)
Défauts rédhibitoires de la racine principale



Plants refusés

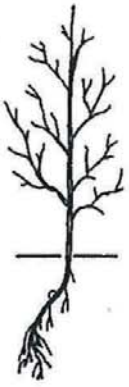
Défauts non rédhibitoires de la racine principale



Simple déformation à la germination

Divisions du pivot à la germination

Plants acceptés



Déviation naturelle du pivot, chez le chêne rouge en particulier (angle racine/tige toujours supérieur à 110°)

Plants acceptés

Critère m - radicelles absentes ou gravement amputées (sauf Pinus, Quercus borealis et certains Populus qui sont en effet pivotants et ne développent pas de chevelu radiculaire important).



Pin laricio de Corse (1+2)
***Plant refusé** – (bien que du genre Pinus car chevelu racinaire inexistant)*

Critère n - plant présentant de graves dommages causés par des organismes nuisibles.



Chêne : dégât de lapin
Plant refusé



Pin noir d'Autriche : rouge cryptogamique
Plant refusé

Critère o - plants présentant des indices d'échauffement, de fermentation ou de moisissures consécutifs au stockage en pépinière ou au transport : par « indices », il faut comprendre une élévation anormale de température dans les bottes de plants, une odeur caractéristique de fermentation, un changement de coloration anormal des aiguilles, la présence manifeste de moisissures sur les parties aériennes et les racines, un bleuissement des tissus internes des racines principales (chêne rouge par exemple...). A noter toutefois que la présence de moisissures sur les racines de Douglas, est un phénomène courant après quelques jours de stockage, mais non préjudiciable. Ne pas confondre les moisissures évoquées avec les mycorhizes.

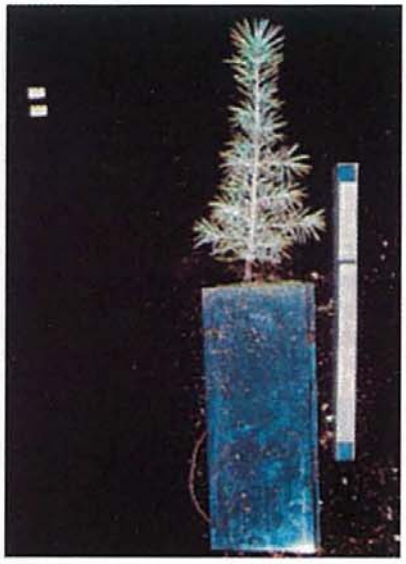
4 Réception des plants en conteneur

Attention !

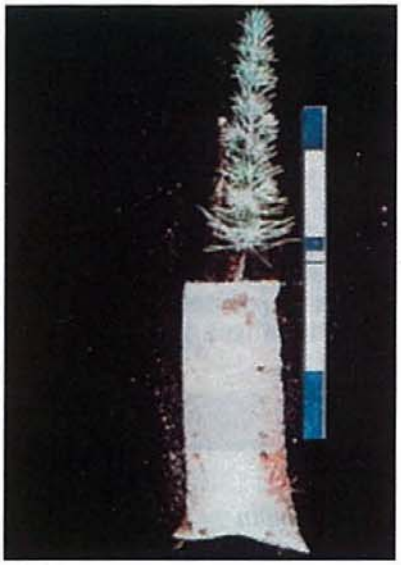
Les plants en conteneurs exigent des précautions particulières !
En effet, l'élevage en conteneur comporte des risques importants pour la qualité des plants (système racinaire et fonctionnement physiologique). C'est pourquoi, il est préférable de privilégier les plants ayant eu la plus courte durée d'élevage.

4.1 Partie aérienne

Les conditions requises sont les mêmes que pour les plants à racines nues (voir 2 et 3). Notamment, la relation diamètre - hauteur doit rester celle des plants à racines nues.
Toutefois, la croissance de certains plants en conteneur exige qu'il soit veillé à un bon équilibre entre la partie aérienne et la partie racinaire.
On pourrait ainsi proposer que la hauteur de la tige soit inférieure à 2 fois la hauteur du conteneur et à 8 fois la plus grande dimension du conteneur (ou diamètre).
D'autre part, le développement de la partie aérienne ne doit pas être limité à la seule croissance en hauteur de la tige. Certaines essences présentent des ramifications latérales dès la première année lorsque la densité d'élevage n'est pas trop élevée (200 à 250 plants par m^2).



Cèdre (1-0) ramifié
Plant accepté



Cèdre (1-0) non ramifié
Plant refusé ou déconseillé

4.2 Conteneur et substrat

Le volume du conteneur doit être suffisant pour accueillir, sans le déformer l'ensemble du système racinaire produit dans un substrat ménageant une place pour l'air (20 à 30%) et une place pour l'eau (25 à 35%).
L'humidité du substrat du conteneur doit être assurée lors de la livraison et maintenue jusqu'à un nouveau trempage à saturation avant la plantation.

4.3 Racines primaires

Un pivot sans ramifications latérales n'est pas acceptable (type d'élevage en substrat argileux, ou plant qui « tète «). Les racines primaires doivent coloniser tout le volume de culture.



Substrat aéré : système racinaire bien développé (racines primaires nombreuses)
Plant accepté



Substrat compact (présence de terre) : système racinaire très déficient
Plant refusé

4.4 Enroulement de racines latérales

Les plants dont les racines se développent en colimaçon au contact des parois du conteneur et présentent, de ce fait, un risque élevé d'étranglement du pivot et des autres racines du plant doivent être refusés.



Pin sur substrat terreux : seulement quelques racines circulaires
Plant refusé

4.5 Chignon au fond du conteneur

La préférence sera donnée aux plants élevés dans des conteneurs sans fond ou présentant une grande ouverte à la base placés, durant l'élevage, sur un dispositif préservant un coussin d'air de 10 cm minimum sous les conteneurs. En effet, si le conteneur n'est pas conçu pour favoriser l'autocernage (arrêt spontané de croissance des racines au contact de l'air) ou s'il

est posé sur une surface imperméable aux racines, le pivot et les autres racines arrivant au fond du conteneur s'amassent et s'enroulent irrémédiablement.
Il ne doit pas y avoir d'accumulation de racines au fond du conteneur.

4.6 Racines remontantes (ou crosse sur le pivot ou racines latérales en parapluie renversé)

Elles peuvent être dues à des erreurs de repiquage dans la motte, à un défaut d'arrosage ou à des volumes de conteneur insuffisants par rapport à la durée d'élevage.



Chênes pédonculés (3 ans) élevés en conteneur
Plants refusés

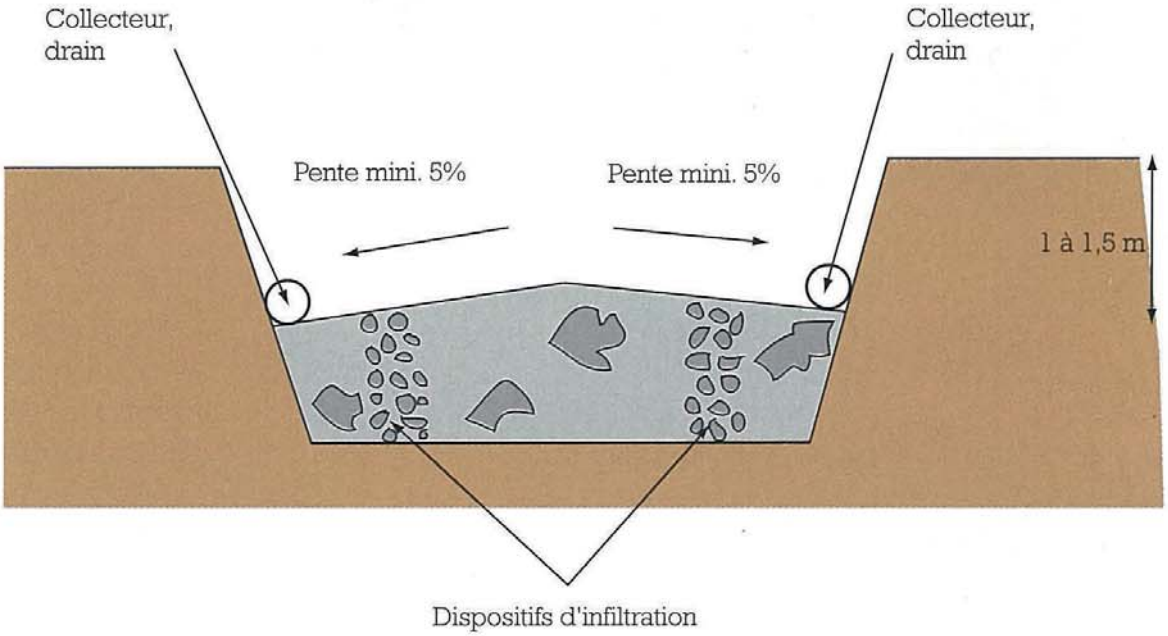
4.7 Racines qui « tètent »

Ceci s'observe :
- au fond du conteneur quand celui-ci est posé directement sur le sol ou quand le « coussin d'air « (sec) n'est pas suffisant (minimum 10 cm).
- sur les parois latérales quand les conteneurs sont perméables aux racines et sont disposés les uns contre les autres.

Annexe 5

Réalisation d'un puits filtrant

Issue de la source bibliographique : [62a] Institut agricole de l'état de Fribourg, 1998 - *Directives concernant le décapage et la mise en dépôt de la terre végétale ainsi que la remise en culture de gravières et de décharges*, 15 p.



Annexe 6

Liste des espèces adaptées dans différentes régions

Issue de la source bibliographique :
[27] Cemagref, 1987 – 1991 – *Guide technique du forestier méditerranéen*

Zone méditerranéenne

Feuillus :

Aulne à feuille en cœur	*Alnus cordata*
Charme houblon	*Ostrya carpinifolia*
Châtaignier	*Castanea sativa*
Chêne liège	*Quercus suber*
Chêne pubescent	*Quercus pubescens*
Chêne rouge d'Amérique	*Quercus rubra*
Chêne vert	*Quercus ilex*
Erables	*Acer monspessulanum, A. opalus, A. campestre, A. platanoïdes, A. pseudo-platanus*
Eucalyptus	*Eucalyptus sp*
Févier d'Amérique	*Gleditschia triacantha*
Frênes	*Fraxinus excelsior, F. angustifolia, F. ornus*
Hêtre	*Fagus sylvatica*
Merisier	*Prunus avium*
Micocoulier	*Celtis australis*
Noyer	*Juglans regia*
Peupliers	*Populus alba, P. nigra, P. tremula*
Platane d'orient	*Platanus orientalis*
Sorbiers et alisiers	*Sorbus domestica, S. aucuparia, S. aria, S. torminalis*
Robinier pseudo-acacia	*Robinia pseudoacacia*
Tilleuls	*Tilia argentea, T. platyphyllos, T. cordata*

Résineux :

Cèdres	*Cedrus atlantica, C. libani, C. brevifolia, C. deodora*
Cyprès	*Cupressus sempervirens, C. dupresiana, C. atlantica, C. macrocarpa, C. arizonica*
Douglas	*Pseudotsuga menziesii*
Pin d'Alep	*Pinus halepensis*
Pin laricio	*Pinus nigra ssp laricio*
Pin maritime	*Pinus pinaster*
Pin noir d'Autriche	*Pinus nigra ssp nigricans*
Pin pignon	*Pinus pinea*
Pin sylvestre	*Pinus sylvestris*
Sapins	*Abies alba, A. nordmanniana, A. bormulleriana, A. cephalonica, A. pinsapo, A. numidica, A. cilicica, A. concolor*

Issue de la source bibliographique :
[5] Annen B., Dörflinger A., Grimm F., Kästli T., Teutsch R., 1991 - *Forêt et gravières : directives pour le reboisement des gravières désaffectées*, FSK- Schweiz. Fachverband für Sand und Kies, Bern, 43 p.

En Suisse ou dans l'Est de la France

Essences forestières :

Aulne blanc	*Alnus incana*
Aulne glutineux	*Alnus glutinosa*
Bouleau blanc	*Betula pendula*
Bouleau pubescent	*Betula pubescens*
Merisier	*Prunus avium*
Charme	*Carpinus betulus*
Chêne pédonculé	*Quercus robur*
Chêne sessile	*Quercus petraea*
Epicéa	*Picea abies*
Erable plane	*Acer platanoïdes*
Erable sycomore	*Acer pseudoplatanus*
Frêne	*Fraxinus excelsior*
Hêtre	*Fagus sylvatica*
Mélèze	*Larix decidua*
Orme des montagnes	*Ulmus glabra*
Pin sylvestre	*Pinus sylvestris*
Sapin blanc	*Abies alba*
Sorbier des oiseleurs	*Sorbus aucuparia*
Tilleul à grandes feuilles	*Tilia platyphyllos*
Tilleul à petites feuilles	*Tilia parvifolia*
Tremble	*Populus tremula*

Essences d'accompagnement :

Chêne rouge d'Amérique	*Quercus borealis*
Douglas	*Pseudotsuga menziesii*
Pin weymouth	*Pinus strobus*

Issue de la source bibliographique :
[125] Valette A., 1988 - *Guide pour la végétalisation des carrières en région Centre,* mémoire ENITEF UNICEM, 29 p + annexes

Dans le Centre de la France

espèces	calcaire dur	calcaire tendre	alluvion	sable	roche méta-morphique	argiles à silex
Abies nordmanniana	X	X				
Acer pseudoplatanus	X					X
Acer saccharum			X			
Ailanthus glandulosa	X	X	X			
Alnus cordata	X					
Betula verrucosa			X			
Carya amara	X	X				X
Castanea sativa				X	X	
Cedrela sinensis	X		X			
Cedrus atlantica	X	X				
Cupressus arizonica	X	X				X
Fraxinus excelsior	X					X
Pinus contorta			X	X	X	
Pinus laricio	X		X	X	X	X
Pinus nigra	X	X				X
Pinus sylvestris			X	X	X	
Populus alba	X		X			
Populus balsamea			X			
Populus euramericana			X			
Prunus avium	X	X				X
Prunus serotina	X					X
Pterocarya fraxinifolia			X			X
Quercus borealis			X	X		
Robinia pseudoacacia	X	X	X	X	X	
Sorbus aria		X	X			X
Sorbus torminalis	X	X				X
Taxodium distichum			X			X
Tilia cordata	X	X				X

Annexe 7

Modalités d'utilisation de certaines espèces

Issue de la source bibliographique :
[125] Valette A., 1988 - *Guide pour la végétalisation des carrières en région Centre,* mémoire ENITEF UNICEM, 29 p + annexes.

Voir tableau page suivante.

espèces	catégorie de plant	hauteur du plant	aide FFN	densité minimale	densité maximale	technique sylvicole	âge d'exploitation	élagage	taille	1ère éclaircie à	Prix bois par m³
Abies nordmanniana	2+2	20/30	oui	1100	2500	plein	70/80 ans	oui		10/15 m	340 f
Acer pseudoplatanus	1+1	40/80	oui	1100		bande placeau	70/80 ans	oui	oui	10/15 ans	1300 f
Acer saccharum	1+1	40/80	oui	1100		bande placeau	70/80 ans	oui	oui	10/15 ans	1300 f
Ailanthus glandulosa	1+1			600	1100	taillis placeau	25/35 ans			non	40 f/st
Alnus cordata	1+1	50/80		1100		bande placeau	50/60 ans	oui			200 f
Alnus glutinosa					1100	linéaire taillis	25/40 ans			non	40 f/st
Betula verrucosa	1+1	60/80		1100		bande placeau	25/35 ans			10 ans	50 f/st
Carya amara											
Castanea sativa	1+1	40/100		1100		taillis	25/35 ans			non	100 f/st
Cedrela sinensis				1100		bande placeau	25/35 ans				
Cedrus atlantica	1+0			600	1100	plein	70/80 ans	oui		10/15 ans	340 f
Cupressus arizonica	1+0			1100		plein bande	65/70 ans	oui		10/15 ans	340 f
Fraxinus excelsior		60/100	oui	600	1100	plein placeau	60/80 ans	oui	oui	10/15 ans	1000 f
Fraxinus oxyphilla	1+1	60/100		600	1100	plein placeau	60/80 ans	oui	oui		1000 f
Pinus contorta	1+1	10/25		1100	2500	plein	70/90 ans	oui			100 f
Pinus laricio	1+1	10/25	oui	1100	2500	plein	70/120 ans	oui		10/15 m	150 f
Pinus nigra	1+1	10/25	oui	1100	2500	plein	70/120 ans	oui		10/15 m	100 f
Pinus sylvestris	1+1	10/25	oui	1100	2500	plein	70/120 ans	oui		10/15 m	125 f
Populus balsamea	1+0		oui	150	200	plein linéaire	20/35 ans	oui	oui	non	150 f
Populus nigra	1+0		oui	150	200	plein linéaire	20/35 ans	oui	oui	non	150 f
Prunus avium			oui	600	1100	plein placeau	60/80 ans	oui	oui	10 ans	1000 f
Prunus serotina	1+0	60/120		600	1100	plein placeau	60/80 ans	oui	oui	10 ans	1000 f
Pterocarya fraxinifolia					1100	linéaire	25/50 ans				
Quercus borealis	1+1	55/70	oui	1100	2500	plein placeau	60/80 ans	oui	oui	10 ans	540 f
Robinia pseudoacacia	1+1	40/80			1100	placeau	25 ans			8 ans	250 f/st
Sorbus aria	1+0	30/40		600	1100	placeau	60/80 ans	oui	oui	10 ans	800 f
Sorbus torminalis	1+0	30/40		600	1100	plein placeau	60/80 ans	oui	oui	10 ans	800 f
Taxodium distichum	1+1			1100		linéaire	60/80 ans	oui			
Tilia cordata	1+1	15/30		600	1100	bande placeau	60/80 ans	oui	oui		800 f

Annexe 8

Calendrier de réalisation et d'entretien d'un boisement

Issue de la source bibliographique :
[38] DERF, 1990 - *Boiser et après,* ministère de l'agriculture et de la forêt, 63 p.

Situation rencontrée	Type d'intervention	Année	Mois
A/ Présence de clématite	Couper les lianes Traiter les taches au sol en pulvérisation	-3	juillet à octobre
B/ Au moment de la mise en vente : (cahier des charges + surveillance)	- Les souches doivent être coupées au ras du sol - Les bois seront exploités jusqu'à 8 cm de diamètre fin bout voire moins (bois de chauffage)		
	- Le débardage sera arrêté durant les périodes où le sol est trop mouillé et les délais de vidange seront prolongés d'autant. - Le parterre de la coupe sera nettoyé	-2	mars à avril
C/ Conception globale du reboisement	- Conception du reboisement (essence+technique) - Négociation avec entrepreneurs - Réalisation devis FFN à présenter à la DDAF	-1	mars-avril à juin
D/ Nettoyage des coupes	Eventuel - Dessouchage si souches trop hautes - Arasement des souches avec « lame coupante » sur Bull (sol sec) ou tronçonneuse - Mise en andain des rémanents (sol sec) - Brûlage en période autorisée	-1	juin à fin octobre (sol sec)
E/ Préparation du sol	Eventuel contrôle chimique avant plantation sur : chiendent, molinie, fougère, clématite, rejets feuillus, chèvrefeuille et éventuel engrillagement contre : lapins, chevreuils, cerfs	-1	avril à juin juillet 15 juillet-15 août juillet à octobre septembre octobre à novembre
	Si nécessaire : - Engrillagement contre gibier (grandes surfaces), éclatement du sol en profondeur avec dents de RIPPER ou sous-soleuse (sol sec) - création ou remise en état des fossés, - labour profond améliorateur de structure (sol sec), pseudo-labour sur 15 à 20 cm (sol sec)	-1	juin à fin octobre
	- En présence de ligneux ou semi-ligneux, débroussailler avant plantation - Lit de plantation au cover-crop avant de planter (sol nécessairement ressuyé)	-1 ou 0	juste avant de planter

	- Réalisation (cover-crop) de lit de semence (juste avant de semer) :		
	- chênes	-1	15 octobre-15 novembre
		0	15 avril-15 mai
		0	1er mai-15 novembre
	- pin maritime		
F/ Plantation	Si nécessaire, ouverture de potet avec une tarière ou une pelle hydraulique (sol ressuyé)	-1	15 octobre à fin décembre
	- Piquetage et plantation	0	1er janvier-31 mars
	- Désherbage (si possible) des plantations sur sol labouré propre		
G/ Protection individuelle contre gibier	Si nécessaire, installation de protections individuelles le jour de la plantation	-1	15 octobre à fin décembre
		0	1er janvier-31 mars
H/ Entretien des Reboisements Dégagements	Si nécessaire traitement :		
	Des graminées :		
	- sur lignes de pins	1	15 mars-15 juin
	- Douglas, épicéa, sapins	1-2	15 mars-15 avril
	- sur lignes ou en plein de chênes et hêtres	2	fin mars
	- toutes essences, semis naturel compris, mêmes débourrées (avec produit strictement gramicide)	0-1-2	15 avril-15 juin
	Des genêts et ajoncs :		
	- sur lignes de Douglas avant débourrement,	1	mars au 15 avril
	- sur lignes de pin maritime avant débourrement,	1	avant le 15 mars
Contrôle chimique	- sur lignes de pin laricio, pin sylvestre, épicéa, sapin après août ement	0 ou 1	1ère quinzaine de septembre
	Rejets feuillus :		
	- sur ligne de pin laricio, pin sylvestre, épicéa, sapin, après août ement,	0 ou 1	1ère quinzaine de septembre
	- sur ligne de Douglas, après août ement	0 ou 1	1ère quinzaine d'octobre
	De la ronce :		
	- sur lignes de pin laricio, pin sylvestre, épicéa sapin, après août ement, écorces non gelées,	0 ou 1	du 15 septembre au 15 décembre
	- sur lignes de Douglas août és, ronces non gelées,	0 ou 1	1er octobre au 15 décembre
Contrôle mécanique en interlignes	Entretien d'interligne par travail du sol superficiel avant arrivée de la végétation concurrente herbacée, en particulier sur sol labouré profondément avant reboisement et non désherbé préventivement.	0-1-2-3-parfois plus	mai-juin
	En présence de végétation ligneuse ou semi-ligneuse, entretien sans toucher au sol avec girobroyeurs ou même rouleaux landais (sol sec)	0-1-2-3-4 parfois plus	juin-juillet (attention au gibier)
Contrôle manuel sur lignes (1m de largeur)	Entretien manuel de la végétation ligneuse ou semi ligneuse sur les lignes de plants	0-1-3 parfois plus	juin-juillet
	En présence d'herbacées, préférer le contrôle chimique.		
I/ Tailles et Elagages	Tailles de formation sur feuillus	2-6 parfois plus	Après gelées de printemps ou époque indifférente pour petites branches

	Elagage en 1 à 5 passages selon les essences et l'accompagnement souvent en même temps que les tailles de formation : - au début jusqu'au 1/3 de la hauteur totale, - ensuite et progressivement jusqu'à mi-hauteur	entre 3 et 20 ans et parfois plus	Hors montée de sève juillet/août pour feuillus
J/ Dépressages (feuillus et résineux)	Coupe et abandon sur place des tiges coupées - Semis de chêne 1 à 3 passages pour atteindre une densité équivalente à plantation hauteur moyenne : 4 à 5 m	8 à 12	En arrêt de végétation
	- Semis de pin maritime 1er passage ramène à 2500 tiges/ha hauteur moyenne : 1,50 m	3	En arrêt de végétation
	2ème passage ramène à 1200 tiges/ha hauteur moyenne 3 à 4 m	6 à10	En arrêt de végétation
	- Plantation de résineux Laisser au plus 800 tiges/ha hauteur moyenne : 4 à 7 m si possible après dernier dégagement	5 à 10 (Douglas Mélèze) 8 à 10 autres résineux	Toute l'année (Douglas,Mélèze) septembre à novembre (pins, épicéas)
K/ Eclaircie précoce (résineux)	Coupe avec commercialisation des produits Densité ramenée à moins de 800 tiges/ha hauteur moyenne : 10 à 15 m	8 à 12 (pins) 12 à 25	Toute l'année (Douglas Mélèze) octobre à mars (autres résineux)

Annexe 9

Recommandations pour stabiliser les talus

Issue de la source bibliographique :
[59] Henensal P., 1996 - *La lutte contre l'érosion sur l'emprise routière : une contribution à la protection de l'environnement,* Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées 201 : 17-28.

Actions sur la physique et la physico-chimie du sol

Agir sur le couple infiltration-ruissellement

Réglage de la pente des surfaces facilitant le ruissellement
- Augmentation et réglage des pentes en terrain subhorizontal
- Ados

Assainissement entraînant une diminution des teneurs en eau
- Tranchées drainantes et drains
- Fossés à ciel ouvert

Traitements mécaniques jouant sur la perméabilité
- Façons culturales des sols à végétaliser
  Labours, quasi-labours (avec dents, disques, rotovator, etc.)
  Sous-solage, épierrage, etc.
- Compactage

Augmentation de la détention superficielle des eaux par micromodelage des surfaces
- Travail du sol isohypse (suivant les courbes de niveau)
- Redans isohypses
- Gaufrage
- Crantage par chenilles

Structures poreuses pour parkings, chaussées et accotements

Diminuer l'érodabilité des sols superficiels dans leur masse

Conditionneurs de sol
- Produit divers à base de polyacrylamide ou polybutadiène ou silicates ou urée et formaldéhyde, etc.

Amendements organiques et humus
- Lisiers et fumiers
- Empaillage et engrais verts
- Déchets végétaux et composts
- Gadoues et boues organiques des stations d'épuration

Amendements minéraux pour augmenter le pH

- Chaux vive éteinte, marnes, calcaires broyés, laitiers, etc. (relèvement du pH d'un sol argileux d'une demi-unité : environ 0,15 kg/m^2 de chaux vive sur 10 centimètres)

Traitements des sols tendant à la cimentation

- Ciments, chaux vive, chaux éteinte (dosage moyen de ciment 5% - dosage moyen de chaux vive 2,5%, soit environ 4,5 kg/m^2 sur 10 centimètres)

Compactage

- Compactage de bord de remblai
- Fermetures des couches superficielles avant l'orage

Protections des surfaces

Protéger des surfaces avec des couverts végétaux

Maintien ou enlèvement de la couverture végétale initiale

Satisfaction des besoins élémentaires de la végétation

- Aération du sol, rétention en eau, pH, éléments nutritifs
- Apports éventuels : terre végétale, amendements, engrais (N, P_2O_5, K_2O)

Adaptation des espèces choisies au climat et aux fonctions recherchées

Mise en place avec ou sans matériaux inertes végétalisables

- Engazonnements
  - Semis classique, semis hydraulique, gazon en plaque
  - Nattes et géotextiles pré ensemencés
- Plantations des ligneux
  - Semis, jeunes plants, boutures
- Structures biomécaniques
  - Plançons, fascinages, clayonnages et tunages
  - Cordons de branchages, paillassonnages de branches

Entretien et gestion de la végétation

Protéger les surfaces avec des matériaux inertes

Protections perméables légères, végétalisables

- Fixateurs et stabilisants
  - Alginates et polyuronides, émulsions de latex ou de bitume
  - Dispersions de polymères de vinyle ou d'éthylène etc.
- Mulchs ou paillage (avec ou sans fixateurs et engrais)
  - Paille, foin, paille-bitume, tourbe, cellulose et déchets de bois
  - Broussailles broyées, fibre de verre, filets de jute, paillis
  - Nattes et paillassons, géotextiles (filets et non tissés)
  - Nappes géosynthétiques tridimensionnelles, films de paillage en polyéthylène basse densité (PE bd) autour ou entre les plants (plasticulture)

- Géogrilles, grillages, filets avec ancrages
  Plaçage et confinement des matériaux évolutifs
  Dispositifs antichute de pierres

Revêtement perméables lourds, végétalisables
- Couche de terre végétale
- Mélange boueux épais (5 à 10 cm) + fils ou grillages
- Structures cellulaires remplies de terre végétale
  Géotextiles tridimensionnels alvéolés, alvéoles en béton préfabriqué ou projeté
  Couverture de pneus ou pavés de béton ajourés jointifs autobloquants ou fixés sur géotextiles, etc.

Revêtements perméables lourds, difficilement végétalisables
- Perrés non cimentés de couverture ou couches de cailloux
- Gabions de couverture
- Enrochements et tétrapodes

Protections totales par imperméabilisation, non végétalisables
- Géomembranes (protections légères provisoires et protection permanentes pour étanchéité), bitumage épais, gunitage, bétonnage, perrés maçonnés

Modulation des talus

Intégrer les talus routiers dans le paysage

Adoucissements de hauts de pentes
Pentes variant progressivement des déblais aux remblais
Prise en compte des structures géologiques
- Alternance de roches dures et de roches tendres
- Discontinuité et pendages naturels des couches

Stabiliser, faciliter la végétalisation et l'entretien des talus

Eperons drainants
Banquettes de pieds ou masques drainants
Murs de pied
Pièges à cailloux
Risbermes (talus en sols cohérents ou roches tendres)
Pentes en marches d'escalier
- Terrassettes et redans (pas de contremarches étayées)
- Roseaux et contremarches en planches sur sables de dune
- Contremarches en pierres sèches ou maçonnées (terrasses agricoles et microterrases)
- Terrasses sur déblais rocheux (avec apport de terre végétale)
- Marches d'escalier dans carrières et mines à ciel ouvert

Raidir et conforter les pentes

Remblais (étagés ou non) en terre renforcée et faces (sub) verticales
- Terre armée et murs à grillages soudés
- Massifs renforcés en géotextiles et géogrilles
- Pneusols

Soutènements-poids perméables et végétalisables
- Texsol
- Murs cellulaires à encoffrement
- Gabions

Soutènements rigides avec barbacanes
- Murs en béton
- Murs cantilever et palplanches

Soutènement ancrés ou cloués

Maîtrise des eaux superficielles

Maintenir et rétablir les écoulements permanents

Etude et calcul des débits potentiels
Buses et ponceaux sous remblais

Dériver les eaux en amont des chantiers

Détournement des petits ruisseaux
Fossés de crête ou d'interception

Filtrer les ruissellements

Dispositifs sur terre cultivées
- Bandes d'arrêts en gazon, bandes de cultures isohypses
- Cordons de pierres sèches

Barrages linéaires sur chantiers pendant les travaux
- Balles de pailles et de foin, barrières de broussailles
- Géotextiles filtrants verticaux

Stopper ou dévier les ruissellements

Dispositifs isohypses sur terres cultivées
- Levées de terre ou terrasses à pente longitudinale nulle (terrasse d'absorption) ou faible 0,1 à 1% (terrasses de canalisation)
- Haies végétatives et rideaux, certains talus du bocage

Dispositifs isohypses sur terrains en forte pente
- Fascinages, clayonnages, cordons de boutures
- Mini banquettes et banquettes DRS
- Risbermes

Evacuer les eaux concentrées (drainage superficiel)

Fossés et chemins d'eau sur terres cultivées

Collecteurs le long des chantiers et des ouvrages linéaires
- Cunettes, fils d'eau ou fossés drainants sur risbermes et au pied des déblais
- Banquettes ou bourrelets au haut des remblais

Collecteurs spéciaux à pente très élevée
- Descente d'eau sur talus routiers, déversoirs d'orage, dissipateurs d'énergie

Maîtriser la sédimentation et le stockage des eaux concentrées

Barrages filtrants provisoires sur les ouvrages de drainage
Bassins de sédimentation pendant les terrassements
Traitements floculants
Bassins de retenue d'orage sur autoroutes et en milieu périurbain (y compris stations de sports d'hiver)
Stockage agricole des eaux
- Diguettes d'infiltration avec déversoirs
- Bassins collinaires et barrages

Annexe 10

Protocole anglais de comparaison de matériaux de protection de pente

Issue de la bibliographie : [71] Kershaw K.W., Mitchley J., Buckley G.P., Helliwell D.R., 1995 - Slope protection and establishment of vegetation on Channel Tunnel spoil in an environmentally sensitive coastal site, in Barker D. H. (ed) *Vegetation and slopes*, Institute of Civil Engineers, Thomas Telford, London : 117-126

Description des matériaux de protection de pente :
– toile de jute à larges mailles couvrant 35% du sol ;
– « géomesh » : un filet de plastique noir à mailles de 25 mm ;
– paillage : de la paille sur une épaisseur de 20 mm ;
– « géomat » : un réseau en trois dimension de plastique constitué par des fibres de 0,5 mm d'épaisseur et créant une épaisseur de 10 mm ;
– un géotextile emballé avec des larges pores permettant la pénétration des petites racines et utilisé sous les blocs de béton ;
– un géotextile non emballé à consistance de feutre et utilisé sous les blocs de béton ;
– « géocell » un géotextile semi-rigide de type nid d'abeille ;
– des blocs de béton perforé :
• de 100 mm d'épaisseur et de 305 mm de côté avec 4 vides de 75 mm de diamètre, ce recouvrement a 38 % de surface ouverte en face supérieure et 32 % en face inférieure,
• de 135 mm d'épaisseur et de 305 mm de côté avec 4 vides de 50 mm de diamètre, ce recouvrement a 32 % de surface ouverte en face supérieure et 15 % en face inférieure.

Types de mélanges de graines (adaptées aux conditions de bord de mer) semés :

Mélange A :

Lolium perenne	5000 graines/m^2

Mélange B :

Agrosis stolonifera	3571 graines/m^2
Festuca ovina	6579 graines/m^2
Festuca rubra	3182 graines/m^2
Lolium perenne	1000 graines/m^2
Poa compressa	5000 graines/m^2
Puccinellia distans	2679 graines/m^2

Mélange C :

Festuca rubra	7000 graines/m^2
Onobrychis viciifolia	92 graines/m^2

Mélange D (composé de graines sauvages collectées sur la côte) :

Avenula pratensis	73 graines/m^2
Brachypodium pinnatum	4 graines/m^2
Brassica oleracea	161 graines/m^2

Briza media	1739 graines/m^2
Bromus erectus	95 graines/m^2
Daucus carota	349 graines/m^2
Echium vulgare	38 graines/m^2
Eupatorium cannabinum	222 graines/m^2
Festuca ovina	39 graines/m^2
Galium mollugo	24 graines/m^2
Hippocrepis comosa	20 graines/m^2
Hypochoeris radicata	9 graines/m^2
Ononis repens	1 graine/m^2
Plantago coronopus	300 graines/m^2
Plantago media	1064 graines/m^2
Scabiosa columbaria	58 graines/m^2
Silene nutans	3553 graines/m^2
Solidago virgaurea	135 graines/m^2
Trisetum flavescens	611 graines/m^2

Protocoles testés
Tous les protocoles incluent un apport de NPK et de gypse avec un semis des mélanges de graines B et C (sauf si une mention complémentaire est indiquée).

1 : pas d'apport de NPK et de gypse, pas de protection de surface, mélanges A, B, C et D
2 : pas de protection de surface, mélanges A, B, C et D
3 : couche de paille sur remblai, sable et compost
4 : toile de jute sur remblai, sable et compost, mélanges A, B, C et D
5 : « géomesh » sur remblai, sable et compost
6 : « géomat » sur remblai, sable et compost, mélanges A, B, C et D
7 : « géomat » par dessus du « géocell » rempli de remblai, sable et compost
8 : blocs de béton à 38 % de vides remplis avec remblai et compost sur un géotextile emballé posé sur du sable
9 : blocs de béton à 32 % de vides remplis avec remblai et compost sur un géotextile emballé posé sur du sable
10 : blocs de béton à 38 % de vides remplis avec remblai, sable et compost sur un géotextile emballé posé sur du sable
11 : blocs de béton à 32 % de vides remplis avec remblai, sable et compost sur un géotextile emballé posé sur du sable
12 : blocs de béton à 32 % de vides remplis avec du gravier sur un géotextile non emballé posé sur du remblai
13 : blocs de béton à 32 % de vides remplis avec remblai, sable et compost sur un géotextile non emballé posé sur du remblai
14 : blocs de béton à 38 % de vides remplis avec remblai, sable et compost sur un géotextile non emballé posé sur du remblai
15 : couche de paille sans addition de NPK et gypse
16 : double dose de NPK et gypse, pas de protection de la surface, mélanges A, B, C et D
17 : pas d'apport de NPK et gypse, pas de protection de la surface, mélanges A, B, C et D

Annexe 11

Protocole de l'essai italien de couverture de sol

Issue de la bibliographie : [95] Muzzi E., Roffi F., Sirotti M., Bagnaresi U., 1997 - Revegetation techniques on clay soil slopes in northern Italy, *Land Degradation and Development* 8 : 127-137

Description des traitements testés :
– témoin ;
– hydroseeding sur le sol tel quel ;
– hydroseeding sur un sol labouré à 5 cm ;
– mulch de paille : de la paille (1200g/m^2) avec un semis manuel et du goudron sur le sol tel quel ;
– toile de jute sur le sol labouré à 5 cm et hydroseeding ;
– toile de jute sur le sol labouré à 5 cm et semis manuel.

Chaque placette est amendée et fertilisée avec :
– 120 g/ m^2 de paille hachée ;
– 140 g/ m^2 de lombricompost ;
– 140 g/ m^2 d'un amendement contenant 5 % H_2O, 80% de matière organique, 5,5 % de NO_3, 1,9 % de P_2O_5, 9 % de K_2O, 3,5 % de Ca, 1,8 % de Mg, 1,8 % de B.

Mélange de graines semé :

Lolium spp	10 %
Phleum pratense	10 %
Festuca arundinacea	10 %
Festuca pratensis	10 %
Lotus corniculatus	10 %
Dactylis glomerata	15 %
Trifolium ladinum	15 %
Hedysarum coronarium	20 %

Ce mélange est utilisé à la dose de 45 g/ m^2.

Annexe 12

Spécifications comparées des composts selon les différents labels

Issue de la source bibliographique : [0] ADEME, Cemagref, 1999 - *Utilisation des déchets organiques en végétalisation, guide de bonnes pratiques, données et références*, Ademe éditions, Angers, 112 p.

Seuils limites retenus par la marque NF « compost urbain » classe A

Teneurs en impuretés (en % de la matière sèche)	
– Films plastiques et polystyrène expansé de dimension > à la maille ronde de 5 mm	< 0,5
– Lourds de dimension > à la maille ronde de 5 mm	< 6
– Inertes totaux	< 20
Teneur en éléments-traces métalliques (en mg/kg de matière sèche)	
– Cadmium (Cd)	< 8
– Mercure (Hg)	< 8
– Nickel (Ni)	< 200
– Plomb (Pb)	< 800

Seuils limites retenus en éléments-traces métalliques par le Label Ecologique Européen

Teneur en éléments-traces métalliques (en mg/kg de matière sèche)	
– Arsenic	< 10
– Cadmium	< 1
– Chrome	< 100
– Cuivre	< 75
– Fluor	< 200
– Mercure	< 1
– Molybdène	< 2
– Nickel	< 50
– Plomb	< 100
– Selenium	< 1,5
– Zinc	< 300

Dans les années 1970, face à la multiplication des ouvertures de carrières, la question de leur réaffectation s'est posée. Quand le site était auparavant boisé, la solution la plus fréquente était de s'orienter vers un réaménagement forestier.

Les vocations de tels réaménagements sont multiples : production forestière (bois), intégration paysagère des sites réaménagés, vocation écologique ou cynégétique. Selon ces objectifs, les caractéristiques de la reconstitution du sol et des boisements seront différentes.

De 1974 à 1990, des expérimentations de réaménagement forestier après extraction ont été réalisées avec l'aide des financements du comité de gestion de la taxe parafiscale. Elles ont principalement concerné des carrières de roches massives avec pour objectif de favoriser la réintégration paysagère du front de taille par différentes espèces végétales.

Ce document est une analyse synthétique des réaménagements forestiers des carrières de granulats issue de trois sources d'information :

- les dossiers concernant les expérimentations mises en place dans les années 1974-1990 ;
- les articles et rapports sur les méthodes récentes de réaménagement forestier de carrières pratiquées dans différents pays européens, au Canada et aux Etats-Uni ;
- une phase d'enquête de terrain sur des réaménagements réalisés dans les années 1974-1990 et des réaménagements récents ou en cours.

Il concerne tous ceux, carriers ou exploitants forestiers, impliqués dans le réaménagement forestier de carrières de granulats.

CHARTE
PROFESSIONNELLE
Union Nationale des Producteurs de Granulats

ISBN 2-85362-574-5



Prix 39 € TTC

Cemagref