RÉAMÉNAGEMENT AGRICOLE DES CARRIÈRES DE GRANULATS

Sylvie VANPEENE-BRUHIER

Avec la participation de Christian PIEDALLU, Isabelle DELORY

Cemagref
EDITIONS

RÉAMÉNAGEMENT AGRICOLE DES CARRIÈRES DE GRANULATS

Sylvie VANPEENE-BRUHIER

Avec la participation de Christian PIEDALLU, Isabelle DELORY

CHARTE PROFESSIONNELLE
Union Nationale des Producteurs de Granulats

Cemagref

Réaménagement agricole des carrières de granulats. *Sylvie Vanpeene-Bruhier,* avec la participation de *Christian Piedallu, Isabelle Delory*. © Cemagref Éditions 2002, tous droits réservés. ISBN 2-85362-573-7. PAO Maurice Merlin, dessins Marie-Laure Moyne, infographie Françoise Peyriguer. Impression BIALEC. Vente par correspondance PUBLITRANS 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 9

CHAPITRE 1 : PREPARATION DE LA REHABILITATION
I - PLANIFICATION DE LA REMISE EN ETAT, DECAPAGE ET STOCKAGE 17
1 - Phasage des opérations 17
2 - Décapage sélectif de la terre végétale et de l'horizon minéral 21
3 - Stockage sélectif de la terre végétale et de l'horizon minéral 23

II - FORME ET TOPOGRAPHIE DE LA PARCELLE REAMENAGEE 28
1 - Forme et accessibilité de la parcelle 28
2 - Diminution de la surface agricole 29
3 - Aménagement du talus 30
4 - Microclimat 30

CHAPITRE 2 : METHODE DE REMISE EN ETAT DES SOLS
I - PREPARATION DE LA REMISE EN ETAT DU SOL 36
1 - Détermination des différents niveaux des matériaux de comblement 36
2 - Nivellement du fond de fouille 38
3 - Drainage du fond de fouille 39

II - QUALITE ET QUANTITE DES MATERIAUX 40
1 - Choix des matériaux 40
2 - Epaisseur de matériaux 47

III - MISE EN PLACE ET ASSAINISSEMENT DES MATERIAUX DE COMBLEMENT 51
A - LES MATERIAUX GROSSIERS 51
1 - Mise en place des matériaux de comblement 51
2 - Le nivellement du toit du remblai 51
3 - Le drainage 52
B - LES MATERIAUX DE RECONSTITUTION DE L'HORIZON MINERAL 53
1 - Mise en place des matériaux de reconstitution de l'horizon minéral 53
2 - Amélioration de l'horizon minéral 54

IV - MISE EN PLACE DE LA TERRE VEGETALE ET PREPARATION DU SOL 56
1 - Conditions de manipulation de la terre 56
2 - Consignes générales de mise en place de la terre végétale 60
3 - Choix et utilisation des engins 61
4 - Epierrage 67
5 - Travail du sol 69

CHAPITRE 3 : AMELIORATION DU SUBSTRAT
I - LES AMENDEMENTS ORGANIQUES 74
A - LES COMPOSTS 74
1 - Les composts de déchets verts 75
2 - Les composts urbains 76
3 - Les composts de fraction fermentescible d'ordures ménagères 78
4 - Les composts de déchets agricoles 78
5 - Les composts mixtes 78

B - LES AUTRES AMENDEMENTS 79
1 - Les boues de papeterie 79
2 - Les boues de sucrerie 80
3 - Les boues de station d'épuration 81

II - AMELIORATION BIOLOGIQUE DES SOLS 83
1 - Utilisation de lombriciens 83
2 - Utilisation d'espèces végétales améliorantes 85

CHAPITRE 4 : LES PRATIQUES CULTURALES SUR UNE PARCELLE CONVALESCENTE
I - UNE PARCELLE CONVALESCENTE 89
1 - Prise en compte de la fragilité de la parcelle 89
2 - Une période de convalescence 90
3 - Un exemple d'une pratique inappropriée 90
4 - Récupération des potentialités de rendement 91

II - LES PRATIQUES CULTURALES 92
1 - Relever le pH 93
2 - Utilisation d'une fertilisation de fond 93
3 - Utilisation de mulchs 93

III - LE CONTROLE DE LA POLLUTION 94
1 - Risques sanitaires liés à l'utilisation de compost 94
2 - Risques de pollution par percolation liés à l'utilisation de compost 94
3 - Risques de pollution par percolation lors des épandages d'engrais 95

CHAPITRE 5 : MISE EN PLACE DES VEGETAUX ET RESULTATS
I - NATURE DES CULTURES 99
1 - La prairie 99
2 - Les grandes cultures 101
3 - Le maraîchage 104
4 - La vigne et l'arboriculture fruitière 105

II - MISE EN PLACE ET ENTRETIEN DE LA CULTURE 107
1 - La mise en place de la culture 107
2 - L'entretien de la culture 107
3 - L'irrigation 108

CHAPITRE 6 : INTEGRATION DU REAMENAGEMENT
I - STABILISATION DES TALUS 111
1 - Pente des talus 111
2 - Actions pour stabiliser les talus 111
3 - Améliorer l'installation des végétaux 112

II - LE CAS PARTICULIER DES BASSINS DE DECANTATION 114

III - LA CONCERTATION AVANT ET PENDANT LE REAMENAGEMENT 116
1 - La concertation carrier-agriculteur 116
2 - L'implication du carrier 117
3 - Le transfert de la parcelle à l'agriculteur 117

Conclusion 119

Glossaire 121

Bibliographie 125

Annexes 137

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des carrières à réaménagement agricoles visitées 13
Figure 2 : Planification d'une exploitation 19
Figure 3 : Schéma d'un réaménagement agricole à l'avancée 20
Figure 4 : Schéma de décapage pour faciliter les manœuvres 20
Figure 5 : Schéma d'un profil de sol 22
Figure 6 : Préparation d'un site de stockage sur un sol imperméable 25
Figure 7 : Schéma d'un stock de terre végétale 26
Figure 8 : Largeur de parcelle incompatible avec une rampe d'épandage 29
Figure 9 : Schéma d'un profil de sol reconstitué 36
Figure 10 : Schéma d'un nivellement en ados 39
Figure 11 : Schéma d'un drainage en ados et galeries drainantes 40
Figure 12 : Influence de l'épaisseur de terre végétale sur le rendement 50
Figure 13 : Mise en place de drains sur le remblai 52
Figure 14 : Schéma d'un sol après la pratique de culture sur l'horizon minéral 55
Figure 15 : Détection de la limite de plasticité d'un sol 57
Figure 16 : Effet des conditions d'humidité et des engins sur le rendement 58
Figure 17 : Effet des conditions d'humidité ou des engins sur le rendement 58
Figure 18 : Schéma de mise en place du sol avec scraper et pelle 62
Figure 19 : Schéma de décapage avec dumpers et pelles 63
Figure 20 : Schéma de régalage avec pelle en rétro ou poussée 64
Figure 21 : Schéma de remise en place des terres avec chargeur 66
Figure 22 : Evolution des rendements au cours du temps sur deux parcelles 91
Figure 23 : Rendements en maïs en 1978 à St-Pierre-de-Chandieu 102
Figure 24 : Incidence sur le rendement en maïs de deux facteurs 102
Figure 25 : Exemple de bons rendements sur un bassin de décantation ressuyé 115

LISTE DES PLANCHES-PHOTOS

Planche 1 : Stock de terre végétale non ensemencé et envahi par des espèces adventices 27
Planche 2 : Influence des remontées de nappe sur la qualité du réaménagement 37
Planche 3 : Quadrillage pour remblai avec des inertes d'origine extérieure 41
Planche 4 : Zones de mouillères sur un réaménagement agricole 59
Planche 5 : Conséquences d'une mouillère agricole 59
Planche 6 : Mise en place de la terre végétale 61
Planche 7 : Exemple d'éléments indésirables apportés 77
Planche 8 : Des réalisations réussies 103
Planche 9 : Exemple d'un réaménagement agricole viticole de qualité 106
Planche 10 : Problèmes d'érosion sur des talus à pente trop forte 113
Planche 11 : Bassin de décantation encore en activité 114

INTRODUCTION

Dans les années 1970, face à la multiplication des ouvertures de carrières, la question de leur réaffectation s'est posée. Comme une partie importante des demandes d'extraction de granulats se situait en plaine alluviale agricole, l'idée de rendre ces espaces à leur vocation primitive, donc de remettre en état les sols, est apparue comme une possibilité intéressante.

Le but du réaménagement agricole d'une carrière est de restituer[1] à un exploitant agricole[2] un sol apte à produire, grâce à des pratiques agricoles[3] normales, des rendements satisfaisants. Il faut donc que le sol puisse être travaillé dans de bonnes conditions et qu'il assure l'installation des espèces végétales et leur croissance grâce à une potentialité suffisante de réserve hydrique et de fixation des éléments nutritifs.

La question de la faisabilité technique de tels réaménagements s'est donc posée. De 1974 à 1990, des expérimentations de réaménagement agricole après extraction ont été réalisées avec l'aide 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 montré que ce type de réaménagement était possible et que des rendements équivalents, voire supérieurs, à ceux sur sols en place pouvaient être obtenus sur des sols reconstitués avec précaution. 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 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[4], 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 calendrier de production...

---

1 De manière exceptionnelle, l'ouverture d'une carrière et son réaménagement peuvent fournir de nouvelles terres pour l'agriculture. Ainsi, à Sonnaz (73) et à la Motte-Servolex (73) des massifs boisés de 70 mètres de haut ont été arasés par l'exploitation d'un gisement et ont été transformés en partie en terres agricoles.

2 Celui qui exploitait auparavant le terrain ou un autre exploitant.

3 Analogues à celles utilisées ordinairement par les agriculteurs de la région.

4 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.

Ce document est une analyse synthétique des réaménagements agricoles des carrières de granulats 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 agricole 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, un entretien avec l'agriculteur exploitant la parcelle, 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°].

La remise en état de sols agricoles peut concerner aussi bien les carrières de roches massives que celles en roche meuble. Cependant, les expérimentations menées dans le cadre de la taxe parafiscale n'ont porté que sur des extractions de gisement meuble, soit au-dessous du niveau de la nappe phréatique, soit au-dessus du niveau de cette nappe.

Les expériences de réhabilitation agricole, financées par la taxe parafiscale sur les granulats, citées dans ce rapport sont les suivantes :
- Beauchamp, dans la Somme (1985) [TPG 4],
- Blagnac, en Haute Garonne (1985) [TPG 5],
- Caromb, dans le Vaucluse (1981) [TPG 6 a et b],
- Coudoulet (Orange), dans le Vaucluse (1985, 1988, 1992) [TPG 7 a à c],
- Couffouleux (St-Waast), dans le Tarn (1985) [TPG 8],
- Criquebœuf-sur-Seine, dans l'Eure (1981, 1985) [TPG 9 a et b],
- Crotenay, dans le Jura (1980-1983) [TPG 10],
- Cuiry-les-Chaudardes, dans l'Aisne (1978-1981) [TPG 11 a et b],
- Flavigny, en Meurthe-et-Moselle (1981-1982) [TPG 12 a et b],
- Goven, en Ile-et-Vilaine (1979) [TPG 13 a et b],
- Jargeau, dans le Loiret (1976-1977) [TPG 14 a et b],
- Juvigny, dans la Marne [TPG 15],
- Misy-sur-Yonne, dans l'Yonne (1979) [TPG 16],
- Passy, en Haute-Savoie (1982-1985) [TPG 17],
- la plaine de l'Ain (Ambronay et Ste-Julie) (1976-78) [TPG 18],

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.

- Pont-à-Mousson, en Moselle (1981-1984) [TPG 19],
- Rennes, en Ille-et-Vilaine (1981-1985) [TPG 20],
- Sierentz, dans le Haut-Rhin (1979-1980) [TPG 21 a à d],
- St-Georges-sur-Eure, en Eure-et-Loire (1984) [TPG 22 a à d],
- St-Pierre-de-Chandieu, dans le Rhône (1977-1980) [TPG 23 a à c],
- Thézan-les-Béziers, dans l'Hérault (1985) [TPG 24],
- Val-de-Loire (Sully-sur-Loire, Baule et Ile-Charlemagne) (1975-1978) [TPG 25].

• *Les sources d'information bibliographiques françaises et étrangères :*
Les articles et études consultés (106 documents analysés) sont issus d'une recherche bibliographique sur différentes bases de données[6]. La majorité de ceux-ci traitent du cas des carrières de roche meuble et très peu des carrières en roche massive avec front de taille. 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.

Les documents proviennent de :
- France : 32
- Grande-Bretagne : 21
- USA : 17
- Canada : 8
- Espagne : 7
- Europe : 7 (Allemagne, Italie, Pays-Bas et Irlande)
- Suisse : 5
- Australie : 5
- Autres pays : 4 (Haïti, Israël, Vénézuéla)

Leurs sujets se répartissent[7] de la manière suivante :
- le réaménagement de carrières : 46
- la réhabilitation de sols miniers : 21
- la revégétalisation d'espaces dégradés : 24
- l'utilisation d'amendements et de boues pour reconstituer un sol : 13
- la pédologie et la vie du sol : 9
- le stockage du sol : 7

La nature des documents analysés est la suivante :
- article scientifique : 66
- rapport d'étude ou rapport de synthèse : 23
- guide technique : 9
- texte réglementaire : 4
- plaquette d'organisme professionnel : 4

6 Agricola, Biological and agricultural index, Biosis previews, Cab abstracts, Enviroline, Geobase, Ntis, Pascal...
7 Le total est supérieur à 106 car certains documents relèvent de plusieurs rubriques.

La plupart des articles consultés mettent en évidence deux points :
- une exigence de qualité du réaménagement du sol d'autant plus grande que les potentialités agricoles du sol de départ étaient importantes (zones maraîchères ou horticoles en périphérie de grosses agglomérations) ;
- une nécessité de concevoir et de planifier soigneusement la remise en état des sols à la fois pour en diminuer les coûts, mais surtout pour en assurer la qualité.

• *Les visites de terrain :*
Les buts de cette phase de terrain étaient de :
- faire le bilan et l'analyse critique des pratiques de réaménagement et des expérimentations menées dans les années 1980 et 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 ;
- faire un bilan et l'analyse critique des pratiques actuelles et voir leurs conséquences sur la qualité du réaménagement ;
- relever les exemples positifs ou les problèmes rencontrés sur les parcelles par leurs utilisateurs actuels, en particulier par des photographies (cette phase de terrain a eu lieu en juin et juillet, les problèmes fréquents de mouillères ne sont visibles que par leur impact sur la végétation) ;
- faire la synthèse des cas rencontrés et proposer des améliorations aux pratiques actuelles.

Nous avons visité 12 carrières en réaménagement agricole[8] appartenant à 3 grandes régions (figure 1) :

– l'Ile-de-France :
Changis [A2 m], Chevrières [A3 m], Cuiry-les-Chaudardes [A5 m], Ecuelles [A6 M], Pécy [A9 M], St-Georges-sur-Eure [A11 m], Varennes [A12 m].
– la région PACA :
Coudoulet [A4 m].
– la région Rhône-Alpes :
Chambéon [A1 m], La Motte-Servolex [A7 Mo], Passy [A8 m], Sonnaz [A10 Mo].

Dans cet ouvrage, le code « m »signifie roche meuble, « Mo » moraine et « M » roche massive.

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

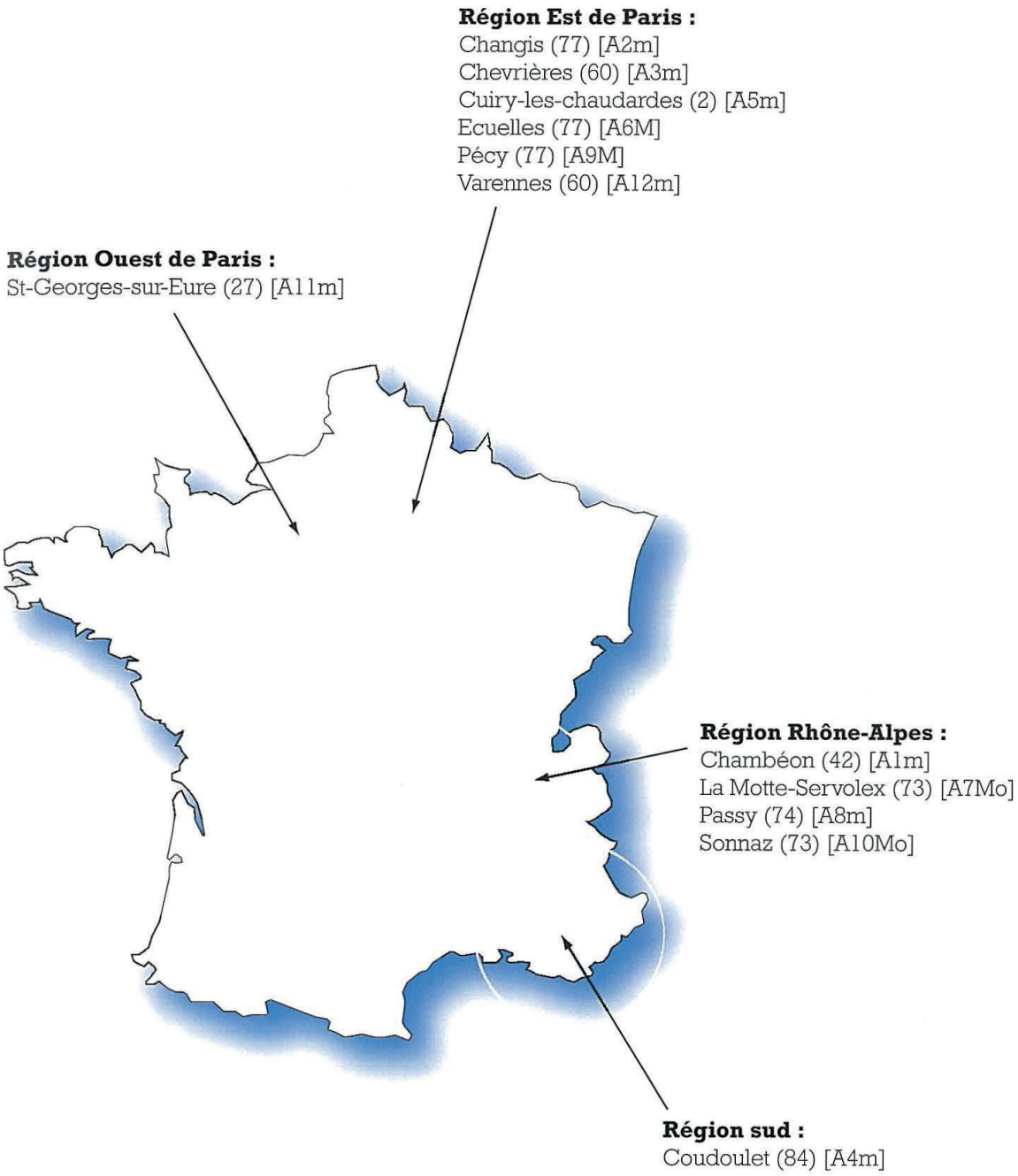


Figure 1 : Localisation des carrières à réaménagement agricole visitées pendant la phase de terrain.

CHAPITRE 1

PREPARATION DE LA REHABILITATION

I - PLANIFICATION DE LA REMISE EN ETAT, DECAPAGE ET STOCKAGE

Toutes les études bibliographiques soulignent le grand intérêt de la remise en état à l'avancement et l'importance fondamentale 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 et de ne pas créer de difficultés. Ainsi, l'exploitation doit se faire en respectant les pentes d'origine et en commençant en amont de l'écoulement de la nappe afin de conserver l'exutoire de l'ensemble de la carrière et éviter ainsi des stagnations d'eau dans la fosse (et donc des pompages pour réaménager).

Les recommandations anglaises [48, 49] préconisent une étape de concertation entre les différents intervenants (carrier, administration de l'agriculture et de l'industrie, agriculteur) et la constitution d'un dossier précis[9] pour préparer la réhabilitation.

Comme la plupart des études taxe parafiscale sont intervenues sur des sites en fin d'exploitation, la réflexion sur la planification des opérations préalables à la remise en état a été peu abordée[10].

Dans les exploitations actuelles visitées lors de la phase de terrain, un plan de phasage précis de l'exploitation, mais aussi du réaménagement, est fixé dans le dossier d'autorisation d'exploiter. Dans certaines situations [A1 m], nous avons remarqué qu'une trop grande rigidité dans le respect du plan de phasage peut nuire au réaménagement en particulier quand les transports de terre ont lieu de ce fait en période humide. Ce point sera développé dans le chapitre 2 - IV -1.

1 - PHASAGE DES OPÉRATIONS

Le réaménagement à l'avancement constitue toujours le meilleur choix [68]. Quand il est soigneusement planifié et réalisé [67], 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. Ceci nécessite une bonne coordination et un rythme d'avancement comparable des deux chantiers, mais aussi le respect de conditions suffisamment sèches pour les manipulations de terre (voir le paragraphe I - 3).

En Grande-Bretagne [67], un plan d'avancement de l'exploitation est proposé afin de pouvoir limiter les mouvements de terre (figure 2).

---

9 L'annexe 1 présente un résumé des recommandations anglaises.

10 Seules TPG 9, TPG 23 et TPG 21 ont fait l'objet d'un réaménagement à l'avancement.

Lors de la première phase :
- la terre végétale des trois premières parcelles est décapée sélectivement et stockée 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 (voir le paragraphe I - 3) ;
- le gisement des parcelles 1 et 2 est exploité.

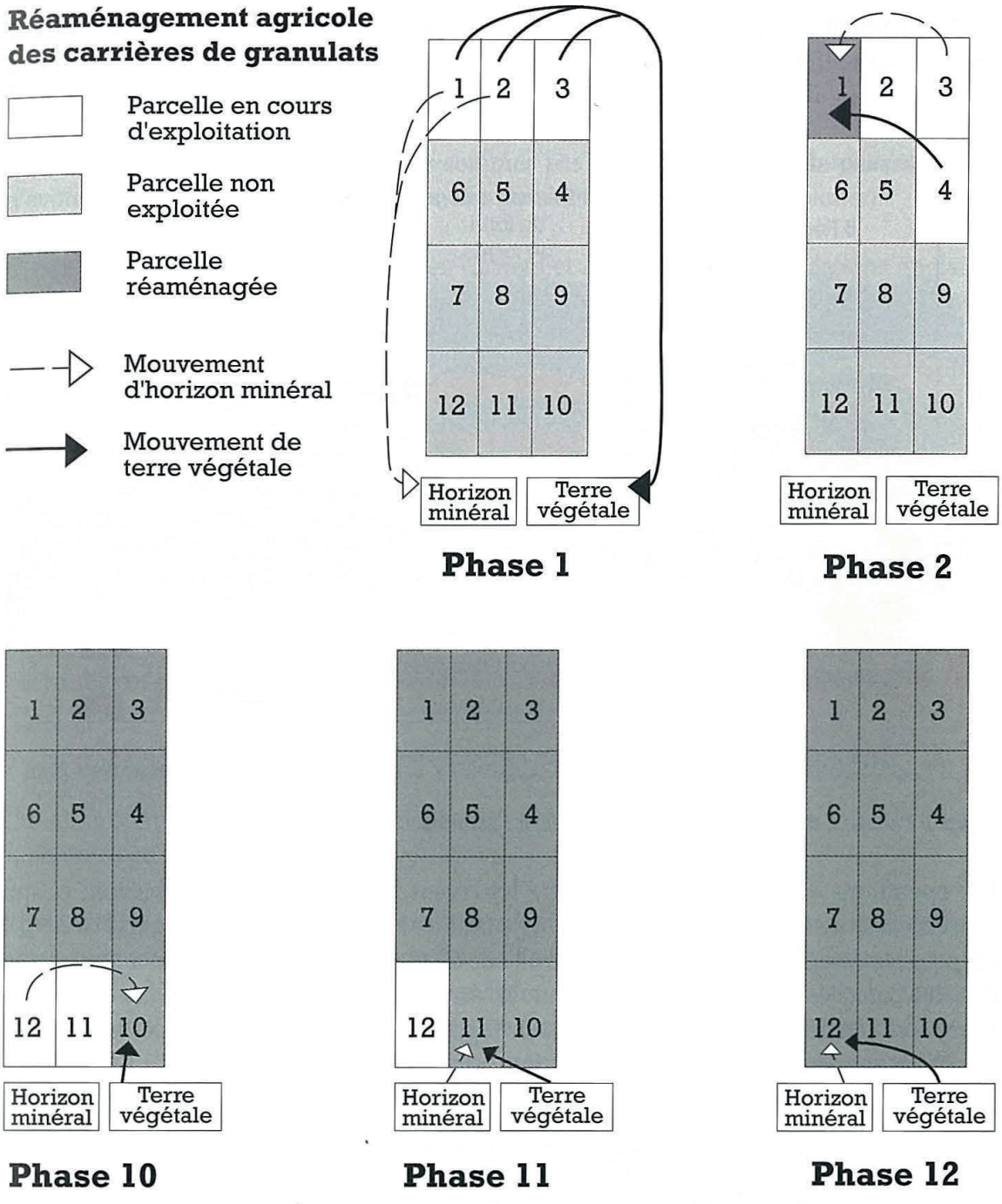
Lors de la deuxième phase :
- la parcelle 1 est à réaménager ;
- l'horizon minéral de la parcelle 3 est alors décapé et mis directement en place sur le fond de fouille nivelé de la parcelle 1 ;
- la parcelle 4 est alors décapée de sa terre végétale qui est mise en place directement sur le niveau d'horizon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

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 la terre végétale. 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 [100] où les terres décapées de la première parcelle sont stockées quelques années avant de servir au réaménagement d'une parcelle intermédiaire (par exemple, parcelle 7 de la figure 2). 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.

La terre décapée de la première parcelle peut également servir à constituer un merlon anti-poussière et anti-bruit le long de l'exploitation [100] avec une mise en végétation rapide et soigneuse (couverture de graminées et de légumineuses et plantation d'arbres).



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 2 : Planification d'une exploitation pour limiter les mouvements de sol.

Le déroulement schématique idéal d'un réaménagement agricole à l'avancée peut ainsi être représenté (figure 3).

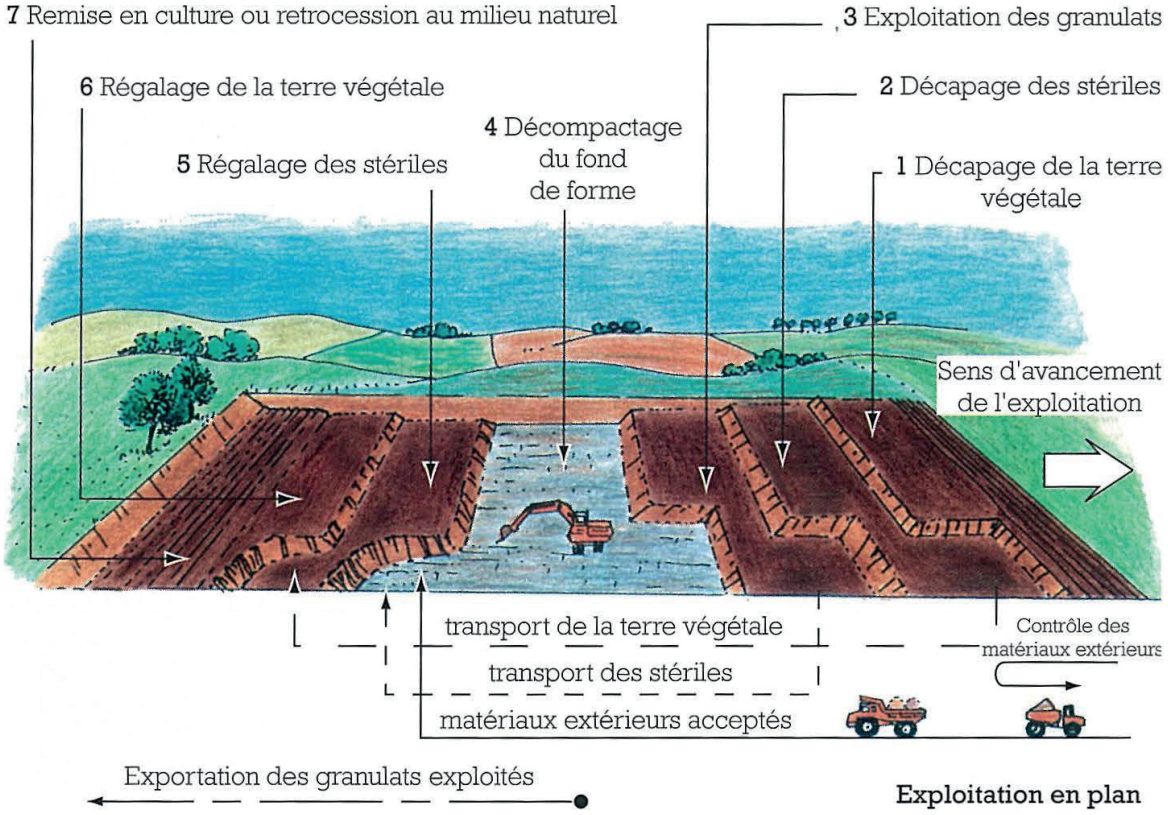


Figure 3 : Schéma d'un réaménagement agricole à l'avancée.

Les opérations coordonnées doivent être les moins contraignantes possibles en ce qui concerne les circulations de véhicules. Afin de faciliter les manœuvres des engins [TPG 9], 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 4). 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.

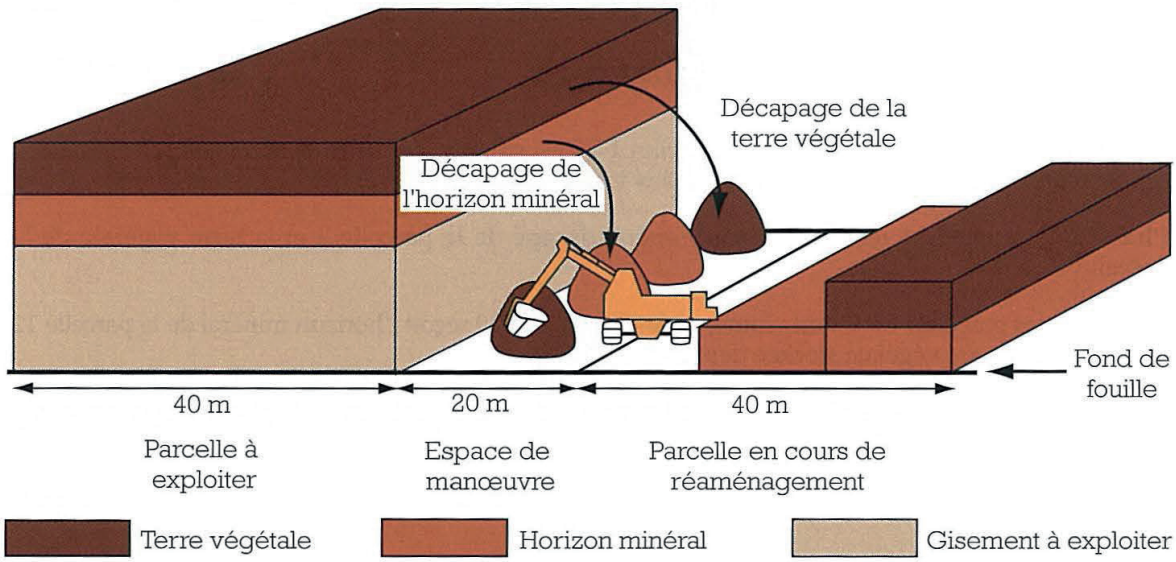


Figure 4 : Schéma de décapage pour faciliter les manœuvres.

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).

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 [48, 49], 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, de pouvoir modifier après une nouvelle concertation le plan de réaménagement. En particulier, le respect strict d'un plan de phasage peut pousser à manipuler de la terre en condition humide.

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.

2 - DÉCAPAGE SÉLECTIF DE LA TERRE VÉGÉTALE ET DE L'HORIZON MINÉRAL

Un sol à bonnes capacités agronomiques est constitué de trois grandes couches (figure 5, vision « agronomique ») :

- la terre végétale ou horizon humifère[11] ou organique, qui constitue la principale zone de prospection des racines et donc de nutrition et l'alimentation en eau de la plante,
- l'horizon minéral[12], qui est également une réserve en eau et en nutriments pour la plante mais dont la prospection est moins importante (seules les plantes à enracinement profond, racine pivot, l'exploitent). Cependant des remontées capillaires peuvent permettre de réhumidifier l'horizon humifère à partir des réserves de l'horizon minéral,
- le sous-sol, qui n'est pas utilisé par la plante.

Ces dénominations reflètent la vision agronomique d'un sol basée sur les potentialités des plantes à prospecter le sol. Le carrier, lui a une interprétation et un vocabulaire différents qui traduisent son utilisation du sol (figure 5, 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).

Dans la majorité des documents étudiés, la parcelle à décaper est considérée dans son intégralité. Seules les recommandations anglaises [48, 49] demandent une cartographie

11 Horizon A des pédologues.
12 Horizon B ou S des pédologues.

précise des sols et préconisent un décapage et un stockage unité de sol par unité de sol. En effet, la réglementation anglaise classe tous les sols agricoles et exige qu'après reconstitution, le sol soit classé comme à l'origine.

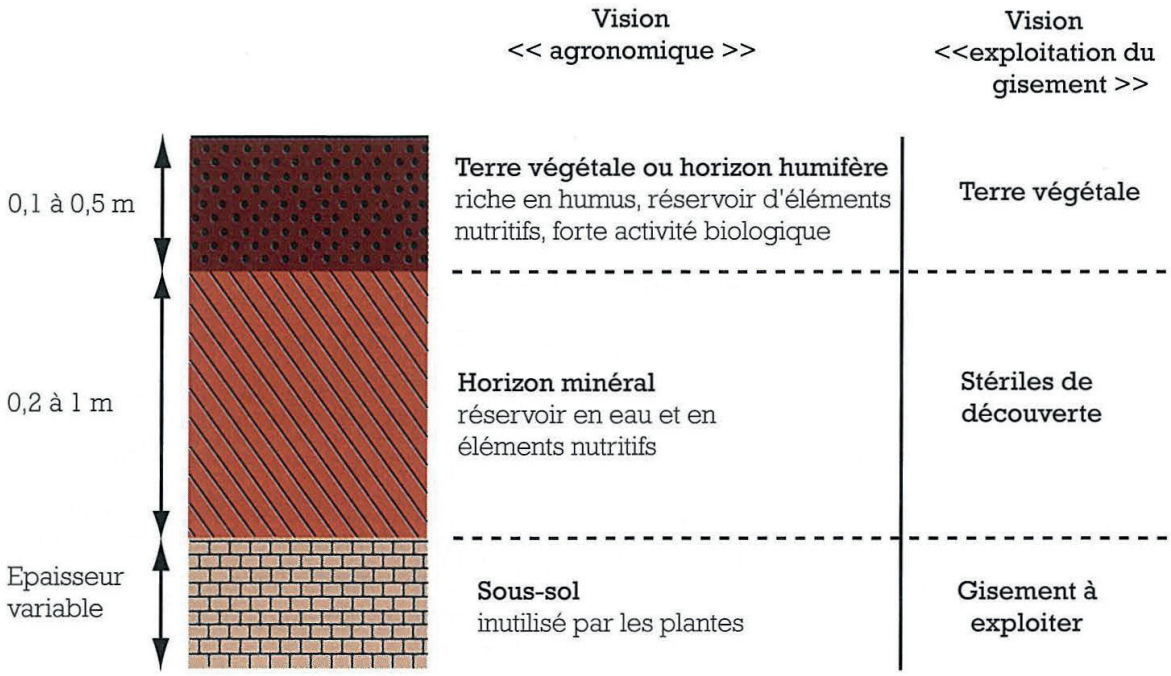


Figure 5 : Schéma d'un profil de sol : vision « agronomique « et « exploitation du gisement «.

Afin de reconstituer un sol de bonne qualité, il est nécessaire de respecter les couches le constituant et donc de décaper sélectivement la couche de terre végétale et la couche de stériles. Il est techniquement possible de décaper sélectivement une couche de terre qui a au minimum 0,20 m d'épaisseur.

L'horizon humifère constitue en général une première couche d'environ 0,10 à 0,50 m (0,30 m [TPG 21] et [TPG 23]).

Cependant, les gisements sont parfois dans des contextes géologiques tels que les épaisseurs de terre végétale sont faibles (0,05 m [TPG 17]). Dans ce cas, l'horizon humifère est trop fin pour pouvoir être décapé seul, il est alors prélevé avec les stériles de découverte et un apport extérieur de terre végétale devra être trouvé ou alors le sol décapé non sélectivement devra être amélioré par des amendements organiques (chapitre 3).

Dans les carrières visitées, le décapage sélectif est souvent pratiqué par des engins spécifiques, c'est-à-dire à la pelle mécanique sur chenille à godet lisse [A3 m] ou au scraper [A2 m]. Quelques sites ont été réaménagés avec un bouteur ou au bulldozer [A1 m, A11 m] dont la lame pousse la terre, ce qui peut créer des compactions (d'autant plus fortes que la terre est humide et que la distance de transport dépasse les quelques mètres), ces engins sont donc déconseillés (chapitre 2 - IV - 3). L'utilisation de chenilles larges permet de diminuer la pression au sol des bulldozers modernes et donc de minimiser les compactions liées au poids des engins

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 est obligé 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 lors de réaménagements au scraper réalisés en conditions pluvieuses [A2 m] (chapitre 2 - IV - 3).

Des différences existent entre les exploitations qui réalisent le décapage avec leur propre matériel et ceux qui sous-traitent [A4 m, A6 M, A7 mo, A8 m, A10 m] ou font appel à une équipe spécialisée du groupe carrier [A9 M]. Elles concernent la nature des engins (matériel 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 [A9 M]. Ceci souligne l'importance de la communication « qualité » et de la formation du personnel. La bibliographie anglaise [48, 49] 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 2 - IV - 1).

Le décapage sélectif est indispensable à la reconstitution d'un sol de bonne qualité. Il doit permettre de prélever d'une part l'horizon humifère (terre végétale) qui constitue l'horizon le plus fertile d'un sol agricole et d'autre part, l'horizon minéral (stériles de découverte) qui constitue principalement la réserve en eau du sol.

Le décapage doit avoir lieu avec des engins n'exercant pas une trop grande pression au sol et ne compactant pas le sol. La pelle mécanique sur chenille est à préférer au scraper. Il est conseillé d'utiliser des chenilles larges afin de diminuer la pression au sol. Les bouteurs ou bulldozer qui poussent le sol sont fortement déconseillés. Les conditions d'humidité du sol sont un facteur primordial pour pouvoir le manipuler sans dégâts (voir le chapitre 2-IV-1).

3 - STOCKAGE SÉLECTIF DE LA TERRE VÉGÉTALE ET DE L'HORIZON MINÉRAL

a) LES EFFETS DU STOCKAGE

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

Les éléments qui suivent sont issus d'une étude de synthèse [100] 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 [84, 100] :
- 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 (destruction 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[13]. 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.

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[14], mais le sol retrouve sa qualité biologique en quelques années si les pratiques culturales appliquées après la remise en état sont adaptées (pas de labour pendant les deux premières années et fertilisation faible pour ne pas nuire 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 [84]. Dans des sols réhabilités, pendant les trois 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.

---

13 Et éventuellement par la dilution de la terre végétale par de l'horizon minéral quand le décapage n'a pas été bien réalisé.
14 Le détail figure en annexe 1.

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.

b) LES CONDITIONS OPTIMALES DE STOCKAGE

Les dépôts de terre sont à installer sur un sol propre, décapé et nivelé. Afin de limiter les altérations, en Suisse [50] on 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'incorporer des drains dans ce gravier[15] (figure 6).

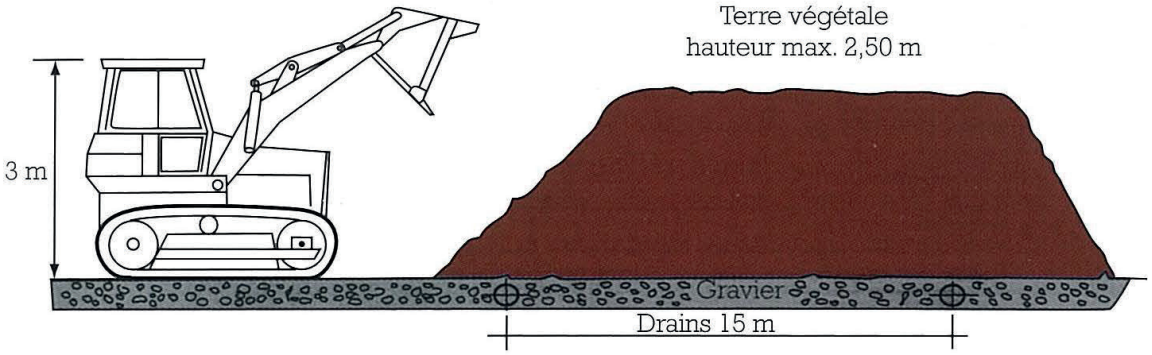


Figure 6 : Préparation d'un site de stockage sur un sol imperméable (d'après [50]).

Les conditions de stockage doivent privilégier le maintien d'une vie biologique du sol [100], et donc les tas doivent être larges et peu élevés pour maintenir au maximum l'aération du sol.

Pour des stockages d'une durée supérieure à 9 mois [50], 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 [50], la hauteur peut être supérieure.

La hauteur du dépôt doit être constituée en une seule fois sans rouler sur le dépôt [50].
En Suisse [50], le sommet du dépôt de longue durée devra avoir une pente de 5% pour éviter les stagnations d'eau de pluie (figure 7).

L'institut agricole de l'état de Fribourg [50] 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

15 Avec une pente qui permette l'évacuation vers un exutoire de l'eau collectée dans le drain.

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.

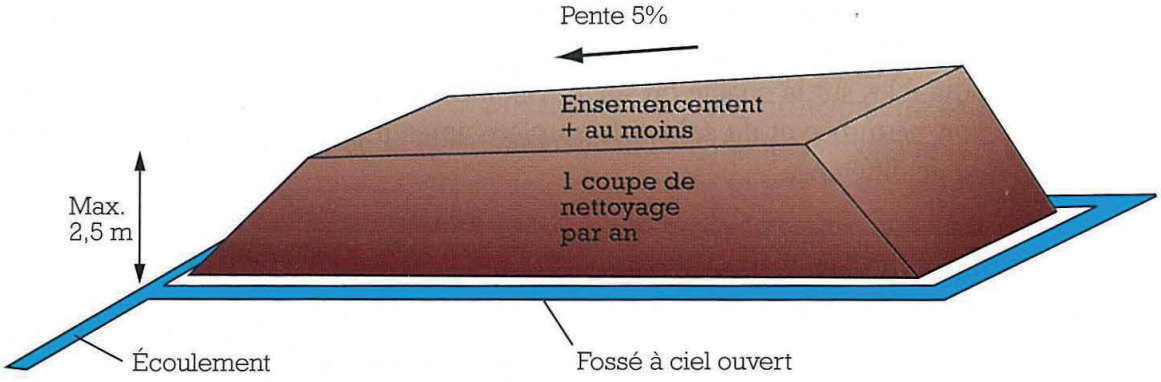


Figure 7 : Schéma d'un stock de terre végétale (d'après [50]).

Les durées de stockage peuvent aller jusqu'à 2 à 3 ans sans nuire au réaménagement ultérieur si celui-ci est fait en condition sèche et si les pratiques culturales, telles le labour, sont absentes pendant 2 ans [100].

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 [A2 m]), les exemples récents montrent que les pratiques actuelles sont plutôt le zéro stockage. Ceci parfois de manière caricaturale, car il vaudrait mieux stocker la terre, dans de bonnes conditions, quelques mois, 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 [A6 M] 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, c'est souvent sous forme de merlons [A1 m] pour isoler l'exploitation d'une voie d'accès et limiter la pollution (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 [A3 m, A10 m] Mais quand l'ensemencement des merlons n'est pas pratiqué, il s'y développe une flore adventice (parfois importante, [A1 m, A2 m]) qui amène lors de la remise en culture, un stock semencier important aux parcelles et donc des problèmes de désherbage des cultures que déplorent les agriculteurs.

La pratique de l'ensemencement des stockages (stockage de 2 ans [A3 m] avec semis de ray-grass et fétuque), mais surtout des merlons, doit être développée.

[A1 m] *Photo Cemagref Delory I.*
PLANCHE 1 – Stock de terre végétale non ensemencée et envahie par des espèces adventices.

Le stock de terre végétale n'a pas été ensemencé. Il est envahi par des espèces adventices (principalement des composées telles le séneçon et l'érigeron). Ces espèces produisent une grande quantité de graines qui germeront sur la parcelle réaménagée quand le stock y sera régalé.

Un ensemencement dès le stock constitué, avec des graminées et de la luzerne, permet d'éviter l'installation de ces espèces indésirables.

L'horizon humifère (terre végétale) et l'horizon minéral (stériles de découverte) doivent être stockés séparément.

Le stockage provoque des modifications physiques et chimiques dans les sols en tas 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 la terre végétale, 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.

II - FORME ET TOPOGRAPHIE DE LA PARCELLE REAMENAGEE

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 forme et la largeur de la parcelle[16] doivent être compatibles avec la taille des machines agricoles utilisées par l'agriculteur (rampes d'épandage ou d'irrigation, moissonneuses...) ;
- l'accès à la parcelle décaissée doit être facile pour les différents engins agricoles ;
- le nivellement de la rampe d'accès à la parcelle doit être étudié pour éviter qu'elle ne guide les écoulements d'eaux pluviales dans la parcelle ;
- pendant la poursuite de l'exploitation sur les parcelles adjacentes, la position topographique de la parcelle par rapport au sol resté en place, mais aussi par rapport à la bordure de l'exploitation du gisement encore active, doit permettre le travail en toute sécurité pour l'agriculteur ;
- les conditions de microclimat (éviter les stagnations d'air froid) et de drainage du terrain doivent être analysées.

1 - FORME ET ACCESSIBILITÉ DE LA PARCELLE

Ainsi, pour les deux premiers points, à Sierentz [TPG 21], les expérimentateurs soulignent la difficulté de récolte en 1979 dans des parcelles réaménagées en raison :
- de la difficulté d'accès de la parcelle pour une grosse moissonneuse-batteuse (la parcelle est en dénivellation de 7 m par rapport à la plaine alluviale) ;
- de l'impossibilité de récolter le bord de la parcelle côté exploitation, à cause du risque de glissement de terrain (remblai de 3,65 m par rapport à la gravière en exploitation) ;
- de la forme peu rationnelle d'une des parcelles ;
- de la difficulté à faire tourner la moissonneuse-batteuse en début et en fin de parcelle.

Dans d'autres études [TPG 14[17], TPG 17], la multiplication des facteurs étudiés (épaisseur de sol, amendement, engrais ...) a conduit à la mise en place de véritables protocoles d'essais agronomiques sur de toutes petites surfaces qui n'ont pas été entretenues et récoltées de manière classique mais par récolte manuelle ou avec des engins spécifiques. Ces expérimentations n'ont pas donné lieu à une réflexion sur la facilité ou la difficulté de récolte standardisée.

Lors des visites de terrain, certains de ces points ont été soulevés, en particulier celui de la nécessité de définir au préalable, par une concertation entre carrier et agriculteur, le plan des parcelles. En effet, les dimensions et formes des parcelles seront plus ou moins pratiques [A2 m] selon le matériel utilisé par l'agriculteur. Ainsi, une parcelle de 50 m de large est peu compatible avec un appareil d'épandage[18] d'une largeur de 28 m (problème de demi-tour sur la parcelle et de surdosage[19] d'une bande de terrain) (figure 8).

16 Et donc au préalable, la forme et la superficie de la carrière doivent être compatibles avec le réaménagement agricole.
17 Par exemple, 7 m x 4 m à Jargeau.
18 Cependant, la modernisation des outils d'épandage facilite la souplesse des largeurs.
19 Des inconvénients similaires peuvent survenir suite à un surdosage de fertilisant ou de phytosanitaire (brûlure du feuillage, mortalité...).

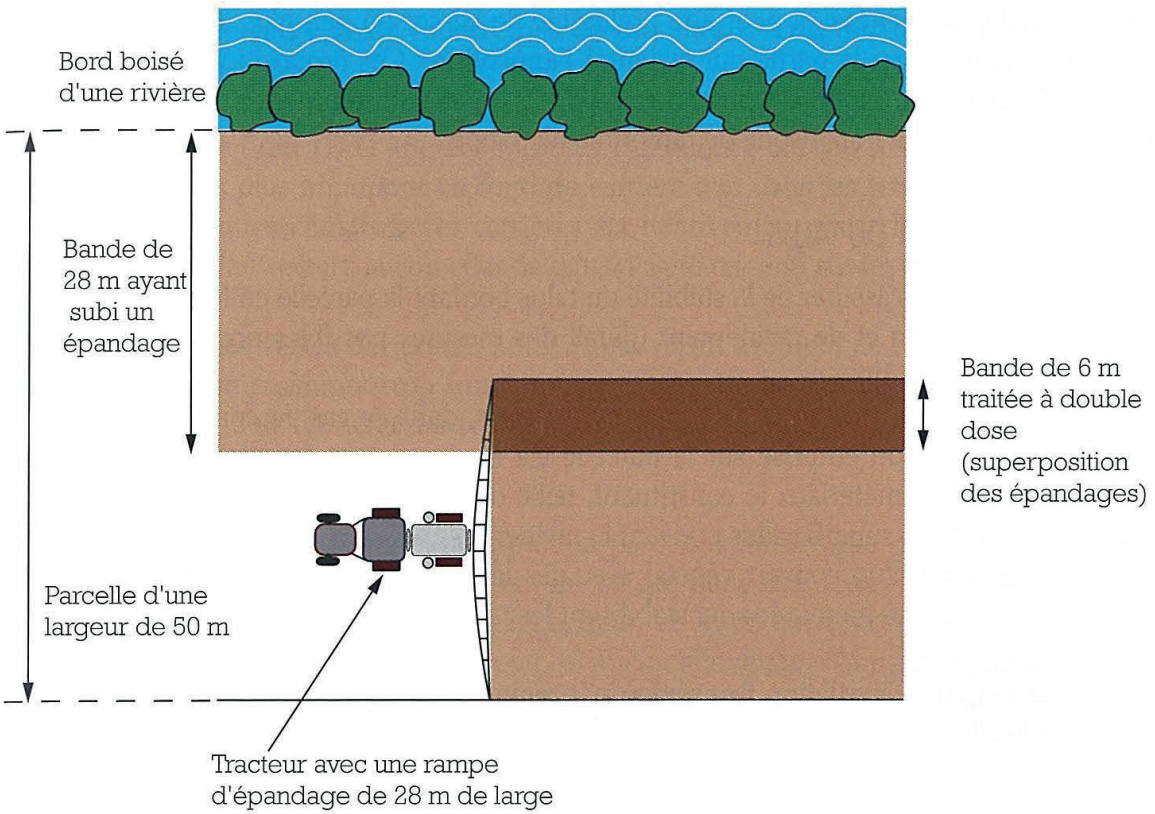


Figure 8 : Parcelle dont la largeur est incompatible avec la largeur d'une rampe d'épandage.

Par ailleurs, l'exiguïté de la parcelle a conduit, parfois, à des compactages de zones de la parcelle ayant servi de bande de roulement pour les camions apportant l'horizon minéral et la terre végétale lors du réaménagement [A1 m, A5 m].

2 - DIMINUTION DE LA SURFACE AGRICOLE

Dans le cas d'une exploitation en alluvionnaire en fosse, la surface rendue à l'agriculture sera inférieure à celle d'origine quand le remblaiement n'est pas complet et qu'un décaissé persiste. La surface occupée par les talus ne sera pas utilisable par l'agriculteur, il existe donc un compromis à négocier entre l'agriculteur et le carrier entre la pente des talus acceptable et le pourcentage de surface agricole utile rendue. Outre la solution du remblai total ou du décaissé entouré de talus, certaines parcelles réaménagées ont été nivelées en pente douce pour à la fois supprimer le décaissé et ne pas avoir un volume trop important à remblayer [A5 m, A9 M].

Les entretiens menés auprès d'agriculteurs lors de la phase de terrain [A3 m, A6 M] ont montré que certains préfèrent une réduction de la surface agricole, pourvu que la partie qui leur est rendue soit de bonne qualité plutôt que rendre une surface identique à celle de départ mais de qualité médiocre.

En Grande-Bretagne [48, 49], il est parfois prévu une partie de la remise en état en eau afin d'avoir suffisamment de stériles et de terre végétale pour réaménager correctement le reste

de la parcelle. En général, il peut être préférable de laisser un peu plus de surface en eau pour mieux aménager la partie qui revient à l'agriculture. Ces propositions sont faites en particulier quand la nappe est proche et qu'il n'y a pas suffisamment de matériaux pour mettre la terre arable hors risque de remontée de nappe.

3 - AMÉNAGEMENT DU TALUS

Il est nécessaire de s'assurer de la stabilité du talus bordant la parcelle en fosse et de limiter les risques d'érosion et de ravinement (détail des mesures possibles pour la stabilisation des talus en annexe 2) :
- par une pente pas trop forte (30° maximum) mais, dans ce cas, le compromis entre la pente du talus et son emprise sur la parcelle est à négocier en fonction des conditions locales (nature des matériaux le constituant, taille de la parcelle à réaménager, trajets des écoulements d'eaux superficielles pouvant le raviner...),
- par l'installation d'un couvert végétal avec des légumineuses qui améliorent la fertilité azotée des sols et des graminées qui stabilisent les talus.

En Suisse [94], une législation fixe région par région, la liste des espèces locales à utiliser en végétalisation des talus.

Au Canada [75, 78], les pentes des talus doivent être comprises entre 26° et 18°. Une pente de 26° est considérée comme la pente maximum pour une stabilité à long terme et 18° comme la pente maximum pour ne pas avoir d'érosion. Ces valeurs de pente paraissent très faibles et font perdre une place considérable de surface agricole. En France, les pentes sont généralement de 45°.

Parfois des fossés drainants sont creusés au pied du talus [TPG 9].

Quand les chemins d'accès conduisent les eaux d'orage et provoquent des ravinements ou l'inondation de la parcelle [TPG 24], ils doivent être rectifiés par des réhaussements (de l'ordre de 0,15 à 0,20 m) et des remodelages permettant d'éviter les entrées d'eau de ruissellement.

Pour des parcelles en décaissé que nous avons visitées, certaines rampes d'accès ne sont pas pratiques [A2 m, A8 m] et ont parfois nécessité la création a posteriori d'un autre chemin d'accès [A8 m].

4 - MICROCLIMAT

Un risque de coulée et de stagnation d'air froid est possible quand la fosse réaménagée se trouve au point bas d'une pente ou d'un vallon. Cependant, cette donnée bibliographique n'a pas été vérifiée ni dans les études taxe parafiscale sur les granulats ni dans les visites de terrain, peut-être parce que pour la plupart des exploitations en plaine alluviale, le terrain est rarement sur des pentes.

Ainsi, à Jargeau [TPG 14], la parcelle est réaménagée en fosse de 5 m de dénivelé par rapport à la plaine avec un talus de pente de 40 à 50°. Un suivi des amplitudes

thermiques a été réalisé et ne montre pas de modification du microclimat par rapport aux parcelles adjacentes.

Dans la plaine de l'Ain [TPG 18], des mesures climatiques ont fait ressortir que le risque de gel n'était pas plus important en fond de carrière que dans les terrains environnants. Au contraire, le microclimat de ces carrières est relativement plus chaud que les zones environnantes. D'autre part, aucun effet de talus n'a été ressenti sur les cultures.

Par contre, lors des visites de terrain, nous avons vu un exemple de talus planté [A8 m] qui a induit un microclimat trop froid sur une partie de la parcelle du fait de la zone d'ombre qu'il produit (la neige tarde à fondre au pied du talus et des brûlures dues au froid ont eu lieu sur de l'orge).

La forme, la surface et la topographie de la parcelle réaménagée doivent permettre d'obtenir un réaménagement optimal. En ce qui concerne l'accès et la facilité de circulation des différents engins de l'agriculteur, et en ce qui concerne l'épaisseur de terre. Ainsi, laisser un plan d'eau permet de mieux réaménager la partie agricole (avec plus de remblai disponible).

CHAPITRE 2

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 à qualité agronomique correcte, 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 plantes ;
- 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 humifère[20] ou « terre végétale » (topsoil en anglais),
- l'horizon minéral[21] ou stériles (subsoil en anglais),
- éventuellement une couche de remblais en sous-couche (overburden en anglais).

Cette mise en place doit se faire sans compaction ni destruction du sol. En effet, la compaction du sol a plusieurs effets [48, 49] :
- 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 ;
- elle diminue la zone de prospection par les racines et donc les capacités de nutrition minérale et hydrique des plantes.

La dégradation de la structure du sol augmente les risques d'érosion, de constitution d'une croûte de battance et de compaction ultérieure lors des passages de tracteur et lors du travail du sol. Elle ne permet pas une stabilité suffisante du lit de semences pour assurer la germination correcte des plantes.

En Grande-Bretagne [48, 49], 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 agricole fait l'objet d'un classement en classe d'aptitude agricole 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[22].

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 9).

---

20 Il s'agit de l'horizon A du sol.
21 Il s'agit de l'horizon B ou S du sol.
22 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.

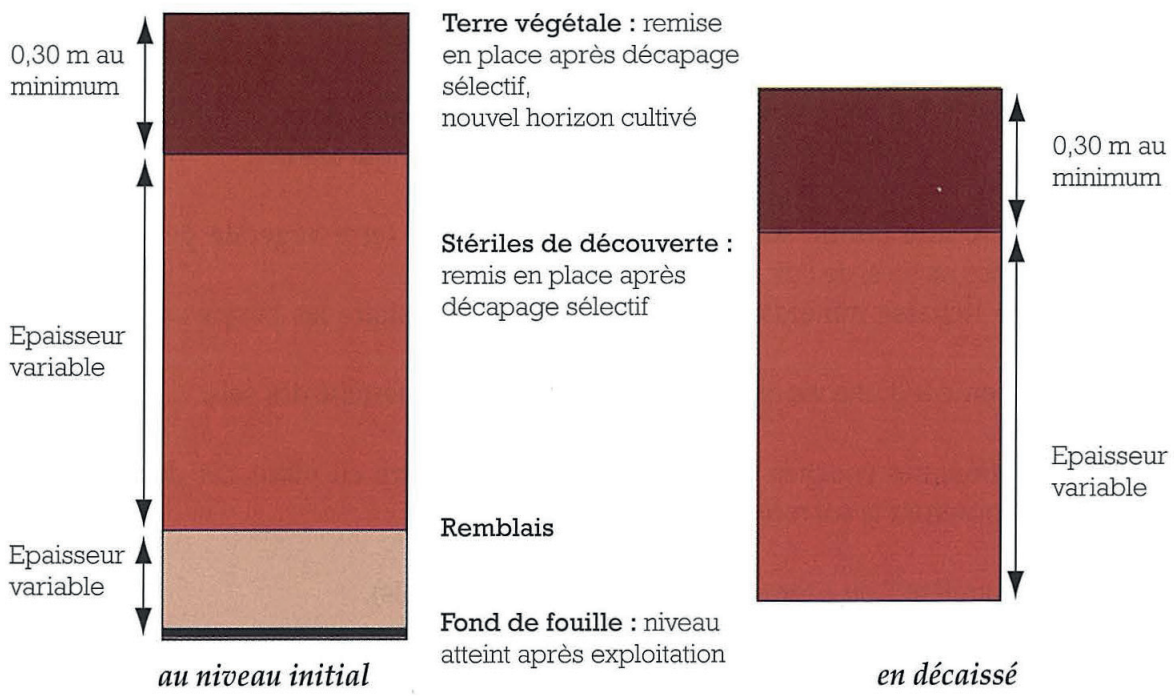


Figure 9 : Schéma d'un profil de sol reconstitué.

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 extraits 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 (stériles de traitement) disponibles ou de remblais extérieurs à mettre éventuellement en place ;
- les quantités de matériaux de décapage stockés (terre végétale et stériles de découverte).

Un premier choix intervient dans la position topographique de la parcelle qui sera rendue à l'agriculteur :
- au niveau initial,
- en décaissé.

Ce choix est technique, car si l'exploitation du gisement s'est faite sur plusieurs mètres, il sera difficile de combler totalement l'excavation. Mais c'est aussi un choix concerté entre le carrier et l'agriculteur afin de trouver la solution technique qui convienne aux deux partenaires. Ainsi, la création d'un bassin réservoir pour l'irrigation peut, en limitant la surface agricole à reconstituer, permettre de mettre une parcelle à niveau [A1 m]. La perte de surface agricole est ainsi compensée par la facilité d'irrigation qui peut être un atout non négligeable dans certaines régions. Un tel bassin peut également servir d'exutoire à un réseau de drainage de la parcelle.

Le principal facteur de détermination du niveau de reconstitution du sol est lié aux risques d'engorgement des terrains liés à une remontée de la nappe phréatique, qui nuiraient à la

fois aux cultures et aux sols remis en place (tassement) et qui limiteraient les possibilités d'intervention dans les parcelles.

Par conséquent, la mise hors d'eau de la terre arable (terre végétale 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 France, le niveau du réaménagement est évalué par rapport à la cote de crue décennale de la nappe phréatique. Le bilan des expériences taxe parafiscale menées montre que, dans tous les cas, la base de la couche de terre arable doit être au-dessus de cette cote, sinon il y a des engorgements trop importants du sol.

PLANCHE 2 – Influence des remontées de nappe sur la qualité du réaménagement.

A5 m] *Photo Cemagref Delory I.*

Avant l'exploitation du gisement, la topographie de la parcelle était en pente vers la rivière.

L'exploitation du gisement a été faite à la même cote partout et le réaménageur a produit une topographie plane avec 1,50 m de stériles et 0,30 m de terre végétale. L'épaisseur de remblai sur la basse terrasse est insuffisante pour éviter les remontées des eaux de la rivière : 8 jours après de fortes pluies, l'eau de la rivière arrive dans la parcelle par infiltration. Même si le débit de la rivière diminue progressivement, l'eau stagne et asphyxie les cultures.

Le second plan de cette photo correspond à la zone de basse terrasse où le blé ne s'est pas développé suffisamment pour avoir été récolté.

Ainsi, le manque de hauteur et de drainage de la parcelle réaménagée en basse terrasse entraîne des différences de pratiques culturales et de croissance des végétaux considérables sur une même parcelle.

Au Canada [78] et en Angleterre [84], la surface du sol réaménagé doit être à 1 m au-dessus du niveau de la nappe phréatique[23]. En France, la surface du sol est souvent située au moins à 0,50 m au-dessus du niveau décennal des crues de la nappe (valeur retenue pour la plupart des sites réaménagés : [TPG 11, TPG 14, TPG 18, TPG 20]).

A Jargeau [TPG 14], l'absence d'étude piézométrique a empêché le calcul du niveau décennal de remontée de la nappe, une estimation a été faite avec une marge de sécurité de 0,50 m, qui n'a cependant pas été suffisante car, en juin 1977, une partie de la parcelle a été submergée. Ceci met bien en évidence la nécessité de mettre en place des suivis de la hauteur de la nappe pendant la période d'exploitation afin de déterminer de la manière la plus précise possible, les fluctuations du niveau de la nappe phréatique.

Les autres niveaux découleront du choix du niveau du sol reconstitué et des disponibilités en matériaux.

La détermination du niveau de reconstitution du sol doit se baser sur une étude la plus précise possible des fluctuations de la nappe phréatique afin d'assurer la mise hors d'eau des parcelles. La surface du sol doit se trouver entre 0,50 et 1 m au-dessus du niveau décennal des crues de la nappe.

2 - NIVELLEMENT 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.

Si le fond de fouille est bosselé, une mise à planéité est nécessaire. En effet, les bosses sont aplanies pour diminuer les risques de mélange des différents horizons et les risques de casse de matériel agricole. Cependant, si les stériles sont épais, les bosses peuvent être nivelées par la découverte. Les creux sont comblés pour diminuer les risques de mouillères.

La création d'une pente régulière permet d'assurer le drainage profond. En Suisse [50], une pente de 4 % est respectée pour l'écoulement des eaux, en Angleterre [84], on estime qu'il faut une pente de 2 à 5 %. Aux USA [19], la pente idéale est de 3 % et en Espagne [54] de 10 %. Les valeurs retenues en France dans les expérimentations taxe parafiscale sont plus faibles : 0,5 % à Passy et St-Pierre-de-Chandieu [TPG 17, TPG 23], 1 % à Flavigny [TPG 12], et 2 % à Rennes [TPG 20] et des drains sont placés à la base des parcelles. La pente peut être double, à la fois dans la largeur et dans la longueur de la parcelle en fonction des caractéristiques topographiques et hydrologiques du terrain : 1 % dans un sens, 0,5% dans l'autre, Crotenay [TPG 10].

Ces deux étapes (planéité et création de la pente) sont réalisées par un défonçage ou un sous-solage au trax ou au ripper [TPG 10, TPG 12, TPG 17]. Ceci permet de décompacter le

23 Nous n'avons pas de précision quant au niveau de risque retenu pour la nappe (crue décennale ou autre).

fond de fouille afin d'améliorer le drainage et l'infiltration des eaux mais aussi la pénétration des racines. La plate-forme est ensuite modelée au chargeur en fonction des cotes définies par l'étude d'impact pour la création de la pente souhaitée. Les cotes sont matérialisées sur le terrain par un quadrillage de piquets mis en place par un géomètre et indiquant le niveau à atteindre en chaque point.

En Espagne [54], la technique de décompaction est adaptée au tassement du sol : scarification, sous-solage ou rippage. En cas d'horizons imperméables, le rippage doit être profond (0,70 - 0,90 m). En Grande-Bretagne [69], des sous-soleuses à dents à ailettes sont recommandées plutôt qu'à dents simples afin d'obtenir une décompaction plus homogène de l'entre-dent. Un premier passage à faible profondeur est préconisé, puis un passage profond afin d'obtenir la meilleure décompaction (voir annexe 3).

Le nivellement du fond de fouille permet de supprimer les bosses et les creux, sources respectivement de risque de casse de matériel agricole et de mouillères et de décompacter le sol. Fréquemment, il permet la mise en place d'une pente (entre 0,5 et 3 %) assurant le drainage profond.

3 - DRAINAGE DU FOND DE FOUILLE

Pour améliorer les conditions de drainage, le nivellement peut être réalisé en ados (Flavigny, [TPG 12]), avec alternativement des pentes de 1 % orientées de droite à gauche, puis de gauche à droite (figure 10).

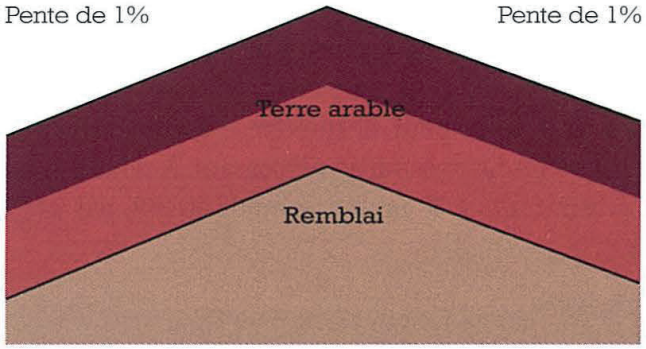


Figure 10 : Schéma d'un nivellement en ados.

Cependant, les conclusions de l'étude de Flavigny indiquent que, comme le remblai est perméable, bien ameubli par rippage, l'infiltration des eaux de pluie se fait verticalement jusqu'à la nappe phréatique et les pentes pour le drainage sont inutiles.

Des systèmes de drainage complexes ont parfois été mis en place (Crotenay [TPG 10] ou Flavigny [TPG 12]), avec une succession d'ados (pente 0,5 à 1 % suivant la disponibilité en remblais), avec une pente globale de 1 à 2,5 %. Ces successions de toits sont raccordées par des galeries drainantes de 0,30 m de profondeur, remplies de galets et de graviers, Crotenay [TPG 10] (Figure 11).

De même, les mouillères sont purgées avec des drains comblés de matériaux très grossiers. A St-Pierre-de-Chandieu [TPG 23], des mouillères ont été assainies avec des puits perdus.

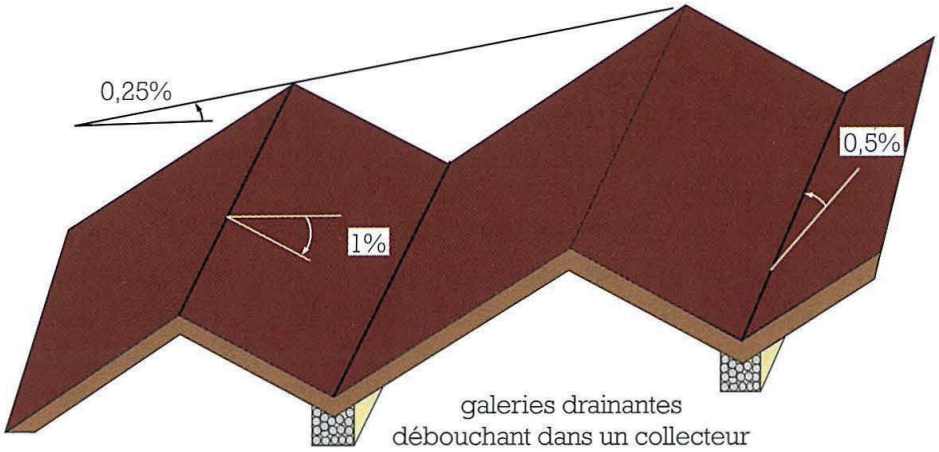


Figure 11 : Schéma d'un drainage en ados raccordés par des galeries drainantes.

Il est parfois utile, quand le sous-sol a été compacté et rendu imperméable, de drainer et de prévoir un bassin de rétention d'eau qui sera utile pour l'agriculture. Ainsi, à St-Georges-sur-Eure, [TPG 22], un bassin permet à la fois de récupérer les eaux de drainage en minimisant les longueurs de drains à installer et sert, l'été, de réserve d'eau d'irrigation. Cette étude précise qu'un bassin de 80 000 m^3 permet à la fois le drainage et l'irrigation de 30 ha de maïs.

En cas de perméabilité faible du soubassement, il est recommandé de disposer une couche filtrante de 0,10 à 0,15 m de graviers ou de matériau perméable à la surface du fond de fouille. Ceci permet d'éviter un horizon d'engorgement dû à une différence forte de perméabilité entre deux matériaux si le terrain réaménagé est proche du substratum.

Le drainage du fond de fouille peut permettre d'éviter des engorgements du sol de la parcelle dans des conditions particulièrement à risque (compaction connue, imperméabilité du substratum...). Il est à raisonner au cas par cas avec un expert en hydraulique agricole.

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 (par exemple, déblais de route à Rennes [TPG 20]), ou des déchets inertes issus de chantiers de démolition (par exemple, briques, tuiles, pierre...) ;
- des matériaux de reconstitution de l'horizon minéral[24] : stériles d'exploitation, terres décapées en vrac provenant de terrassements extérieurs ;
- de la terre végétale : horizon humifère de décapage ou terre végétale décapée sélectivement dans un chantier de terrassement extérieur ;

24 En Suisse [97], cette couche est dénommée couche intermédiaire.

- 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 GROSSIERS 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, de produits chimiques...).

Ce n'est pas le cas dans tous les pays. Ainsi, en Grande-Bretagne, des ordures ménagères sont utilisées [68, 69]. Quand elles sont déposées directement, la fermentation provoque des dégagements de gaz (méthane et dioxyde de carbone) qui peuvent nuire aux cultures. Actuellement, les carrières remblayées avec des ordures doivent être à plus de 250 m des habitations, le fond de fouille doit être rendu étanche et des systèmes de captage des gaz doivent être installés (ce qui permet leur utilisation pour produire de l'énergie).

* *LES MATÉRIAUX INERTES D'ORIGINE EXTÉRIEURE*

Dans certains cas, l'autorisation d'exploiter peut permettre l'utilisation de matériaux externes à l'exploitation. Ces matériaux proviennent de chantiers aux environs de la carrière, ils sont souvent produits par des entrepreneurs clients de l'exploitation.

Parfois des autorisations plus spécifiques ont été accordées (sables de fonderie : [A11 m]).

PLANCHE 3 . Quadrillage pour remblai avec des inertes d'origine extérieure.

[A3 m] *Photo Cemagref Delory I.*

La réglementation impose le suivi des remblais inertes provenant de l'extérieur.
Le quadrillage de la parcelle à remblayer permet l'enregistrement du dépôt de remblai, camion par camion.

La mise en place de remblais inertes provenant de l'extérieur de l'exploitation est l'un des points les plus sujets à controverse dans le domaine du réaménagement agricole des carrières de granulats. Dans le passé, peu d'apports étaient contrôlés ou uniquement de manière visuelle au passage des camions à la bascule. Les camions arrivant de l'extérieur bennaient directement leur chargement dans l'excavation[25]. Plusieurs agriculteurs ([A1 m], [A8 m]) ont mentionné des phénomènes de remontée de gros blocs contenant des ferrailles ou de câbles métalliques ce qui pose des problèmes de sécurité lors de façons culturales et d'usure du matériel de labour. Cependant, de nombreux sites ([A9 M], [A11 m], [A12 m]) ont utilisé des remblais sans que cela pose de problèmes.

Actuellement, la majorité des carrières qui acceptent des remblais pratiquent ou vont mettre en place une procédure de contrôle précis des réceptions ([A1 m], [A3 m], [A5 m], [A6 M]). Ceci impose une forte motivation et une implication du personnel de l'exploitation.

** 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 à terre 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 (Beauchamp, [TPG 4]). Cette étude portait essentiellement sur les risques de pollution de la nappe phréatique, car les terres 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.

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

D'autres excavations d'exploitation de granulats [A3 m ; A13 m] proches d'une sucrerie pratiquent le remblaiement par boues de lavage de betteraves. Ces boues permettent donc

25 Ce qui pouvait alimenter les craintes du déchet dangereux ou interdit caché sous un haut de chargement correct et les idées que de la « bonne terre est gaspillée pour remblayer au fond du trou alors qu'il en manque au-dessus ».

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) [A3 m], 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). Une fois ces deux paramètres connus (quantité et qualité), il est possible d'estimer la quantité de l'horizon minéral et de terre végétale qui seront régalés et leur qualité agronomique. Si la quantité ou la qualité sont insuffisantes, différents moyens correctifs ou palliatifs existent (chapitre 3).

Les directives suisses [50] précisent que les limons très argileux ainsi que les débris de construction de routes et de démolition d'immeubles ne peuvent pas être employés.

Le sol reconstitué [84] 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.

Aux USA [73], des essais ont été menés avec trois types de matériaux, l'un avec 50 % d'argile (forte rétention en eau), l'autre avec 29 % d'argile et le dernier, plus sableux, avec 13 % d'argile (basse rétention en eau). Il s'est avéré que les cultures fourragères ont mieux réussi sur le substrat le plus sableux, tandis que le blé d'été a préféré le substrat le plus argileux (sur un sol de 1,20 m au maximum). Par conséquent, les propriétés texturales du sol seront à adapter aux cultures envisagées.

La densité du sol [84] joue un rôle très important sur la distribution des racines, ce qui a des conséquences sur les rendements. A partir de 1,2 g/cm^3 de densité du sol, il commence

à y avoir affaiblissement de la distribution racinaire, les racines ne pénètrent plus les sols argileux à densité supérieure à 1,46 g/cm^3 et les sols sableux à densité supérieure à 1,75 g/cm^3. La compaction du sol par les engins augmente la densité du sol, surtout sur des sols déjà sensibles.

* *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 [A2 m], 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 la qualité agronomique du sol. Une concertation avec l'agriculteur peut permettre de décider de réaménager en coordonné avec modification du sol (donc des pratiques antérieures de l'agriculteur) ou de stocker le sol de la parcelle et de ne la réaménager qu'en fin d'exploitation pour y remettre le sol d'origine.

* *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 végétaux, 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.

Ces matériaux de faible valeur agronomique présentent pourtant 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 (à Passy [TPG 17], 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) ;
- les boues alcalines permettent d'apporter du calcium dans des milieux qui en sont dépourvus (chaulage gratuit comme à St-Pierre-de-Chandieu, [TPG 23]) ;
- 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.

Dans plusieurs cas, des fines de décantation ont été utilisées mélangées ou non à des stériles d'exploitation. Des expérimentations [TPG 10, TPG 17, TPG 18, TPG 20, TPG 23] avaient montré l'intérêt de ces fines en particulier pour augmenter la réserve utile et donc les rendements des cultures surtout en année sèche.

Les fines peuvent être utilisées à trois niveaux :
- incorporées aux stériles de découverte : après régalage, incorporation par des passages croisés au trax 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 [TPG 20] ;
- 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 [TPG 17] ;
- en reconstitution de sol, mais, dans ce cas, 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 [34] 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.

Ainsi, l'incorporation des fines au sous-sol augmente la productivité de façon relativement importante [TPG 10, TPG 17, TPG 18, TPG 20, TPG 23] 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. Dans la plaine de l'Ain [TPG 18], ces propriétés des fines ne sont valables que si celles-ci ont une granulométrie très fine. En effet, les fines ont des propriétés variables selon leur granulométrie, qui peut aller de limono-sableuse à limono-argileuse selon les lieux.

A Rennes [TPG 20], les fines sont plus productives que les stériles (même additionnés de compost) car elles ont une meilleure fertilité hydrique. 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 [TPG 17]). 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 hydriques, comme à Rennes [TPG20]. D'autre part, il faut veiller à manipuler ces matériaux quand ils sont bien ressuyés afin de ne pas les tasser.

Sur les sols reconstitués uniquement avec des fines, il faut dans un premier temps établir une prairie temporaire qui va couvrir rapidement le sol. Les racines des graminées et

des légumineuses vont réduire les risques de battance et améliorer le sol par leur action structurante et enrichissante en azote et matières organiques. Il est également recommandé de faucher afin de limiter les accidents culturaux.

Dans les études taxe parafiscale 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 a permis [A8 m] 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. En effet, sur cette parcelle [A8 m] constituée de la réunion de tous les blocs d'essais[26], l'agriculteur cultive dans la plaine de Passy du maïs avec une bonne réussite alors que cette culture n'est pas pratiquée ailleurs dans la plaine. Cependant, les réaménagements postérieurs [A8 m] n'ont pas été de la même qualité. Des matériaux inertes et des fines ont été apportés, mais sans adjonction de matière organique. La structure du sol était mauvaise, formant une semelle dense au labour et devenant compacte en cas de sécheresse ou d'humidité trop forte. Un apport important de fumier a permis d'améliorer un peu cette structure. Actuellement la parcelle donne des rendements en orge satisfaisants pour la région (50 q/ha).

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 agricole du bassin de décantation lui-même (chapitre 6, paragraphe II).

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) LA TERRE VÉGÉTALE

Elle 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 de terre végétale pour assurer une épaisseur suffisante, elle peut provenir de chantiers extérieurs dans la mesure où le décapage a été fait de manière sélective. Dans

26 L'expérimentation avait été menée sous forme de tous petits blocs, qui ont été depuis, homogénéisés par les pratiques.

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. Certaines espèces (l'orge en particulier) peuvent avoir la sortie des pousses gênée par un sol trop argileux.

L'exemple à Jargeau [TPG 14], de réaménagement avec des sols à mauvaises potentialités agricoles (un sol très argileux et très peu humifère et un sol alluvionnaire très sableux) a montré que les sols à texture grossière sont préférables (surtout pour les cultures maraîchères : pomme de terre et échalote) aux sols argileux.

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. De tels sols gênent également les travaux agricoles et en particulier la fauche.

Dans certains cas extrêmes où il n'existe pas (ou plus) de terre végétale, il est possible de constituer un horizon organique. Ainsi, à Rennes [TPG 20], des stériles mélangés à des fines de décantation et à du compost ont donné de bons résultats.

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

Le choix raisonné des matériaux de reconstitution de l'horizon minéral doit permettre de recréer un sol de bonne qualité agronomique, voire d'améliorer le sol originel. En effet, ces matériaux doivent être choisis pour leur complémentarité et leur intérêt : stériles pour apporter un volume de substrat suffisamment drainant, fines de décantation pour améliorer la rétention en eau.

La terre végétale provient dans la majorité des cas de l'exploitation (stockée ou provenant du réaménagement à l'avancée d'une autre parcelle).

2 - EPAISSEUR DE MATÉRIAUX

** Les matériaux grossiers*

L'épaisseur des remblais à mettre en place est conditionnée par le niveau à atteindre au-dessus de la nappe et par la topographie que l'on souhaite restituer. Elle est calculée en fonction des épaisseurs fixées pour les horizons supérieurs (horizon minéral et terre végétale). Ainsi, en Suisse [50], les fosses sont comblées par du remblai jusqu'à 1 à 1,5 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.

Les matériaux les plus grossiers doivent toujours être disposés en fond de fouille et les plus fins au dessus.

Si la perméabilité du remblai est insuffisante, les directives suisses [50] imposent la mise en place, à son sommet, d'une couche de 0,10 à 0,15 m de graviers ou de matériau perméable.

* *L'HORIZON MINÉRAL*

Selon les pays, les préconisations relatives aux épaisseurs minimales d'horizon minéral à mettre en place varient :
- de 0,70 à 1,1 m en Suisse [50] ;
- au minimum 0,5 m en France [15] ;
- 0,80 m aux USA [19] ;
- 0,90 m d'horizon minéral en Angleterre [84].

Dans les réaménagements étudiés (rapports taxe parafiscale), les épaisseurs de terre arable[27] mises en place varient : 0,20 m [TPG 10], expérimentation avec 0,30 m et 0,50 m uniquement de stériles [TPG 14], 0,60 m [TPG 12, TPG 18], 0,70 m [TPG 23], 1 m [TPG 21].

Dans les sites visités, l'épaisseur de l'horizon minéral mis en place est comprise entre 0,60 et 1,50 m, voire parfois 2 m.

L'épaisseur de l'horizon minéral est dans certains cas très importante dès que le climat soumet les végétaux à un déficit hydrique. En effet, c'est principalement cette couche du sol qui assure une bonne réserve hydrique.

L'épaisseur de l'horizon minéral à mettre en place dépendra du type d'utilisation du sol prévu, de la topographie du site et aussi de la nature de la couche de remblai ou de substrat en place dessous.

Ainsi, aux USA [73], des essais ont été menés sur blé d'été, avec 0,20 m de couche humifère en faisant varier un certain nombre de critères. Une épaisseur de 1 m d'horizon minéral semble être le minimum admissible, mais sur un versant nord, cette épaisseur peut être moins importante (0,60 - 0,70 m). 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. Les plantations de plantes fourragères montrent également de meilleurs résultats sur versant nord par rapport au sommet de pente ou à un versant sud, surtout si le sol est peu argileux (peu de réserve utile). Dans ces conditions climatiques, il est donc possible de mettre en place un sol un peu moins épais[28] s'il y a une pente de surface.

---

27 La plupart des dossiers taxe parafiscale (BDPA) ne distinguent pas les épaisseurs d'horizon minéral et de terre végétale, ils donnent uniquement l'épaisseur de terre arable (entre le sommet du remblai et la surface du sol). Ils n'utilisent donc pas le terme terre arable au sens des agronomes pour qui elle désigne la couche labourable soit de 0,5 à 0,7 m de profondeur.

28 Donc une couche d'horizon minéral plus fine.

Sur fond de granulats en place, les épaisseurs suivantes d'horizon minéral et de terre végétale (l'ensemble de ces deux couches sera désigné sous le nom de terre dans la suite du paragraphe) sont recommandées dans les différentes études taxe parafiscale sur les granulats, selon les cultures :
- orge, blé : 0,40 à 0,60 m,
- maïs : 0,40 à 0,60 m,
- échalote, poireau : 0,50 à 0,60 m,
- céleri, pomme de terre : 0,50 à 0,60 m,
- arboriculture : 0,70 m.

L'influence de cette épaisseur de terre sur les rendements est plus forte pour les cultures à enracinement profond ou à forts besoins en eau, car elle conditionne la résistance des plantes à la sécheresse.

Des essais menés à Jargeau [TPG 14] sur des épaisseurs de terre décapée non sélectivement de 0,30 et 0,50 m ont montré que ces variations d'épaisseur n'avaient que peu d'influence sur la croissance des plantes à enracinement superficiel (orge), mais que l'effet se faisait sentir sur le maïs à enracinement plus important.

Les essais de Passy [TPG 17] ont démontré que des sols reconstitués[29] de 0,45 m d'épaisseur (au lieu de 0,30 m sur les terrains agricoles avoisinants) étaient un des facteurs permettant une meilleure production sur la zone réhabilitée que sur les terrains agricoles en place autour. Actuellement, la parcelle issue de ces essais [A8 m] avec une couche de terre arable de 0,45 m et une bonne réserve utile due à l'utilisation de fines de décantation, permet la culture du maïs alors que celle-ci n'est pas pratiquée dans le reste de la plaine alluviale.

Les épaisseurs de terre remises en place doivent être plus importantes après un remblai par des matériaux tout-venant qu'après une remise en état sur soubassement de gisement resté en place. Ceci est dû à la faible perméabilité souvent constatée du remblai et à la pratique de labours profonds qui exigent l'absence d'éléments de grande taille dans la couche labourée (sinon, risque d'endommager le matériel ou de provoquer des accidents). Pour les mêmes raisons de sécurité, si le substrat est une roche dure, le sol doit être plus profond. Ainsi, si le substrat est un remblai ou une roche dure, il est recommandé d'augmenter l'épaisseur de 0,10 ou 0,20 m.

Plus l'épaisseur de terre est importante [86], plus le réaménagement a des chances de succès du point de vue de la production agricole et de la facilité des pratiques culturales. Cependant, des expérimentations menées au nord-ouest du Colorado [86] avec un suivi pendant 10 ans montrent l'absence de différence significative de la productivité d'une prairie sur des sols plus ou moins profonds (de 0,20 à 0,60 m).

* *LA TERRE VÉGÉTALE*
L'épaisseur de terre végétale minimale conseillée varie peu selon les pays : 0,15 m à 0,20 m aux USA [19], 0,30 m en Angleterre [84], 0,30 à 0,40 m en Suisse [50].

---

29 Mélange selon les cas de stériles, fines de décantation et de compost à des doses variables selon les plots d'expérimentation.

En France, les chiffres annoncés dans les dossiers de réaménagement sont au minimum de 0,30 m. Dans la réalité, il semble que parfois cette épaisseur ne soit pas respectée sur la totalité de la parcelle par manque de terre végétale disponible. Le début de la parcelle réaménagée comprend bien les 0,30 m prévus, mais au fur et à mesure de la diminution de la terre disponible, l'épaisseur diminue. Ainsi, beaucoup d'agriculteurs mentionnent des inégalités de rendement au sein d'une parcelle liée à l'hétérogénéité de la couche de terre végétale régalée [A2 m, A6 M]. Ils signalent également une pierrosité trop importante de la couche de terre labourable qui occasionne des difficultés culturales et des dégradations d'outils (socs de charrue ou lame de fauche).

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 et des agriculteurs préféreraient une parcelle plus petite qu'à l'origine, mais avec la même épaisseur de terre plutôt que la même surface avec moins de terre végétale [A1 m, A2 m, A6 M]. En outre, la terre qui a été manipulée présente souvent un phénomène de foisonnement qui la rend moins dense, mais après le dépôt, elle se tassera. Il faut donc avoir prévu ce tassement ultérieur et mettre en place une épaisseur de terre supérieure à celle attendue au final [TPG 22], de l'ordre de 10 %.

L'épaisseur de terre végétale mise en place influe beaucoup sur les rendements, une forte épaisseur de terre végétale permet d'obtenir des rendements supérieurs aux sols restés en place à plus faible épaisseur (figure 12 : [A2 m]).

	Parcelle de basse terrasse (0,70 m de terre végétale)	Parcelle de haute terrasse (0,30 m de terre végétale)	Parcelle témoin entre la haute et la basse terrasse
Maïs	90 q/ha	30 q/ha	65 q/ha
Tournesol	30 q/ha	20 q/ha	40 q/ha

Figure 12 : Influence de l'épaisseur de terre végétale sur le rendement.

Les épaisseurs de matériaux à mettre en place dépendent du niveau à atteindre au-dessus de la nappe phréatique. Les matériaux grossiers de comblement doivent permettre de mettre hors d'eau l'horizon minéral (au moins 0,5 m au-dessus du niveau des crues décennales de la nappe).

L'horizon minéral doit avoir au moins 0,5 m d'épaisseur. Il conditionne fortement la réserve en eau des sols donc le bon comportement de la parcelle en année sèche et peut être la raison de productivité meilleure de sols réaménagés que de sols en place.

L'épaisseur de terre végétale est directement liée à la productivité de la parcelle, plus l'épaisseur est importante, meilleurs seront les rendements. Un minimum de 0,30 m d'épaisseur finale de terre végétale partout sur la parcelle doit être respecté.

III - MISE EN PLACE ET ASSAINISSEMENT DES MATERIAUX DE COMBLEMENT

A - LES MATERIAUX GROSSIERS

1 - MISE EN PLACE DES MATÉRIAUX DE COMBLEMENT

Après le rippage du fond de fouille décrit au paragraphe I et son nivellement aux pentes voulues, un comblement avec des remblais peut être effectué. Eventuellement, une couche drainante aura été mise en place (voir paragraphe I - 3).

Les plus gros éléments des matériaux inertes apportés seront situés dans les niveaux inférieurs [TPG 21]. 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 [50].

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 [50]).

Il convient de s'assurer que la perméabilité du remblai mis en place est correcte. Les préconisations suisses [50] recommandent d'incorporer dans le remblai des dispositifs d'infiltration : au fur et à mesure que le remblai monte, il s'agit de disposer à certains endroits une « colonne » de graviers (figure 13).

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 terre végétale). Il est même préférable [TPG 22] que le remblai puisse se stabiliser pendant un hiver avant la remise en état du sol dessus. En effet, selon la taille des matériaux inertes mis en place, il peut se produire des tassements qui pourraient donner lieu à la création de cuvettes et donc de zones de stagnation d'eau. Sur le terrain, de tels affaissements ont été vus sans que leur cause puisse être précisée (tassement du remblai ou compactage de l'horizon minéral ou de la terre végétale).

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. Les pentes des ados varient de 1 % [TPG 12] à 5 % [50], elles suivent généralement ce qui a été fait pour le nivellement du fond de fouille. Il y aura donc des profils de remblais à pente régulière (dans une ou deux dimensions de la parcelle) ou des successions de toits.

La mise en place des matériaux grossiers de comblement doit se faire en fonction de leur granulométrie, les plus grossiers au fond, les plus fins au-dessus afin d'assurer les meilleures conditions de drainage. Une période de stabilisation du remblai est conseillée avant poursuite du réaménagement afin de permettre les tassements. La mise en forme du toit du remblai améliore le drainage.

3 - LE DRAINAGE

La question du drainage est importante car, sur le terrain, elle est souvent l'objet d'une divergence de vues entre le carrier et l'agriculteur. En effet, il arrive que le carrier propose de réaliser un drainage qui lui semble être la solution à d'éventuels compactages ou remontées de nappe. Il a du mal à comprendre le refus de l'agriculteur, qui, connaissant mieux son terrain, sait que le drainage par des drains mis en terre ne sera pas efficace (nappe trop haute qui empêche l'écoulement et l'évacuation de l'eau ou terre trop compactée) mais qu'un modelé en bosse - bien que moins coûteux - sera plus adapté à sa parcelle [A1 m, A2 m, A4 m].

En effet, tous les sols agricoles 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) ;
- que l'évacuation hors des drains puisse se faire, c'est-à-dire que les drains soient au-dessus de 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).

Dans la pratique, si dans un secteur proche de la carrière et souffrant d'excès d'eau à certaines périodes de l'année, le drainage n'est pas réalisé, c'est qu'il a de fortes contre-indications techniques.

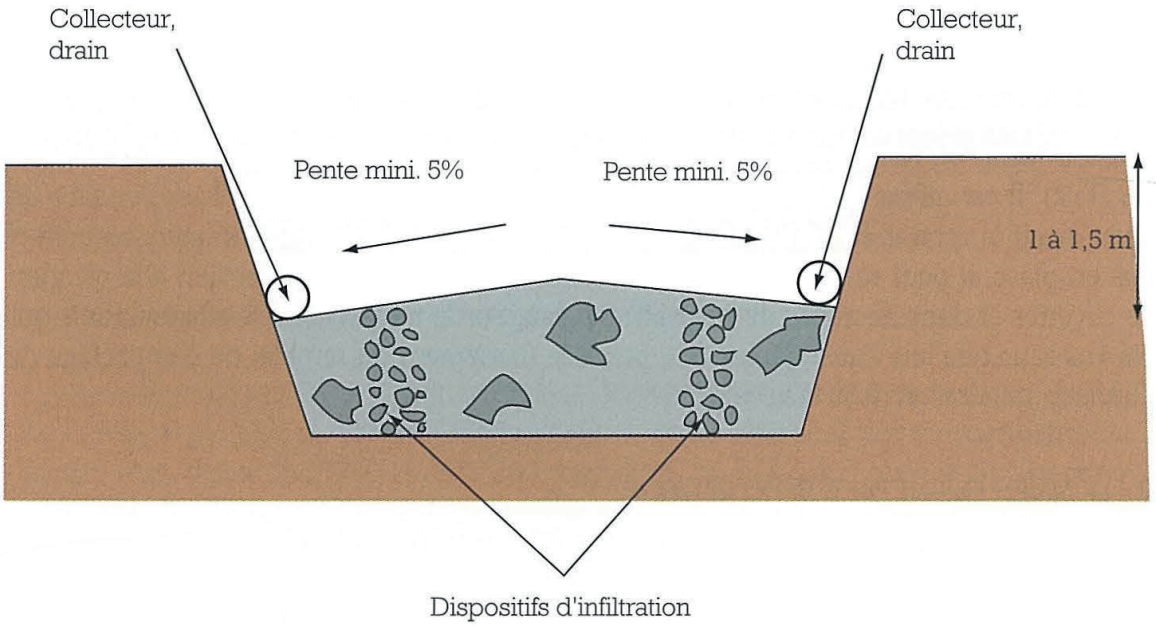


Figure 13 : Mise en place de drains sur le remblai (d'après [50]).

Quand le drainage est techniquement possible, différentes solutions sont envisageables :
- disposer une couche filtrante de graviers à la surface du remblai si celui-ci n'est pas jugé très perméable. Ceci permet d'éviter un horizon d'engorgement dû à une différence forte de perméabilité entre deux matériaux. En effet, si une discontinuité hydrique existe entre deux matériaux à forte différence de perméabilité, il peut y avoir création d'horizon engorgé lors des périodes humides ;

- modeler le fond de fouille et le remblai avec une pente ou des ados pour évacuer l'eau vers l'extérieur de la parcelle et mettre des drains en bordure de la parcelle (figure 13).
- En Grande-Bretagne [48, 49], il n'y a pas de mise en place de drains au cours de la reconstitution du sol, mais le drainage doit être établi le plus vite possible après la restitution des parcelles. Une décompaction du sol est éventuellement nécessaire pour que le drainage soit efficace.

Concevoir un drainage efficace d'une parcelle est une réflexion complexe qui mérite d'y associer l'agriculteur et un expert en hydraulique agricole.

B - LES MATERIAUX DE RECONSTITUTION DE L'HORIZON MINERAL

Les conditions de mise en place de ces 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.

1- MISE EN PLACE DES MATÉRIAUX DE RECONSTITUTION DE L'HORIZON MINÉRAL

L'utilisation d'engins à basse pression et la manipulation des matériaux en conditions sèches sont indispensables à la qualité du réaménagement (voir paragraphe IV - 1).

Une fois le fond de fouille nivelé et drainé, le régalage de l'horizon minéral se fait au godet du chargeur, à la pelle mécanique ou au bouteur à chenilles (bulldozer), en bandes, l'engin 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, un chargeur ou un bulldozer situé latéralement, travaillant en pousse ou en rétro. La pelle peut aussi travailler en reculant sur la bande en cours d'aménagement, par balayage (Jargeau [TPG 14]. Aucun engin sur pneus ne doit circuler sur la surface rippée ou sur la sous-couche afin de ne pas la tasser (exemple de cette mauvaise pratique à St-Pierre-de Chandieu [TPG 23]). Il faut également éviter le scraper qui compacte. Cependant, si des tassements devaient être constatés sur la couche d'horizon minéral, il est possible de la scarifier avant le régalage de la terre végétale. A Flavigny [TPG 12], l'horizon minéral a été régalé au bouteur marais, mais des labours ont été nécessaires afin de décompacter le sol par la suite.

Afin de pratiquer un travail optimum, il est bon de mener le rippage et le régalage de façon conjointe, par bandes (figure 18 du paragraphe IV - 2) :
- 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 de mouillères, il est nécessaire de pratiquer un nivellement correct de la surface de l'horizon minéral en respectant la pente du toit du remblai (Criqueboeuf-sur-Seine [TPG 9]) ;
- rippage de l'horizon minéral avant le dépôt de la terre végétale ;
- apport de la couche de terre végétale sans rouler sur l'horizon minéral ;
- régalage de la terre végétale.

Ensuite, une deuxième bande peut être réalisée, sans tassement de la première (Passy [TPG 17]).

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 (Crotenay [TPG 10]) de vider le godet en deux fois en décalant latéralement le chargeur d'une largeur de godet.

Quand des fines de décantation sont apportées en mélange avec des stériles, selon les sites, la quantité de fines incorporée varie de 3/4 de l'épaisseur du sol reconstitué comme à Passy [TPG 17], à 1/3 à Crotenay [TPG 10] ou à 1/4 à St-Pierre-de-Chandieu [TPG 23].

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 (Rennes [TPG 20]). 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 (voir schéma page 155 de l'annexe 4).

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.

Les conditions idéales pour la mise en place de fines de décantation impliquent 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.

Piste de recherche

Tester le mode opératoire pour prélever et sécher les fines de décantation et les différents pourcentages et modes d'incorporation aux stériles.

La reconstitution de l'horizon minéral doit s'effectuer sans compaction. Les engins ne doivent pas rouler sur les couches remises en place et un rippage doit avoir lieu avant de mettre en place la terre végétale.

2 - AMÉLIORATION DE L'HORIZON MINÉRAL

Il s'agit de recommandations uniquement préconisées en Suisse [50, 94] (voir en annexe 4). En France, elles ne sont pas pratiquées.

En Suisse [50, 94], il est conseillé de drainer l'horizon minéral, s'il est imperméable, avec des tuyaux placés en fond de fouille (ou sur l'horizon remblayé) et en créant des tranchées remplies de graviers, allant jusqu'à 0,20 m de la surface. Ces saignées filtrantes remplies de gravier peuvent être disposées en épis.

En Suisse [50], une amélioration (bio-activation) de l'horizon minéral est la règle. Elle a lieu soit par la mise en place d'une culture intercalaire sur cet horizon, soit par épandage

de compost. La culture intercalaire doit être pratiquée pendant au moins trois mois, afin de former une masse végétale importante et le plus de racines possibles qui permettront d'améliorer cet horizon.

Si la mise en place de la terre végétale est prévue à l'automne, on ensemencera l'horizon minéral jusqu'au 1er juin avec du colza d'été, de la moutarde jaune ou du chou de chine (voir tableau 3 de l'annexe 4).

Si la terre végétale n'est remise en place qu'au printemps suivant, on peut semer du chou de chine, du colza d'hiver ou de la navette d'hiver jusqu'au 15 septembre ou du seigle jusqu'au 30 octobre (voir tableau 3 de l'annexe 4).

Ces espèces préconisées ont une levée rapide et régulière et un enracinement profond ; elles ne nécessitent pas un lit de semence de qualité. Les racines permettront une bonne circulation de l'air et de l'eau. La végétation accroît la résistance au tassement et a, en plus, un rôle de fumure organique. Un apport d'engrais de type N P K 120 - 100 - 240, Mg 25, complété par 60 à 80 m^3/ha de compost et d'un hersage est conseillé. La culture pionnière va être récoltée ou broyée, puis incorporée à l'horizon minéral par hersage avant la mise en place de la terre végétale.

Le sol qui sera reconstitué à l'issue de cette culture améliorante sur l'horizon minéral aura donc schématiquement le profil suivant (figure 14).

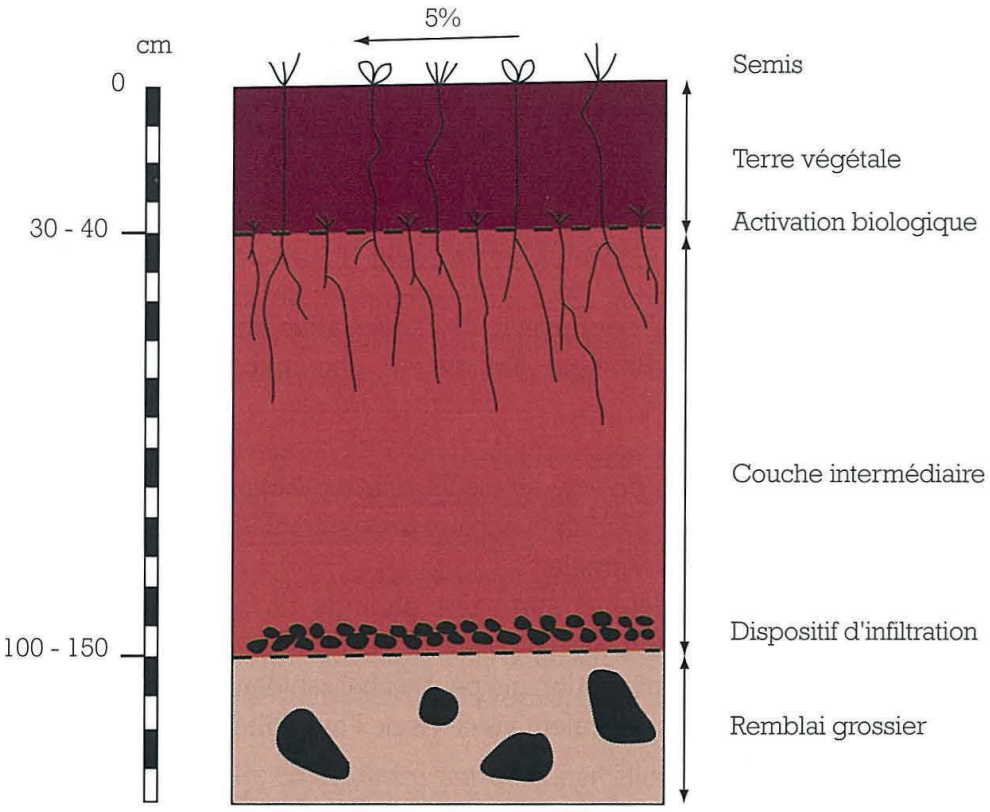


Figure 14 : Schéma d'un sol après la pratique de culture sur l'horizon minéral (d'après [50]).

Cette pratique impose donc un délai plus long pour le réaménagement agricole, et nécessite le stockage de la terre végétale pendant la période de culture intercalaire.

S'il n'y a pas de culture pionnière, un apport de 100 m^3/ha de compost doit être incorporé par hersage.

Nous ne disposons pas de résultats d'essais montrant l'impact de ces pratiques de bio-activation de l'horizon minéral.

Piste de recherche

Tester l'efficacité des pratiques préconisées en Suisse d'amélioration de l'horizon minéral par mise en place d'une culture améliorante avant le régalage de terre végétale.

IV - MISE EN PLACE DE LA TERRE VEGETALE ET PREPARATION DU SOL

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 [7, 47, 84, 100]. Le décapage et le réaménagement ne devraient avoir lieu que si le sol est suffisamment sec (terre friable, non modelable et ne collant pas aux mains et aux machines) [50].

Déterminer si le sol peut être manipulé peut relever de l'observation de deux paramètres : le climat ou le sol. Ainsi, en Grande-Bretagne [48, 49, 84], 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[30].

30 Limite d'Atterberg.

La limite de plasticité est atteinte [44] 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 15) : 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 15) ou s'il est impossible de réaliser ce boudin, le sol peut être manipulé, il est suffisamment sec.

Figure 15 : Détection de la limite de plasticité d'un sol (d'après [44]).

Les experts anglais [48, 49] 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.

Un bon nombre de cas de réaménagements de qualité médiocre ou moyenne sont manifestement liés à des décapages, des transports ou des régalages de terre trop humide [A2 m, A11 m].

Ainsi, la figure 16 met en évidence, sur deux parcelles adjacentes [A2 m], l'importance de manier de la terre sèche pour en conserver la structure et la qualité (et donc les potentialités de rendement). Le transport de terre humide détruit celle-ci de manière irrémédiable et ceci d'autant plus que le décapage est effectué avec un scraper. Entre la parcelle décapée à la pelle en condition sèche et celle décapée au scraper en condition humide, le rendement est diminué de moitié.

Conditions du réaménagement	Rendements en blé obtenus
Temps sec et décapage réalisé au bouteur	80 q/ha
Temps humide et décapage réalisé au scraper	40 q/ha

Figure 16 : Différences de rendement en fonction, de manière conjointe, des conditions d'humidité de la terre et des engins utilisés lors du réaménagement.

Un résultat similaire a été obtenu [A11 m] entre 2 ha réaménagés en 1979 en conditions de terre sèche (la moitié à la pelle et l'autre au bouteur) et 2 ha réaménagés en conditions de terre humide en période pluvieuse en 1980 (la moitié à la pelle et l'autre au bouteur).

Conditions d'humidité	engins utilisés	rendements en blé obtenus	rendements moyens témoins
temps sec (réaménagée en 1979)	pelle	60 q/ha	75 q/ha
	bouteur	56 q/ha	
temps humide (réaménagée en 1980)	pelle	31 q/ha	60 q/ha
	bouteur	25 q/ha	

Figure 17 : Différences de rendement en fonction, de manière séparée, des conditions d'humidité de la terre et des engins utilisés lors du réaménagement.

Les rendements indiqués (figure 17) sont ceux de la première année de culture (donc deux années différentes, mais pour lesquelles les rendements moyens de la région ne bougent pas beaucoup).

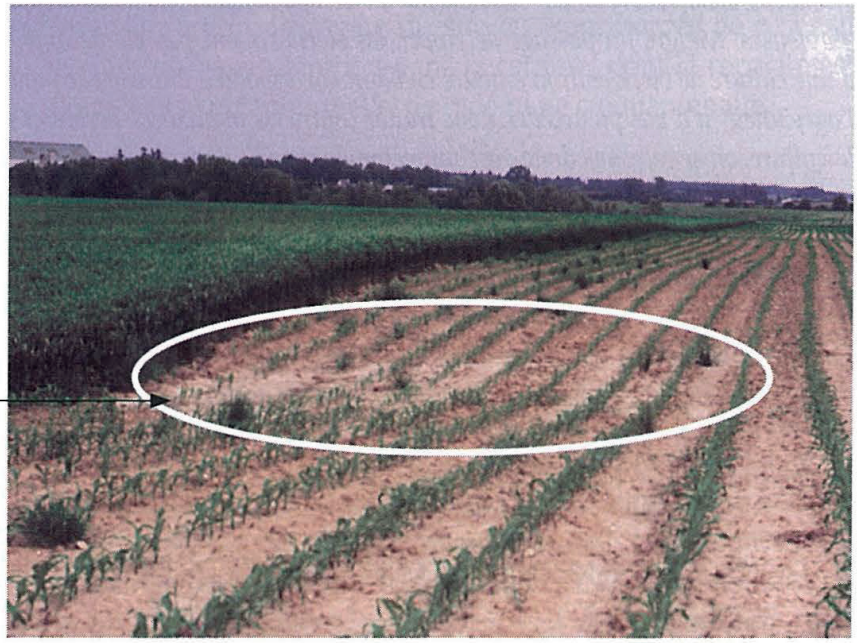
L'influence des conditions du transport des terres joue donc ici aussi du simple au double. Nous voyons de plus ici que même un réaménagement fait à la pelle sur chenille (engin à faible pression au sol) diminue de moitié les potentialités de rendement. Nous n'avons pas recueilli d'information sur la durée de cette influence.

Les conditions de manipulation de la terre constituent le point sur lequel les pratiques des carriers peuvent le plus s'améliorer avec des effets indiscutables sur la qualité et la productivité agricole des parcelles réaménagées. En effet, la terre ne doit être manipulée qu'en conditions sèches après un test à la main pour en évaluer le degré de plasticité.

Quel que soit l'engin utilisé, une manipulation de terre en condition plastique diminue notablement les rendements ultérieurs sur la parcelle.

Une information doit être menée afin de faire passer dans les pratiques systématiques l'arrêt de toutes les manipulations de terre trop humide.

PLANCHE 4 . Zone de mouillère sur un réaménagement agricole.



[A11 m] *Photo Cemagref Delory I.*

Parcelle réaménagée en 1979 avec :
- 4,40 m de remblai (stériles et matériaux extérieurs) ;
- 0,58 m d'horizon minéral ;
- 0,42 m de terre végétale.
Le remaniement a eu lieu par temps humide avec circulation de dumper sur l'horizon minéral. La mouillère de la photo correspond à une zone d'affaissement et de compactage.
Le maïs a une densité moins importante et un retard de croissance sur cette zone.

PLANCHE 5 . Conséquences d'une mouillère agricole.

[A2 m] *Photo Cemagref Delory I.*

Cette parcelle a été réaménagée en 1993 sur un ancien bassin de décantation de boues de lavage de granulats. Les terres remises sont issues d'un décapage réalisé au moto-scraper et pendant des conditions pluvieuses. Malgré un passage de ripper, les stériles n'ont pas été décompactés. Sur la photo, il s'agit d'une culture de blé. L'endroit entouré en blanc correspond à une zone de mouillère très vaste sur laquelle l'agriculteur n'a pas pu accéder, donc traiter contre les mauvaises herbes et semer son blé. Au milieu de la culture, on se retrouve donc avec un rectangle rempli d'adventices.

Cependant, le terrain est très fertile, l'agriculteur obtient en effet des rendements supérieurs (95 q/ha) à moyenne de la région (70 q/ha)

Lors de la restitution des terres, les boues n'étaient sans doute pas assez sèches, si bien que le terrain était très instable et l'échec de la toute première culture avait amené l'agriculteur à mettre cette parcelle en jachère. La notion de parcelle en convalescence prend toute sa dimension a fortiori sur un ancien bassin de décantation.

2 - CONSIGNES GÉNÉRALES DE MISE EN PLACE DE LA TERRE VÉGÉTALE

Depuis 1976, aux USA [66], il y a des expériences de reconstitution de sol après exploitation pour obtenir les mêmes caractéristiques que le sol qui existait auparavant. Ainsi, des précautions doivent être prises lors de la manipulation des substrats.

La mise en place de la terre arable doit se faire sans compaction. La terre doit être manipulée avec précaution, avec des machines à basse pression. Au Canada [78], la pression des machines ne doit pas dépasser 1000-2000 g/cm^2. pour éviter la compaction du sol. Nous voyons que les normes suisses [50] 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[31] 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 sur de longues distances : le sol est un matériau fragile.

Les couches de terre doivent être mises en place du haut vers le bas du versant, afin que les écoulements d'eau ne détrempent pas le sol à l'amont du réaménagement.

Selon les pays une pente de surface est recommandée ou non :
- en Suisse [50] une pente de 2 à 5° est recommandée pour le drainage de surface. Au Canada [75, 78], elle doit être inférieure à 12° pour faciliter le passage des machines agricoles ;
- en Grande-Bretagne [48, 49], une pente est exigée sauf si le substrat est très perméable et éloigné de la nappe. Si le substrat est imperméable, une pente de 3° est exigée afin de favoriser le drainage de surface. Les marges des parcelles permettant le raccord du terrain à la topographie non perturbée peuvent avoir des pentes de 7° et être cultivées ;
- une pente de surface n'est pas toujours réalisée en France (quelques exemples cités dans les paragraphes I - 3 et III - A -2 présentent un modelé en ados suivant le profil du fond de fouille et du toit du remblai nivelés). Cependant, la phase de terrain nous a montré que la solution de modeler en bosse la parcelle peut pallier l'impossibilité de drainage [A1 m, A2 m, A4 m].

31 Recommandations du Bureau de Développement des Productions Agricoles [TPG 22].

Afin d'assurer un bon assainissement de surface, des fossés pour l'évacuation des eaux sont creusés autour du site recultivé, ceci est d'autant plus efficace que la carrière est en creux. En outre, ils peuvent améliorer l'insertion paysagère du site en étant bordés de haies. Il y a également possibilité de créer un bassin tampon dans la carrière, dont la capacité est déterminée par le volume d'une averse exceptionnelle, de type pluie cinquantenaire.

La mise en place de la terre végétale doit elle aussi s'effectuer sans compaction. Afin d'améliorer le drainage de surface, une légère pente (de 2 à 3°) peut être recommandée. Des fossés d'évacuation en bordure de parcelle peuvent également être mis en place.

3 - 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. La figure 17 montre que les réaménagements effectués à la pelle donnent des rendements légèrement supérieurs à ceux obtenus sur une parcelle réaménagée au bouteur, mais la différence n'est pas significative (de 4 à 6 q/ha de différence). Afin de ne pas rouler sur les couches mises en place, il est nécessaire de planifier soigneusement les déplacements des engins et de créer des pistes de circulation 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 [48, 49].

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, mais cette méthode est plus lente et plus coûteuse que celle au scraper.

PLANCHE 6 . Mise en place de la terre végétale. Vue d'un réaménagement en cours.

[A2 m] *Photo Cemagref Delory I.*

La couche de stériles constituant l'horizon minéral a été régalée (sol de couleur claire).
La terre végétale est en cours de régalage sur l'horizon minéral (terre de couleur brune).

Deux méthodes ont été mises au point en Angleterre dans les années 80 [84] :

- l'une avec un scraper et une pelle (figure 18)

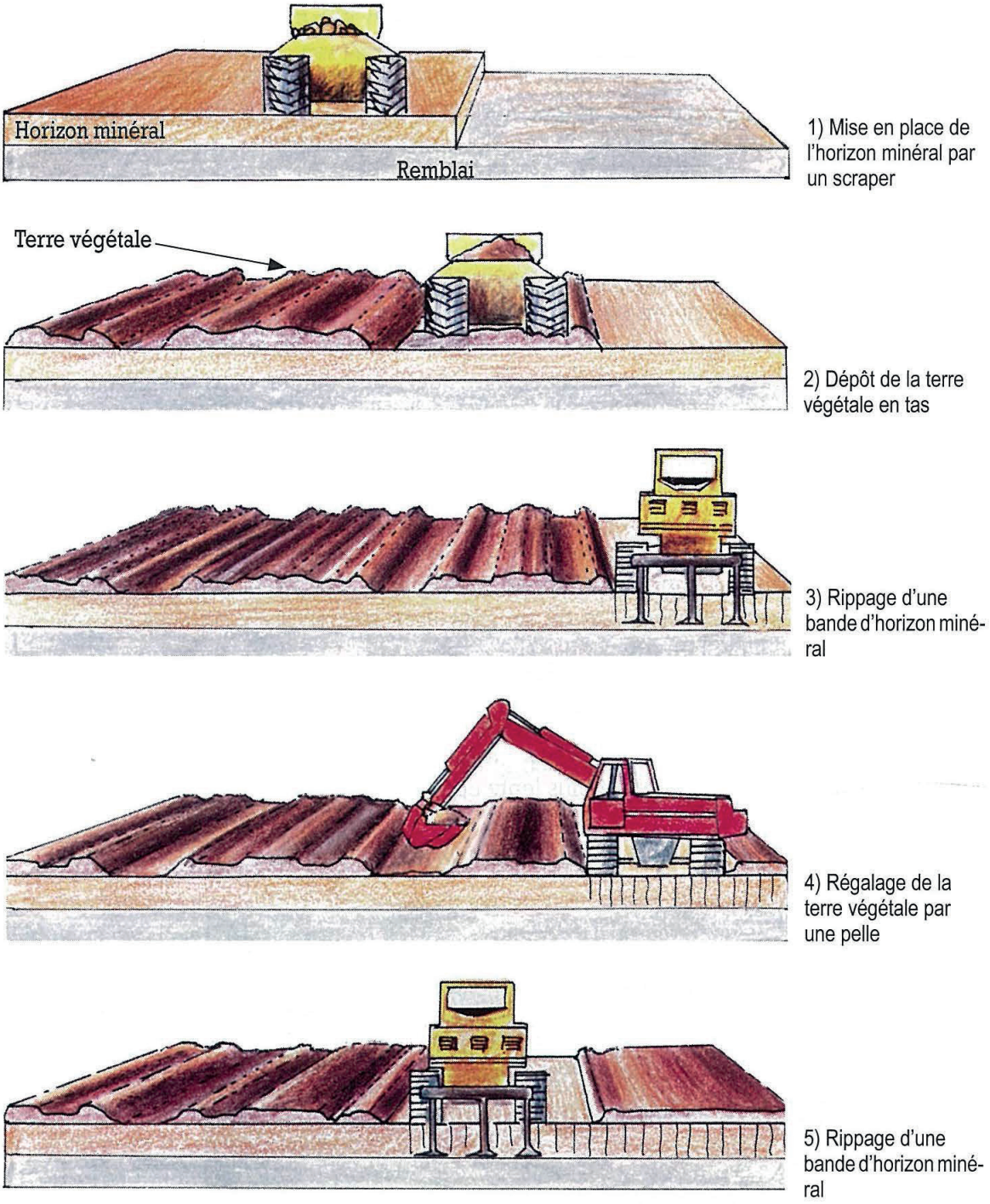


Figure 18 : Schéma de mise en place du sol avec scraper et pelle.

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.

- une méthode plus soigneuse est réalisée avec des dumpers et des pelles (figure 19).

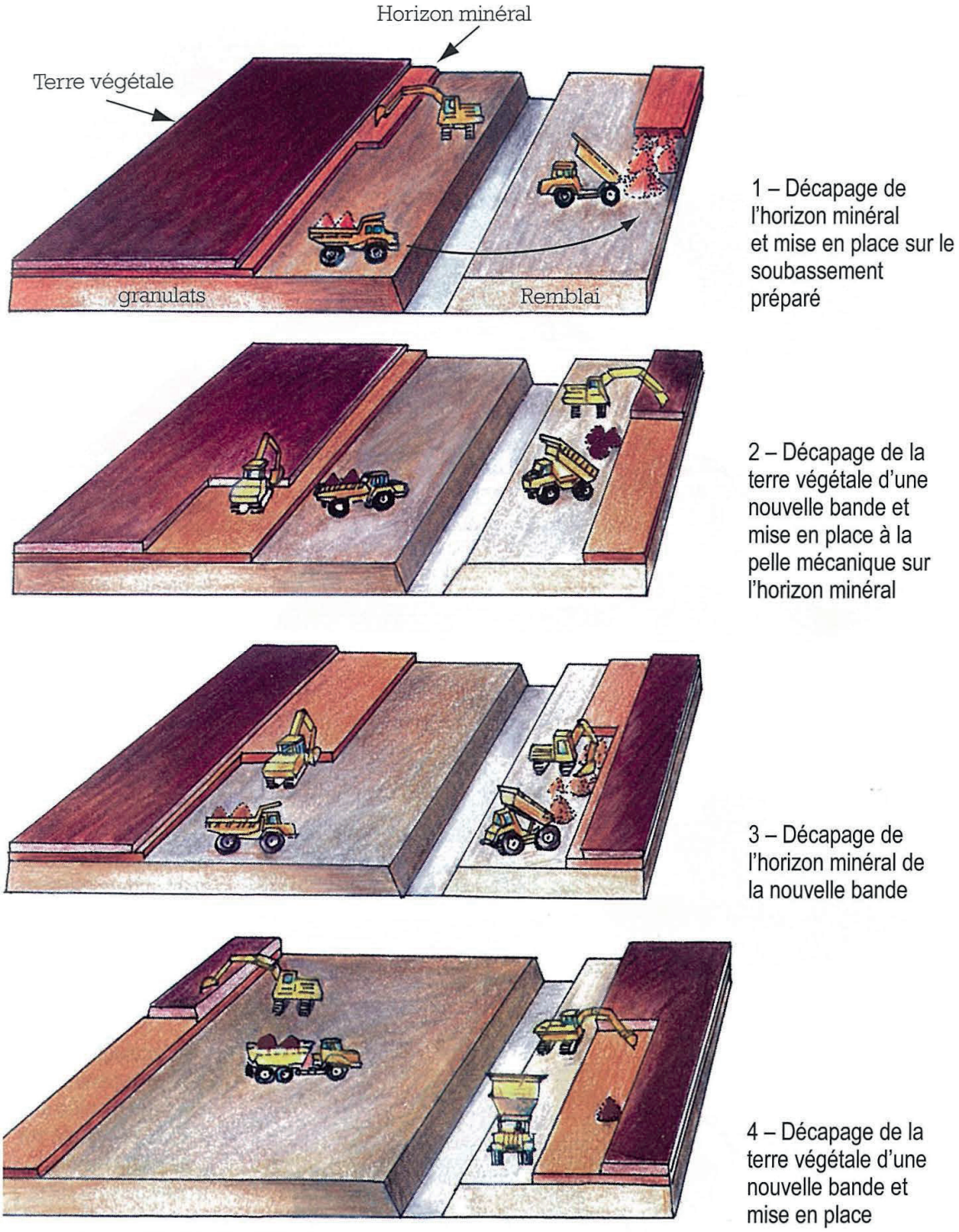
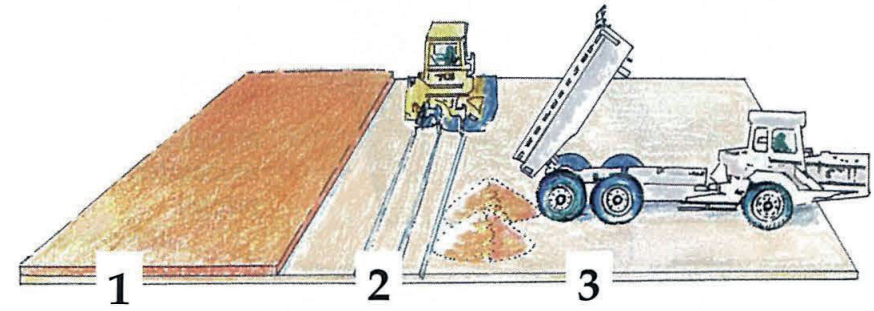


Figure 19 : Schéma de décapage avec dumpers et pelles.

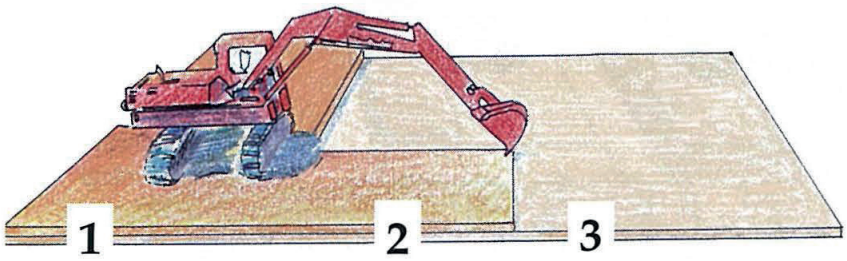
L'horizon minéral[32] est découvert, puis placé dans le camion qui le dépose en tas et en bandes, puis il est étalé. Ensuite, on procède de la même manière avec l'horizon organique qui est replacé sur l'horizon minéral de l'autre côté. Auparavant, le soubassement a été rippé. Ainsi, le sol n'est jamais tassé par des engins.

32 Préalablement décapé de son horizon organique dans une phase précédente.

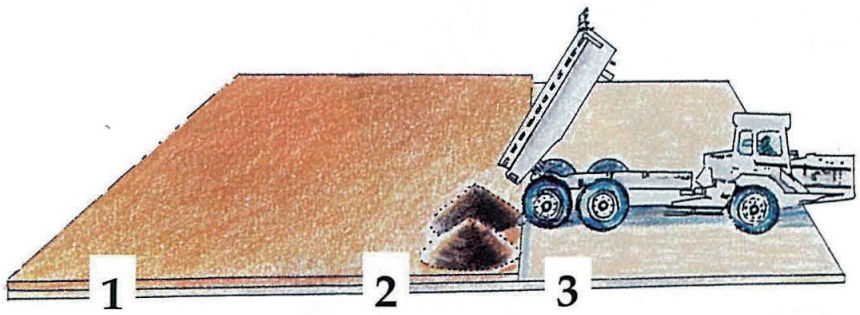
En France, deux méthodes sont préconisées par le BDPA[33] (figures 20 a et 20 b) :
- l'une recommande le régalage par pelle à chenille placée sur la couche mise en place et fonctionnant en rétro (schéma 4 a) ou par pelle à roues depuis le soubassement et travaillant en poussée (schéma 4 b) ;



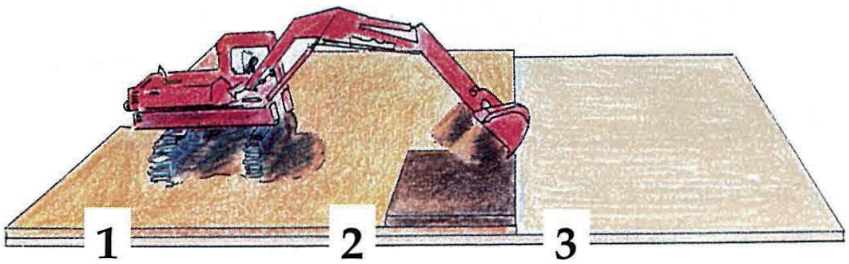
1 – Rippage de la bande 2 et apport de la couche inférieure, sans roulage des dumpers sur la bande 2.



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



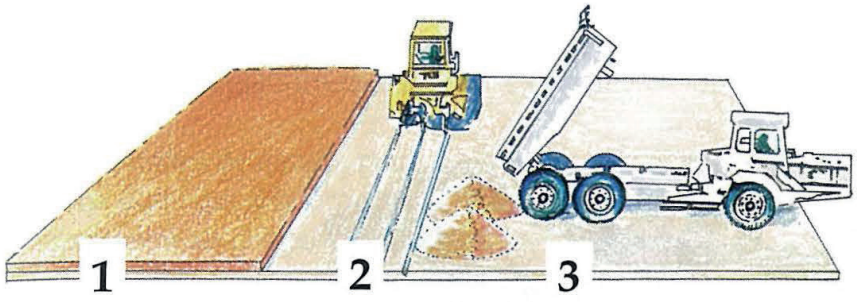
3 – Apport de la couche supérieure sur la bande 2. Le bennage doit être fait sur la couche inférieure, quitte à monter les roues arrière, pour ne pas gaspiller la terre sur le soubassement de la bande 3.



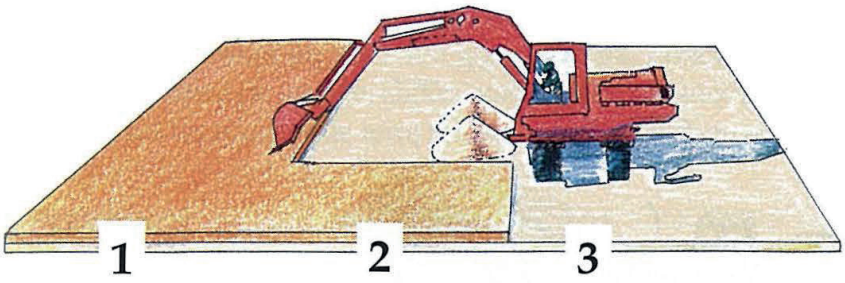
4 – Régalage de la couche supérieure par une pelle montée sur chenilles circulant sur la bande1 terminée. Travail aisé en rétro, y compris pour la reprise de terre versée éventuellement sur le soubassement.

Figure 20 a : Schéma de régalage avec pelle à chenille.

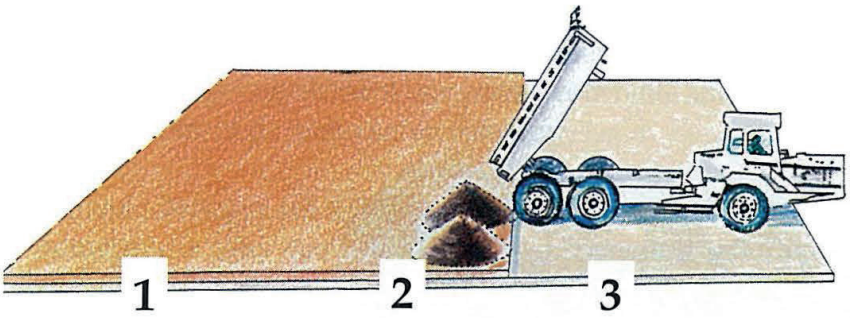
33 BDPA : Bureau de Développement des Productions Agricoles.



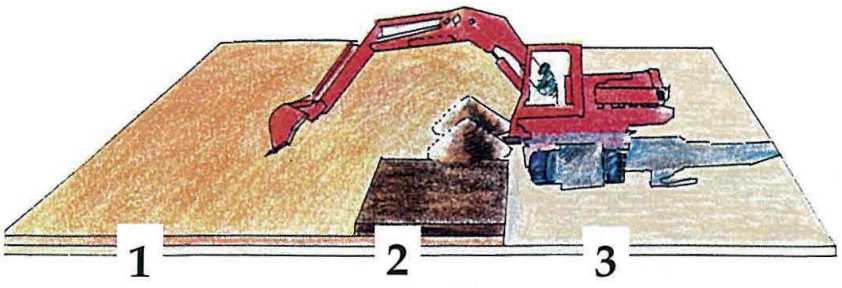
1 – Rippage de la bande 2 et apport de la couche inférieure, sans roulage des dumpers sur la bande 2.



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.

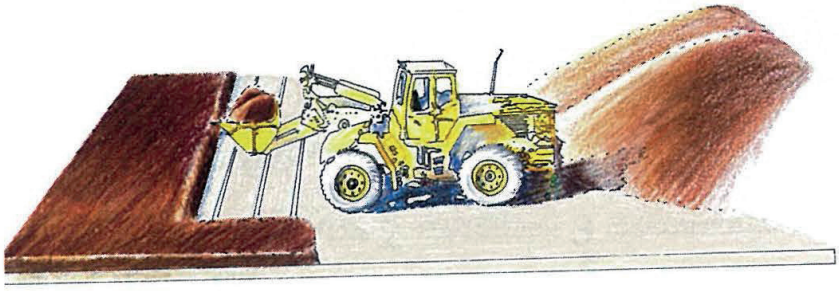


4 – Régalage de la couche supérieure par une pelle montée sur pneus, depuis le soubassement de la bande 3. Travail en poussée et en rétro, avec nécessité de pivoter la tourelle pour reprendre en rétro la terre versée sur le soubassement.

Figure 20 b : 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 21).

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 21 : 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.

Lors des visites de terrain, nous n'avons pas pu vérifier les méthodes employées et nous n'avons donc pas d'information de leur effet sur le rendement. Par contre, nous avons fréquemment vu des problèmes de mouillères liés sans doute à des compactions. En cas de compaction en raison de l'emploi d'engins inappropriés, un rippage ou un sous-solage est nécessaire à une profondeur supérieure à celle de la couche déposée (afin de détruire effectivement la semelle de compaction).

Une méthode de travail soigneuse avec des engins adaptés (sur chenille et exerçant une faible pression au sol : 400 g/cm^2), et par condition de terre sèche, permet un réaménagement de qualité. Différentes possibilités sont décrites, elles évitent toutes de circuler sur les couches de terre remises en place et de trop pousser la terre.

4 - EPIERRAGE

Beaucoup de gisements de granulats sont surmontés par des sols qui présentent des taux élevés de cailloux (de 20 à 50 % du volume de terre). De plus, l'eau de pluie tombant sur un sol remis en place resté nu entraîne les éléments fins du sol et laisse apparaître les pierres ; ainsi, la pierrosité du sol augmente (Criqueboeuf-sur-Seine [TPG 9], Crotenay [TPG 10]). Il est donc très important, pour éviter ce phénomène, d'essayer de limiter les apports de cailloux, d'installer rapidement une culture couvrante afin d'éviter les pertes d'éléments fins et éventuellement de pratiquer un épierrage.

En Grande-Bretagne [48, 49], les auteurs soulignent que le sol remis en place a une pierrosité « homogène » alors que le sol avant l'exploitation pouvait présenter des alternances de zones très caillouteuses (des poches de cailloux) et des zones peu caillouteuses. Le sol n'est donc plus perçu de la même manière par l'agriculteur même si la quantité globale de cailloux n'a pas augmenté.

Une forte teneur en cailloux (diamètre supérieur à 20 mm) provoque une usure importante des matériels agricoles et empêche parfois certaines cultures (par exemple la pomme de terre, dont la récolte mécanique est impossible s'il y a trop de pierres dans le sol). La diminution du pourcentage de petits cailloux (de diamètre de 2 mm à 20 mm) permet d'augmenter en outre la réserve en eau du sol. Afin d'obtenir un sol de meilleure qualité, le rôle de l'épierrage est important. Il a été prouvé aux USA [19] qu'il augmentait les rendements.

** LIMITER LES APPORTS DE CAILLOUX*

Lors de la reprise des terres stockées en tas temporaire ou en merlons de plus longue durée, il peut être intéressant de cribler la terre afin d'éliminer le maximum de cailloux. La reprise du stock au chargeur ou à la pelle hydraulique permet un certain tri granulométrique des pierres. Le tri granulométrique réalisé par une pelle est en principe plus fin.

S'il y a utilisation de fines de décantation, il faut veiller à ce que les bassins de décantation soient conçus afin d'éviter l'incorporation de cailloux aux fines lors de leur prélèvement.

* *EPIERRER*

Certains agriculteurs [A11 mo] exploitant les terres ont procédé avant ou après mise en culture à des épierrages manuels dans les premières années d'exploitation. La plupart des agriculteurs rencontrés mentionnent des problèmes de remontée de pierres.

Des essais d'épierrage ont été réalisés à Crotenay [TPG 10], sur sol sec et sans végétation. Il s'agissait de rassembler les cailloux (diamètre supérieur à 100 mm) en andains, avec une aligneuse de pierre équipée d'un rotor entreprise. Les pierres sont ensuite ramassées par une ramasseuse-chargeuse. Ceci ne peut se faire que sur sol très sec et en absence de végétation. Cette technique peut être intéressante s'il y a semis immédiatement après l'épierrage et roulage pour tasser la terre. Il semble utile d'enlever les cailloux de diamètre supérieur à 50 mm, par utilisation d'une épierreuse agricole, ou mieux, par criblage avant la mise en place de la terre végétale.

En Suisse [92, 94, 97], il est recommandé d'enlever les pierres de diamètre supérieur à 150 mm pour la couche intermédiaire et de refaire un épierrage si nécessaire en surface en enlevant les pierres de diamètre supérieur à 100 mm. Si un épierrage mécanique est nécessaire, les machines utilisées ne doivent pas compacter le sol : andaineur à pierre et chargement manuel de l'andain dans la benne d'un trax à basse pression. L'épierrage doit être souvent réalisé car il y a des remontées de cailloux.

Si 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 [29], le concassage des pierres avec un appareil à marteaux fixes tiré 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[34] pour reconstituer la même épaisseur de sol.

Les stériles de découverte qui permettent de reconstituer les sols ont souvent un fort pourcentage de cailloux qui nuit aux pratiques agricoles (perte d'éléments fins du sol, faible réserve utile, contraintes pour l'utilisation des engins agricoles). Un épierrage (des cailloux supérieurs à 100 ou 50 mm de diamètre) permet d'augmenter les rendements, il peut être réalisé par des engins spécifiques.

Piste de recherche

Le concassage des cailloux n'est pas pratiqué en réaménagement de carrière, il a prouvé son intérêt pour des réhabilitations de pistes de ski car il permet d'augmenter la profondeur de sol disponible. Il pourrait être testé en réaménagement de carrière quand le sol est en faible quantité et avec un fort taux de cailloux.

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

5 - TRAVAIL DU SOL

Dans le nord-ouest du Colorado, USA [86], des études ont montré qu'un décompactage à la charrue sur 0,15 à 0,20 m avant de mettre en place la terre arable avait autant d'effet sur la mise en place de la terre arable qu'un rippage de 0,60 à 0,90 m. Cependant, des remontées accrues de cailloux sont possibles.

En Suisse [50], 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 Grande-Bretagne [48, 49] 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 ou les dents sont trop écartées sur les engins agricoles classiques.

Les experts préconisent donc des expérimentations afin de définir :
- l'espacement des dents,
- la profondeur du sous-solage,
- la fréquence de celui-ci.

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

L'épaisseur du remblai à mettre en place doit amener le sol en dehors de la zone de battement de la nappe phréatique. Le niveau du sol reconstitué doit se trouver entre 0,5 et 1 m au-dessus du niveau de la crue décennale de la nappe.

Les remblais doivent être déposés en fond de fouille, les plus grossiers et les moins perméables au fond, 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 humifère 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 ne doivent pas circuler sur les couches remises en place ;
- 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.

Sur les conseils d'un expert en hydraulique agricole, un drainage peut être mis en place s'il est nécessaire et s'il est efficace.

L'utilisation des 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 et la productivité en année sèche.

CHAPITRE 3

AMELIORATION DU SUBSTRAT

La fertilité d'un sol est due en bonne partie à ses capacités d'échange des éléments nutritifs, en fonction de la teneur du sol en matière organique et à ses potentialités de réserve en eau, liées pour partie[35] également à la matière organique du sol ainsi qu'à un pH compatible avec la bonne croissance des végétaux.

Dans un sol qui a été stocké, il y a généralement une dégradation ou une disparition de l'humus. Cependant, l'accumulation d'humus commence tout de suite après la réhabilitation des sols. Mais la vitesse de reconstitution de l'humus diminue avec le temps [33] : il est très long de retrouver un niveau identique à celui avant la dégradation. Ainsi, il est important de conserver les horizons humifères intacts ou, sinon, de remettre les sols en culture immédiatement avec des espèces enrichissantes afin de reconstituer un humus.

Dans la plupart des cas un apport de matière organique permet de restaurer plus vite la fertilité des sols. Elle influence en effet la biodisponibilité des éléments nutritifs essentiels pour les plantes (azote, phosphore et potasse), augmente la réserve en eau des sols. Elle permet également de restaurer la vie biologique des sols (micro-faune et micro-flore) ce qui influe sur les échanges sol-plantes [1].

Des essais aux USA [19] ont montré qu'à partir de 6%, l'augmentation du taux de matières organiques améliorait nettement les résultats de productivité. Une amélioration biologique des sols est également possible.

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 humifère reconstitué) ou si le sol reconstitué est peu profond.

Ainsi, l'exemple de Jargeau [TPG 14] a montré une amélioration très nette sur maïs ou orge suite à un épandage de fumier.

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.

La correction d'un pH trop bas sera évoquée dans le chapitre 4 car elle relève des pratiques classiques sur une parcelle agricole.

35 Mais aussi au pourcentage de terre fine, à la densité du sol.

I - LES AMENDEMENTS ORGANIQUES

A - LES COMPOSTS

Les apports de compost permettent également d'effectuer un apport massif de matière organique au sol et de réaliser un ensemencement biologique[36]. Ces produits ont une vitesse de minéralisation lente et sont précurseurs d'humus stable [1].

Les apports de compost pour améliorer le sol ont lieu quand celui-ci est remis en place et en début ou en fin de cycle de végétation. L'épandage se fait en général à des doses de 5 à 200 t/ha. Il semble préférable de fractionner les apports de compost, qui peuvent être répartis sur une ou deux années. L'épandage peut se faire avec un épandeur à fumier. Le mélange s'effectue ensuite par des façons agricoles (labour). 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].

Dans le cas où le compost va participer à la reconstitution du sol (mélange compost, fines et stériles comme à Passy [TPG 17]) les quantités à apporter sont beaucoup plus importantes (500 t/ha) et sont mises en place à la pelle. 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. A Passy [TPG 17], la pelle allait chercher le compost dans la benne du camion, afin d'effectuer le régalage.

L'apport de compost permet une amélioration de la fertilité et une plus grande précocité des cultures (colza, orge, avoine). Les rendements sont meilleurs, surtout s'il y a sécheresse estivale (effet tampon des accidents climatiques).

La stabilité structurale est fortement améliorée par l'apport de compost. Il y a un enrichissement en éléments majeurs et en oligo-éléments, entraînant une baisse du rapport C/N et un relèvement du pH. 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).

Les composts présentent différentes caractéristiques selon les matières premières mises en œuvre.

Lors de la phase de terrain, nous avons obtenu peu d'informations sur l'emploi de compost pour améliorer le sol, un seul site en a employé [A7 mo]. Seule l'utilisation en reconstitution de sol [A8 m] a été analysée.

---

36 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.

Les principaux éléments cités ici sont issus d'un document Ademe - Cemagref [1] qui est un guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des déchets organiques en végétalisation.

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[37] (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, d'éléments 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[38] 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[39] et de son degré de maturité [1].

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 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 m^3/ha. En apport en tant qu'amendement organique sur sol remis en place, les apports sont de 50 à 300 m^3/ha.

37 En particulier en ce qui concerne les teneurs maximales en éléments indésirables, en éléments-traces métalliques (plomb, mercure, cadmium, nickel,...).
38 En fonction de leur teneur en eau et en éléments ligno-cellulosiques (produits rapidement fermentescibles).
39 Liée principalement aux conditions de stockage du compost mûr.

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 appliqués 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.

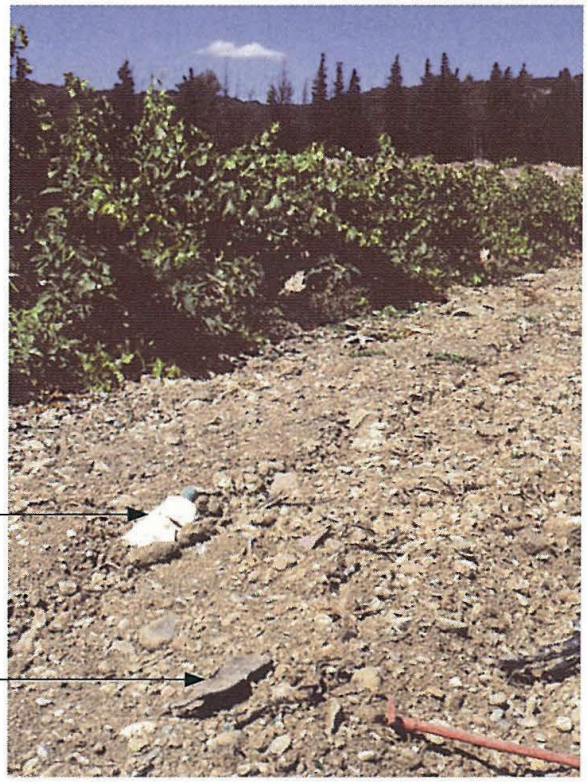
Le compost d'ordures ménagères a pour avantage un apport massif de matières organiques. C'est un amendement peu cher et disponible facilement. Les composts urbains classiques sans tri à la source présentent des éléments indésirables (verre et plastique principalement) et des risques d'éventuelle contamination 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), des risques pour les animaux, tandis que les impuretés menacent de s'accumuler au cours des ans quand on répète les apports pour maintenir la fertilité du sol.

Dans le cas de Passy [TPG 17], il y avait 70% d'indésirables (beaucoup de verre).

A Rennes [TPG 20], le compost a été tamisé à une maille de 25 mm, ce qui permet de réduire le taux d'indésirables (42% d'indésirables). Ces réaménagements sont anciens et les normes et marques normalisées ne devaient pas être en vigueur. Néanmoins, dans un aménagement plus récent [A7 mo], l'apport de compost urbain a laissé en surface de la parcelle des fragments de plastique bleu peu appréciés de l'agriculteur reprenant la parcelle.

PLANCHE 7 . Exemple d'éléments indésirables apportés par du compost d'ordures ménagères.



[A4 m] *Photo Cemagref Delory I.*

Le viticulteur après le réaménagement a fait des apports de compost d'ordures ménagères sans tri granulométrique. Des éléments indésirables de grande taille (bouteille plastique, semelle...) sont présents sur la parcelle.

Un compost d'ordures ménagères labellisé (par exemple NF compost urbain) doit être tamisé à une certaine maille (variable selon le label choisi) ce qui élimine les indésirables de grande taille (mais pas les fragments de plastique).

A Passy, 20% de la matière organique du compost d'ordures ménagères se minéralisait annuellement. Ainsi, pour maintenir au long des années la teneur en matière organique du sol reconstitué avec 500 t/ha de compost, il faut apporter annuellement 100 t/ha de compost.

Les parcelles compostées sont plus productives, surtout la première année. Dans la plaine de l'Ain, un apport de compost d'ordures ménagères a eu le même effet qu'une quantité égale de fumier (10% de production par an en plus à raison de 60 t/ha d'amendement). Par la suite, il faut quand même une forte fertilisation chimique.

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 d'une 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 [1].

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.

4 - LES COMPOSTS DE DÉCHETS AGRICOLES

En Israël [22], 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 [33] 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'anciennes carrières».

En Savoie, en revégétalisation de pistes de ski [30], 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 [29], le compost permet un démarrage beaucoup plus rapide de la végétation.

Les composts 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.

Les quantités à apporter dépendent du taux de matières organiques, de N, de P et de K du compost, ainsi que de son rapport C/N. Un rapport C/N trop élevé provoque un effet dépressif sur l'azote et exige un apport d'engrais azoté la première année. C'est pourquoi un compost bien mûr est souvent préférable à un fumier contenant beaucoup de paille peu décomposée.

Par conséquent, l'apport sera fonction du sol existant (texture, structure, taux de matière organique, profondeur du sol) et des caractéristiques du produit dont on dispose.

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 [1] 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).

B - LES AUTRES AMENDEMENTS

1 - LES BOUES DE PAPETERIE

Les boues de papeterie ont été testées pour l'utilisation en amélioration de sols agricoles en France et au Canada. Il s'agit en effet, d'un apport à la fois de la matière organique mais aussi d'un matériau qui peut améliorer la rétention de l'eau dans le sol et qui peut remonter le pH [31].

Les produits dénommés boues de papeterie peuvent être extrêmement variables en fonction du type de production, des processus de fabrication et 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 usées ;
- boues de désencrage qui contiennent des fibres de bois, des argiles et de l'encre.

Chaque production est un cas particulier dont il convient de connaître parfaitement la composition avant d'envisager son utilisation en tant qu'amendement d'un sol agricole :
- la teneur et nature de la matière organique ;
- le rapport C/N qui va conditionner la quantité d'azote à fournir pour permettre sa minéralisation ;
- les teneurs en éléments fertilisants et la disponibilité de ces éléments (ainsi, P_2O_5 est généralement peu mobile dans ce type de substrat [31] ;
- les teneurs en éléments traces.

Des essais [31] 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. L'acide phosphorique est peu présent et peu mobile dans les boues de papeterie. Cependant, son rapport C/N très élevé (entre 70 et 250) a un effet dépressif[40] très fort sur l'azote. Un apport d'azote minéral s'avère nécessaire.

En cas d'utilisation agricole à faible dose (moins de 100 t/ha) en mélange avec un sol contenant des microorganismes, 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[41] tant par le coût que par les risques très importants de pollution azotée.

Les boues de papeterie ne paraissent pas être un produit intéressant en reconstitution de sol, il peut avoir un intérêt pour l'agriculteur s'il veut corriger le pH au cours de pratiques agricoles classiques.

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.

---

40 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 que l'on a semées.
41 Les calculs faits dans cette étude indiquent qu'un apport de 9 tonnes d'ammonitrate 33,5 serait nécessaire pour compenser un apport de boues de papeterie de 1500 tonnes par hectare.

3 - LES BOUES DE STATION D'ÉPURATION

a) RÉGLEMENTATION

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 [55] 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) [56] ainsi qu'à tout produit à base de boues[42]. Dans d'autres pays, leur usage est autorisé.

b) EXPÉRIENCES ANCIENNES INTÉRESSANTES

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.

Dans la plaine de l'Ain [TPG 18], un apport de boues de station d'épuration d'eaux usées a eu le même effet qu'une quantité égale de fumier (10% de production par an en plus à raison de 60 t/ha d'amendement).

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 résidait 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 jouaient également le rôle d'engrais, en libérant lentement des substances nutritives sous forme minérale (azote et phosphore). Ces apports nutritifs étaient d'un coût faible si le site de production était proche de la zone à réaménager (sinon le coût du transport devient prohibitif). Elles pouvaient être utilisées comme améliorant du sol (par application puis incorporation), pour créer un substitut d'humus (en mélange avec d'autres matériaux) ou comme fumure d'entretien.

Cependant, et en fonction des doses apportées, les boues pouvaient également avoir des effets négatifs : pollution par ruissellement ou par lessivage, libération de métaux lourds, présence de germes pathogènes.

c) LES COMPOSTS À BASE DE BOUES DE STATION D'ÉPURATION

L'avis[43] 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

42 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.
43 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 exemples 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) [1]. Et à plus grande échelle, des talus et zones végétalisées de l'autoroute de Maurienne [93], 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).

d) UTILISATION DES BOUES DE STATION D'ÉPURATION OU DE LEURS DÉRIVÉS

Les boues sont utilisées en France [29] 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 50 à 80 cm 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 par épandage.

En Allemagne [33], 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).

Des expériences anciennes avaient montré l'intérêt de l'apport de boues maturées de stations d'épuration des eaux usées et des composts à base de ces boues dans l'amélioration des sols. Ces produits sont désormais interdits pour le réaménagement sur site d'ancienne carrière.

L'utilisation d'amendement organique est indispensable quand il s'agit d'une reconstitution de sol à partir d'éléments uniquement minéraux (stériles, fines de décantation, boues minérales). Dans les cas de sol remis en place une analyse du sol peut être intéressante afin de connaître la richesse en matière organique du sol. En effet, si cela est nécessaire, des apports de composts peuvent permettre l'obtention d'un sol de qualité agronomique supérieure. 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. En amélioration de sol, des doses de 50 à 300 m^3/ha sont habituellement utilisées. 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[44].

II - AMELIORATION BIOLOGIQUE DES SOLS

1 - UTILISATION DE LOMBRICIENS

De nombreux travaux [16] ont montré que l'activité des lombriciens[45] dans le sol améliore la structure du sol, sa porosité, ses capacités de drainage et sa fertilité[46].

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. Cet effet est très intéressant pour les sols reconstitués puisque nous avons souligné la nécessité de l'épierrage de la surface pour faciliter les récoltes ou limiter l'usure des engins agricoles.

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 du compost, contribuant à sa minéralisation.

---

44 Dans certains cas, pour des gros volumes mis en œuvre, l'exploitant peut participer financièrement si la demande habituelle est faible.

45 Sous prairie, un réseau de galeries de lombriciens fait 500 m linéaires par m^2 de sol et contient 4 à 6 litres d'air ; une tonne de lombriciens ingère 250 tonnes de terre par an.

46 Les parois de galeries de ver de terre contiennent 125 fois plus de microorganismes fixateurs aérobie que le reste du sol.

Ils sont naturellement présents dans la terre végétale correctement décapée, stockée et remise en place et ne nécessitent pas d'introduction particulière. Cependant, en l'absence de terre végétale, 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 prairie pendant 2 - 3 ans est indispensable suite à l'introduction de vers de terre, le chevelu racinaire leur étant favorable. 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. Ce sont 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. Et, actuellement en Grande-Bretagne [48, 49], lors de la période de convalescence de parcelle, l'introduction de vers de terre est recommandée pour favoriser l'augmentation de la matière organique.

Des essais d'introduction de lombriciens ont été effectués à Passy [TPG 17]. 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.

L'effet des lombriciens sur l'amélioration de la structure et la fertilité des sols qui en étaient dépourvus, est démontré. Par contre, il n'y a pas eu d'expérimentation de l'effet du renforcement des populations existant dans la terre végétale remise en place. En outre, il n'y a pas de structure d'élevage de vers de terre anéciques (les seuls à avoir une action sur la structuration du sol).

Piste de recherche

Mettre en place une expérimentation de réaménagement avec des populations lombriciennes à densité contrôlée afin de voir quel est le nombre minimum efficace pour améliorer la structure d'un sol agricole. Comme les pratiques agricoles sont fortement destructrices pour les vers de terre, une conduite de la parcelle avec et sans labour pourrait être testée.

2 - UTILISATION D'ESPÈCES VÉGÉTALES AMÉLIORANTES

La majorité des études et articles mettent en évidence l'intérêt de la mise en place d'une culture améliorante avant la culture productive. L'effet améliorant doit porter sur deux points :
- la décompaction du sol et l'amélioration de sa structure par un enracinement profond ;
- l'apport d'azote organique par prélèvement d'azote atmosphérique par les plantes symbiotiques à bactéries ou champignons fixateurs d'azote.

En outre, son enfouissement éventuel à la fin de la culture servira d'engrais vert. Mais dans certains cas, la culture améliorante peut être récoltée (la mise en pâture sera à éviter en raison de son rôle perturbateur sur le sol).

Des travaux en Australie [64] ont démontré que la concentration des racines dans la couche de surface est le principal facteur améliorant la structure du sol, et qu'il est possible de sélectionner des espèces afin de favoriser la structuration du sol. Les quatre premières années après la réhabilitation constituent la période pendant laquelle les propriétés physiques du sol peuvent se modifier le plus (influence directe sur la productivité). Par conséquent, pendant cette période, le pâturage, en réduisant la croissance des plantes et le revêtement de litière, peut réduire le potentiel d'amélioration des sols.

En Australie [88], des plantes développant des racines profondes sont utilisées (enracinement rapide et profond jusqu'à 3 m : *Cenchrus ciliaris* cultivar Biloela, *Macroptilium atropurpureum*) ce qui stabilise la terre et modifie la structure. Des légumineuses sont inoculées avec rhizobium et cultivées afin d'améliorer le sol et de constituer un réservoir d'éléments nutritifs. Par conséquent, l'utilisation de légumineuses et de plantes à rhizobium semble être le meilleur engrais. Ceci est vérifié aussi en France, où des implantations sur sol très minéralisé de luzernes inoculées améliorent grandement leur productivité et la structuration du sol (com. pers. Cleyet-Marel).

En Suisse [92, 97], après un an de culture d'engrais vert sur la couche intermédiaire du sol, la terre végétale est épandue et est à son tour mise immédiatement en végétation avec des engrais verts. Un mélange fourrager est recommandé en Suisse dans un premier temps [50, 92, 97], à base de trèfle blanc et de graminées ou à base de luzerne. De la luzerne inoculée est également introduite dans les mélanges pour favoriser l'enracinement. Le semis doit être réalisé avant le 15 septembre et il faut attendre 6 mois à un an pour pâturer.

Au Canada [75, 76, 78], beaucoup d'échecs proviennent de l'installation directement après le réaménagement d'une culture comme le maïs. Or, il est préférable de mettre en place un fourrage de légumineuses avec des racines profondes par exemple la luzerne (il faut que la nappe phréatique soit au moins à un mètre en dessous). Les caractéristiques d'enracinement et de nutrition azotée aérienne de la luzerne permettent la réduction de la compaction des sols et l'apport au sol d'azote organique. Il est recommandé de maintenir pendant 3 ou 4 ans, avec coupe sur place. S'il y a des problèmes de drainage, le lotier peut remplacer la luzerne.

Une étude au Vénézuela [25] montre que l'introduction de mycorhizes avec application de hauts niveaux de fertilisants (triple superphosphate) joue un rôle fondamental dans la réhabilitation de sols avec des herbacées (*Brachiaria decumbens*). Il est noté que le niveau de colonisation des mycorhizes est très lent dans les sols perturbés, mais la fertilisation augmente cette vitesse. Cependant, la reproduction de cette expérience à large échelle est impossible, car il faut inoculer chaque plant, mais le faire pour quelques îlots de plants et les fertiliser peut permettre la colonisation par des espèces natives.

Ces données contredisent les informations françaises (principalement sur des arbustes) où la fertilisation du sol est réputée nuire à la nodulation des bactéries fixatrices d'azote (com. pers. Cleyet-Marel).

La mise en place pendant un ou deux ans d'une prairie à base de légumineuses (augmentation de l'azote du sol) et de graminées permet une amélioration du sol : amélioration de sa structure et de sa fertilité. Le broyage et le retournement de cette prairie avant la mise en culture définitive permettent également d'augmenter la teneur en matière organique du sol.

Si la reconstitution du sol n'a pas lieu à un moment où la culture définitive peut être mise en place, il est indispensable de prévoir une culture dérobée résistant à l'hiver (crucifère généralement) afin de couvrir le sol pendant l'hiver et d'éviter les phénomènes de battance (quand les sols sont limoneux) et d'érosion [92, 97].

La mise en place de cultures améliorant la structure du sol et sa fertilité est une voie très intéressante à promouvoir en France en accompagnement de la notion de parcelle convalescente. L'utilisation de légumineuses inoculées avec des souches performantes permet les meilleures améliorations du sol sans aucun effet indésirable.

CHAPITRE 4

LES PRATIQUES CULTURALES SUR UNE PARCELLE CONVALESCENTE

I - UNE PARCELLE CONVALESCENTE

1 - PRISE EN COMPTE DE LA FRAGILITÉ DE LA PARCELLE

Une des conclusions majeures de la phase de terrain concerne la nécessité de prendre en compte le fait que la parcelle qui vient d'être réaménagée et rendue à l'agriculteur est une parcelle fragile. Son sol a subi une forte perturbation : sa structure, sa vie biologique, sa teneur en matière organique et, d'une façon générale, tout son fonctionnement sont perturbés. Si le carrier a une part de responsabilité dans la qualité de la parcelle remise en état, l'agriculteur en a une aussi qu'il méconnaît. En effet, en France, les agriculteurs veulent tout de suite «voir ce que la parcelle va rendre». Ils y pratiquent donc, dès la première année souvent, une culture dans les mêmes conditions qu'une parcelle non perturbée.

Pour qu'une parcelle réaménagée soit jugée « de bonne qualité », il faut qu'elle assure à l'agriculteur :
- un rendement acceptable et reproductible quelles que soient les conditions climatiques ;
- une réalisation pas trop contraignante de son itinéraire technique.

Si ces conditions ne sont pas satisfaites, souvent, dans le contexte actuel de gel des terres, les parcelles réaménagées sont les premières de l'exploitation à être mises en jachère. Ainsi, sur 12 sites visités, 6 ont des parcelles réaménagées qui sont en jachère ou qui le seront l'année prochaine.

Dans les expérimentations taxe parafiscale qui avaient été menées, des étapes de transition étaient prévues avec des cultures améliorantes (paragraphe III). Dans les sites visités, seuls quelques agriculteurs [A5 m, A6 M, A12 m] ont mis en place pendant quelques mois un engrais vert (ray-grass enfoui) avant de mettre en culture. Pour une raison différente[47] du souci de laisser la terre se restructurer, une situation intéressante a été observée [A7 mo], après remise en état : le carrier confie la parcelle à un agriculteur en lui demandant par contrat de semer des gaminées et de les broyer régulièrement ; l'agriculteur est indemnisé pour ce travail.

Nous proposons le concept de « parcelle en convalescence » pour essayer de faire prendre conscience à l'agriculteur de la nécessité de permettre à la terre végétale de se restructurer. Une communication forte en sa direction doit être soutenue afin qu'une remise en état potentiellement de qualité ne soit pas dégradée par des cultures trop précoces.

Nous allons voir dans le paragraphe suivant comment cette étape de transition est prise en compte dans d'autres pays et en particulier en Suisse [50] et en Grande-Bretagne [48, 49].

La parcelle qui vient d'être réaménagée et rendue à l'agriculteur est une parcelle fragile dont le sol a subi une forte perturbation. Elle doit faire l'objet de pratiques agricoles adaptées.

47 Il s'agit ici de la mise en attente de la parcelle réaménagée en agricole dans l'espoir d'une extension d'autorisation d'exploiter qui utiliserait cette parcelle.

2 - UNE PÉRIODE DE CONVALESCENCE

La réglementation britannique [48, 49] impose depuis 1981, au niveau de l'autorisation d'exploiter, la prise en compte et la description d'une période de convalescence (aftercare). En effet, la restauration complète d'un sol ne se limite pas à sa remise en place mais exige qu'il soit cultivé et entretenu spécifiquement pendant quelques années après le réaménagement afin de retrouver les caractéristiques d'un sol non perturbé.

Cette période de transition est d'au maximum 5 ans. Si sur le papier cette réglementation semble intéressante, il semble d'après les conclusions des experts qu'elle ne fonctionne pas correctement car les deux ministères concernés (MPA et MAFF)[48] n'ont pas assez de moyens pour suivre de manière correcte les sites. Les propositions d'amélioration faites dans le rapport visent à demander une réunion annuelle entre les ministères et l'agriculteur responsable de la parcelle afin de faire le point sur les pratiques[49] effectuées pendant l'année, sur le résultat de ces pratiques et sur celles prévues pour l'année suivante.

Nous préciserons dans les paragraphes suivants quelles pratiques relèvent de cette période d' « aftercare ». Il s'agit pour la culture généralement de la mise en place d'une prairie, principalement sur sols lourds et en climat humide. De manière plus récente, des travaux de recherche ont mis en évidence que des cultures de céréales permettent de mieux structurer le sol qu'une prairie en raison de l'importance de leur appareil racinaire [48, 49].

L'étude [48, 49] a montré que les bénéfices d'un programme de transition peuvent être rapidement perdus par l'inexpérience de l'exploitant agricole et par la précipitation à vouloir obtenir un bon rendement sur un sol restauré.

En Suisse [50], la réglementation impose au minimum trois années complètes d'utilisation en prairie (à base de trèfle blanc et de graminées ou à base de luzerne) avant de retourner la prairie. Les premières cultures pratiquées alors seront des céréales (surtout pas du maïs ni des plantes sarclées) avec des rotations courtes les premières années. Comme cette réglementation prévoit également une culture améliorante de l'horizon intermédiaire (chapitre 2 paragraphe III-B-2), le délai ente le début du réaménagement et la première culture de céréales est environ de 5 ans comme en Grande-Bretagne.

La période de convalescence imposée pour une durée de 3 à 5 ans permet une structuration du sol par une végétation de type prairie ou céréales.

3 - UN EXEMPLE D'UNE PRATIQUE INAPPROPRIÉE

Ceci est fort différent des pratiques françaises où, par exemple [A1 m], une parcelle rendue à l'agriculteur début juin 1997 a eu l'itinéraire cultural suivant :
- en juin 1997, un maïs d'ensilage semé sans labour, juste après un passage de disque ; rendement : 60 q/ha (contre 100 q/ha pour une bonne parcelle) ;

48 Le MPA (Mineral Planning Authorities) est l'équivalent du Secrétariat d'Etat à l'Industrie, le MAFF (Ministry of Agriculture, Fisheries and Food) est le Ministère de l'Agriculture.
49 Drainage, sous-solage, analyses de sol et itinéraire technique pratiqués.

- un blé en 1998 sans labour (1998 a été une année très favorable du point de vue climat, car pas trop humide) : rendement 65 à 70 q/ha (contre 90 à 100 q/ha sur les autres parcelles) ;
- en 1999, augmentation de 10 % des surfaces en jachère, l'agriculteur a donc mis cette parcelle en jachère avec implantation de ray-grass qui est broyé ;
- pour 2000, s'il y a suppression de son obligation de mise en jachère de parcelles, il sèmera du blé en octobre, sinon, il conservera cette parcelle en jachère car, en année humide, elle pose problème.

En effet, cette parcelle présente une bande de compactage (de 0,40 m de large en bordure de la parcelle) et les conditions d'accès en période humide sont très mauvaises (risques d'enlisement des engins agricoles).

Nous voyons donc ici qu'aucune période de restructuration du sol n'a été prévue, mais qu'en plus, la première culture est du maïs, plante qui a tendance à destructurer le sol. Les Anglais interdisent son utilisation dans la première année qui suit les 5 ans de convalescence. Beaucoup de conditions sont réunies ici pour que la qualité du sol remis en place ne puisse pas atteindre son potentiel maximum. Il aurait mieux valu semer une luzerne ou un ray-grass mêlé à du trèfle les trois premières années, puis ensuite faire une culture de blé qui aurait vraisemblablement pu obtenir de meilleurs rendements.

Il est cependant intéressant de noter que même dans ces conditions, la parcelle n'a pas de trop mauvais rendements : 60 % des rendements sur une parcelle non perturbée la première année et 70 % la seconde année.

4 - RÉCUPÉRATION DES POTENTIALITÉS DE RENDEMENT

Nous avons montré qu'une trop grande précipitation à vouloir obtenir des rendements comparables à des parcelles non perturbées peut nuire gravement à long terme à la qualité des parcelles réaménagées. Les quelques sites pour lesquels nous avons obtenu des informations chiffrées concernant plusieurs années sur les rendements montrent qu'ils augmentent aux cours des années (figure 22).

Certaines parcelles atteignent ainsi rapidement des rendements de l'ordre de 80 à 90 % des rendements moyens de la région.

Parcelle 1 :

Nombre d'années après restitution	Culture	Rendements de la parcelle	Rendements moyens de la région	% par rapport à la région
1 an : 84-85	maïs	44 q/ha	78 q/ha	56 %
2 ans : 85-86	blé	38 q/ha	60 q/ha	63 %
3 ans : 86-87	orge d'hiver	42 q/ha	52 q/ha	81 %
4 ans : 87-88	maïs	64 q/ha	74 q/ha	86 %
5 ans : 88-89	blé	45 q/ha	51 q/ha	88 %
6 ans : 89-90	orge d'hiver	42 q/ha	pas de données	non comparable
7 ans : 90-91	maïs	66 q/ha	pas de données	non comparable

Parcelle 2 :

Nombre d'années après restitution	Culture	Rendements de la parcelle	Rendements moyens de la région	% par rapport à la région
1 an : 96	tournesol	6 q/ha	21 q/ha	28 %
2 ans : 97	blé	52 q/ha	62 q/ha	84 %
3 ans : 98	orge d'hiver	43 q/ha	60 q/ha	72 %
4 ans : 99	colza	18 q/ha	30 q/ha	60 %

Figure 22 : Evolution des rendements au cours du temps sur deux parcelles [A6 M].

Nous n'avons pas pu connaître l'itinéraire technique pratiqué sur ces parcelles et en particulier les doses d'engrais apportées par rapport aux parcelles en place. Si l'investissement de l'agriculteur est inférieur sur une parcelle à sol reconstitué, ceci introduit un biais en défaveur des rendements obtenus.

Selon les années, et en particulier en fonction des conditions climatiques, les parcelles réaménagées ont des rendements plus ou moins proches des parcelles non perturbées. Généralement, les années sèches leur conviennent mieux.

Piste de recherche

Mettre en place des expérimentations de culture de prairie (trèfle et graminées ou luzerne) ou de céréales pendant 2 à 3 ans après le réaménagement et comparaison avec une portion de la parcelle mise en culture de rendement tout de suite et procéder au bout de 5 à 10 ans à un bilan complet (financier, agronomique et pédologique).

Il est indispensable de mettre en place une communication dirigée vers les agriculteurs pour leur faire prendre conscience de la nécessité de laisser le temps au sol de se restructurer à l'aide de l'action améliorante des graminées et des légumineuses. Des expérimentations pourraient être mises en place avec la moitié de parcelle réaménagée cultivée directement en maïs, puis une rotation blé - maïs et l'autre moitié mise en prairie pendant 3 à 5 ans avec retournement à la fin et culture de blé.

Les différences de rendement, mais aussi peut-être surtout de qualité de sol[50] observées pourraient être un élément permettant de convaincre les agriculteurs de patienter pour un meilleur résultat ultérieur.

II - LES PRATIQUES CULTURALES

Dans certains pays, une analyse doit vérifier que le sol reconstitué a des caractéristiques agricoles convenables. Quand ce n'est pas le cas, des fertilisants, de la chaux, des amendements organiques ou des engrais verts peuvent être incorporés.

50 A la fois en terme de structure, de taux de matière organique et en éléments fertilisants, de réserve en eau du sol, mais aussi en terme de capacité d'accès à la parcelle.

1 - RELEVER LE PH

Au Canada, un pH de 5,5 est considéré comme le seuil minimal admissible [75]. Si le pH est inférieur, un chaulage doit y être pratiqué six mois avant le semis.

Le pH des sols peut être relevé avec des amendements calciques ou des cendres de charbon [33]. En Espagne [54], le chaulage est recommandé pour relever le niveau du pH : chaux vive (CaO), carbonate de calcium ($CaCO_3$), dolomie (carbonate calcimagnésique).

Nous avons vu (chapitre 3 paragraphe III-1) qu'il est parfois possible d'utiliser les boues organo-minérales (boues de papeterie [31]) 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 recommandés en Grande-Bretagne [48, 49] pour leur action favorable sur la structure du sol. Les teneurs sont calculées sur la base d'une analyse de sol et de recommandations générales pour l'agriculture.

2 - UTILISATION D'UNE FERTILISATION DE FOND

En Espagne [54], il est spécifié que suite à l'analyse de terre, il faut apporter une fertilisation afin d'améliorer les qualités physico-chimiques du sol.

Un apport engrais aux doses N120 P100 K240 Mg25 est recommandé en Suisse [97] sur la couche intermédiaire (horizons minéraux), en vue de faire une culture intermédiaire. Sur la terre végétale, des fumures sont recommandées en fonction de l'analyse de terre et de la culture envisagée.

En Australie [88], sur des sols pauvres en azote et en phosphore, des apports d'engrais ont donné de faibles résultats. L'apport de superphosphates sur pâture ne procure pas d'effet et les engrais azotés ont une efficacité éphémère.

Au nord-ouest du Colorado [87] l'apport de phosphore n'a pas d'effet sur une prairie. Cependant, une autre étude [87], montre qu'une forte fertilisation (N et P) améliore nettement les résultats sur prairies, ce qui semble être le cas majoritaire d'après la bibliographie aux USA. Par contre, les arbustes ne répondent pas très positivement à la fertilisation (concurrence herbacée).

En France, il semble ne pas y avoir d'analyse de sol systématique et c'est l'agriculteur qui gère les amendements et la fertilisation. Cependant, comme généralement, il fait une culture « pour voir », les investissements qu'il accorde à cette parcelle ne sont pas suffisants. La parcelle ne sera donc pas fertilisée correctement.

3 - UTILISATION DE MULCHS

Les mulchs sont recommandés pour protéger les plantations aux USA [106], préserver le sol de l'érosion et conserver l'humidité. De plus, dans le cas de mulchs organiques (paille, foin, fibres de bois) ils apportent des nutriments au sol. Il est noté [23] que le mulch de chaume réduit la température de surface et l'évaporation, il minimise la formation de croûte

sur des sols battants et permet l'établissement d'une prairie. Ceci peut être intéressant pour des sols reconstitués à partir de fines de décantation qui doivent être végétalisés très rapidement.

Des pratiques agricoles classiques d'amélioration du pH et de la fertilité peuvent être effectuées si l'analyse du sol reconstitué n'est pas satisfaisante pour la culture prévue.

III - LE CONTROLE DE LA POLLUTION

Les pollutions peuvent être de deux types dans les sols reconstitués :
- une pollution liée à l'utilisation de matières premières potentiellement polluantes lors de la reconstitution du sol (composts, terres de betterave, boues de papeterie...) ;
- un risque de pollution par les pratiques agricoles classiques en raison des caractéristiques du sol reconstitué différentes de celles d'un sol en place.

1 - RISQUES SANITAIRES LIÉS À L'UTILISATION DE COMPOST URBAIN

A Passy [TPG 17], les analyses du compost indiquent une très faible contamination du produit en métaux (seul le cuivre est supérieur aux normes pour 500 ou 1 000 t/ha).

La contamination fécale est bien inférieure[51] à celle observée dans les boues de station d'épuration. En conséquence, observer un délai de plusieurs mois entre l'épandage du compost et la mise à l'herbe du bétail permet d'éliminer tout risque. Une analyse des eaux de percolation montre que la pollution bactérienne des eaux n'est pas à craindre.

A Rennes [TPG 2], le compost amène au sol des teneurs supérieures aux normes en zinc, plomb, cadmium et chrome. Cependant, les métaux issus du compost ne sont pas accumulés par les plantes, à l'exception du cuivre qui dépasse le seuil de toxicité pour les ovins, mais pas pour les bovins.

Les fines, quant à elles, peuvent avoir de fortes teneurs en manganèse, à la limite du seuil critique pour les animaux (site de Rennes [TPG 20]).

2 - RISQUES DE POLLUTION PAR PERCOLATION LIÉS À L'UTILISATION DE COMPOST

Le compost d'ordures ménagères et les fines constituent des risques de pollution. Une analyse de leur teneur en métaux est donc conseillée avant incorporation au sol. Ainsi, à Passy [TPG 17] les fines présentaient une forte teneur en fer et dans une moindre mesure en manganèse et en cobalt.

L'étude de Passy [TPG 17] montre que le compost d'ordures ménagères broyées est responsable d'un apport important de métaux lourds, avec un risque de pollution

51 10 à 20 coliformes fécaux et streptocoques fécaux par gramme de compost.

physico-chimique[52] la première année (pour un apport de 500 et 1 000 t/ha). Après 18 mois d'expérience, les percolats sont conformes aux normes européennes de pollution. En effet, à Passy, [TPG 17], les bacs lysimétriques contenant du compost et des fines ont des teneurs en métaux lourds dans la solution de percolation moindres que celles des bacs sans fines.

Par conséquent, l'utilisation de compost à des doses de 500 à 1 000 t/ha est envisageable sans risque majeur de pollution, sous réserve qu'il soit associé à des fines de lavage de granulats qui jouent un rôle de piégeage d'une partie de la pollution métallique.

A Rennes [TPG 20], seuls le plomb et le cadmium sont supérieurs aux normes, mais il n'y a pas de pollution bactériologique ou chimique. Les fines, quant à elles, présentent des risques de pollution au cadmium. Le mélange du compost avec des fines, mais aussi avec de la terre de découverte (matériau plus argileux), favorise la rétention des éléments.

Un épandage fractionné sur 1 ou 2 ans du compost à hautes doses est recommandé.

3 - RISQUES DE POLLUTION PAR PERCOLATION LORS DES ÉPANDAGES D'ENGRAIS

Les sols reconstitués ont des caractéristiques différentes des sols en place qui existaient avant l'exploitation. L'extraction du gisement de granulats a enlevé une couche de plusieurs mètres de matériaux qui constituaient un filtre à la percolation des éléments fertilisants et des produits phytosanitaires dans la nappe. Ainsi, en particulier dans le cas d'un réaménagement en décaissé, les risques de pollution de nappe par les nitrates et les pesticides sont accrus. L'agriculteur doit en tenir compte dans son calendrier d'épandage et au besoin, mieux raisonner et fractionner les apports pour pallier cette plus grande sensibilité.

Des risques de pollution des eaux suite au réaménagement d'une parcelle peuvent être dus à l'utilisation de constituants pollués (boues de papeterie, composts urbains), ce qui peut être évité par le choix d'un amendement non pollué. L'autre risque est lié aux pratiques agricoles (apport d'engrais et de pesticides) qui doivent être éventuellement adaptées à la diminution de l'épaisseur de la sous-couche du sol.

La parcelle réaménagée est une parcelle fragile parce que son sol a subi des fortes perturbations et que son sous-sol a changé. La remettre en culture de rendement (maïs) dès qu'elle est rendue à l'agriculture est le meilleur moyen de détruire la structure fragile du sol reconstitué.

C'est pourquoi, la mise en place d'une période de convalescence de 2 à 3 ans pendant laquelle une prairie de légumineuses inoculées et de graminées est pratiquée (avec éventuellement un ensemencement lombricien) permet de donner toutes ses chances à la parcelle et d'obtenir une productivité identique voire supérieure à celle qui existait avant l'exploitation de granulats.

Le sol de la parcelle ne doit jamais rester sans couvert végétal, selon l'époque du réaménagement des crucifères doivent être semées avant l'installation de la prairie.

52 Les DBO (demande biologique en oxygène), DCO (demande chimique en oxygène), et la teneur en plomb sont supérieures aux normes.

CHAPITRE 5

MISE EN PLACE DES VEGETAUX ET RESULTATS

La phase de terrain devait permettre de recueillir des informations chiffrées sur les rendements. Cependant, la rencontre d'une à deux heures avec les agriculteurs[53] n'a souvent pas permis d'obtenir d'éléments précis. Les réponses qui nous ont été faites ont souvent été floues tant pour les rendements des parcelles réaménagées que pour les parcelles comparables de l'exploitation.

Par ailleurs, l'agriculteur intègre souvent la parcelle réaménagée à des parcelles restées en place ou, au bout de plusieurs étapes de réaménagement, il agglomère les parcelles restaurées à différentes dates. Les rendements obtenus alors sont une moyenne sur la totalité de la surface cultivée et il devient presque impossible d'obtenir des informations spécifiques sur la parcelle réaménagée.

Des informations nous ont été fournies par les carriers, certaines ont été utilisées dans ce rapport, d'autres ont été éliminées en raison des chiffres peu vraisemblables indiqués pour les rendements des parcelles en place de la région.

Par ailleurs, même les dossiers des expérimentations taxe parafiscale sont très peu précis sur les rendements et pour la plupart n'ont pas été menés à l'échelle d'une parcelle, mais à celle d'un petit bloc d'expérimentation. Les moyens d'entretien et de récolte de la parcelle étaient donc différents (récolte et pesée manuelle) par rapport à une pratique agricole normale, ce qui peut introduire des biais.

I - NATURE DES CULTURES

1 - LA PRAIRIE

Une prairie temporaire peut être installée là où, les premières années, elle permettra d'améliorer la structure du sol (chapitre 4 paragraphe III - 2). Ainsi, parmi les expériences menées, Rennes [TPG 20] avait une prairie de graminées la première année, Passy [TPG 17] une prairie de légumineuses et graminées.

Le ray-grass et le dactyle ont un enracinement superficiel et le trèfle violet et la luzerne un enracinement en profondeur ; ces plantes sont complémentaires pour stabiliser le sol et améliorer sa structure et son drainage. Le ray-grass anglais est souvent considéré comme la culture pionnière la plus intéressante pour redonner vie à des sols maltraités.

Les prairies peuvent être pâturées sur les sols les plus stables (Crotenay [TPG 10]). Cependant, si le sol est meuble, il faut uniquement faucher tant que la structure n'est pas bien stabilisée. En effet, le piétinement par le bétail provoque une dégradation de la structure.

53 Parfois en présence du carrier ou parfois seul avec l'agriculteur.

En cas d'utilisation de compost, de fines de décantation ou de boues minérales, il est nécessaire de pratiquer une analyse des végétaux portant sur les éléments toxiques pour le bétail avant de mettre en pâture ou d'utiliser le fourrage.

La prairie temporaire peut être enfouie au bout d'une ou de deux années. Le tapis végétal doit être broyé et incorporé. Elle joue alors un rôle d'engrais vert et permet l'augmentation du taux de matières organiques (exemple de Rennes [TPG 20], de la plaine de l'Ain [TPG 18]). Dans la plaine de l'Ain, la prairie améliore le taux de matières organiques, surtout si la prairie comporte des légumineuses (+ 8 % de rendement lors de la culture qui suit l'enfouissement). Cependant, cette étude [TPG 18] montre que les modalités de l'enfouissement jouent un rôle non négligeable : une prairie simplement retournée à la charrue a provoqué une baisse du rendement en blé (-2 q/ha) alors qu'un broyage (au covercrop) et un séchage préalables de la prairie avant labour ont amélioré le rendement du maïs (+ 7 q/ha).

La prairie permanente de Passy [TPG 17] a donné d'excellents résultats, bien supérieurs à ceux des zones alentour. Ainsi, en 1983, quatre coupes ont été effectuées sur des parcelles non irriguées avec un rendement de 12 t ms/ha ce qui correspond à une multiplication par 4 par rapport au terrain en place (produisant 3 t ms/ha) bordant cette parcelle.

C'est l'augmentation de l'épaisseur de sol, l'incorporation de fines et de compost qui expliquent ces rendements par une meilleure résistance à la sécheresse (réserve utile du sol accrue).

Au Canada, lorsqu'il n'y a pas assez d'épaisseur de terre reconstituée, au lieu de mettre en place des cultures, la réhabilitation est tournée vers les pâtures, avec des mélanges de plantes résistant à la sécheresse. Une expérimentation aux Etats-Unis montre que l'apport d'un inoculum mycorhizien[54] provenant d'une prairie naturelle en place lors du semis permet d'augmenter au bout d'un an la part des espèces indigènes dans la prairie. La prairie devient alors plus diversifiée et mieux adaptée aux conditions climatiques.

Une étude menée en Australie [88] démontre qu'il est possible d'établir des pâtures avec des sols de 0,20 ou 0,30 m de profondeur sur des pentes jusqu'à 33 %. Un mulch d'herbe coupée est appliqué sur une épaisseur de 5 cm.

En Suisse [50], pour les mélanges à base de trèfle blanc et de graminées, une fauche rapide est préconisée afin de lutter contre les mauvaises herbes et permettre une bonne installation des plantes.

54 L'inoculum consiste en 875 g/m^2 de sol prélevé dans une prairie en place et contenant des spores mycorhiziennes et des morceaux de racines colonisées.

La pâture ne doit pas avoir lieu avant 6 mois à un an. Pour les mélanges à base de luzerne, la première coupe ne doit pas avoir lieu trop tôt et elle doit être effectuée à 8 cm du sol.

En Suisse [50], si les prairies reconstituées sont considérées comme « compensation écologique », des recommandations spécifiques en fonction des régions fixent les espèces à ensemencer et la provenance des graines.

Lors de la phase de terrain, nous n'avons pas eu de résultat sur des parcelles en prairie. Certaines parcelles sont en prairie, mais ne sont pas récoltées.

2 - LES GRANDES CULTURES

Différentes cultures ont été pratiquées :
- orge (Rennes [TPG 20], plaine de l'Ain [TPG 18] et Jargeau [TPG 14]) ;
- avoine (Rennes [TPG 20]) ;
- maïs (Jargeau [TPG 14], Sierentz [TPG 21], Rennes [TPG 20], St-Pierre-de-Chandieu [TPG 23], plaine de l'Ain [TPG 18], Passy [TPG 17]) ;
- blé (St-Pierre-de-Chandieu [TPG 23], plaine de l'Ain [TPG 18]) ;
- colza (St-Pierre-de-Chandieu [TPG 23], plaine de l'Ain [TPG 18], Rennes [TPG 20]).

Les dossiers taxe parafiscale sont généralement peu précis et donnent des estimations plutôt que des comparaisons fiables de rendement entre parcelles en place et réaménagées. En outre, et nous avons retrouvé ce handicap lors des visites de terrain, les parcelles réaménagées sont fréquemment adjointes à des parcelles en place et les rendements obtenus sont une moyenne (au mieux d'une parcelle mixte, au pire de toute l'exploitation pour une culture donnée).

Malgré ces difficultés, les dossiers indiquent que les rendements obtenus sont globalement satisfaisants, voire localement très satisfaisants.

* *LES CULTURES D'HIVER : BLÉ, ORGE, COLZA*
- un mélange d'orge et d'avoine à Rennes [TPG 20] au bout de trois ans a eu un rendement en grain faible (18 q/ha) en raison d'un semis très tardif ;
- blé (de 45 à 74 q/ha en troisième anné), colza (17 q/ha[55] en quatrième année) et orge (59 q/ha en sixième année) à St-Pierre-de-Chandieu [TPG 23] : les résultats se situent dans la moyenne des rendements obtenus dans la plaine de Lyon. Pour le blé en 1979, sur une même parcelle, les rendements varient de 45 q/ha dans une zone où du colza a été enfoui (état sanitaire mauvais du blé) à 74 q/ha alors que la moyenne régionale était de 50 q/ha ;
- l'orge à Jargeau [TPG 14] : les rendements sont identiques aux rendements alentour[56].

55 Rendements faibles mais dus à une attaque parasitaire.
56 Pas d'autre précision dans le dossier.

* *LE MAÏS*

- le maïs à Jargeau [TPG 14] a un rendement acceptable[57] ;
- le maïs à Rennes a en 1986 (cinquième année de culture) un rendement très bon pour la région[58] ;
- dans la plaine de l'Ain [TPG 18], les rendements sont très variables : ainsi, à Ambronay les rendements varient de 36 q/ha (1977), 68 q/ha (1976) à 87 q/ha (1978, année à bilan hydrique excédentaire) ;
- les rendements en maïs sont variables (de 51 à 96 q/ha) à St-Pierre-de-Chandieu [TPG 23], seules des années climatiques très favorables ou de l'irrigation permettent d'obtenir des rendements corrects. Ainsi, en 1978 (figure 23) :
  - sur précédent maïs, du maïs irrigué a donné 69 q/ha,
  - sans précédent cultural : 71 q/ha
  - sur précédent colza enfoui en 1978 : 97 q/ha
  - alors que la moyenne de la région était de 80 q/ha ;

culture précédente	maïs	pas de culture	colza enfoui	moyenne de la région
rendement (maïs irrigué)	69 q/ha	71 q/ha	97 q/ha	80 q/ha

Figure 23 : Rendements en maïs en 1978 à St-Pierre-de-Chandieu (d'après [TPG 23]).

- à Sierentz [TPG 21], les rendements en maïs grain sont considérés comme honorables (39 q/ha sur un sol à mauvaise structure au printemps 1979 et 42 q/ha en 1980) à très corrects (69 q/ha pour une parcelle malgré un semis tardif en 1979 et 65 q/ha en 1980 ;
- maïs ensilage à Passy [TPG 17] après deux ans de prairie temporaire, les rendements s'échelonnent de 10,2 t ms/ha à 17,7 t ms/ha (figure 24) en fonction des paramètres irrigation[59] et présence de fines dans le sol reconstitué, ceci constitue d'excellents résultats, car dans le secteur les rendements sont de 10 t ms/ha.

Rendement en maïs	Sans fines	Avec fines
Sans irrigation	10,2 t ms/ha	13,9 t ms/ha
Avec irrigation	16,6 t ms/ha	17,7 t ms/ha

Figure 24 : Incidence sur le rendement en maïs d'ensilage de deux facteurs expérimentaux (d'après [TPG 17]).

Différents comptes-rendus d'expérimentation [TPG 21, TPG 23] mentionnent la difficulté d'obtenir de bons rendements avec le maïs, car il ne tolère pas les accidents de structure du sol (lit de semence avec des mottes très dures, compactage) ni les retards dans les opérations culturales. Ces problèmes sont moins aigus avec les cultures d'hiver.

57 Pas d'autre précision dans le dossier.
58 Données fournies dans le dossier sans calcul de rendement mais sur la base d'observations visuelles.
59 200 mm en quatre apports de juillet à août.

PLANCHE 8 . Des réalisations réussies.

[A11 m] *Photo Cemagref Delory I.*

Une culture de maïs de qualité.

[Menneville] *Photo Cemagref Delory I.*

Un champ de blé sur une ancienne carrière.

Les recherches bibliographiques menées ne nous ont pas permis d'obtenir pour les pays étrangers des rapports d'expérimentation de mise en culture. Nous avons obtenu soit des articles publiés dans des revues scientifiques, soit des guides de bonnes pratiques réalisés par des instituts de recherche ou des organismes ministériels. Nous n'avons donc quasiment pas d'information sur les cultures mises en place et sur leurs rendements dans les différentes conditions de restauration des sols.

Au Canada comme en Suisse, il n'est pas recommandé de cultiver des céréales comme le maïs directement après la remise en état. Une culture structurante est en effet nécessaire. En Suisse [50], il est recommandé au minimum trois ans complets de prairie à base de trèfle blanc ou de graminées ou à base de mélange de luzerne. Des céréales (mais pas le maïs) doivent être cultivées la première année en pratiquant des rotations courtes les premières années.

En Allemagne [33], sur sols réhabilités, la betterave à sucre, le blé, le seigle, la pomme de terre et l'orge sont cultivés. En France, généralement, la betterave à sucre et la pomme de terre sont exclues du fait des conditions difficiles d'accès aux parcelles au moment de la récolte (risque trop grand d'enfoncement avec les engins de récolte).
Selon les sites, les données obtenues sur les rendements varient :
- pour le blé de 35 % des rendements de la région (troisième année sur une parcelle trop proche de la nappe, [A13 m]) à 84 % (deuxième année) et 88 % (cinquième année) [A2 m] ;
- pour le colza, un rendement de 60 % de ceux de la région en quatrième année, [A2 m] ;
- pour l'orge, des rendements de 72 % (troisième année [A2 m]) à 84 % (première année [A8 m]) des rendements moyens ;
- pour le maïs, des rendements de 34 % de ceux de la région (deuxième année sur une parcelle trop proche de la nappe[60], [A13 m]) à 86 % (quatrième année [A2 m]).

3 - LE MARAÎCHAGE

Les sols maraîchers doivent présenter des caractéristiques particulières, ils doivent :
- assurer un réchauffement rapide à la sortie de l'hiver ;
- permettre le travail agricole à tout moment de l'année ;
- avoir une bonne perméabilité et une bonne exposition ;
- posséder une richesse en matière organique convenable (au minimum de 2 %) ;
- être en bon état sanitaire (c'est-à-dire être exempts de colonies d'insectes ou de spores de champignons pathogènes des cultures).

La structure idéale pour un sol maraîcher est classiquement définie par les répartitions granulométriques suivantes [TPG 5] :
- sables grossiers : 40 à 50 %,
- sables fins : 8 à 12 %,
- limons grossiers : 5 à 10 %,
- limons : 8 à 12 %,
- argiles : 10 à 15 %.

60 Dans ce cas, la proximité de la nappe a induit une baisse de production directe sur la culture mais aussi une forte concurrence herbacée car il n'y a pas eu de désherbage possible en raison de l'impossibilité d'accéder à la parcelle en temps voulu.

Des essais ont été menés avec de l'échalote et de la pomme de terre à Jargeau, les résultats sont moyens, mais les sols utilisés pour la reconstitution étaient de qualité médiocre.

A Criqueboeuf-sur-Seine [TPG 9], la première culture en 1980 a été des choux (chou vert et chou de Bruxelles) qui ont eu des rendements inférieurs de 20 % à ceux des parcelles en place, cependant ce décalage a été rattrapé l'année suivante. Des poireaux cultivés après les choux ont eu des rendements identiques à ceux du voisinage.

En Val-de-Loire à l'Ile-Charlemagne (près d'Orléans), des cultures de poireau et de céleri-rave ont été couronnées de succès[61].

En zone méditerranéenne, à Caromb[62] [TPG 6], une culture de tomate n'a pas été favorable (mauvais rendement et maturité trop tardive) en raison de la mise en place hors délai du fait d'un réaménagement qui avait pris du retard. Du melon dans les mêmes conditions a eu un rendement acceptable. D'autres cultures ont eu lieu par la suite avec des rendements acceptables (pomme de terre, piment et poivron). Ces cultures sont traditionnellement irriguées par gravité « à la raie », cette pratique nécessite un nivellement très soigneux sans contre-pente (qui arrête l'eau), ni pente trop forte (qui accélère la circulation de l'eau et ne permet pas l'alimentation en eau correcte d'une partie de la rangée).

Aucun des sites visités ne faisait l'objet de culture maraîchère.

4 - LA VIGNE ET L'ARBORICULTURE FRUITIÈRE

Sur le plateau de Coudoulet [TPG 7], des essais de remise en culture en zone AOC ont eu lieu, avec une sous-couche de sables et de graviers de 1,5 m, et 0,55 m de terre de découverte. Afin d'éviter les risques de maladies, des mesures prophylaxiques ont conduit à extraire les restes de racines du sol, après défonçage à la charrue. Il y a ensuite eu épandage de compost d'ordures ménagères, de fumure minérale, et plantation de cépage Grenache noir.

Les résultats montrent une production inférieure à 27 % sur 5 ans liée à un poids des baies plus faible. La vigueur des ceps est également moindre (-34 % sur 4 ans). Le vin a été jugé différent avec pour les années 1992 et 1993 un vin jugé de meilleure qualité[63] que la parcelle en place. La parcelle réaménagée est plus précoce au débourrement mais avec une plus grande sensibilité au *Botrytis*. A maturité, elle est plus précoce deux années sur cinq et plus tardive deux années sur cinq. La visite de terrain de ce secteur ne nous a pas permis de recueillir d'informations supplémentaires.

61 Termes sans plus de précision du dossier d'expérimentation [TPG 25].
62 Le dossier ne contient pas de renseignements plus précis.
63 Jugement d'un panel de dégustateurs.

[A4 m] *Photo Cemagref Delory I.*

PLANCHE 9 . Exemple de réaménagement agricole viticole de qualité.

Cette parcelle a été réaménagée et restituée à l'agriculture en 1990. Il n'existait que très peu de terre végétale sur ce site, ce sont donc presque exclusivement des stériles qui ont été remis. La terre végétale contient beaucoup de galets mais en pourcentage comparable aux parcelles en place voisines à vocation viticole.
La vigne sur la parcelle réaménagée a un rendement légèrement inférieur aux parcelles voisines en place. Cependant, le vin issu de la parcelle réaménagée est de qualité nettement supérieure à celui des parcelles en place.

Au Canada [77], il y a sur sol reconstitué, des productions de pêches, de cerises, de pommes et de vigne. Ces espèces sont sensibles aux conditions climatiques et doivent être installées dans de bonnes conditions de circulation de l'air. C'est-à-dire qu'il faut éviter les situations topographiques provoquant des stagnations d'air. Il faut ainsi éviter des carrières en fosse qui peuvent créer des poches de froid au profit des pentes douces et respecter une pente d'au minimum 1 %.

La production fruitière demande des sols profonds (1,2 m au minimum), bien drainés (40-60 % de porosité) en sols aérés et épais sans couche compactée même en profondeur. L'épierrage est recommandé avant plantation. Dans ces conditions, de bons résultats ont été enregistrés (rendements normaux). Pour cela, il faut un bon entretien : fertilisation de redressement et de gestion, mise en place de pieux pour les nouveaux arbres, programmes de taille, pesticides.

Quelques dossiers taxe parafiscale présentaient des projets d'installation de vergers (abricotier et olivier), aucun n'a été poursuivi à terme. Les sites retenus pour la phase terrain ne présentaient pas d'arboriculture.

Quelques cas particuliers [A2 m, A5 m, A8 m] présentent des rendements sur les parcelles réaménagées, meilleurs que ceux de parcelles en place (en raison en particulier d'une amélioration de la disponibilité en eau[64]).

Mais dans la majorité des autres cas, les rendements sont, pour les 4 premières années, inférieurs de l'ordre de 30 à 40 % par rapport à des parcelles non remaniées.

Cependant, si le réaménagement a été bien fait et que les cultures choisies ont été adaptées, la parcelle retrouve peu à peu des niveaux de rendements normaux ou proches de la normale. L'expérience étrangère montre que le respect d'une période de convalescence de la parcelle pourrait encore améliorer ces performances à niveau de qualité de réaménagement constant.

II - MISE EN PLACE ET ENTRETIEN DE LA CULTURE

La plupart des dossiers taxe parafiscale et des entretiens menés avec les agriculteurs mettent en évidence que les difficultés d'accès à la parcelle réaménagée constituent l'un des principaux handicaps. Cette absence de prévisibilité des passages de tracteurs et d'engins conditionne en effet, à la fois la préparation du lit de semence pour installer la culture, les différentes opérations culturales (et en particulier les désherbages et traitements phytosanitaires) et aussi la récolte. Un manque de portance à un moment crucial de la culture peut provoquer des pertes de rendement importantes.

1 - LA MISE EN PLACE DE LA CULTURE

La préparation du lit de semence est une étape importante pour plusieurs cultures, nous avons déjà signalé pour le maïs [TPG 21, TPG 23] qu'un lit de semence trop motteux peut fortement réduire le pourcentage de germination, donc les rendements. Plusieurs études signalent des rendements médiocres en raison d'une installation de la culture trop tardive par rapport à la date optimale, soit parce que la parcelle est trop humide en hiver pour installer du blé soit parce que le réaménagement a eu lieu avec du retard par rapport aux prévisions. Si, en phase expérimentale, on peut comprendre que la culture soit installée malgré le retard pour ne pas repousser d'un an l'expérimentation, en conditions agricoles, un engrais vert devrait être installé si la culture productive ne peut plus être mise en place dans de bonnes conditions.

2 - L'ENTRETIEN DE LA CULTURE

Quelques parcelles réaménagées présentant des phénomènes de compaction imposent l'emploi d'engins plus légers que ceux utilisés de manière courante [A13 m] et restreignent les périodes où le travail sur la parcelle est possible. Ainsi, après de fortes pluies, certaines

64 Liée à l'utilisation de fines de décantation.

parcelles sont inaccessibles pendant plusieurs semaines sous peine d'enlisement [A1 m, A13 m] ce qui contrarie fortement l'itinéraire technique de l'agriculteur. Ainsi, en automne pluvieux [A13 m] la récolte du maïs n'a pu être faite qu'en novembre alors qu'elle aurait dû avoir lieu début octobre.

Cependant, dans les parcelles réaménagées en conditions sèches et sans compactage, les opérations culturales sont semblables à celles d'une parcelle classique. Malgré tout, il nous semble que la parcelle réaménagée reste toujours un cas à part pour l'agriculteur et qu'il n'y interviendra qu'après avoir entretenu ses autres parcelles. Dans son esprit, la parcelle reste moins fiable que les autres et ne mérite pas le même investissement. Cette tendance serait à inverser pour au contraire, dès que les conditions sont favorables, intervenir en premier sur une parcelle plus délicate à suivre.

3 - L'IRRIGATION

La proximité de la nappe alluviale permet dans certaines situations de prévoir un bassin restant en eau, à proximité de la parcelle, qui servira de bassin de stockage d'eau pour l'irrigation. Dans d'autres cas, la nappe plus proche permet des forages plus faciles pour irriguer.

L'irrigation a été pratiquée à Passy [A8 m] : elle n'a pas entraîné de dommages sur la qualité des sols reconstitués et n'a pas modifié la stabilité structurale. Par contre, elle a eu des effets bénéfiques sur les rendements. Dans la plaine de l'Ain [TPG 18], seules les parcelles irriguées ont eu des rendements corrects en maïs.

En outre, l'amélioration des sols préexistants par reconstitution avec des fines de décantation permet souvent d'obtenir une meilleure réserve utile en eau et donc de diminuer les besoins en irrigation. La quasi-totalité des réaménagements incorporant des fines ont ainsi montré leurs qualités en année sèche ou de meilleurs rendements liés à une meilleure alimentation hydrique.

L'absence de prévisibilité de l'accessibilité des tracteurs sur la parcelle réaménagée est la contrainte principale exprimée par les agriculteurs pour la gestion de leur exploitation. Ne plus manipuler de terre humide et développer la phase de convalescence de la parcelle, sont deux des facteurs qui devraient améliorer l'accès à la parcelle en limitant les phénomènes d'enfoncement d'engins grâce à une meilleure structure du sol.

CHAPITRE 6

INTEGRATION DU REAMENAGEMENT

Ce chapitre va traiter de l'intégration de la parcelle réaménagée dans l'environnement avec, en particulier, un point sur le traitement des talus, mais il va aussi aborder de manière plus globale la concertation autour du réaménagement agricole entre le carrier et l'agriculteur.

I - LA STABILISATION DES TALUS

1 - LA PENTE DU TALUS

Quand une parcelle est réaménagée en décaissé, elle est reliée à la topographie en place par un talus dont la pente résulte d'un compromis à établir entre la perte de surface agricole et la possibilité d'avoir un talus stable (chapitre 1 paragraphe II-3).

Selon les pays, les pentes recommandées sont comprises entre 26° et 45°. En France, la priorité est mise sur le gain en surface agricole avec des pentes élevées (45°). En Grande-Bretagne, au contraire, les pentes sont soit très douces afin de rattraper la topographie en place par une pente cultivable, soit elles sont intégrées dans des dispositifs paysagers (haies, bocage).

2 - ACTIONS POUR STABILISER LES TALUS

Dans le cas d'une pente forte, il est très important de stabiliser les talus et d'éviter les ravinements et l'érosion.

Pour cela, 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.

En France [45], les principales études sur les stabilisations de talus ont pour objet les talus d'autoroute, donc avec des contraintes plus fortes et des moyens financiers beaucoup plus importants que dans le réaménagement de carrières. Cependant, les solutions méritent d'être citées.

Le laboratoire central des Ponts et Chaussées (voir annexe 2) 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, calcaires broyés ;
- de compacter les bords de 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 effets des 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 protections légères végétalisables : mulchs, broussailles broyées, filets de jute, géotextiles, paillages plastiques, grillages.

* *DE MAÎTRISER LES EAUX SUPERFICIELLES :*
- en filtrant les ruissellements ;
- en évacuant les eaux qui se rejoignent au point le plus bas du profil : par des fossés ou par un collecteur spécial[65] placé sur le talus à l'endroit le plus sensible à l'érosion.

3 - AMÉLIORER L'INSTALLATION DES VÉGÉTAUX

En France, peu de pratiques sont faites sur les talus bordant les parcelles réaménagées, ils sont généralement ensemencés et quelquefois fertilisés. Cependant, il est possible à faible coût d'améliorer l'installation de la végétation sur des talus.

En Savoie [2], sur les pistes de ski et les talus routiers à forte pente, un apport d'effluents d'élevage (lisier et fumiers) et de boues de station d'épuration est projeté sur les talus avant de pratiquer un semis hydraulique. Les résultats obtenus sont très intéressants : le talus témoin[66] a un taux de recouvrement herbacé de 40 % alors que les talus traités par amendement organique ont des taux de recouvrement de 85 %.

Vu les faibles hauteurs et pentes des talus bordant des parcelles réaménagées, l'utilisation de fumier épandu à l'aide d'un épandeur agricole à projection latérale pourrait être proposée.

Pour un semis hydraulique [29], dans une cuve on mélange :
- de l'eau (1 litre par m^2 à semer) ;
- 150 à 200 kg de graines par hectare ;
- 1 t/ha d'amendement organique ;
- un engrais apportant 60 à 80 unités d'azote par hectare ;
- un fixateur (de la cellulose à fibres longues[67]) à raison de 500 à 800 kg/ha.

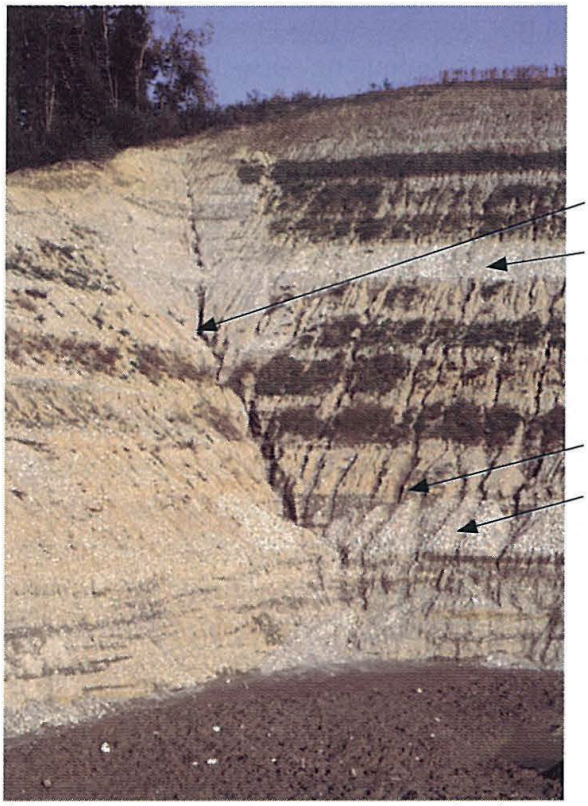
Le semis peut être recouvert d'une projection de paille bituminée ce qui active la germination (par effet de corps noir), freine l'évaporation et l'érosion.

Si le paillage bituminé n'est pas suffisant, des toiles de jute[68] peuvent être posées sur le sol. Elles retiennent l'eau et la libèrent lentement, freinent l'érosion et en se biodégradant, apportent de la matière organique au sol.

---

65 Collecteur utilisé dans les travaux publics pour acheminer les eaux sur les talus d'autoroute.
66 Sur lequel seul le semis hydraulique est pratiqué.
67 Provenant de pâte mécanique vierge et non de déchets de papeterie.
68 Procédé VERTOILE : il s'agit d'une structure maillée, biodégradable qui est composée de cellulose (80 %) et de lignine (20 %).

PLANCHE 10 . Problèmes d'érosion sur des talus à pente trop forte.



[F8Mo] *Photo Cemagref Delory I.*

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 de l'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.

En Italie [82], des essais de stabilisation de talus argileux ont montré que les meilleurs résultats étaient obtenus avec un mulch de paille et de goudron ou avec des nattes de jute. Un labour à 5 cm de profondeur joue également un rôle bénéfique dans la reprise des graines. Le semis hydraulique a de médiocres résultats, cette technique ne permettant pas seule le contrôle de l'érosion, elle doit être combinée avec des paillages et des mulchs.

Aux USA, l'utilisation de mulchs de paille et de goudron est fortement recommandée, mais, vu la phytotoxicité de l'asphalte, des alternatives de liants ont été recherchées. Les boues de fibre de bois (550 kg/ha) semblent donner d'excellents résultats.

Quand la pente des talus est forte (entre 26° et 45°), une stabilisation du talus par la mise en place d'une couverture végétale et parfois des aménagements spécifiques anti-érosion peuvent être prévus. Dans ce cas, des experts de talus routier pourront être consultés pour bénéficier de leur expérience.

II - LE CAS PARTICULIER DES BASSINS DE DECANTATION

Il s'agit ici des bassins de décantation de lavage de granulats. Nous avons traité le cas des boues de sucrerie dans le chapitre 2 paragraphe II-1-a.

PLANCHE 11 . Bassin de décantation encore en activité.

[Criqueboeuf] *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).

Nous avons montré dans ce rapport l'intérêt des fines de décantation dans la reconstitution de sol afin d'augmenter la profondeur de celui-ci et d'augmenter sa réserve en eau. Cependant, à part quelques expériences menées dans le cadre de la taxe parafiscale sur les granulats, peu de sites ont fait l'objet d'une utilisation raisonnée des fines qui s'accumulent dans les bassins de décantation. Dans la plupart des cas, c'est du devenir du bassin de décantation lui-même, quand il est plein, dont se préoccupent les carriers. Nous considérons pourtant que ce n'est pas la meilleure façon d'utiliser les fines de décantation et que des recherches devraient être menées pour permettre leur utilisation plus courante dans la reconstitution de sol.

Néanmoins, la mise en valeur agricole des bassins de décantation de fines est possible (Rennes, [TPG 20]). Il est recommandé de procéder de la façon suivante :

- ressuyage de la fosse ;
- creusement de fosses de drainage ;
- apport de 0,20 m de terre végétale ou de déblais ;
- mélange si possible au cultivateur rotatif à axe vertical ou à la machine à bêcher, sinon, un passage croisé de charrue puis de cultivateur et de la herse est recommandé ;
- épandage de compost d'ordures ménagères, au minimum 500 t/ha, au maximum 1 000 t/ha, selon la nature de la terre végétale. Cet apport peut être fractionné en 2 ou 3 passages ;
- décompactage avec sous-soleuse ou chisel ;
- introduction de vers de terre ;
- semis de prairie temporaire.

Les apports de compost d'ordures ménagères et de terre végétale sont intéressants pour ensemencer le milieu en microorganismes et en vers de terre. Sans apport de compost, la seule exploitation possible à court terme (dans les 5 ans) des bassins de décantation est celle de prairie fauchée, compte tenu de la faible portance des fines.

Ainsi, un site visité [A2 m] montre qu'au bout d'une dizaine d'années, la culture de blé sur un ancien bassin de décantation bien ressuyé permet de très bons rendements (figure 25) : meilleurs qu'une parcelle réaménagée dans de bonnes conditions. Néanmoins ce résultat n'a été acquis qu'au bout d'une période de jachère de 7 ans. En effet, dans les premières années de l'utilisation agricole, ce bassin n'était pas assez ressuyé et avait été mis en jachère en raison des difficultés d'accès dans la parcelle. Il s'agit presque dans ce cas d'une « convalescence forcée » qui n'a cependant pas bénéficié de l'amélioration liée à la mise en place d'une prairie améliorante.

type de parcelle	bassin ressuyé totalement	parcelle bien réaménagée	moyenne régionale
rendement en blé	95 q/ha	80 q/ha	70 q/ha

Figure 25 : Exemple de bons rendements sur un bassin de décantation ressuyé (d'après [A2 m]).

Le réaménagement agricole de bassins de décantation de fines est possible. Il pose cependant beaucoup de contraintes en particulier celle du temps nécessaire au ressuyage des fines et pendant lequel une colonisation de plantes aquatiques puis de ligneux (saules, peupliers, robiniers...) peut se faire naturellement.

Il paraît plus judicieux d'exploiter les fines pour leur capacité d'amélioration des autres sols à reconstituer sur l'exploitation plutôt que de vouloir transformer le bassin en parcelle agricole.

III - LA CONCERTATION AVANT ET PENDANT LE REAMENAGEMENT

Nous avons déjà mis en avant tout au long de cet ouvrage divers moments où la concertation entre le carrier et l'agriculteur améliore la qualité du réaménagement final. Nous allons ici développer un peu plus ce point.

1 - LA CONCERTATION CARRIER-AGRICULTEUR

Cette concertation doit avoir lieu en amont lors de la définition du réaménagement dans le dossier d'autorisation d'exploiter afin de bien définir les contraintes des deux partenaires. Par exemple la taille des parcelles, l'épaisseur de terre, le calendrier de rendu des terres doivent être négociés (ainsi que les fluctuations acceptables : il paraît en effet ridicule de s'en tenir à un calendrier fixe et, pour le respecter, manipuler la terre humide).

La concertation pourrait également permettre une meilleure compréhension des deux parties en ce qui concerne le drainage. En effet, il arrive que le carrier propose de réaliser un drainage qui lui semble être la solution à d'éventuels compactages ou remontées de nappe. Il a du mal à comprendre le refus de l'agriculteur qui, connaissant mieux son terrain, sait que le drainage par des drains mis en terre ne sera pas efficace (nappe trop haute qui empêche l'écoulement et l'évacuation de l'eau ou terre trop compactée) mais qu'un modelé en bosse - bien que moins coûteux - sera plus adapté à sa parcelle ([A1 m, A2 m, A4 m]).

L'implication de l'agriculteur devrait également avoir lieu lors de la phase de remise en état. En effet, même si la situation « d'avoir toujours l'agriculteur sur son dos » n'est pas très confortable pour le carrier, la concertation, les explications des contraintes et les visites sur le terrain en cours de réaménagement nous paraissent intéressantes. Certains réaménagements sont ainsi de qualité variable pour une même carrière en fonction de la vigilance de l'agriculteur (cas [A8 m] où le réaménagement était sous-traité à une entreprise extérieure).

Une intervention de l'agriculteur [A9 M] qui a conseillé un mélange de stériles avec la terre végétale pour minéraliser un peu celle-ci s'est révélée concluante. Que les suggestions de l'agriculteur puissent être entendues et, quand cela est possible, réalisées, lui permet de mieux s'approprier le réaménagement plutôt que d'être uniquement en situation de contestation.

2 - L'IMPLICATION DU CARRIER

De la même manière, l'implication d'un responsable de la carrière (équipe spécialisée, responsable interne environnement) est un gage de qualité et d'amélioration des pratiques ([A3 m, A11 mo]). Il s'agit principalement d'un travail d'animation et de soutien de l'équipe technique par quelqu'un qui au niveau de la société connaît les exigences de l'exploitation, mais a aussi des exigences fortes en matière de qualité du travail.

D'une manière comparable, l'implication globale de l'entreprise qu'il s'agisse d'un Plan Environnement Entreprise (avec l'ADEME), de la participation à des trophées environnement (en interne à la société ou au plan national ou européen), de la certification selon les normes NF permet une reconnaissance du travail effectué par chaque employé et une appropriation d'une technicité (chacun comprend pourquoi on lui demande de faire les choses de telle manière ; le résultat acquis prouve le bien fondé des efforts consentis). Les journées portes ouvertes[69] et l'accueil d'écoles permettent également cette prise en compte par le personnel de la carrière de l'intérêt d'un travail bien fait.

3 - LE TRANSFERT DE LA PARCELLE À L'AGRICULTEUR

Pour qu'un réaménagement soit de qualité, il faut que la parcelle assure à l'agriculteur :
- un rendement acceptable et reproductible quelles que soient les conditions climatiques ;
- une réalisation pas trop contraignante de son itinéraire technique.

Si ces conditions ne sont pas satisfaites, souvent, dans le contexte actuel de gel des terres, les parcelles réaménagées sont les premières de l'exploitation à être mises en jachère.

Si le carrier a une part de responsabilité dans la qualité de la parcelle remise en état, l'agriculteur en a une aussi qu'il méconnaît. En effet, il nous semble que l'agriculteur ne se rend pas compte que la parcelle qui lui est rendue est fragile : le sol a été remanié, la sous-couche est différente, parfois de bien moindre épaisseur.

Une communication forte devrait avoir lieu en direction de l'agriculteur, afin qu'une remise en état potentiellement de qualité ne soit pas dégradée par des cultures trop précoces.

Même si ce point sort du cadre strict de l'étude, il nous paraît important de mentionner qu'à tous les niveaux, il faut de la souplesse. En particulier, il nous semble qu'un peu plus d'ouverture de la part de l'administration responsable de la délivrance des autorisations d'exploiter et des procès verbaux de récolement pourrait améliorer la qualité de certains réaménagements et leur durabilité. En effet, il est aberrant que pour respecter de manière stricte (quelques mois) un plan de phasage, le décapage ou la remise en état soit fait sous la pluie.

Toute concertation, de la souplesse dans le plan de phasage pour s'adapter au mieux aux contraintes du terrain et du climat vont dans le sens d'une meilleure qualité du réaménagement.

69 Elles permettent également une meilleure acceptation et intégration de la carrière dans son environnement social, mais le rôle de motivation interne est très important.

CONCLUSION

Par rapport aux premiers réaménagements agricoles menés dans les années 1980, les carriers ont fait de gros efforts pour améliorer la qualité des terres rendues à l'agriculteur. Mais ces efforts doivent être poursuivis.

D'une manière théorique, la méthode de réaménagement est désormais bien définie. Cependant, tous les retours d'expérience ne sont pas encore intégrés dans la pratique courante des réaménagements agricoles.

Les principaux points techniques qui pourraient être améliorés dans la pratique par les carriers concernent :
- le respect impératif de conditions sèches pour manipuler l'horizon minéral et la terre végétale : en effet, la quasi totalité des résultats médiocres observés proviennent des conséquences des manipulations de terre humide ;
- 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.

Pour les autres points, il s'agit plus de convaincre les opérateurs (conducteur d'engin mais aussi agriculteur) de l'effet de leurs différentes actions. Dans ce but, des opérations de communication pourraient être mises en place :
- au sein des entreprises entre le conducteur d'engin et le responsable de la carrière pour faire prendre conscience des conséquences de certains gestes : transport de terre humide, roulement sur un niveau remis en place ;
- entre carrier et agriculteur à toutes les étapes afin que les compétences de chacun soient en synergie ;
- vers l'agriculteur afin de lui faire prendre conscience que sa « parcelle est convalescente » et qu'elle ne peut pas supporter une activité agricole classique immédiatement après remise en état. Des expérimentations pourraient être menées sur des parcelles réaménagées, afin de comparer sur 7 à 8 ans les rendements entre une moitié de la parcelle cultivée directement sans précautions et l'autre moitié en prairie fauchée pendant les trois premières années.

Ce dernier point est très important à mettre en place car il faut noter que 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. En effet, les pratiques agricoles classiques sur les parcelles autrefois expérimentales ont supprimé les possibilités d'étudier 10 ans après les variations de rendement des anciens protocoles mis en place. Les agriculteurs ont cultivé toutes les placettes de la même manière et, au mieux, les résultats de rendement obtenus concernent l'ensemble de la parcelle reconstituée et non chaque plot expérimental.

GLOSSAIRE [70]

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).

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).

Arable (terre) : utilisé dans ce rapport dans son sens large : c'est la partie supérieure , meuble du sol (horizon organique et horizon minéral).

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).

Compactage : mécanisme de diminution de l'espace poral :
- hydrique : avec perte d'eau par dessiccation ;
- mécanique : à teneur en eau constante, par la pression exercée par des engins circulant sur le sol ou par la charge animale.

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.

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 du niveau de fertilité du sol ;
- l'amélioration de la structure du sol ;
- la stimulation de la vie microbienne dans le sol ;
- la protection du sol contre l'érosion.

---

70 Les définitions sont principalement issues du Dictionnaire de Sciences du sol [66].

Epigés (vers de terre) : vers de terre qui vivent uniquement dans la litière et n'ont aucune action sur le sol.

Fines de décantation : matériau limoneux issu de la décantation dans un bassin des eaux résiduaires de lavage de granulats.

Fortage : redevance payée au propriétaire du terrain par le carrier, fixée au prorata du volume de gisement enlevé.

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.

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.

Inoculation : procédé qui consiste à enrober les graines de légumineuses avant le semis avec une culture de la ou les souches appropriées de Rhizobium. Elle active la formation des nodosités racinaires (siège de la symbiose sol-plante qui permet de fixer l'azote atmosphérique).

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 champ 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 de la profondeur faible (< 1m) et irrégulière du sommet d'un horizon peu perméable (par exemple compacté) ;
- soit du fait d'irrégularités (métriques à décamétriques) de la surface du sol (microdépression, changement de pente).

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.

Régaler : action d'étaler la terre pour aplanir le terrain.

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.

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.

BIBLIOGRAPHIE

RAPPORTS FINANCES PAR LA TAXE PARAFISCALE SUR LES GRANULATS

[TPG 1] Conditions à observer pour un réaménagement agricole des carrières, 1977, comité de gestion de la taxe parafiscale sur les granulats, BDPA - 012.EG.039

[TPG 2] Etude des potentialités mellifères des carrières sèches de Franche-Comté à des fins de réaménagement agricole, premier rapport d'activité, novembre 1988, CPIE de Besançon - 060.025.010

[TPG 3] Utilisation des boues de lavage dans le réaménagement des carrières, 1986, Cemagref de Grenoble, CETE de Lyon, LRPG de Clermont-Ferrand - 041.EG.098

[TPG 4] 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

[TPG 5] Réaménagement agricole de la zone des Quinze Sols à Blagnac (Haute-Garonne), essais agricoles et études de réhabilitation agricole d'ensemble, 1985, DDA de Haute-Garonne, Société d'aménagement foncier et d'établissement rural de Gascogne, ENSA de Toulouse, BRGM -054.031.023

[TPG 6a] Opération pilote de réaménagement agricole à Caromb (Vaucluse), janvier 1981, BRGM - 023.084.011

[TPG 6b] Opération pilote de réaménagement agricole à Caromb (Vaucluse), rapport final, décembre 1983, BRGM - 023.084.011

[TPG 7a] Etude du réaménagement des anciennes carrières du plateau du Coudoulet à Orange (Vaucluse), décembre 1978, BDPA, BRGM - 016.084.006

[TPG 7b] Opération pilote expérimentale de remise en état viticole de carrière en zone AOC dans le Vaucluse (Coudoulet, Orange), février 1988, Syndicat général des Vignerons réunis des Côtes-du-Rhône - 053.EG.133

[TPG 7c] Opération pilote expérimentale de remise en état viticole de carrière en zone AOC dans le Vaucluse (Coudoulet), compte-rendu technique 1992, Syndicat général des Vignerons réunis des Côtes-du-Rhône - 053.EG.133

[TPG 8] Réaménagement agricole d'une gravière à St-Waast, commune de Couffouleux, Tarn, rapport technique fin de travaux 1986, Société d'Aménagement Foncière Aveyron-Lot-Tarn - 052.081.009

[TPG 9a] Démonstration de remise en état de carrières en Haute-Normandie l'exemple de Criquebœuf-sur-Seine (Eure), 1981, Diren, BDPA - 031.027.008

[TPG 9b] Démonstration de remise en état de carrières en Haute-Normandie l'exemple de Criquebœuf-sur-Seine (Eure), bilan et synthèse, 1985, Chambre d'agriculture de l'Eure - 031.027.008

[TPG 10] Démonstration de réaménagement agricole de carrière à Crotenay (Jura), juillet 1983, BDPA, Société des carrières Pernot

[TPG 11a] Opération pilote de réaménagement agricole d'une carrière à Cuiry-les-Chaudardes, rapport sur le suivi agricole des deux campagnes de réaménagement, juin 1981, Chambre d'agriculture de l'Aisne - 022.002.012

[TPG 11b] Réaménagement agricole d'une carrière à Cuiry-les-Chaudardes lieu dit le champ tortu, 1978-1981, Chambre d'agriculture de l'Aisne - 022.002.012

[TPG 12a] Démonstration régionale de remise en état de carrière à Flavigny (Meurthe-et-Moselle), 1981, BDPA, Société des sablières de Richardmesnil - 033.54.017

[TPG 12b] Remise en état agricole de carrière à Flavigny (Meurthe-et-Moselle) compte-rendu annuel de suivi des cultures, 1982, Chambre d'agriculture de Meurthe-et-Moselle, Société des sablières de Richardmesnil - 033.54.017

[TPG 13a] Réaménagement agricole exemplaire de la carrière du «Gatelard» à Goven, rapport de synthèse des travaux, décembre 1978, Service industries et mines de Bretagne, BDPA - 020.035.007

[TPG 13b] Réaménagement agricole exemplaire de la carrière du «Gatelard» à Goven, compte-rendu de visite, avril 1979, Service industries et mines de Bretagne, BDPA - 020.035.007

[TPG 14a] Expérience de réaménagement agricole de la carrière de Jargeau (Loiret), première campagne 1976, BDPA - 003.045.004

[TPG 14b] Expérience de réaménagement agricole de la carrière de Jargeau (Loiret), rapport de synthèse, 1976-1977, 1978, BDPA - 003.045.004

[TPG 15] Opération pilote de réaménagement à des fins agricoles dans le département de la Marne : réaménagement de la carrière de Juvigny (Marne), UNICEM, URPG Champagne Ardennes - 025.051.005

[TPG 16] Démonstration de réaménagement agricole de carrière à Misy-sur-Yonne entreprise Morillon Corvol, compte rendu des travaux de la 2ème tranche d'aménagement déc. 1979, BDPA - 016.077.008

[TPG 17] Etude expérimentale du réaménagement agricole de la plaine des îles à Passy, rapport de synthèse 1982-1985, Cemagref, Groupement de Grenoble, division APMN - 042.074.011

[TPG 18] Expérience de réaménagement agricole des carrières de la plaine de l'Ain (Ste-Julie, Ambronnay), 1976-1978, BDPA Chambre d'agriculture de l'Ain - 003.001.001

[TPG 19] 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 20] Etude expérimentale de reconstitution de sol en vue de la remise en état agricole des gravières avec appoint de compost d'ordures ménagères, rapport de synthèse, 1981-1985, mai 1987, AUDIAR, District urbain de l'agglomération rennaise - 040.035.011 (025.035.008)

[TPG 21a] Opération pilote de réaménagement agricole de carrières pour la région Alsace : sablières de Sierentz, compte-rendu de chantier, 1978-1979, Sablières de Sierentz, Chambre d'agriculture du Haut Rhin - 022.068.009

[TPG 21b] Opération pilote de réaménagement agricole de carrières pour la région Alsace : sablières de Sierentz, compte-rendu agricole, 1979, Sablières de Sierentz, Chambre d'agriculture du Haut Rhin - 022.068.009

[TPG 21c] Opération pilote de réaménagement agricole de carrières pour la région Alsace : sablières de Sierentz, 1980, Sablières de Sierentz, Chambre d'agriculture du Haut Rhin - 022.068.009

[TPG 21d] Opération pilote de réaménagement agricole de carrières pour la région Alsace : sablières de Sierentz, compte-rendu de chantier, 1981, Sablières de Sierentz, Chambre d'agriculture du Haut Rhin - 022.068.009

[TPG 22a] Démonstration de réaménagement agricole de carrière à St-Georges-sur-Eure entreprise Morillon Corvol, compte rendu des travaux de la première tranche d'aménagement déc. 1979, BDPA - 021.028.003

[TPG 22b] Démonstration de réaménagement agricole de carrière à St-Georges-sur-Eure entreprise Morillon Corvol, rapport de synthèse octobre 1980, BDPA - 021.028.003

[TPG 22c] Démonstration de réaménagement agricole de carrière à St-Georges-sur-Eure entreprise Morillon Corvol, suivi de culture octobre 1981, BDPA - 021.028.003

[TPG 22d] Démonstration de réaménagement agricole de carrière à St-Georges-sur-Eure entreprise Morillon Corvol, suivi de culture octobre 1984, Chambre d'agriculture d'Eure-et-Loire - 044.028.008

[TPG 23a] Démonstration de réaménagement agricole de carrière à St-Pierre-de-Chandieu (Rhône), compte rendu de la campagne 1980, SUAD, Chambre d'agriculture du Rhône - 007.069.003

[TPG 23b] Démonstration de réaménagement agricole de carrière à St-Pierre-de-Chandieu (Rhône), rapport de synthèse, janvier 1980, Entreprise Roméro, BDPA - 007.069.003

[TPG 23c] Remise en état à des fins agricoles et remise en culture des carrières : démonstration de St-Pierre-de-Chandieu, rapport de synthèse, Chambre d'agriculture du Rhône, déc. 1985 - 025.069.007

[TPG 24] Démonstration régionale de remise en état agricole de carrière à Thézan-les-Béziers (Hérault), avril 1985, DDA de l'Hérault, DRIRE Languedoc Roussillon, BDPA - 047.034.006

[TPG 25] Expérience de réaménagement agricole sur carrières remblayées dans le Val-de-Loire (Sully-sur-Loire, Baule, Ile Charlemagne : Loiret), rapport de synthèse, 1978, Ministère de l'environnement, BDPA - 009.045.007

ARTICLES SCIENTIFIQUES, RAPPORTS ET GUIDES DE BONNE PRATIQUE

[1] ADEME, Cemagref, 1999 - *Utilisation des déchets organiques en végétalisation, guide de bonnes pratiques, données et références,* ADEME éditions, Angers, 112 p.

[2] 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

[3] Allen D.F., 1983 - Quarry site rehabilitation and afteruse, *Surface mining and quarrying, symposium,* october 1983, Bristol : 89-97

[4] Alsac J.B., Chauvel F., Chazot S., Chevin C., Couvreur S., Croize Pourcelet V., Eudes X., Feuvrier G., Levite H., Toumi I., Turenne J., 1993 - Gestion et réaménagement des carrières de silice en Seine-et-Marne, *Environnement et situations locales promotion 93-95,* ENGREF, Paris, 17 p.

[5] 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

[6] Archaux F., Donato M., Duclos P., Gozal M., Guespereau M., Herlemont B., Lefebvre N., Moreon E., Toulouse E., 1997 - La carrière de basalte des Côtes de Clermont, *Environnement et situations locales promotion 97-99,* ENGREF, Paris, 15 p.

[7] 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

[8] AURG, 1998 - Le réaménagement des carrières de la région grenobloise en plaine de Bièvre et dans la vallée de l'Isère, document I, AURG, Conseil Général de l'Isère, 35 p.

[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] Berger A.L., Brule P., Brunet E., Clergeot D., Demeure dit Lotte M., Dreno A.L., Frey P., Leclerc F., Tiengou T., Trabelsi A. 1995 - Exploitation et après exploitation des granulats dans les vallées de l'Oise et de l'Aisne, *Environnement et situations locales promotion 95-97,* ENGREF, Paris, 18 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] Brizay A., Brun G., Clerc M.A., Faysse N., Frequelin A., Demassiac J.C., Perreau B., Picard M.C., Sinet I., Thibault Q., 1996 - Les granulats alluvionnaires dans la vallée de la Moselle, *Environnement et situations locales promotion 96-98,* ENGREF, Paris, 12 p.

[15] Bruhier S., 1992 - *Méthodologie de réaménagement de carrière,* stage d'étude 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 B.I.* **304** : 55-67

[18] Bureau d'études EI, n. d. - Régénération végétale des sites par la restructuration des sols, Avrigny, 14 p.

[19] Burley J.B., Thomsen C.H., 1990 - Application of an agricultural soil productivity equation for reclaiming surface mines : clay county, Minnesota, *International Journal of Surface Mining and Reclamation* **4** : 139-144

[20] Canadian land reclamation association, 1987 - *Proceedings of the twelfth annual meeting,* Laurentian University, Sudbury, Ontario, 260 p.

[21] 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

[22] Chen Y., Inbar Y., Hadar Y., 1988 - Composted agricultural wastes as potting media for ornamental plants, *Soil Science* **145** *(4)* : 298-303

[23] Chichester F.W., Hauser V.L., 1984 - Revegetation of minespoils constructed from lignite overburden in east central Texas, *Reclamation and Revegetation Research* **3** : 137-152

[24] Chong C., Hamersma B., Bellamy K.L., 1998 - Comparative rooting of deciduous landscape scrub cuttings in media amended with paper mill biosolids from four different sources, *Canadian Journal of Plant Science* **78** *(4)* : 517-526

[25] Cuenca G., De Andrade Z., Escalante G., 1998 - Arbuscular mycorrhizae in the rehabilitation of fragile degraded tropical lands, *Biol. Fertil. Soils* **26** : 107-111

[26] 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

[27] Defrance G., Mandil C., 1995 - Circulaire interministérielle du 11 janvier 1995 concernant le schéma départemental des carrières, Paris, 18 p.

[28] 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.

[29] Dinger F., 1997 - *Végétalisation des espaces dégradés d'altitude,* Cemagref éditions, 139 p.

[30] 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.

[31] Dinger F., Tardif P., 1996 - Utilisation des boues de papeterie en végétalisation de carrières, Cemagref, Grenoble, 16 p.

[32] Dworschak U.R., 1997 - Earthworm populations in a reclaimed lignite open-cast mine of Rhineland, *European Journal of Soil Biology* **33** *(2)* : 75-81

[33] Emmerling C., Liebner C., Haubold-Rosar M., Katzur J., Schröder D., 1998 - Impact of organic matter application on biomass and activity of recultivated soils in the Lusatian coal mining region, communication personnelle, 23 p.

[34] Entreprise Spada, Société du canal de provence, 1986 - Utilisation des boues de lavage de granulats à des fins de reconstitution des sols, 30 p.

[35] Frost B. D., 1983 - Restoration to agriculture of sand and gravel workings a practical approach, *Surface Mining and Quarrying symposium,* october 1983, Bristol : 75-87

[36] Gagen P., Gunn J., 1987 - Restoration blasting in limestone quarries, *Explosives Engineering* autumn 14-15

[37] 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

[38] Gonzales C.M., Jimeno C.L., n. d. - Technicas de restauracion de graveras, Asociacion nacional espanoma de fabricantes de aridos (ANEF) : 361-382

[39] 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

[40] Gunn J., Bailey D., 1993 - Limestone quarrying and quarry reclamation in Britain, *Environmental Geology* **21** : 167-172

[41] 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.

[42] 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

[43] 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

[44] 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.

[45] 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

[46] Hewgill D., 1986 - Soil storage, *Mineral Planning* **26** : 26-29

[47] 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

[48] HMSO, 1996 - *The reclamation of mineral workings to agriculture*, HMSO, Londres, 148 p.

[49] HMSO, 1996 - *Mineral planning guidance : the reclamation of mineral workings*, MPG7, The Stationery Office, London, 53 p.

[50] 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.

[51] Jean Lefebvre Méditerranée, n.d. - Carrière de Châteuneuf-les-Martigues, Jean Lefebvre Méditerranée, Aix-en-Provence, 5 p.

[52] Jefferson R.G., 1984 - Quarries and wildlife conservation in the Yorkshire Wolds, England, *Biological Conservation* **29** : 363-380

[53] 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

[54] Jimeno C.L., del Milagro Escribano Bombin, n. d. - Technicas de restauracion de canteras, Asociacion nacional espanoma de fabricantes de aridos (ANEF) : 383-404

[55] JO du 10 décembre 1997 - Epandage des boues issues du traitement des eaux usées, décret n°97-1133 du 8 décembre 1997

[56] 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

[57] 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

[58] Joinet H., 1998 - Boues d'épuration : des règles de sécurité renforcées, *Le Moniteur* **4925**

[59] 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

[60] Knight J., McCarron S.G., McCabe A.M., Sutton B., 1999 - Sand and gravel aggregate resource management and conservation in Northern Ireland, *Journal of Environmental Management* **56** : 195-207

[61] Lafarge Bétons Granulats, 1997 - Lafarge Bétons Granulats et l'environnement : constat et ambitions, Lafarge Bétons Granulats, Saint Cloud, 55 p.

[62] Laval M., 1995 - *Les carrières : nuisances et exemples de réaménagements,* rapport BRGM R 38789, Orléans, 28 p.

[63] Lilin C., 1987 - *Techniques biologiques de conservation des sols en Haiti,* FAO, 36 p.

[64] 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

[65] Maiaux C., Lentz A., Pilloy J.C., 1984 - Réaménagement pilote des gravières avec des ordures ménagères dans la vallée de la Moselle à Pont-à-Mousson, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* **133** : 33-47

[66] McCormack D.E., 1977 - Legislating soil reconstruction on surface-mined land in the United States, *Minerals and the Environment* **6** :154-156

[67] McRae S.G., 1979 - The agricultural restauration of sand and gravel quarries in Great Britain, *Reclamation Review* **2** : 133-141

[68] McRae S.G., 1989 - The restoration of mineral workings in Britain - a review, *Soil Use and Management* **5** *(3)* : 135-142

[69] 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

[70] McRae S.G., 1998 - Heights of soil storage heaps, com pers., 1p.

[71] Maubert F., Sauter M., 1985 - Expériences françaises de réaménagement de sites miniers, *Hydrogéologie* **2** : 159-167

[72] 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

[73] 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)*

[74] Ministère de l'Agriculture, nd. - La remise en état des carrières à des fins agricoles, dépliant Ministère de l'Agriculture, Paris

[75] Ministry of natural resources, 1982 - Agriculture and the aggregate industry, Ontario, *Industrial mineral background paper* **3**, 39 p.

[76] Ministry of natural resources, 1984 - Pit and quarry rehabilitation, the state of the art in Ontario, 16 p.

[77] Ministry of natural resources, 1985 - Rehabilitation of sand and gravel pits for fruit production in Ontario, *Industrial mineral background paper 6*, 24 p.

[78] Ministry of natural resources, 1987 - Sand and gravel pit rehabilitation in northern Ontario, 24 p.

[79] 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

[80] Morillon Corvol, n.d. - Plan Environnement Entreprise, Morillon Corvol, Rungis, 22 p.

[81] Muller S., Dutoit T., Alard D., Grevilliot F., 1998 - Restoration and rehabilitation of species rich grassland ecosystems in France : a review, *Restoration Ecology 6 (1)* : 94-101

[82] 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

[83] 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.

[84] Ramsay W.J.H., 1986 - Bulk soil handling for quarry restoration, *Soil Use and Management 2 (1)* : 30-39

[85] Recyval, EDF, CNPE du Bugey, 1993 - Valorisation agricole des boues minérales de la station d'épuration, 31 p.

[86] 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

[87] 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

[88] Russel M.J., Roberts B.R., 1986 - Revegetation of coal mine spoil using pasture on the darling downs of queensland, Australia, *Reclamation and Revegetation Research 5* : 509-519

[89] 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

[90] 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

[91] Scullion J., Mohamed R.A., Richardson H., 1988 - Effect of storage and reinstatment procedures on earthworm populations in soils affected by opencast coal mining, *Journal of Applied Ecology 25* : 233-240

[92] Service cantonal de protection des sols Suisse, 1992 - Le travail du sol : une synthèse, 15 p.

[93] SFTRF, 1997 - Autoroute de la Maurienne, respecter intégrer valoriser l'environnement, Société Française du Tunnel Routier du Fréjus, 15 p.

[94] Société Suisse de pédologie, 1984 - Exploitation du gravier et agriculture, 42 p.

[95] 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

[96] Sort X., Alcaniz J.M., 1999 - Effect of sewage sludge amendment on soil aggregation, *Land Degradation and Development* **10** : 3-12

[97] 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.

[98] Sweigard R.J., 1990 - Reclamation of surface-mined land for agricultural use, *International Journal of Surface Mining Reclamation* **4** : 131-137

[99] Thomas H., 1992 - *Le réaménagement des carrières au travers de l'histoire de la Société GSM*, rapport de stage 2ème année, ENGREF, Paris, 280 p.

[100] 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.

[101] UNICEM, 1996 - L'exploitation des carrières régime juridique, *Matériaux de Construction et Produits de Carrière*, numéro spécial ***683***, 48 p.

[102] 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.

[103] Université de Laval (Canada), groupe de coordination sur les bois raméaux, 1997 - Impact du bois raméal fragmenté sur la dynamique de la mésofaune du sol, 51 p.

[104] US environmental protection agency, n. d.- Erosion and sediment control, surface mining in the eastern USA, EPA Technology transfer seminar publication, 83 p.

[105] Watkin E.M., Watkin J., 1983 - Keep reclamation costs low with effective revegetation, *Canadian Mining Journal* **104** *(8)* : 33-36

[106] 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

Résumé des recommandations anglaises

Issue de la bibliographie : [48] HMSO, 1996 - *The reclamation of mineral workings to agriculture*, HMSO, Londres, 148 p.

TABLEAU DE BORD POUR S'ASSURER D'UN REAMENAGEMENT DE BONNE QUALITE

1 Etape préliminaire au réaménagement :

- mener des réunions de concertation sur le projet.

- proposer un plan de réaménagement sachant que, si nécessaire, des points pourront être modifiés lors de la réalisation du réaménagement.

- s'assurer que l'équipe chargée du réaménagement soit motivée.

- inclure des plans des caractéristiques de l'occupation actuelle du sol et de l'environnement sur le site et autour du site.

- les informations géologiques doivent préciser l'épaisseur et le type de la découverte du gisement, la nature et la configuration du toit de l'excavation ; les volumes doivent être estimés avec soin.

- inclure des informations détaillées sur l'hydrologie du site : ceci est nécessaire pour planifier la topographie et le drainage du site reconstitué.

- fournir des informations techniques et des cartographies de la qualité des sols identifiés sur le site. Inclure les caractéristiques telles le climat et les données topographiques.

- inclure des plans montrant la topographie finale du site restauré en prenant en compte le drainage du site.

- joindre des notes techniques décrivant précisément les opérations de réaménagement et les contraintes à respecter.

2 Etape du réaménagement :

- rédiger un manuel de restauration pour chaque site. Il doit comporter des informations sur l'avant-exploitation, la stratégie de restauration et le programme de « convalescence ».

- être sûr que les termes techniques sont clairement définis et compris de la même manière par toutes les parties.

- conserver tous les documents décrivant toutes les opérations faites.

- être sûr que l'équipe impliquée dans le réaménagement est correctement dirigée (en particulier pour les opérations sous-traitées).

- être sûr que le dossier du réaménagement est disponible pour tous les intervenants.

- les mouvements de déplacement de sol et toutes les interventions sur le sol doivent être menées en conditions sèches ou si le sol est à l'état friable. Il faut être attentif que chaque couche de sol respecte ces conditions.

- éviter de mélanger les matériaux.

- supprimer les niveau compactés après la restauration. Ceci peut nécessiter de ripper à une profondeur supérieure aux couches déposées. Le sous-solage et le rippage peuvent être éventuellement pratiqués de manière régulière pendant la période de convalescence.

- se souvenir que des pentes, des profondeurs de sol et un drainage adéquats sont nécessaires pour maintenir un usage agricole.

- quand c'est possible, la topographie et l'aspect définitif doivent être similaires au paysage agricole environnant.

3 Période de convalescence :

- un drainage doit être installé aussi vite que possible. S'assurer que les exutoires des drains ne risqueront pas d'être bouchés ou engorgés.

- les parcelles doivent être régulières et les éléments reconstruits dans le paysage (haies, fossés...) ne doivent pas gêner les opérations agricoles. S'assurer que l'utilisation agricole de la parcelle ne nuit pas à d'autres secteurs restaurés pour d'autres usages (en eau ou écologique par exemple).

- la période de convalescence est une étape importante du programme de réaménagement.

- faire des réunions « de convalescence » pour discuter du travail qui a été fait et se mettre d'accord sur les propositions pour la saison de culture suivante.

- disposer une fois par an des données sur la période de convalescence.

- ne pas prendre des engagements à long terme avec un utilisateur final sans être sûr de ses compétences.

- l'utilisateur final du sol doit recevoir des conseils sur la façon de conduire la culture sur un sol reconstitué.

- être patient. Une restauration de qualité est une opération longue. Beaucoup de restaurations potentiellement de qualité sont dégradées par une utilisation inadéquate en particulier par un retour trop rapide à un usage agricole intensif.

Annexe 2

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

Tableau 1
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

Tableau 2
Protections des surfaces

Protéger les 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 préensemencés
- 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

Revêtements 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

---

TABLEAU 3
Modulation des talus

Intégrer les talus routiers dans le paysage

Adoucissement 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
- Textol
- Murs cellulaires à encoffrement
- Gabions

Soutènements rigides avec barbacanes
- Murs-poids en béton
- Murs cantilever et palplanches

Soutènement ancrés ou cloués

Tableau 4
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 paille 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

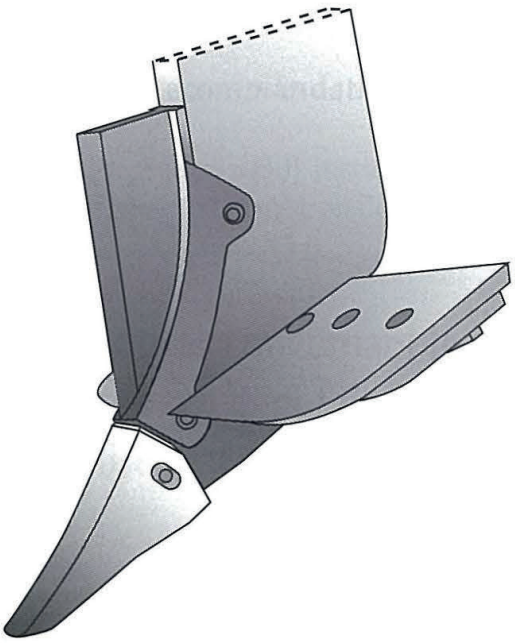
Traitements floculants

Bassins de retenue d'orage sur autoroutes et en milieu périurbain (y compris stations de sports d'hiver)

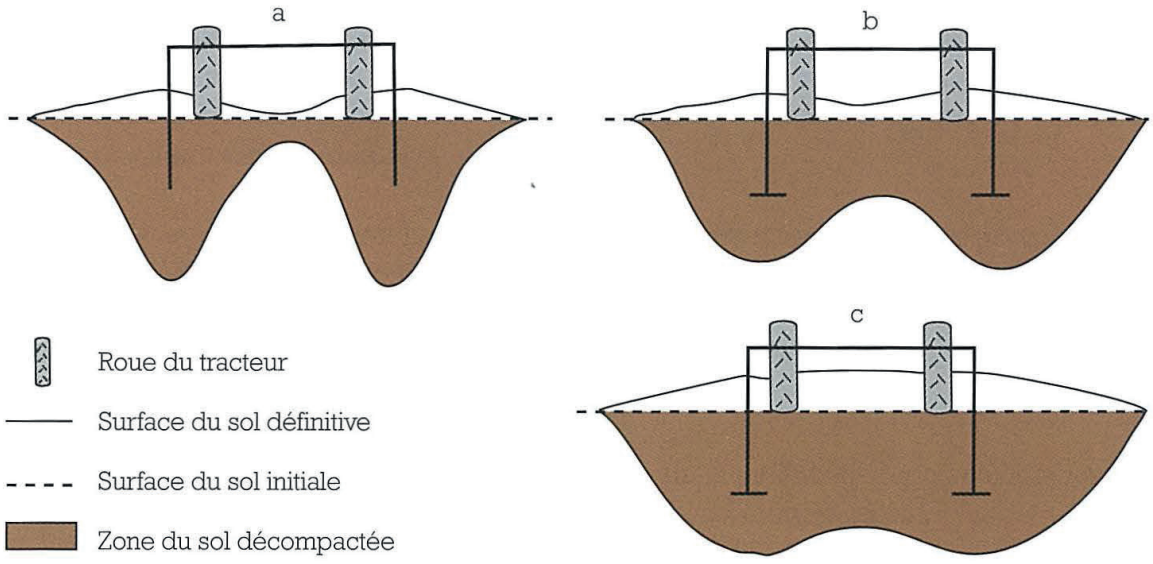
Stockage agricole des eaux

- Diguettes d'infiltration avec déversoirs
- Bassins collinaires et barrages

Annexe 3



Une dent de sous-soleuse avec des ailettes utilisée pour décompacter les sols reconstitués



L'action de la sous-soleuse est mis en évidence par une coupe théorique du sol après le passage d'une sous-soleuse à deux dents.

(a) sous-soleuse classique : une grande zone de sol n'est pas décompactée entre les dents et la surface du sol présente des rides.

(b) sous-soleuse à ailettes qui peut décompacter plus de sol qu'une sous-soleuse classique ; elle nécessite une force de traction légèrement plus forte.

(c) sous-soleuse à ailettes avec des dents avant peu profondes pour pré-décompacter le sol avant le passage des dents principales, elle produit une décompaction maximum.

Annexe 4

Recommandations suisses

Issue de la source bibliographique : [50] 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.

Directives concernant le décapage et la mise en dépôt de la terre végétale ainsi que la remise en culture de gravières et de décharges

1. INTRODUCTION

Chaque année, 300 à 400 ha de terres sont soustraites à l'agriculture suisse en vue de l'exploitation du gravier situé dans leur sous-sol. Par ailleurs, des surfaces estimées d'importance comparable sont momentanément bouleversées par la construction de voies de communication modernes. La terre végétale et la couche intermédiaire (définition : voir fig. 1) décapées lors de ces travaux sont stockées provisoirement en attendant une réutilisation ultérieure, ou bien elles sont employées immédiatement pour remettre en culture une autre surface (décharge ou gravière).

Cette remise en culture de terrains soustraits momentanément à l'agriculture pose souvent des problèmes notables qui sont en général dus au comblement incorrect de la décharge ou de la gravière. Les mesures techniques d'amélioration destinées à remédier par la suite à des difficultés donnent alors des résultats moins bons que les mêmes mesures appliquées à un sol naturel, intouché par de tels bouleversements.

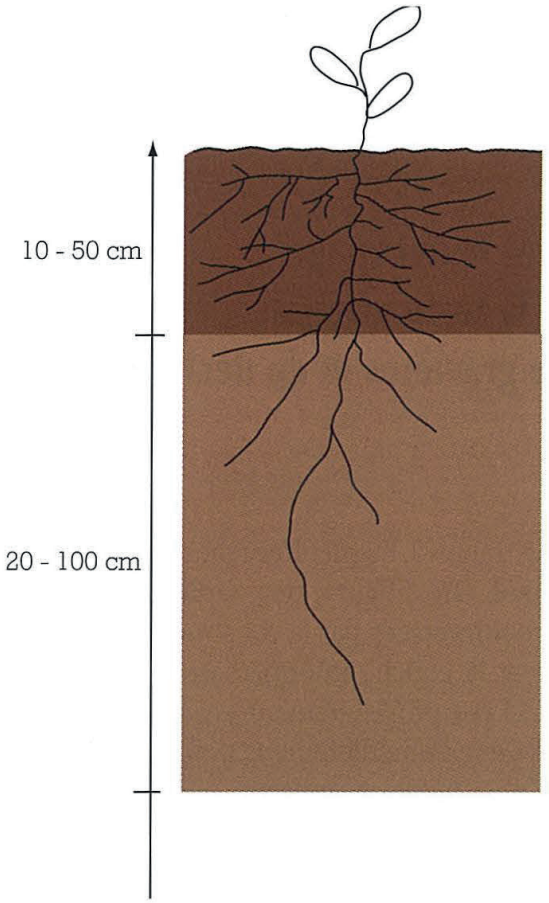
Abstraction faite des frais énormes causés par ces travaux supplémentaires d'amélioration, le proverbe « prévenir vaut mieux que guérir » prend donc ici toute sa valeur.

Le sol n'est pas un capital multipliable. En une seconde, un trax peut détruire ce que la nature a mis des centaines d'années pour patiemment élaborer. Chaque personne concernée par les travaux susmentionnés est donc responsable de la préservation de ce bien irremplaçable qu'est le sol.

Les présentent directives concernent en particulier :

- *L'agriculteur et le propriétaire foncier*
- *Le vulgarisateur et l'expert agricole*
- *Le chauffeur de trax et de camion*
- *L'entrepreneur et la direction locale des travaux*
- *Les instances communales et cantonales concernées*

Ces directives se basent sur les instructions de la station fédérale de recherches agronomiques de Zürich-Reckenholz (JAEGGLI et FREY, 1977) et sont conformes aux intentions de la société pédologique suisse (1983) et de l'Association suisse des gravières.



Terre végétale, riche en humus : réservoir en éléments nutritifs et en eau ; centre de l'activité biologique du sol.

Couche intermédiaire : réservoir en eau et en éléments nutritifs.

Sous-sol : matériau inutile à la plante.

Fig. 1 – Les différentes couches naturelles du sol.

2. DÉCAPAGE ET MISE EN DÉPÔT

2.1 TERRE VÉGÉTALE

Cette terre peut subir divers dégâts sous l'influence des facteurs suivants :
a) pression excessive (déformations mécaniques ou charge statique excessive)
=> La terre devient compacte.
b)manque d'air, excès d'eau, drainage insuffisant
=> Arrêt de l'activité biologique : la terre s'asphyxie, elle prend une couleur bleuâtre-verdâtre, elle dégage une odeur nauséabonde, elle « meurt ».

Afin de prévenir ces dégâts, les mesures suivantes seront prises :

Pour éviter les déformations mécaniques :
a) ne décaper la terre végétale que si le sol est suffisamment sec (si possible terre friable, c'est-à-dire non modelable et ne collant pas aux mains et aux machines). Décaper également l'emplacement du dépôt de terre.

b) ne pas décharger la terre par couches successives superposées, mais en une seule fois (fig.2) ; ne rouler sur le dépôt que si c'est vraiment nécessaire, et avec des engins dont la pression est inférieure à 300g/cm^2.

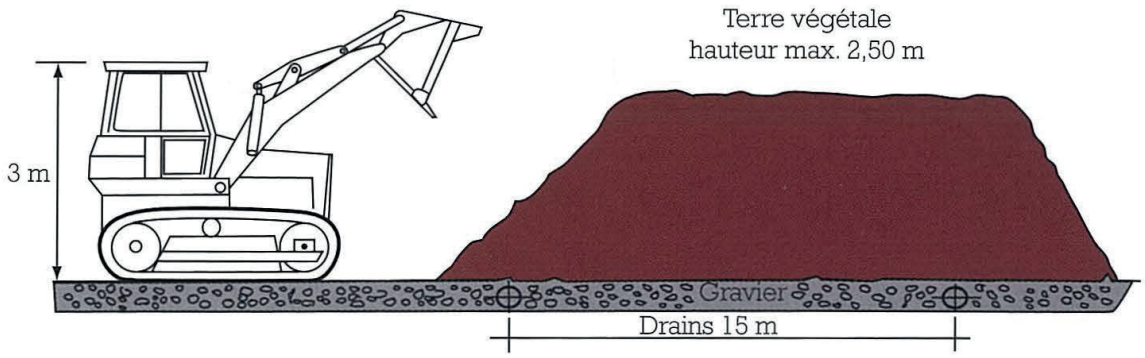


Fig. 2 – Mise en place d'un dépôt de terre végétale de longue durée sur fond imperméable.

Pour éviter une charge statique excessive :
a) hauteur maximale du dépôt de longue durée au moment de la mise en dépôt : 2,5 m. Après tassement naturel, la hauteur ne dépassera ainsi pas 2 m. Pour les dépôts de courte durée, on peut admettre une hauteur supérieure.

Tabl. 1 Différence entre dépôts de longue durée et dépôts de courte durée.

	Mise en dépôt	Reprise du dépôt
Dépôts de courte durée	Entre le printemps et l'automne, c'est à dire pendant la période de végétation	Au plus tard en automne de la même année
Dépôts de longue durée		L'année ou les années suivantes

Pour assurer la circulation de l'eau et de l'air
a) drainage : si la couche intermédiaire et le sous-sol de l'emplacement du dépôt sont perméables (par ex. gravières), il y a peu de problèmes. Par contre, en conditions peu perméables, il faut creuser des fossés à ciel ouvert autour du dépôt pour détourner l'eau venant des surfaces situées en amont du dépôt. Si le fond est très imperméable, il faut le recouvrir de 15 cm de gravier et incorporer des drains dans ce gravier avant la mise en dépôt de la terre végétale (fig. 2).

b) pentes : pour éviter toute stagnation des eaux de pluie, on donnera à la surface du dépôt de terre une pente d'environ 5%. Le ruissellement superficiel de cette eau sera empêché si l'on garantit au dépôt une perméabilité suffisante (fig.3).

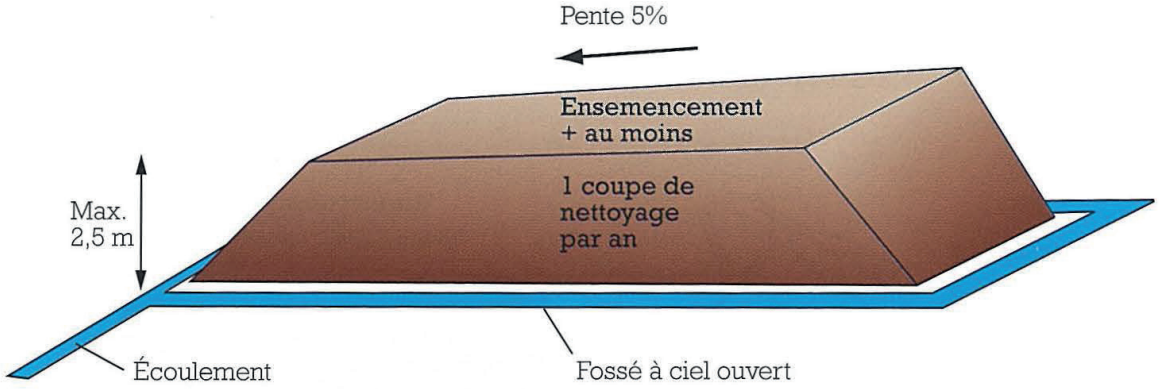


Fig. 3 – Dépôt de terre végétale de longue durée sur fond moyennement perméable

Pour activer la vie biologique et pour empêcher la prolifération des mauvaises herbes :

a) ensemencer le dépôt le plus rapidement possible, de manière à obtenir une couverture végétale suffisante avec le début de l'hiver suivant (tab. 2). Si le décapage a lieu après le 15 septembre, l'ensemencement se fera dès le printemps suivant pour profiter de l'humidité favorable à la germination.

b) éliminer les mauvaises herbes tenaces (spécialement les rumex et les chardons) poussant sur le dépôt aussi souvent que nécessaire !

Tab. 2 : choix des plantes à semer sur les dépôts de terre selon la durée du dépôt et la date de semis

Durée du dépôt	semis jusqu'au[1]	Mélange ou plante[2]
courte	15 septembre	chou de Chine, colza, navette/moutarde jaune, etc...
longue	15 août	- mélange pour dépôts de terre VSS G (1 fauche par an, le fourrage peut être laissé sur place, la pâture par des moutons ou de jeunes génisses peut aussi être admise) - mélanges standards 303, 430 ou 440 (pour les tas restant en place plus de 2-3 ans)
	15 septembre	chou de Chine, colza d'hiver ou navette d'hiver ; ensemencement du mélange standard ou du mélange pour dépôts le printemps suivant

(1) avancer cette date de 15 jours en régions élevées

(2) autres plantes et autres dates de semis : selon conseil individuel

2. 2 COUCHE INTERMÉDIAIRE

Lors du décapage et de la mise en dépôt de cette couche, on veillera à travailler dans des conditions suffisamment sèches (si possible terre friable, c'est-à-dire non modelable et ne collant pas) pour éviter toute compactation.

La hauteur des tas pourra être supérieure à ceux de terre végétale. En règle générale, on ne dépasse pas une hauteur de 3,5 m. Le semis d'un mélange ne se fait que pour de longues durées de stockage.

3. COMBLEMENT ET REMISE EN CULTURE

3. 1 COMBLEMENT AVEC LE REMBLAI JUSQU'À 1 À 1,5 M AU DESSOUS DU NIVEAU DÉFINITIF

Les travaux suivants doivent être prévus. Dans l'ordre :
a) des dispositifs d'infiltration seront tirés vers le haut à mesure que le niveau du remblai monte (voir fig. 4). Ceci est important si la couche intermédiaire et la couche de terre végétale sont d'épaisseur limitée (80 à 100 cm).

b) on donnera à la surface du remblai une pente de 5% minimum. Les profils de pente doivent être planifiés pour permettre l'évacuation d'eaux superficielles vers un exutoire. Pour le dernier mètre d'épaisseur du comblement, on choisira des matériaux de remblai les plus perméables possibles.

Dès maintenant et jusqu'à la fin de la remise en culture, seules les machines à basse pression au sol (<300g/cm^2) auront accès à la surface. La direction locale des travaux doit contrôler le respect de cette condition.

c) avant de terminer le remblai, toute la surface sera jalonnée et l'ensemble de la surface devra être égalisée à un niveau partout égal à ..cm du niveau final de la surface après mise en place de la couche intermédiaire et de la terre végétale. Ces dernières couches ne doivent en aucun cas servir à terminer les mises à niveau.

La direction des travaux essaiera d'anticiper les tassements qui pourraient donner lieu à la formation de cuvettes après quelques années.

Dès maintenant et jusqu'à la fin de la remise en culture, seules les machines à basse pression au sol (<300g/cm^2) auront accès à la surface. La Direction locale des travaux doit contrôler le respect de cette condition.

d) ces travaux de mise à niveau du remblai se feront au moyen d'une machine à basse pression au sol.

e) les gros blocs et autres déchets indésirables éventuels seront évacués.

f) ripper au trax à basse pression l'ensemble de la surface.

g) si la perméabilité du remblai est insuffisante, on déposera 10 à 15 cm de gravier ou matériau perméable de même effet.

Ces mesures s'appliquent bien sûr également à des gravières dont le comblement n'est pas prévu et destinées à une remise en culture sur leur fond.

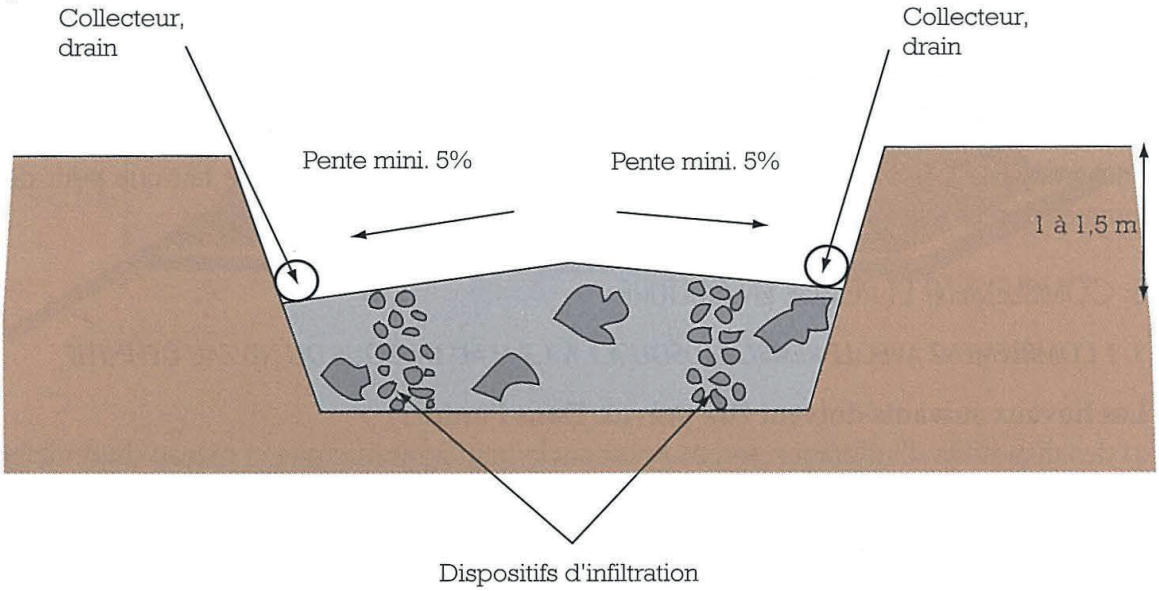


Fig.4 – Comblement avec le remblai brut

3. 2 POSE DE LA COUCHE INTERMÉDIAIRE

Dans les gravières, le matériau situé entre la terre végétale et le gravier (= couche située entre 25 et 120 cm de profondeur) constitue en général une couche intermédiaire de très bonne qualité. Tout limon sableux moyennement pierreux est également utilisable. Par contre, les limons très argileux, compacts par nature, ne seront pas employés, de même que les débris de construction de routes et de démolition d'immeubles.

a) Cet horizon intermédiaire sera mis en place en une seule fois au niveau souhaité.

b) Si les matériaux sont amenés par camion, ils utiliseront une piste de chantier afin d'éviter au maximum le tassement du remblai. Au fur et à mesure de l'avance de la mise en place, la piste sera ripée.

c) Une fois la mise en place terminée, la surface sera ripée au trax à basse pression au sol. Les pierres d'un diamètre supérieur à 15 cm seront ramassées et évacuées.

A ce moment de l'avancement des travaux, il faut se poser la question suivante :
-**Un concept de drainage est-il à prévoir** ? (collecteurs, drains, possibilités ultérieures de saignées filtrantes au gravier). Si oui, mettre en place le(s) collecteur(s) principal(aux), les éventuels bras latéraux. Ils seront constitués d'un tuyau en fond de fouille et d'une tranchée remplie de gravier jusqu'à – 20 cm du niveau fini (après mise en place de la terre végétale). Si la surface remise en culture est prévue rester toujours en prairie, on aménagera le gravier jusque près de la surface finie.

A partir de cette infrastructure de base, des saignées filtrantes au gravier peuvent en tout être tirées « en épi » en direction de ces collecteurs, mais sans bouleverser à nouveau toute la surface.

3. 3 FAUT-IL ACTIVER BIOLOGIQUEMENT LA COUCHE INTERMÉDIAIRE ?

Selon la nature des sols auxquels nous avons à faire, il est le plus souvent judicieux de prévoir une bio-activation de cet horizon par la mise en place d'une culture pionnière.

A part la nature du sol, l'époque à laquelle les travaux de mise en place de cette couche sont terminés est un élément de décision.

Pour qu'elle aie un effet, la culture intercalaire doit rester en place le temps de former une masse végétale importante, donc le plus de racines possible. Si la durée d'implantation est inférieure à 3 mois, cet objectif ne peut en général pas être atteint.

Dans les cas où cette durée ne peut être assurée, il faut alors renvoyer la mise en place de la terre végétale à la prochaine saison !

Schéma de travail pour le semis d'une culture intercalaire

a) sur la surface ripée et épierrée, épandre un engrais complet apportant par ex. les éléments fertilisants suivants par ha :

N : 120 P_2O_5 : 100 K_20 : 240 Mg : 25

Cet apport d'engrais pourra être complété par 60-80 m^3/ha de compost s'il est disponible dans la région.

b) hersage avec un tracteur équipé de roues jumelées en sol bien ressuyé.

c) semer un engrais vert (selon tab. 3)

Tab.3

Mise en place de la terre végétale prévue en :	Date de semis jusqu'au : [1]	Mélange ou plante	Semence kg/ha
Automne de la même année	1er juin	colza d'été	20
		moutarde jaune	40
		chou de Chine	20
Printemps ou été suivant	15 septembre	chou de Chine	20
		colza d'hiver	20
		navette d'hiver	40
	30 octobre	seigle	
		(Protector Rheidol)	300
		ou variétés usuelles	300

[1] avancer cette date de 15 jours en régions élevées

d) au besoin, rouler au rouleau croskill

Si, après discussion, il n'est pas opportun de mettre en place cette culture pionnière, après le ripage et l'épierrage de la couche intermédiaire on procèdera à un épandage de compost à raison de 100 m^3/ha.

Il sera incorporé au sol par un hersage afin de favoriser sa décomposition dans le sol.

Ensuite, on passera directement à la mise en place de la terre végétale.

3. 4 MISE EN PLACE DE LA TERRE VÉGÉTALE ET REMISE EN CULTURE

En fin d'été, la terre végétale ne se met en place que si elle peut encore être ensemencée dans les délais.

a) opération préalable : récolter ou hacher et laisser sécher sur place le fourrage semé sur la couche intermédiaire, s'il est trop abondant. Cela évitera une asphyxie ultérieure du sol.

b) ne poser la terre végétale que si le sol est suffisamment sec (si possible terre friable : non modelable, ne collant pas).

c) pour cette mise en place, on prévoira des pistes de roulage. A la fin de leur emploi, la surface ainsi tassée sera ripée.

d) 1er hersage et épierrage : une fois la mise en place de la terre végétale terminée, laisser l'humidité de la terre s'évaporer.

Herser au moyen d'un tracteur équipé de roues jumelées.

Epierrer la surface une première fois avec soin. Toutes les pierres dont la plus grande dimension est de 10 cm et plus sont à évacuer.

Si une abondance excessive de cailloux rend nécessaire un épierrage mécanique, on choisira les machines qui permettent d'éviter tout dégât de compactation du sol. Par exemple : andaineur de pierres et chargement manuel de l'andain dans la benne d'un trax à basse pression. Les dumpers n'auront qu'exceptionnellement accès à la surface par ex. pour la collecte de pierres en conditions sèches.

e) épandre la fumure en vue du semis du mélange fourrager. Par ex. :
Landor-Colza (N5, P12, K24, Mg 2, B 0,1) à raison de 10-12 kg/are ou autre engrais selon analyse de la terre végétale.

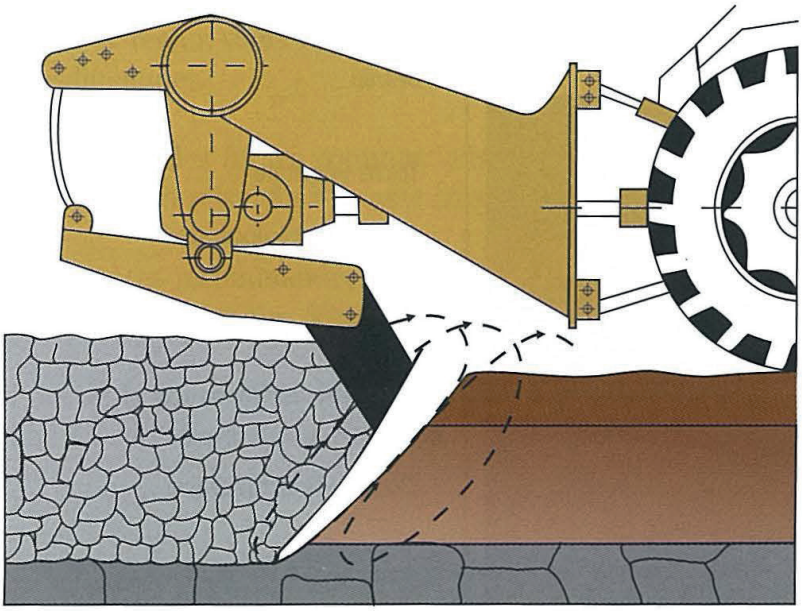
Il est souvent profitable d'aider à la revitalisation de la terre végétale en épandant avant ou après la fumure minérale env. 80 m^3 de compost par ha. Dans ce cas, on choisira un engrais minéral complémentaire différent.

f) la réussite d'une remise en culture est liée étroitement au niveau de compaction du sol, donc aux possibilités d'enracinement de la prairie.

Un atout intéressant pour y parvenir est le bêchage de la surface.

Une entreprise spécialisée dispose d'une bêcheuse mécanique qui soulève toute la masse du sol jusqu'à une profondeur de – 60 à 70 cm.

Ceci sans ramener les pierres en surface. Sans provoquer de couche de lissage, ni mélanger les horizons de sol.



g) dernier hersage et épierrage

h) semis du mélange fourrager / choix du mélange :

Région	Mélange standard n°		Densité g/are	Utilisations
Plaine	430	trèfles blancs + graminées	500*	Toutes
Collines	440	idem sans dactyle	500*	Bien pour pâture + retour prairie naturelle
Préalpes	323	à base de luzerne	500*	Pour zones séchardes

* Adjonction de 50 g/are de luzerne (inoculée) pour favoriser l'enracinement

Sauf pour les régions très favorables, la date limite pour le semis fourrager définitif est le 15 septembre.

En règle générale, dans la planification des travaux, il faut prévoir que la surface remise en culture soit prête le 1er septembre, afin de terminer le semis au plus tard le 15 du mois, les conditions climatiques et l'état du sol étant incertains.

i) roulage au rouleau croskill (pas de rouleau lisse !)

j) au stade 3 feuilles du trèfle, une vision locale décidera si une lutte contre les mauvaises herbes est à entreprendre (en particulier les jeunes rumex lampés).

Si oui, notre Service ou les Services des Stations cantonales agricoles des autres cantons sont à même de proposer le produit et la dose à appliquer.

En règle générale, l'application de ce traitement permet d'affourager la première coupe. Dans le cas où aucun traitement n'est effectué, ce fourrage doit souvent être évacué en décharge.

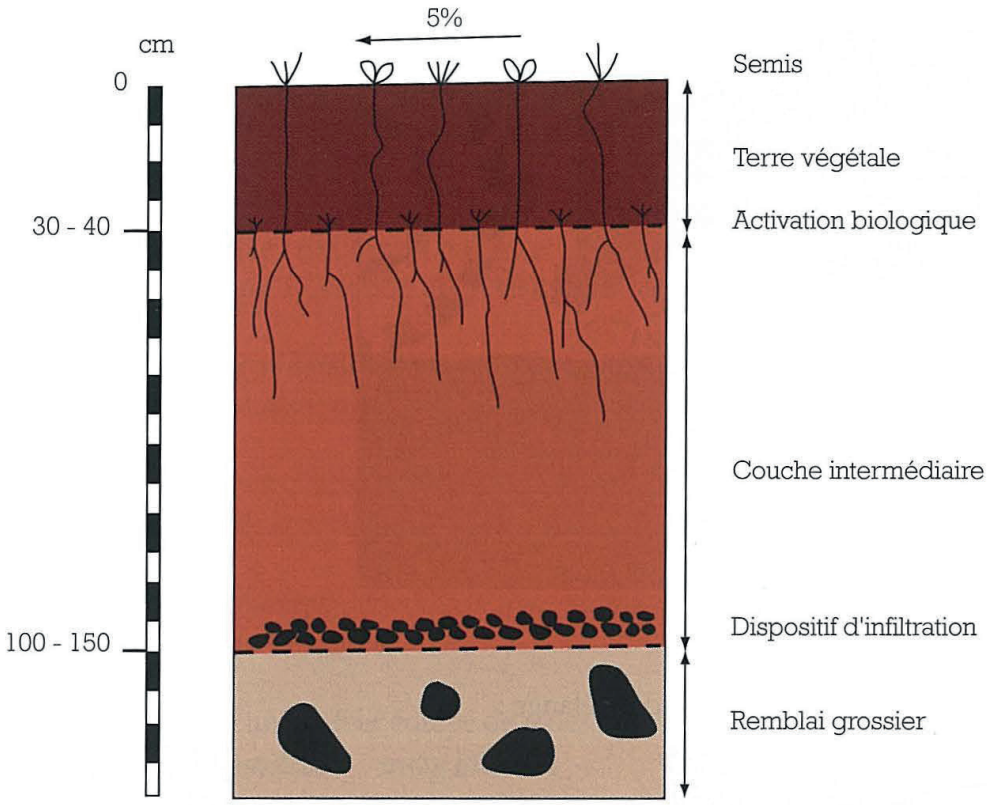


Fig. 5 – Comblement et remise en culture corrects

3. 5 REVÉGÉTALISATION DES TALUS ET AUTRES SURFACES ADJACENTES

Dans ces surfaces sont compris notamment les talus bordant la chaussée du tracé d'une route / autoroute, les surfaces prévues en exploitation extensive (sans fertilisation) tels que les giratoires et les autres surfaces non dévolues à une utilisation non agricole usuelle (par ex. les abords de biotopes et marais, etc.)

Elles comprennent également des surfaces qu'il est prévu de reboiser ou arboriser à court ou moyen terme.

Mise en place des matériaux

Cas des surfaces peu pentues : il faut prévoir là aussi une perméabilité suffisante pour favoriser l'implantation du mélange fourrager / herbacé et d'éventuels arbres et/ou arbustes qui seront plantés par la suite.

Une qualité du sol satisfaisante permettra un entretien plus aisé de la surface

Cas des surfaces en pentes : pour les talus en particulier, la fixation des matériaux se fera le plus rapidement grâce au semis effectué par une méthode spécifique de mise en place sous protection anti-érosion.

Choix du mélange de semence
La commission suisse pour la protection des plantes sauvages (CPS) a émis des directives en matière de choix des espèces à semer sur ce type de surface.

Selon la région dans laquelle se trouve la surface à ensemencer, les espèces peuvent être différentes.

Les principales firmes commercialisant des graines, par ex. UFA (Landi, coopératives agricoles), Shweizer Sa à Thoune offrent une gamme de mélanges adaptés au site.

Les espèces recommandées sont incorporées dans ces mélanges. Le document annexé fournit de plus amples détails.

Lors de la soumission, les entreprises de paysagisme se conformeront à ces exigences. La DLT contrôlera son application.

4. UTILISATION DES SURFACES REMISES EN CULTURE : CONSEILS À L'INTENTION DES AGRICULTEURS

Mélanges à base de trèfle blanc et graminées
a) après l'ensemencement, le mélange doit être fauché très tôt, afin de lutter contre les mauvaises herbes et de permettre une bonne installation des plantes. Les coupes suivantes seront très fréquentes. Si la surface remise en culture est importante, il faut demander à plusieurs agriculteurs de prendre en charge ce fourrage.

b) attendre que le mélange se soit bien installé (c'est-à-dire au moins 6 mois à 1 an) avant de pâturer. Ne pas puriner durant le premier été d'utilisation.

c) fumure : mettre un peu d'azote à chaque utilisation (40 kg N par fauche, 30 kg N par pâture) sous forme d'engrais azoté ou d'engrais complet, selon les cas. Faire procéder à des analyses de sol pour déterminer la fumure phospho-potassique. Purinage dès la 2^{e} année. Attention : max. 30 m^3 /ha purinage !

Les terres remises en culture sont alcalines, le phosphore apporté doit l'être sous forme de superphosphate. Fractionnez les apports de P_2O_5 et K_2O.

Mélanges à base de luzerne
a) ne pas effectuer trop tôt la 1ère coupe après le semis. En général, la luzerne ne se récolte pas avant le stade du bourgeonnement.

b) ne pas faucher trop près du sol (6 à 8 cm).

c) se prête bien pour l'affouragement en vert et l'ensilage ; ne convient pas pour le séchage au sol et la pâture.

d) peut se passer d'azote sauf à l'ensemencement et après la 1ère coupe. Cet apport se fait en sortie d'hiver si la luzerne a été semée en août-septembre de l'année passée

Lutte contre les mauvaises herbes
* Lampés : profiter de lutter plante par plante quand ils sont encore peu nombreux (arrachage, ou traitement au individuel ; ramassage et brûlage ou mise en décharge des lampés en graines). La lutte chimique n'aura lieu que si les lampés sont trop abondants et sur les conseils de la Station cantonale de production végétale.

Tassement du sol
* Eviter tout tassement du sol par les machines, ce qui pourrait entre autres favoriser l'installation des renoncules et lampés. Attention : le tassement des prairies par les machines agricoles est souvent sous-estimé !

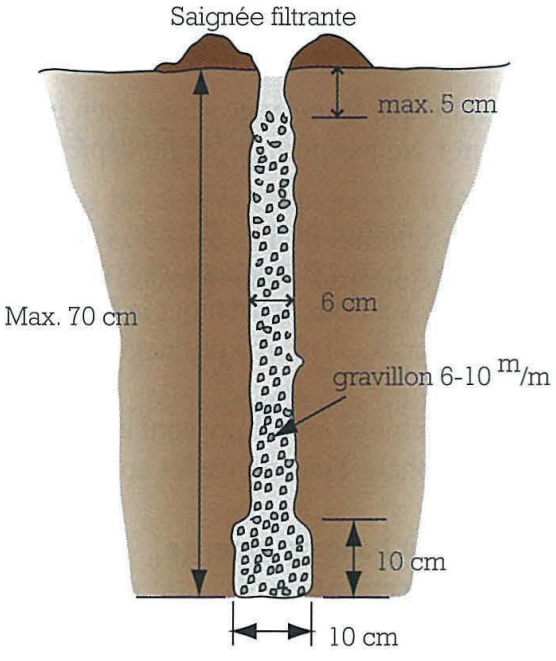
Mise en rotation
* Retournement de la prairie : au plus tôt après 3 ans complets d'utilisation. Commencer d'abord à cultiver des céréales, mais pas de maïs ou d'autres cultures sarclées. Pratiquer par des rotations courtes les premières années.

5. AMÉLIORATIONS DU SOL

Mis à part les drainages complémentaires, il n'est pas normal de devoir procéder à un drainage plus ou moins complet après la remise en culture d'une décharge. Si c'est le cas, cela signifie que des fautes graves ont été commises lors du comblement et de la remise en culture !

Assainissement locaux
Il peut arriver que certains secteurs de décharge doivent être assainis dans les années qui suivent la mise en culture.

Le plus souvent, les saignées filtrantes au gravier sont mises en place. Dans le cas où les collecteurs filtrants existent, il est aisé de les mettre en place en travers du sens de circulation de l'eau dans le sol.



Décompactage du sol
La seule possibilité réelle est le bêchage de la surface concernée au moment où le sol est ressuyé.

Après un bêchage (voir point 3.4, littera f), une prairie artificielle devrait être mise en place pour limiter à un minimum la quantité de terre fine qui pourrait s'écouler de la surface en profondeur, et par là colmater les interstices crées entre les mottes par la bêcheuse.

6. ORGANISATION DU DÉCAPAGE, DE LA MISE EN DÉPÔT ET DE LA REMISE EN CULTURE

Les présentes directives ne doivent pas être considérées comme rigides. Bien au contraire, il s'agit de les adapter à chaque situation. Les éléments suivants, qui sont à prévoir à chacune des phases des travaux suivantes, prmettront de trouver la souplesse d'adaptation nécessaire et de réaliser au mieux l'esprit des directives :

1) CAS DES GRAVIÈRES

1ère phase : tractations préliminaires

Information des propriétaires et des exploitants de gravier sur les présentes directives.
Dans le cas d'une exploitation de gravier, cela leur permet d'inclure les exigences de ces directives dans les contrats qu'ils établissent avec les entreprises, resp. d'y faire références dans l'étude d'impact.

2e phase : contrat de droit privé, procédure d'autorisation, soumissions

Les présentes directives sont approuvées par contrat par tous les partenaires concernés.
A cet effet, l'expert de la Station cantonale de production végétale à Grangeneuve détermine les exigences particulières à fixer dans chaque cas concret.

3e phase : expertise de départ

- Cette expertise est effectuée par la Station cantonale de production végétale à Grangeneuve.

Les caractéristiques suivantes de la terre végétale et de la couche intermédiaire sont déterminées :
nature du sol (granulométrie), caractéristiques physiques et chimiques, en particulier épaisseur de la couche de terre végétale et de la couche intermédiaire.

- But de l'opération : contrôler que le sol qui sera remis en culture ait au moins les mêmes qualités que le sol original (en particulier épaisseur de la couche de terre végétale !). L'expertise de départ sert donc de référence en cas de litige futur.

4e phase : décapage et mise en dépôt

- Obligation d'affecter toute la terre végétale décapée aux remises ultérieures en culture.
- Information des chauffeurs et des ouvriers sur les précautions à prendre.

2) CAS DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL

1e phase : planification

Les entreprises soumissionnaires doivent être informées que :

- Les machines prise en compte dans le remplissage de la soumission doivent répondre aux maxima de pression au sol prévus pour la plupart des étapes de mouvements de terres et matériaux (<300g/cm^2).
- En cas de mauvais temps, les travaux sur une décharge peuvent être interrompus sur ordre de la DGT, de la DLT ou de nos services. A contrario, l'entreprise adjudicataire mettra

tout en œuvre pour tirer le meilleur parti des périodes où les conditions météorologiques / d'humidité de sol sont favorables.

2e phase : décapage et stockage
La DLT est responsable de la meilleure organisation possible du stockage correct de la terre végétale, resp. de la couche intermédiaire.

Elle veillera en particulier à sauvegarder le volume le plus grand possible de ces matériaux en suivant les variations pédologiques de ces épaisseurs de couche sur le terrain.

Si une expertise de départ mentionne ces épaisseurs, elle veillera à ce que le/les chauffeur(s) les respecte(nt) au mieux.

Dans toute la mesure du possible, décapage et remise en culture se feront par étape afin de limiter le temps de stockage des matériaux.

3e phase : remblai et remise en culture
Dès que la plus grande partie ou une étape de remblayage pourrait se poursuivre par la remise en culture, la DLT invite les parties intéressées à une vision locale.

Au fur et à mesure de l'avancement des travaux de remise en culture, elle prend l'initiative de convoquer / consulter les partenaires pour obtenir leur aval pour la suite des travaux.

4e phase : suivi et travaux complémentaires
Une fois la surface en culture, le mode d'exploitation par l'agriculteur doit être observé et les mesures complémentaires (assainissements localisés, épierrage complémentaire, etc...) décidés de cas en cas.

Impression d'après documents fournis
bialec, nancy
Dépôt légal n° 56736 - juillet 2002

Le but du réaménagement agricole d'une carrière est de restituer à un exploitant un sol apte à produire, grâce à des pratiques normales, des rendements satisfaisants.

De 1974 à 1990, des expérimentations de réaménagement agricole après extraction ont été réalisées avec l'aide du Comité de gestion de la taxe parafiscale. Elles ont montré que des rendements équivalents, voire supérieurs, à ceux sur sols en place pouvaient être obtenus sur des sols reconstitués avec précaution.

Cet ouvrage est une analyse synthétique des réaménagements agricoles 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 agricole de carrières pratiquées dans différents pays européens, au Canada et aux Etats-Unis ;
- une phase d'enquête de terrain concernant des réaménagements réalisés dans les années 1974-1990 et des réaménagements récents ou en cours.

Il est destiné aux carriers et agriculteurs qui souhaitent bénéficier de l'expérience acquise depuis vingt-cinq ans pour reconstituer un sol qui assure l'installation des espèces végétales et leur croissance grâce à une potentialité suffisante de réserve hydrique et de fixation des éléments nutritifs.

CHARTE
PROFESSIONNELLE
Union Nationale des Producteurs de Granulats

ISBN 2-85362-573-7

Prix 32 € TTC

Cemagref