



Guide opérationnel V1.0

Réhabilitation opérationnelle des terrains d'alpage

CONTACT ET SUIVI DE L'ÉTUDE

Maître d'ouvrage	Domaine skiable de France Savoie (DSF73)
Interlocuteur	Jean REGALDO (DSF) - jregaldo@dsr-larosiere.com
Rédacteur et contrôle qualité	<p>Lisa BENAS (Soltis Environnement) lbenas@soltis-environnement.com</p> <p>Léa LECLERCQ (Soltis Environnement) lleclerq@soltis-environnement.com</p> <p>Florence BAPTIST (Soltis Environnement) fbaptist@soltis-environnement.com</p> <p>Rémi MAGDINIER (Société d'Economie Alpestre 73) rmagdinier@sea73.fr</p> <p>Jérôme POULENARD (EDYTEM) jerome.poulenard@univ-smb.fr</p>
Date de réalisation	2024

> Zoom sur les auteurs :

Soltis Environnement, bureau d'études basé à Voiron (38), propose des outils et des solutions pour évaluer le potentiel agro-pédologique et fonctionnel des sols, intégrer ces données dans l'aménagement du territoire, et recommander des solutions de réhabilitation. La recherche et le développement occupent une place centrale dans l'activité de l'entreprise, avec un engagement ferme à faciliter le transfert des résultats de la recherche vers la sphère opérationnelle. La société propose ainsi à ses clients des approches opérationnelles, innovantes et robustes pour garantir la réhabilitation et la protection des sols, assurant ainsi la fourniture de services écosystémiques essentiels à la société. Soltis Environnement, et en particulier Lisa Benas, chef de projet en génie pédologique et Florence Baptist, dirigeante de Soltis Environnement, ont coordonné l'étude qui a permis d'aboutir à la production de ce guide opérationnel. L'équipe s'est fortement investie à chaque étape de l'étude : synthèse bibliographique, entretiens auprès des acteurs du territoire, prospection pédologique sur le terrain et analyses des données afin d'aboutir à des préconisations concrètes destinées aux parties prenantes en charge de la réhabilitation écologiques des terrains d'alpage.

La Société d'Économie Alpestre de Savoie, également connue sous le nom de SEA 73, est un service pastoral départemental. Forte d'environ 300 adhérents, cette structure associative défend les intérêts du pastoralisme de l'échelon local au niveau national via le Réseau Pastoral AURA. Il s'agit d'une organisation professionnelle agricole composée d'agriculteurs, mais aussi d'élus locaux et de partenaires représentant l'ensemble des acteurs des espaces pastoraux, tels que les espaces protégés, les financeurs et les administrations. Elle œuvre pour l'intérêt général des alpages de Savoie en mettant en place ses propres actions, en collaborant avec d'autres structures ou en établissant des partenariats solides. Ses missions principales comprennent le conseil aux alpagistes et aux collectivités, l'accompagnement des structures pastorales collectives (AFP, GP), l'agroenvironnement, la

communication et la sensibilisation pastorale, ainsi que la médiation territoriale. La SEA 73 et notamment Rémy MAGDINIER s'affiche donc comme un acteur incontournable du projet, ses relations avec les acteurs locaux, notamment les alpagistes et les domaines skiabiles, ont permis de mener à bien l'ensemble des entretiens. Son expertise a également permis d'évaluer la qualité fourragère des sites réhabilités et d'apporter un regard avisé sur les spécificités des milieux de montagne.

Edytem (Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne) est une unité mixte de recherche de l'Université Savoie Mont Blanc et du CNRS. Né de la volonté de rassembler des chercheurs en géosciences (géologie, hydrogéologie, géomorphologie) et en sciences humaines et sociales (géographie), Edytem vise à résoudre, grâce à une approche interdisciplinaire, les problématiques environnementales et sociétales propres aux environnements, aux dynamiques et aux territoires de montagne. C'est dans ce cadre que le partenariat avec Jérôme Poulénard, enseignant-chercheur au sein de l'Edytem et spécialiste des sols, apparaissait inévitable. Fort de nombreuses années d'expérience dans la recherche sur les sols et les socio-écosystèmes de montagne, Jérôme a pu accompagner le groupement en apportant une expertise précise sur le terrain ainsi que dans les réflexions liées à l'établissement des recommandations.

REMERCIEMENTS

EDYTEM, SEA 73 et Soltis Environnement tiennent à remercier l'ensemble du Comité Technique ayant suivi l'étude durant toute la durée du projet et composé des membres suivants :

Domaines skiables	Exploitants	Personnes référentes
	Domaines skiables de France (Savoie)	PONSON David
		DIMIER Yves
		BRAU-MOURET Dominique
Domaine skiable de la Rosière	Domaine skiable de la Rosière (DSR)	REGALDO Jean
		PELLEGRINI Frank
		FERRARIS Michèle
Domaine skiable des Arcs	ADS Domaine de Montagne Les Arcs / Peisey-Vallandry	TIXIER Léo
		CHARLOT Frédéric
Domaine skiable de la Plagne	Société d'Aménagement de la Plagne	PROVENDIE Nicolas
		NICOLINO Luc
		CHENAL Raphaël
Domaine skiable de Courchevel	Société des Trois Vallées	PERRETIER Cédric
		FERMAUT Jordan
		PFEND Stéphane
		VIGNON David
Domaine skiable de Val Cenis	SEM de Val Cenis	DIMIER Yves
		GAGNIERE Jean-Christophe
Domaine skiable de Valmeinier	SEMVAL	VACHERAND Anthony
		JOLY Jean-Sébastien
Domaine skiable d'Aussois	Société Parraché – Vanoise	CHOUDIN Jérôme
		BOIS Sébastien
Domaine skiable des Saisies	SPL Domaines Skiables des Saisies	TESSARD Michaël
		CLOCHEY Philippe
		GALLICE Géraldine

Nous tenons par ailleurs à remercier l'ensemble des intervenants ayant participé à ce projet, en particulier les alpagistes qui travaillent sur le secteur et ont contribué aux enquêtes menées au printemps 2023, ainsi que les différents experts contactés tout au long du projet.

De plus, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers toutes les personnes ayant contribué à l'acquisition des données lors de la campagne de terrain, notamment les différents bureaux d'études (MDP consulting, EPODE et Karum), ainsi qu'à nos collaborateurs pour leur aide apportée tout au long du projet : Norine KHEDIM, Jérôme PINTA, Abigaël CHIEUX, Mathilda TAMALOUT et Nicolas BONFANTI.

SOMMAIRE

PARTIE 1 : OBJECTIFS ET SYNTHÈSE OPERATIONNELLE	1
PARTIE 2 : STRUCTURE DU GUIDE OPERATIONNEL	6
PARTIE 3 : FICHES OPERATIONNELLES	9
LES INTERVENTIONS PREALABLES A LA REHABILITATION ECOLOGIQUE	10
FICHE 1 – Le diagnostic du site	11
FICHE 2 – Le cahier des charges	16
LA REDUCTION DES IMPACTS DES TRAVAUX D'AMENAGEMENTS	22
FICHE 3 – Le défrichement	23
FICHE 4 – Le remaniement du relief	26
FICHE 5 – Le drainage	33
LA REHABILITATION ECOLOGIQUE DES SOLS DEGRADEES	36
A. Préparation physique des sols	37
FICHE 6 – La récupération, le stockage et la mise en place du substrat	37
FICHE 7 – La réduction de la teneur en pierres	46
FICHE 8 – La préparation du lit de semences	49
B. Revégétalisation	53
FICHE 9 – Le choix des semences	54
FICHE 10 – La récolte et le stockage des semences	59
FICHE 11 – L'ensemencement	62
FICHE 12 – L'étrépage - replaquage	68
C. Amélioration du substrat, optimisation de la germination et développement des plantules	72
FICHE 13 – Les amendements organiques et minéraux	74
FICHE 14 – Les engrais minéraux	82
FICHE 15 – La bioactivation	85
D. Protection du lit de semences	89
FICHE 16 – Le paillage	90
FICHE 17 – Les géotextiles biodégradables	93
E. Suivi des travaux de réhabilitation, travaux correctifs et usage du site	96
FICHE 18 – Le suivi des travaux de réhabilitation et les travaux correctifs	97
FICHE 19 – L'usage du site	101
BIBLIOGRAPHIE	105

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation des fiches techniques du guide opérationnel de la réhabilitation des terrains d'alpages.....	7
Figure 2 Présentation des fiches techniques concernant les interventions préalables à la réhabilitation	10
Figure 3 : réalisation d'un transect pour le diagnostic initial de la piste des Arcosses à Valmeinier (L. BENAS, 2023).....	11
Figure 4 : Exemple de l'évolution du NDVI _{max} sur une piste de ski (représentant 40 pixels de 30x30m) depuis 1984.	13
Figure 5 : Exemple des services écosystémiques rendus par un site témoin dans le cadre de la présente étude. Cette approche permet de réaliser un suivi par rapport au site de référence ou un suivi temporel de la réhabilitation.	15
Figure 6 : Plan de circulation des engins sur le chantier et zones de stockage (Prévenchem).....	16
Figure 7 : Définition des enjeux de la réhabilitation des terrains d'alpage	17
Figure 8 : Analyse sur lames minces de la porosité (espaces vides en noir) sur un site témoin (coupe rase et débardage par câble) et sur un site tassé (débardage par tracteur) et photos de profils racinaires.	19
Figure 9 : Présentation des fiches techniques concernant la réduction des impacts des travaux d'aménagements.....	22
Figure 10: Défrichage d'une nouvelle piste et mise en place du broyat sur la piste (L. BENAS, 2022).	23
Figure 11 : Mesure du ratio Carbone/Azote (C/N) dans les deux horizons de la piste réhabilitée (en bas) et du site témoin (en haut). Sur le site réhabilité où des aulnes étaient initialement présents, la teneur en carbone organique dans les sols est très importante, de même en ce qui concerne le C/N.....	24
Figure 12 : Réalisation du terrassement de la piste des secrets aux Arcs (L. Tixier, 2018).....	26
Figure 13 : Observation d'une fosse pédologique lors de l'étude de la réhabilitation opérationnelle des terrains d'alpages. (DSF, 2024)	27
Figure 14 : Structure du sol avant terrassement (gauche) et après terrassement (droite) avec un effet de foisonnement de l'horizon de sous-face, une remobilisation des éléments grossiers dans toute l'épaisseur du profil et une réduction de l'horizon de surface organo-minéral par perte de matière fine et/ou tassement (Dupin et al., 2019).	27
Figure 15 : Zoom sur la porosité du sol (agrégats, eau et air) puis zoom sur une partie des agrégats comportant le complexe argilo-humique permettant de fixer et de libérer des nutriments dans la solution du sol pour qu'ils soient disponibles au niveau des poils des racines.....	28
Figure 16: Saturation de la CEC par les ions carbonates libérés par le remaniement de sols calcaires	28
Figure 17 : Terrassement d'une piste de ski sur Quartzite avec quasiment aucun sol présent à l'état initial (L. BENAS, 2022)	31
Figure 18 : Mesure du pH sur la profondeur 0-20 cm et 20-40 cm d'un site réhabilité remblayé en comparaison avec un site témoin à proximité (DSF, 2024)	32
Figure 19 : Drain bétonné pour l'évacuation des eaux de ruissellement sur une piste de ski (La Plagne) (Hassid et al., 2006).	33
Figure 20 : Présentation des fiches techniques concernant la réhabilitation des sols dégradés dans les milieux ouverts de montagne.....	36
Figure 21 : Les différentes définitions du sol et champs d'application de la Loi sur la protection de l'environnement (OFED & Bellini, 2015).	38
Figure 22 : Teneur en matière organique moyenne des horizons de surface des sites réhabilités et des sites témoins (DSF, 2024).....	39

Figure 23 : Stockage du substrat (OFED & Bellini, 2015)	42
Figure 24 : Ensemble des étapes du décapage à la remise en place du substrat (Soltis environnement)	44
Figure 25 : Godet cribleur	46
Figure 26 : Photo d'une herse peigne permettant de réaliser le hersage (Wikipédia).....	49
Figure 27 : Mesure de la densité apparente sur deux sites réhabilités et un site témoin (DSF, 2024) .	50
Figure 28 : Recouvrement végétal d'une parcelle 5 ans après la réalisation	51
Figure 29 : Prairie d'alpage au sein d'un domaine skiable de Savoie non impacté par les travaux d'aménagement.....	54
Figure 30: Brosseuse électrique rotative pour la récolte de semences (cbn-alpin.fr).....	59
Figure 31: Épandage de foin vert sur le site réhabilité (SEM'LESALPES, 2018)	62
Figure 32 : Ensemencement à l'hydroseeder de la piste de l'Éclipse à Courchevel (D. Vignon, 2021)	65
Figure 33: Spectre d'utilisation de différents types de mulch en fonction de la longueur et du degré de la pente (Lignier & Rosset, 2012). FGM : Flexible Growth Medium. BFM : Bonded Fiber Matrix.....	65
Figure 34: Prélèvement d'une plaque à la pelle mécanique (Dupin et al., 2019).	68
Figure 35 : Nombre d'espèces végétales présentes sur le site réhabilité (en bleu) et sur le site témoin (orange)	69
Figure 36 : remise en place des plaques en mosaïque (OFED & Bellini, 2015).	70
Figure 37 : Épandeur à fumier ou compost (Agriculture).....	74
Figure 38 : Unité de compostage des boues de station d'épuration des eaux usées (STEP) et des déchets verts (Isoagglo.fr).....	75
Figure 39 : Les principales influences des différents minéraux N, P et K sur la croissance des plantes (Soltis environnement)	82
Figure 40 : La phytostimulation et phytoprotection grâce aux rhizobactéries (Yvan Moenne-Loccoz). 85	
Figure 41: Revégétalisation avec du foin vert de la piste Vernie Touge à Saint-Léger-les-Mélèzes (Huc et al., 2018).....	90
Figure 42 : Intérêt du paillage pour maintenir l'humidité (Lignier & Rosset, 2012).....	91
Figure 43: Mise en place d'un géotextile en toile de jute au col Agnel (hautes-alpes.net).	93
Figure 44: Illustration d'une fosse pédologique pour la description du sol (Soltis environnement)	97
Figure 45 : Comparaison des fonctions écologiques du sol et des caractéristiques du couvert végétal pour le site témoin (rose) et le site réhabilité (marron) pour l'établissement d'un score écologique (DSF, 2024).....	99
Figure 46 : Exemple des scores obtenus par le site témoin (rose) et le site réhabilité (marron) depuis 2017 (DSF, 2024).....	99
Figure 47 : NDVImax mesuré sur le site réhabilité depuis 1984 (DSF, 2024).....	99
Figure 48 : Prise de vue du dessus du site réhabilité avec un recouvrement végétal actuel de 75%. 100	
Figure 49: Pâturage d'un troupeau de brebis sur le domaine skiable de Aussois (R. MAGDINIER, 2022).	101

SOMMAIRE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Lien entre les caractéristiques abiotiques et les caractéristiques du sol et du couvert végétal (DSF, 2024).....	13
Tableau 2 : Exemple d'indicateurs pouvant être mesurés lors de l'état initial d'un site avant les travaux d'aménagement.	14
Tableau 3 : Evaluation du risque de tassement en fonction de la texture du sol, de la charge en éléments grossiers et de l'engorgement des sols.....	19
Tableau 4. Comparaison des avantages du débardage par câble et par tracteur	25
Tableau 5 : Influence de la teneur en argile initiale sur la perte d'argile pendant les travaux.....	39
Tableau 6 : Avantages et inconvénients des mesures de réduction ? de la teneur en éléments grossiers en fonction des conditions du milieu.	48
Tableau 7 : Modalités techniques et de mise en œuvre du griffage, hersage et chenillage (Dupin et al., 2019; Isselin-Nondedeu et al., 2006 ; DSF., 2024).....	52
Tableau 8 : Comparaison des semences exogènes et locales en termes de succès dans le cadre de la réhabilitation.	56
Tableau 9 : Critères de sélection des semences locales et exogènes.....	57
Tableau 10 : Comparaison des différentes techniques de récolte des semences.....	61
Tableau 11 : Comparaison entre les différentes techniques de végétalisation.....	67
Tableau 12 : Caractéristique physico-chimique moyenne ? des fumiers et composts équin et bovins d'après environ 75 analyses (IFCE, 2019). Les valeurs moyennes indiquées ci-dessus peuvent significativement varier entre les fumiers et composts de différentes exploitations en raison des pratiques de gestion des litières et des conditions de stockage, notamment la durée et les installations utilisées.....	76
Tableau 13 : Intérêt des différents produits organiques.	80
Tableau 14 : Comparaison des conditions de pose d'un géotextile ou du paillage en fonction des conditions du milieu	95

Objectifs et synthèse opérationnelle

PREAMBULE

La préservation et la restauration des sols dans les terrains d'alpages revêtent une importance cruciale, non seulement pour garantir la pérennité des écosystèmes montagnards, mais aussi pour répondre aux besoins des différents acteurs, tels que les exploitants agricoles, les gestionnaires de stations de ski et les autorités locales. En effet, ces terrains peuvent faire l'objet de travaux d'aménagement (pistes de ski, réhabilitation de milieux ouverts) dont la mise en œuvre peut dégrader les sols de manière irréversible. Ces enjeux multiples, allant de la préservation du patrimoine naturel à la promotion d'une activité économique durable, imposent des exigences élevées en matière de réhabilitation écologique.

Malgré de nombreux travaux consacrés à la question de la revégétalisation, les stations de ski sont confrontées à de multiples échecs, révélant ainsi la nécessité de poursuivre les études et les recherches pour améliorer les pratiques de réhabilitation et mieux comprendre les processus écologiques spécifiques à ces milieux montagneux et notamment ceux associés au sol.

C'est dans ce cadre qu'en novembre 2022, les 35 sociétés de remontées mécaniques des domaines de montagne de la Savoie, membres de Domaines Skiables de France, ont décidé à l'unanimité de mandater un organisme scientifique pour obtenir des recommandations sur les méthodes de réhabilitation des terrains d'alpage, adaptées aux contextes spécifiques des milieux de montagne. L'objectif est de favoriser la reconstitution du sol afin de répondre aux enjeux et usages des écosystèmes de montagne, notamment le maintien de l'activité agricole, la réduction de l'érosion, la préservation de la biodiversité et la qualité paysagère.

Cette étude, intitulée « La réhabilitation opérationnelle des terrains d'alpages, DSF (2024) », a été menée par un groupement composé du bureau d'études Soltis Environnement, de la Société d'Économie Alpestre de Savoie (SEA 73) et du laboratoire Edytem de l'Université Savoie Mont-Blanc (Zoom sur les auteurs :

Au travers d'une expérimentation d'envergure menée sur 8 stations pilotes de Savoie, les facteurs de succès et d'échecs des projets de réhabilitation écologiques des pistes de ski ont été déterminés. La bonne compréhension du sol et des bonnes pratiques issues des retours d'expérience a permis d'aboutir à la production de ce guide opérationnel afin d'accompagner au mieux les différentes parties prenantes à chaque étape de la réhabilitation écologique.

Ce travail s'est décliné selon 4 grandes phases :

- > **PHASE 1.** La première étape a consisté en une synthèse bibliographique, avec compilation de retours d'expérience, s'appuyant sur une cinquantaine de documents issus de la littérature scientifique et technique internationale. Cette étape a permis de recueillir des données pertinentes sur les méthodes de réhabilitation écologique utilisées en système montagnard, les résultats obtenus et les enseignements tirés des expériences passées.
- > **PHASE 2.** Une série d'entretiens a ensuite été menée avec les gestionnaires des huit stations pilotes de Savoie, à savoir Courchevel, les Arcs, la Plagne, Aussois, Val Cenis, Valmeinier, les Saisies et la Rosière ainsi qu'avec 22 alpagistes exploitant les terrains d'alpages de ces domaines skiables. Cette deuxième étape a été cruciale pour identifier les besoins spécifiques des acteurs locaux et comprendre les enjeux liés à la réhabilitation des sols en milieu montagnard. Ce travail a également fourni des informations précieuses sur les pratiques existantes, les contraintes rencontrées et les attentes en matière de résultats de la réhabilitation.
- > **PHASE 3.** Une trentaine de sites d'étude réhabilités, ainsi que des sites témoins ont été sélectionnés en concertation avec les exploitants agricoles et les domaines skiables afin

d'évaluer l'efficacité des mesures de réhabilitation écologique, en se basant sur différents indicateurs de refunctionalisation des sols et de revégétalisation. Cette importante phase de terrain a permis de collecter des données spécifiques sur les conditions locales et les résultats obtenus après la mise en œuvre des pratiques de réhabilitation.

- > **PHASE 4.** Enfin, un traitement statistique des données collectées a été réalisé afin de comprendre quels facteurs biotiques (liés au vivant), abiotiques (liés à l'environnement) et anthropiques (liés à l'activité humaine) contribuent à la réussite des mesures de réhabilitation des terrains d'alpages dégradés. **Cette quatrième étape a permis de tirer des conclusions et de formuler des recommandations pour guider les futures actions de réhabilitation des sols en milieu montagnard.**

Chacune de ces phases a contribué à enrichir et à adapter les recommandations aux différentes contraintes rencontrées dans les milieux ouverts de montagne par les responsables des travaux. Les principaux résultats obtenus à chaque phase de l'étude ainsi que les principales recommandations formulées dans ce guide opérationnel sont présentés ci-dessous.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Synthèse bibliographique

La synthèse bibliographique a permis d'établir **une base de connaissances solide et d'identifier la plupart des méthodes et techniques de réhabilitation adaptées aux milieux de montagne**. Certaines études, mettant en avant les techniques de revégétalisation en montagne avec notamment l'utilisation de semences locales, ont déjà fait leurs preuves sur les stations concernées par notre étude. En revanche, l'intérêt d'une caractérisation des différents horizons¹ du sol à l'état initial n'est que peu énoncé et représente un axe d'étude prioritaire pour favoriser la réussite des projets.

Entretiens

Les entretiens avec les acteurs locaux, notamment les **domaines skiables** et les **alpagistes**, ont apporté une dimension concrète à ce guide en intégrant des remarques et observations spécifiques aux milieux étudiés. Les contraintes rencontrées par les maîtres d'œuvre de la réhabilitation (généralement les domaines skiables) ont été prises en compte pour adapter au mieux les recommandations et améliorer leurs mises en œuvre en milieu de montagne.

Concernant les sols, la courte fenêtre d'intervention pour la réalisation des travaux ne permet pas toujours une intervention dans des conditions météorologiques favorables, entraînant ainsi des risques de dégradation importants des sols. De la même manière, le choix du matériel utilisé en fonction des caractéristiques du milieu et sa disponibilité peuvent être déterminants pour la réussite du projet. La forte sensibilité des sols implique également le bon encadrement des entreprises de travaux publics (cahier des charges, temps de contrôle sur site) afin d'assurer leur préservation tout au long de la réhabilitation. De mauvaises pratiques peuvent générer des impacts importants et souvent irréversibles sur les sols. Enfin, certaines pratiques telles que la récolte des semences sur site sont efficaces, mais leur faisabilité technico-économique peut être un frein à leur mise en œuvre.

Les entretiens avec les **alpagistes** ont apporté un éclairage complémentaire compte tenu de leur connaissance du terrain. Le principal constat concerne l'effet néfaste de la répétition des travaux d'aménagements sur un même site. À force de remaniements, la perte excessive de substrat entraîne

¹ Les horizons du sol sont les différentes couches du sol, issu de la division de l'ensemble du sol, en volumes considérés comme homogènes.

une difficulté de reprise importante de la végétation. Les alpagistes insistent, tout comme les référents des domaines skiables, sur l'enjeu du choix des prestataires et d'une supervision adéquate des travaux.

Par ailleurs, malgré une reprise de la végétation initialement satisfaisante, celle-ci voit souvent sa biomasse diminuer significativement après quelques années (généralement deux ou trois ans après la revégétalisation) sans que les raisons n'aient pu être identifiées avant la réalisation de cette étude.

Campagne de terrain

Une campagne de terrain d'envergure a été menée au cours de l'été 2023 au sein du domaine skiable des 8 stations pilotes à savoir Courchevel, les Arcs, la Plagne, Aussois, Val Cenis, Valmeinier, les Saisies et la Rosière. Au total 31 sites ont été prospectés incluant de manière systématique un site réhabilité (piste de ski) et un site de référence à proximité du site réhabilité. Au cours de cette mission de terrain, des fosses pédologiques ont été réalisées et analysées, différents échantillons de sol ont été prélevés pour analyse en laboratoire. Enfin, la végétation a fait l'objet d'une étude tant en termes de biomasse produite qu'en termes d'évaluation de la richesse spécifique (nombre d'espèces observées).

Ce travail a permis, au cas par cas, de formuler des recommandations pour améliorer chaque site réhabilité, lesquelles ont été partagées avec les domaines skiables concernés. Une importante base de données a aussi été constituée, permettant une analyse statistique poussée.

Synthèse statistique et analyse

L'analyse statistique de l'ensemble des données collectées sur le terrain et lors des entretiens a permis de confirmer l'effet de contraintes environnementales sur les sites témoins.

L'altitude est un des facteurs clés qui influence les caractéristiques pédologiques avec notamment une plus forte teneur en sable et une plus faible teneur en argile à mesure que l'altitude augmente. Ces conditions entraînent également une diminution de la biomasse du couvert végétal avec l'altitude.

En ce qui concerne la géologie, des liens ont été observés avec le pH du sol, la teneur en éléments grossiers et la texture (teneur en sable et en argile) sans mise en évidence de relation significative du fait d'un nombre de réplicats limité.

En ce qui concerne la pente et l'exposition, aucun effet direct sur les caractéristiques du sol n'a été identifié. Cependant, ces caractéristiques peuvent représenter des contraintes dans le cas de fortes pentes et de versants exposés au sud et doivent être prises en compte lors du choix des techniques de réhabilitation.

D'un autre côté, cette analyse a aussi permis de dégager les principaux facteurs d'échec de la réhabilitation des terrains d'alpages, à savoir :

- > La modification des propriétés physiques des sols, notamment la compaction des horizons.
- > La perte de la matrice fine (diminution de la teneur en argile).
- > La diminution de la fertilité des sols, caractérisée par une baisse de la capacité des sols à retenir les nutriments (lié à une faible teneur en argile notamment) et à une baisse de la teneur en matière organique notamment dans le premier horizon.

Ces paramètres ont une incidence négative directe sur les caractéristiques du couvert végétal, en particulier sur la biomasse végétale, pourtant essentielle d'un point de vue pastoral.

RECOMMANDATIONS POUR LA RÉUSSITE D'UN PROJET DE RÉHABILITATION

L'ensemble des quatre phases méthodologiques a permis de formuler un grand nombre de recommandations qui seront présentées dans les 19 fiches du guide opérationnel de la réhabilitation des terrains d'alpages. La réussite de ces travaux implique la prise en compte des recommandations fournies à travers l'ensemble de ces fiches, en sélectionnant les techniques et les méthodes les plus appropriées aux conditions spécifiques de chaque site à réhabiliter. Plusieurs recommandations clés sont synthétisées ci-après et nécessitent une attention particulière.

Études

L'étape d'études consiste à réaliser un état des lieux du site et à orienter les recommandations :

- > Définir les objectifs de la réhabilitation.
- > Identifier les spécificités du milieu à travers des échanges avec les différents acteurs concernés.
- > Réaliser un diagnostic initial incluant les caractéristiques environnementales, du sol et de la végétation pour compléter la connaissance du domaine et permettre d'adapter le choix des techniques et méthodes de réhabilitation.
- > Établir un cahier des charges et un calendrier d'action regroupant l'ensemble des techniques et méthodes choisies pour chaque étape du guide en tenant compte des caractéristiques propres au site identifiées précédemment.

Cette étape doit être anticipée et prise en compte dans la planification du projet, car elle constitue un moment clé dans la réussite du projet de réhabilitation des terrains. Elle doit être menée par un personnel qualifié et compétent en écologie et en pédologie (sciences des sols).

Travaux de terrassement

Les travaux de terrassement doivent veiller à la préservation des sols et rechercher la réduction de l'impact tout au long de l'intervention, à savoir intervenir sur des terrains secs, limiter la compaction du sol, privilégier la circulation des engins hors zones à enjeux et limiter l'érosion du substrat.

À noter que les horizons superficiels sont les plus exposés aux terrassements et correspondent aux couches les plus fertiles, car les plus organiques avec une banque de graines intéressantes qu'il convient de préserver au mieux.

Les entreprises de TP doivent être encadrées par le personnel ayant rédigé le cahier des charges afin de veiller à sa bonne mise en application. Une supervision attentive de l'avancement des travaux permettra de résoudre au mieux les aléas et limitera les risques d'impact sur le milieu.

Les principales préconisations sont les suivantes :

- > En amont des travaux d'aménagements : réalisation soignée du décapage et du stockage de l'horizon de surface dans des conditions adaptées, sans compaction (ensemencement de l'andain à envisager selon la durée de stockage des terres).
- > En phase post travaux d'aménagement : réalisation d'un griffage perpendiculaire à la pente sans compaction afin de restaurer les liens entre l'horizon de sous-face en place et l'horizon de surface qui sera remis en œuvre par la suite. Cette action favorisera une meilleure rétention de l'eau et des nutriments.

- > Remise en place soignée de l'horizon de surface avec intégration d'un mélange d'amendements et/ou de fertilisants adaptés, et éventuels apports de biostimulants. Ce mélange doit permettre un maintien dans le temps des propriétés physico-chimiques du sol restauré. La minéralisation de la matière organique doit assurer à la fois une reprise rapide (disponibilité rapide en nutriments) et pérenne de la végétation (restaurer la fonction de recyclage des nutriments avec maintien d'une teneur en matière organique dans le temps).

Le choix des amendements doit être minutieusement étudié en fonction des caractéristiques spécifiques du milieu initial, notamment la composition physico-chimique du sol, l'usage du site, ainsi que des ressources disponibles aux alentours des domaines skiables (privilégier un fournisseur localisé à proximité du site).

Travaux de végétalisation

Après la mise en place du substrat, il est essentiel de procéder rapidement aux étapes de revégétalisation et de protection des semences, afin de favoriser la reprise du couvert végétal et ainsi stabiliser le sol pour limiter la perte de la matrice fine.

Sont recommandées :

- > La sélection d'un mélange de semences approprié, en tenant compte des conditions environnementales locales et des objectifs de réhabilitation. Les semences doivent être adaptées aux caractéristiques du sol et capables de s'établir efficacement dans le milieu montagnard, favorisant ainsi le rétablissement d'une végétation diversifiée, avec une phénologie similaire aux végétations adjacentes et résiliente.
- > La mise en place d'un paillis sur les zones réhabilitées afin de prévenir l'érosion et de favoriser la stabilisation du sol. Le paillis protège le sol des intempéries, réduit le lessivage des nutriments et crée un microclimat propice à la croissance des plantules.

CONCLUSION

Cette synthèse offre une vue d'ensemble des bonnes pratiques. Les fiches proposées dans la suite du guide présentent la démarche complète permettant une mise en œuvre efficace de ces recommandations.

Celles-ci visent à accroître les chances de succès de la réhabilitation des terrains d'alpages. Elles contribuent non seulement à restaurer la biodiversité et la productivité des écosystèmes montagnards, mais également à renforcer leur résilience face aux changements environnementaux actuels.

En préservant ces habitats fragiles et en luttant contre l'érosion, la pérennité des services écosystémiques essentiels qu'ils fournissent est assurée, notamment en ce qui concerne leur usage agricole (production de fourrage) et récréatif (activités estivales et/ou hivernales).

Structure du guide

Ce guide opérationnel est destiné aux différentes parties prenantes impliquées dans un projet de réhabilitation écologique des pistes de ski et plus globalement à la réhabilitation des milieux ouverts de montagne. Une synthèse des principaux résultats est présentée dans cette partie 1.

Pour ce faire, la partie 3 propose 19 fiches techniques et opérationnelles réparties en deux grands chapitres : « Les interventions préalables » (5 fiches) et « La réhabilitation des sols dégradés » (14 fiches, Figure 1). Ces chapitres représentant les principales thématiques abordées sont composés de 7 sous-sections de couleurs différentes.

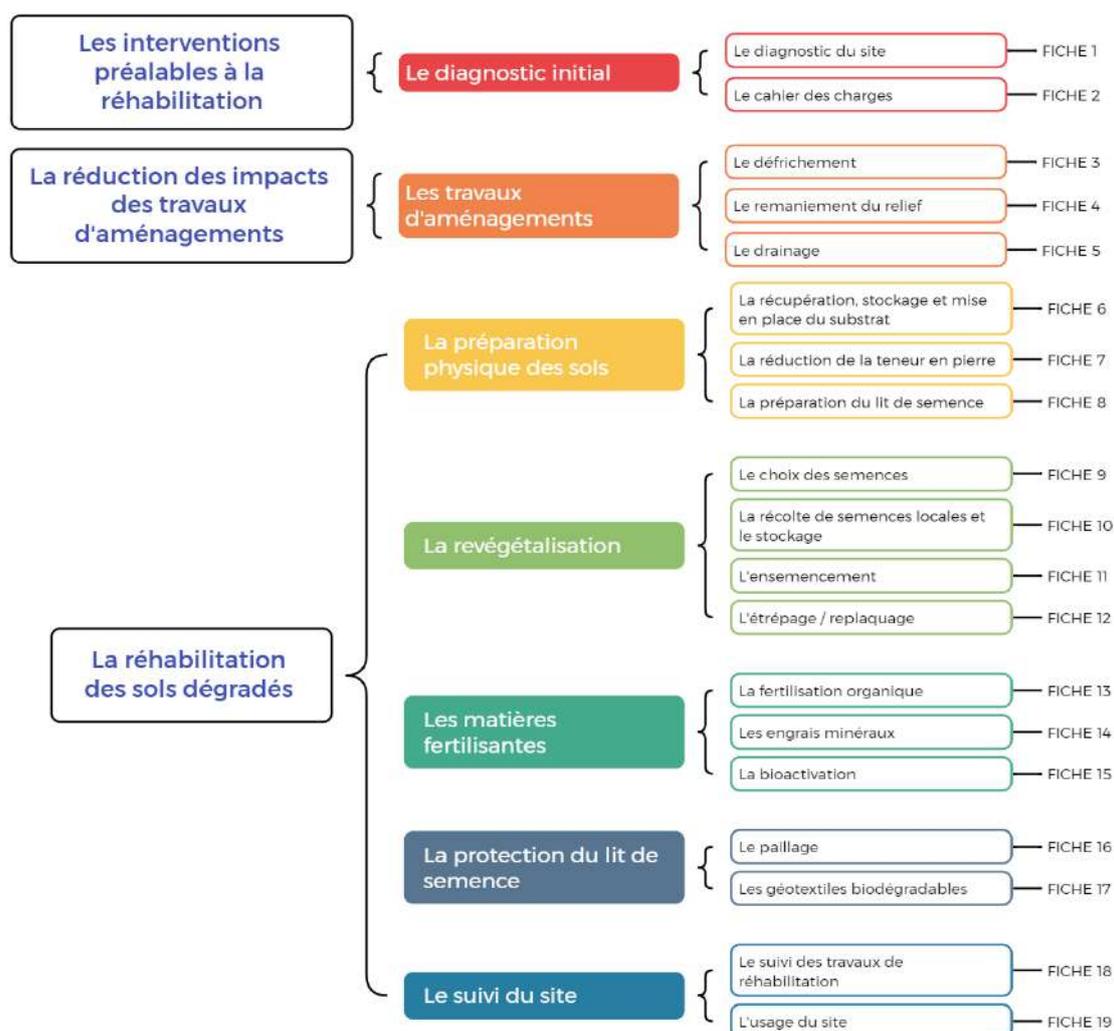


Figure 1 : Présentation des fiches techniques du guide opérationnel de la réhabilitation des terrains d'alpages.

Dans le cadre des études liées à la réalisation de travaux d'aménagement et de travaux de réhabilitation, il est nécessaire de consulter le présent guide dans son intégralité. La partie diagnostic initial et réduction des travaux d'aménagement doit impérativement être consultée dès la création du projet afin d'avoir une idée de l'ensemble des étapes à prendre en compte. De plus, la partie concernant la réduction des impacts des travaux d'aménagement permet de guider le maître d'œuvre pour orienter au mieux les entreprises de travaux publics (TP) afin de réduire leur impact sur le milieu et notamment sur le sol.

Les parties concernant la réhabilitation des sols dégradés doivent être consultées, par le maître d'œuvre ou l'assistance à maître d'œuvre, lors de l'établissement de l'itinéraire technique de réhabilitation afin de les orienter dans la définition des méthodes à mettre en œuvre en fonction du contexte spécifique du site déterminé lors du diagnostic initial. De plus, l'ensemble des retours d'expériences contenus dans le guide permettront de les alerter sur les différentes problématiques qu'ils pourraient éventuellement rencontrer et de leur indiquer comment y faire face.

Chaque fiche fait l'objet d'un résumé synthétique, suivi d'une partie contexte et description. Enfin, une partie intitulée 'Modalités techniques de mise en œuvre et retours d'expérience' est proposée, reprenant l'ensemble des étapes à suivre pour chaque phase des travaux ainsi que les retours d'expériences collectés à partir de la bibliographie, des entretiens et de l'analyse statistique.

Fiches opérationnelles

La version actuelle du guide opérationnel, version 1.0, pourra être amendée et adaptée en fonction des retours d'expérience des domaines skiabiles et des futures études scientifiques.

Les interventions préalables à la réhabilitation écologique

"Historiquement, les travaux se sont concentrés sur les terrains les plus faciles à travailler avec des engins, donc les moins escarpés et caillouteux. C'étaient aussi les meilleurs secteurs d'alpage." Alpagistes du Montvalezan.

Malgré une diminution de la fréquence des aménagements en montagne ces dernières années, les **travaux** sont désormais réalisés dans des milieux naturellement plus **contraignants**, tels que des terrains plus pentus, situés à des altitudes plus élevées, ou caractérisés par une géologie plus dure et des sols peu profonds. Ces contraintes ajoutent une dimension technique supplémentaire aux travaux de réhabilitation, car la perte de substrat sur des sols peu épais, une mauvaise revégétalisation sur des pentes abruptes, ou l'utilisation de semences inadaptées à haute altitude peuvent conduire à des difficultés parfois irréversibles.

Face à ce constat, l'encadrement des travaux d'aménagement et de réhabilitation par des experts prend de plus en plus de sens.

La connaissance préalable du milieu initial à travers le diagnostic de l'état initial permet en effet de comprendre les enjeux et usages anthropiques du site, mais aussi de déterminer l'ensemble des caractéristiques du sol et du couvert végétal.

Ces éléments sont déterminants pour proposer un cahier des charges adapté au cas par cas et ainsi accroître les chances de réussite de la réhabilitation.



Figure 2 Présentation des fiches techniques concernant les interventions préalables à la réhabilitation

Par ailleurs cela permet de préserver les secteurs les plus productifs caractéristiques des alpages laitiers des Alpes du Nord, et ainsi de privilégier l'implantation de certains projets en mauvaises terres agropastorales.

FICHE 1 – LE DIAGNOSTIC DU SITE



À retenir

Un diagnostic initial du site est essentiel pour caractériser le milieu et ainsi guider le choix des techniques de réhabilitation écologique à mettre en place. **L'ensemble de ces étapes, décrites ci-dessous, doivent, si possible, être réalisées par une même personne référente qui assurera le suivi tout au long du chantier.**

Ce diagnostic intègre les étapes suivantes :

- > Nomination de la personne référente et responsable de l'ensemble des étapes de la réhabilitation.
- > Identification des différents acteurs concernés par l'aménagement du milieu.
- > Inventaire documentaire.
- > Diagnostic de terrain.

En montagne, une des contraintes majeures est la saisonnalité. L'anticipation est de rigueur pour travailler en conditions optimales !

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Les caractéristiques environnementales telles que l'altitude, la géologie et la pente exercent une influence significative sur les propriétés du sol et le développement de la végétation.

Les paramètres tels que l'historique et l'usage, spécifiques à chaque site, doivent également être déterminés pour mener à bien la réhabilitation.

La prise en compte de la dimension humaine permet d'obtenir une caractérisation plus détaillée des milieux à restaurer et d'adapter toutes les étapes du processus de réhabilitation.

Ce diagnostic doit être réalisé préalablement au projet d'aménagement.

Dans le cas où les travaux de réhabilitation ont déjà été menés, mais qu'un dysfonctionnement est identifié, un diagnostic simplifié peut être envisagé afin de définir les actions correctives à réaliser.

Dans ce cas, il est possible d'identifier un site voisin exposé aux mêmes conditions environnementales et n'ayant jamais fait l'objet de travaux, afin de définir l'objectif à atteindre en termes de réhabilitation écologique. Il est, dans ce cas de figure, crucial de s'assurer que la géologie est similaire, car elle peut varier rapidement sur quelques mètres en milieu montagneux. La composition rocheuse joue en effet un rôle primordial dans la formation du sol.



Figure 3 : réalisation d'un transect pour le diagnostic initial de la piste des Arcosses à Valmeinier (L. BENAS, 2023).

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Au vu de la courte fenêtre d'intervention sans neige en montagne, il est recommandé d'engager la réalisation d'un diagnostic **avant la saison estivale voire l'année précédente les travaux** afin d'intervenir dans des conditions optimales et assurer une bonne intégration des prescriptions dans le cahier des charges (FICHE 2).

Une personne référente (maître d'œuvre ou assistance à maîtrise d'œuvre) et spécialiste des sols et/ou terrains d'alpage doit être identifiée pour superviser l'ensemble des étapes du projet. Elle est chargée d'analyser les données issues des diagnostics, de produire le cahier des charges, d'interagir avec les acteurs locaux et les entreprises de travaux et s'appuyer au mieux sur les recommandations du guide.



Résultats des entretiens

Pour certains alpagistes, la mise en place d'une véritable maîtrise d'œuvre serait bénéfique.

"Il faut être vigilant à ne pas aller au plus simple ! Un suivi par un maître d'œuvre compétent pourrait être un vrai plus, ou bien par un spécialiste dans l'équipe du domaine skiable, qui encadre les entreprises pour être sûr que le cahier des charges est bien suivi (il ne s'agit pas de faire au moins cher, mais de faire bien) : ne pas enterrer la terre végétale, ne pas laisser les gros cailloux dans les horizons supérieurs, ..." Les alpagistes de la Rosière.

① ETAPE 1. IDENTIFICATION DES DIFFERENTS ACTEURS CONCERNES PAR L'AMENAGEMENT DU MILIEU

La première prise de contact avec les acteurs locaux, notamment les alpagistes, a pour objectif de les informer du projet et des travaux à venir.

Une **bonne collaboration avec les parties prenantes constitue une ressource majeure** tout au long du projet. Les acteurs locaux disposent généralement de documents aidant à la compréhension du site d'un point de vue environnemental et historique et peuvent également permettre d'anticiper des contraintes potentielles et spécifiques au site (ex : AOP Beaufort).



Résultats des entretiens

Les entretiens réalisés au cours de cette étude ont souligné **l'importance de l'implication des alpagistes dans les projets de réhabilitation**. En effet, leur connaissance approfondie du territoire leur confère **une vision précise des réalités locales et des caractéristiques du terrain**. Lorsque les méthodes employées sont adaptées au contexte spécifique de chaque site, les projets de réhabilitation ont tendance à être plus réussis.

Notons également qu'une partie de l'équipe des domaines skiables est issue du **monde agricole**, en activité ou non, et constitue une vraie plus-value pour les stations dans le cadre de travaux de réhabilitation.

Citons deux retours d'alpagistes pour illustrer le propos :

"Aux Saisies, les alpagistes ne craignent pas d'aller voir le chef de chantier pour voir comment ça va se passer et donner certains conseils au gré de leurs expériences antérieures" Les alpagistes des Saisies.

Ce constat est partagé par les alpagistes de Valcenis :

"C'est important pour les agriculteurs d'être présents sur le chantier pour suivre les entreprises lors de la remise en état. Il n'y a pas toujours nécessité d'une maîtrise d'œuvre spécifique, nous pouvons le faire nous-mêmes. En revanche, ces travaux ne doivent pas se faire en décembre ! Il arrive aussi que les agriculteurs fassent la remise en état en partenariat avec l'entrepreneur."

② ETAPE 2. INVENTAIRE DOCUMENTAIRE

Les principales caractéristiques environnementales du site peuvent être collectées grâce à de nombreux outils en ligne ou ressources en libre accès :

- **La géologie** via le site Infoterre (<https://infoterre.brgm.fr>).
- **La pédologie** à l'aide de Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP : <https://www.geoportail.gouv.fr>).

- **La topographie, l'hydrologie, la pente, l'exposition, l'altitude** à l'aide du site Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr>) et/ou d'outils de cartographie (SIG).
- **Les données climatiques** disponibles sur le site MétéoFrance (<https://meteofrance.com>).

Des relations peuvent exister entre ces caractéristiques et le fonctionnement des sites. L'étude DSF (2024) a permis d'établir quelques grandes tendances présentées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Lien entre les caractéristiques abiotiques et les caractéristiques du sol et du couvert végétal (DSF, 2024).

Géologie	Altitude	Pente	Exposition
<p>La géologie influence le pH, la proportion en éléments grossiers et la texture du sol.</p> <p>Une roche cristalline sera associée à un sol avec une prédominance sableuse, tandis qu'une roche sédimentaire présentera un sol avec une prédominance d'éléments plus fins (de type limons, argiles)</p>	<p>L'augmentation de l'altitude entraîne généralement une teneur en argile plus faible et une teneur en sable plus élevée selon les résultats obtenus dans cette étude.</p> <p>Ces variations influencent la fertilité du sol. En effet, une faible teneur en argile limite la capacité du sol à retenir les nutriments (CEC).</p>	<p>La pente ne semble pas avoir d'effet direct sur les caractéristiques du sol, mais limite l'infiltration de l'eau dans le sol.</p> <p>C'est en revanche, en cas de pente forte, une contrainte à prendre en compte pour le choix des techniques de réhabilitation.</p>	<p>L'exposition ne semble pas avoir d'effet direct sur le milieu bien que l'adret soit susceptible de générer davantage de stress hydrique (à vérifier, le cas échéant, sur la base des données météorologiques disponibles)</p>

Pour compléter la bibliographie, d'autres ressources sont à coupler aux entretiens et échanges menés avec les acteurs locaux, tels que :

- **Les données historiques** disponibles sous la forme de photographies aériennes et disponibles via le site IGN (outil « Remonter le temps ») : <https://remonterletemps.ign.fr>.
- **Les données historiques sur le suivi du couvert végétal du site**, sur la base de données satellitaires SENTINEL 2 (résolution 10 m, disponible depuis 2017) et LANDSAT (résolution 30 m, disponible depuis 1984 voire 2017 sur google engin) (<https://earthengine.google.com>). Cette mesure correspond au NDVI max et permet d'appréhender l'évolution de la biomasse du couvert végétal.

Focus sur le NDVI, qu'est-ce que c'est ?

Le NDVI_{max} (indice de végétation par différence normalisée) est un indicateur du **niveau de vert**, à savoir la « quantité de vert » (ou greening en anglais) calculé à partir du traitement d'une image satellite. Il convient de sélectionner l'image analysée au **pic de saison de la végétation** afin d'établir un suivi annuel cohérent. Plus il s'approche de 0 plus « la quantité de vert diminue », plus il s'approche de 1 plus « la quantité de vert augmente ». **Attention**, cet indicateur ne témoigne pas de la qualité du couvert végétal.

Sur la Figure 4 ci-dessous, l'indicateur a été calculé entre 1984 et 2022 permettant de rendre compte de l'évolution de la végétation sur une piste de ski. On observe que des travaux conséquents ont eu lieu en 2012 et en 2013, entraînant une perturbation significative du couvert végétal. Malgré une amélioration notable en 2016, la végétation a mis plusieurs années avant de retrouver un recouvrement satisfaisant (mais différent de l'état initial).

Utilisé à une échelle plus globale, par exemple à l'échelle de la station, cet indicateur permet d'identifier les secteurs dégradés où des interventions d'amélioration du sol et/ou de revégétalisation doivent être mises en œuvre prioritairement.

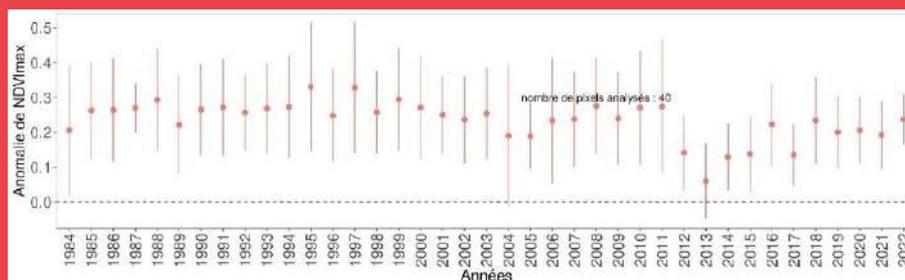


Figure 4 : Exemple de l'évolution du NDVI_{max} sur une piste de ski (représentant 40 pixels de 30x30m) depuis 1984.

③ ETAPE 3. DIAGNOSTIC DE TERRAIN

Toutes ces données fournissent une base solide à la caractérisation du site dans son ensemble. Dans un contexte montagneux de **forte variabilité des sols**, l'analyse de terrain permettra de vérifier et de préciser les éléments bibliographiques collectés précédemment.

Les différents paramètres à relever sur le terrain sont indiqués dans le Tableau 2 ci-dessous. Ils permettent de qualifier les différents enjeux, à savoir **l'enjeu écologique, l'enjeu pastoral, l'enjeu paysager et l'enjeu lié aux pistes de ski** tels que la réduction du risque d'érosion (FICHE 2).

Tableau 2 : Exemple d'indicateurs pouvant être mesurés lors de l'état initial d'un site avant les travaux d'aménagement.

Enjeu écologique		Enjeu pastoral		Enjeu paysager et de réduction de l'érosion	
Environnement du site	Exposition Géologie Topographie Altitude	Environnement du site	Exposition Géologie Topographie Altitude	Environnement du site	Exposition Géologie Topographie Altitude Pente
Physique du sol	Densité apparente Granulométrie Teneur en éléments grossiers Profondeur du sol Perméabilité à saturation (optionnel, dépend des sites) ...	Production fourragère	Nombre de jours pâturables Recouvrement par la végétation Hauteur et biomasse sur pied mesurées au pic de la saison de végétation	Physique du sol	Texture
Chimie du sol	pH, CEC, Matière organique Corg, Ntot, P, K, Mg, Ca, Na, CaCO ₃			Végétation	Homogénéité du couvert (taux de recouvrement par la végétation)
Biologie du sol	Profondeur racine Densité racinaire Biomasse microbienne, ...				
Végétation	Hétérogénéité spatiale (sol nu, végétation) Habitat selon EUNIS ou communauté phytosociologique Diversité floristique Présence d'espèce patrimoniale Présence d'espèce exotique envahissante ...	Qualité du couvert végétal	Appétence du couvert (potentiel fourrager du site, présence d'espèces appétentes) Présence d'espèce refusée (refus de pâture) <i>Reprise des espèces semées (si déjà réhabilité)</i>	Indicateur paysager	Esthétique globale sur dires d'expert

L'obtention des paramètres liés au sol nécessite la réalisation d'une **fosse pédologique** réalisée à la main ou à l'aide d'une minipelle, si celle-ci peut être mise à disposition (veiller à éviter les zones avec une forte charge en éléments grossiers et intervenir en conditions sèches).

Différents paramètres visuels sont relevés dans la fosse comme par ex. la structure, la densité apparente, la nature des différents horizons, etc. Des **échantillons de sol** sont par la suite prélevés et envoyés en laboratoire pour compléter le diagnostic. Ces analyses sont nécessaires pour mesurer les **paramètres physico-chimiques et biologiques** du sol. En parallèle, un relevé exhaustif de la **diversité végétale** sur un transect peut également être réalisé ainsi que la mesure du recouvrement et la biomasse des espèces présentes (mesure à réaliser au pic de saison de végétation).

L'obtention de ces résultats permet de caractériser l'état initial du site dans son ensemble. Ils serviront de base à l'élaboration de la stratégie de réhabilitation écologique, mais également par la suite pour suivre le succès de la réhabilitation.

Voici un exemple des résultats qui peuvent être produits à l'issue d'un diagnostic. Une note allant de 0 à 1 est attribuée à chacun des services étudiés pouvant prendre en compte plusieurs indicateurs évalués sur le terrain. Par exemple, la rétention en eau du sol dépend de la profondeur du sol, de la texture et de la teneur en élément grossier. Alors que la productivité primaire représente la quantité de biomasses végétales produite.

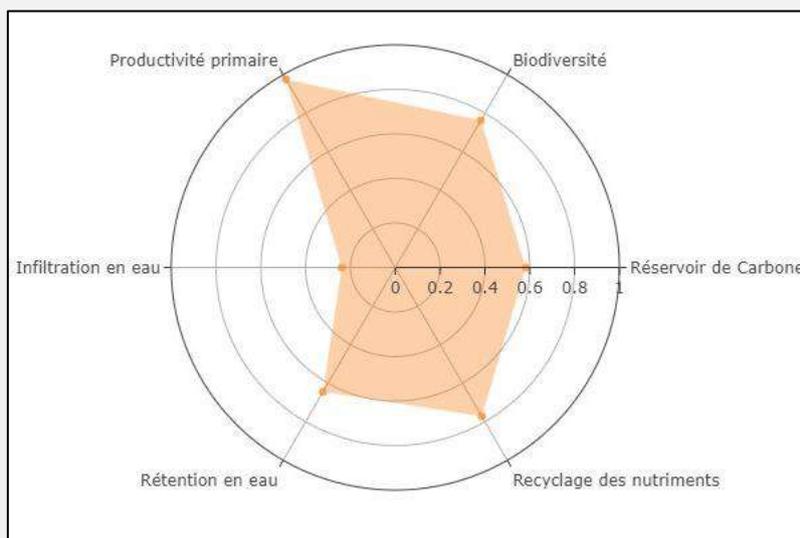


Figure 5 : Exemple des services écosystémiques rendus par un site témoin dans le cadre de la présente étude. Cette approche permet de réaliser un suivi par rapport au site de référence ou un suivi temporel de la réhabilitation.

FICHE 2 – LE CAHIER DES CHARGES



À retenir

L'élaboration du cahier des charges se fait sur la base :

- > D'objectifs clairement définis avec les différentes parties prenantes.
- > Du diagnostic de terrain.
- > Des fiches 1 à 19 du présent guide.

Au vu de l'ensemble de ces éléments, la personne référente détermine la stratégie à mettre en œuvre. Elle définit ainsi les moyens et techniques les plus adaptés à chaque site afin d'optimiser la réussite du projet. Le cahier des charges, à destination de l'entreprise de travaux publics sélectionnée, concernera tout ou une partie des travaux de réhabilitation.

D'éventuelles contraintes réglementaires doivent également être intégrées à cette étape.

En phase travaux, toute compaction est à proscrire (hors prescription spécifique). La réussite du projet en dépend !

CONTEXTE ET DESCRIPTION

La personne responsable du montage du projet doit esquisser une **stratégie** pour déterminer **quelles actions, quand, par qui** (agriculteurs, les domaines skiabiles, l'entreprise de TP) et **comment** elles seront à mettre en œuvre.

La rédaction du cahier des charges s'adressera à l'entreprise sélectionnée sur les travaux qui lui seront confiés.



Figure 6 : Plan de circulation des engins sur le chantier et zones de stockage (Prévencem)

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Les étapes de l'établissement du cahier des charges sont les suivantes :

① ÉTAPE 1. STRATEGIE POUR LA REHABILITATION ECOLOGIQUE

La définition préalable des objectifs avant d'entreprendre les travaux d'aménagement permet de choisir la technique de réhabilitation la plus adaptée, en fonction des principaux enjeux de la zone.

Par exemple,

- > Si l'objectif est principalement lié à la **réduction de l'érosion**, des choix devront être faits pour permettre le **développement rapide de la végétation** (grâce à un effet « Boost » lors de l'ajout des matières fertilisantes) tout en assurant une **compaction** suffisante pour éviter la perte de sol.
- > Si l'objectif vise le **développement d'un couvert végétal pérenne** (sans la nécessité d'avoir cet effet « Boost »), il s'agira de travailler les matériaux de sous-face de manière à **réduire la compaction** et à **améliorer l'horizon de surface** et faciliter ainsi l'exploration racinaire.

En milieu de montagne, **4 grands enjeux** ont été définis : **les enjeux écologiques, ceux liés au pastoralisme, au paysage et à la réduction du risque d'érosion**. En fonction de ces enjeux, différents paramètres vont être pris en compte tels qu'identifiés dans le diagramme ci-dessous.

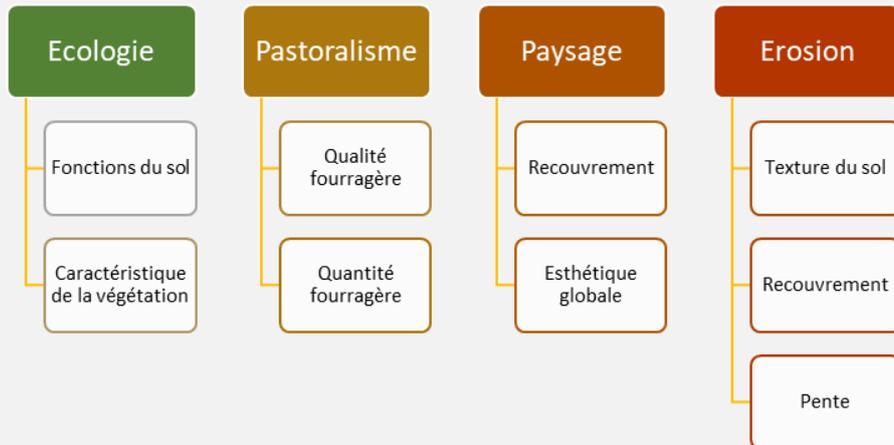


Figure 7 : Définition des enjeux de la réhabilitation des terrains d'alpage

Il est important de noter que les différents acteurs doivent être consultés car les enjeux varient d'un acteur à l'autre. L'exploitation d'un alpage avec des chèvres ou des vaches ne demande pas les mêmes ressources. De la même manière, certaines exploitations doivent répondre à des cahiers des charges précis tels que l'AOP Beaufort, ce qui peut orienter les choix de réhabilitation.



Résultats des entretiens

Le syndicat de défense du fromage Beaufort a aussi pu s'exprimer, dans le cadre de cette étude concernant les enjeux et contraintes spécifiques à l'exploitation en cahier des charges Beaufort :

« Validé par décret ministériel le 04 avril 1968, le premier cahier des charges du Beaufort pose les jalons de l'Appellation d'Origine et définit l'aire géographique de production.

La ressource herbagère, constituée majoritairement de prairies naturelles, étant avec le troupeau la base de la production du lait, il n'est pas étonnant de voir rapidement apparaître dans le cahier des charges des dispositions préservant l'ancrage au terroir : autonomie fourragère et laitière, vaches de race Tarine et Abondance exclusivement, limitation de la production moyenne du troupeau, « liste positive » pour la complémentation des troupeaux n'autorisant que des produits dits « nobles ».

Rassemblés autour de valeurs fortes, les acteurs de la filière Beaufort en ont fait l'un des plus exigeants avec pour objectif principal de garantir aux consommateurs un fromage d'une qualité optimale.

Une attention toute particulière est donc portée aux prairies avec l'utilisation principalement des effluents d'élevage (fumier et lisier). L'épandage des boues d'épuration ou de produits dérivés est interdit.

Aujourd'hui, la filière Beaufort s'interroge également face aux questions posées par les évolutions climatiques et réfléchit à rendre

son cahier des charges plus résilient sans renier les valeurs et, quelque fois les devoirs de précaution, qui ont fait la renommée du fromage Beaufort.

La filière ne peut que saluer les travaux menés ces dernières années, ainsi que l'engagement humain de l'ensemble des partenaires, pour réhabiliter les terrains d'alpage impactés par les travaux.

Le maintien d'une forte diversité floristique est essentiel, de même que l'utilisation autant que possible de variétés locales afin de retrouver au plus vite les caractéristiques des prairies pastorales, la résilience de ces habitats, pour un lait fromageable de qualité et garantir le goût inimitable du Beaufort. " Syndicat de Défense du Fromage Beaufort.

② ÉTAPE 2. DEFINITION DU CAHIER DES CHARGES

Une fois les objectifs et l'usage post-travaux définis, il convient d'établir un cahier des charges destiné à ou aux entreprises TP sur la base du présent guide. Il a vocation à préciser l'importance de la **préservation des sols** et à définir le mode opératoire.

Il intègre les méthodes et techniques qui visent à **réduire l'impact des travaux** d'aménagement sur le milieu (FICHE 3 , FICHE 1 FICHE 4 et FICHE 5) et qui **accompagnent la réhabilitation du site** (Fiches 6 à 19).

Il doit proposer un **calendrier d'intervention** détaillé en tenant compte **des conditions météorologiques**, et ce sur toute la durée du projet, un **plan de circulation** spécifique, des **moyens matériels et humains** adaptés au site et faire état des **contraintes à prendre en compte** à chaque étape du projet.

Le cahier des charges doit également comprendre des **directives spécifiques pour la gestion des déchets et des matériaux** utilisés pendant les travaux, ainsi que des mesures de prévention des **risques environnementaux et de sécurité** pour le personnel intervenant sur le chantier.

La **personne référente** doit prendre en compte l'ensemble des données issues du diagnostic du site préalable (FICHE 1).

Pour favoriser la réussite de la réhabilitation, le principal impact à éviter concerne la compaction des sols. Selon le guide PROSOL (FCBA & ONF, 2009), en se basant sur les données collectées lors du diagnostic initial du site, trois caractéristiques du sol sont à prendre en compte pour estimer **la sensibilité du sol au tassement**, à savoir :

- > **La texture du sol** : la sensibilité des sols au tassement est étroitement liée à la texture du sol. Un sol principalement sableux peut s'avérer très portant même en condition humide alors que des sols à texture plus fine (argile et surtout limon) se tassent sous le poids des engins.
- > **La charge en éléments grossiers** : plus un sol est riche en éléments grossiers, plus il sera à même de supporter une forte charge sans se déformer. On estime ainsi qu'en présence de plus de 50% d'éléments grossiers le risque de tassement est considérablement réduit. Une teneur en élément grossier élevée favorisera également le drainage : les sols seront alors plus rapidement ressuyés permettant ainsi d'accroître la période favorable à la circulation des engins.
- > **L'engorgement du sol** : plus un sol est humide, moins il est portant et plus les agrégats qu'il contient sont susceptibles de se disloquer sous la pression exercée par l'engin. Un sol est d'autant plus sensible au tassement qu'il est humide.

Il est ainsi possible d'estimer le risque de tassement des sols selon le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Évaluation du risque de tassement en fonction de la texture du sol, de la charge en éléments grossiers et de l'engorgement des sols.

Texture du sol	État d'humidité du sol			
	Sol sec (sur 50 cm de profondeur)	Sol frais	Sol humide	Nappe d'eau (< 50 cm de profondeur)
Sol très caillouteux (> 50%)	Risque faible			Risque fort
Sol très sableux (> 70%)	Risque faible		Risque modéré	Risque fort
Sol à dominante argileuse	Risque faible	Risque modéré	Risque modéré	Risque fort
Sol limon dominant à sablo-limoneux	Risque faible	Risque modéré	Risque fort	Risque fort

Focus sur le risque de compaction, quels enjeux ?

Les dégâts engendrés par le passage des engins sur la porosité des sols sont maximaux dès les premiers passages d'engins.

Différents effets ont pu être observés en fonction des types de sol,

- > **Sur un sol sensible au tassement** : le passage répété d'engins entraîne une réduction importante de la macroporosité des horizons (Figure 8), notamment en surface. La capacité de rétention en eau du sol et la perméabilité diminuent, ce qui entraîne une augmentation du ruissellement en surface et un risque de stress hydrique des végétaux (Goutal et al., 2013). Le profil racinaire apparaît également modifié en situation de sol tassé.

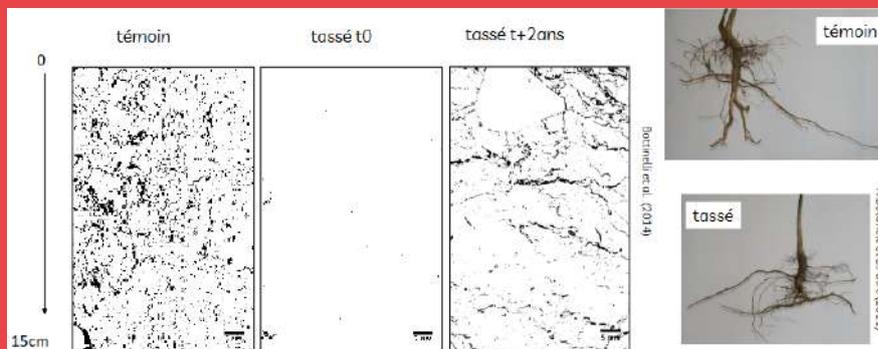


Figure 8 : Analyse sur lames minces de la porosité (espaces vides en noir) sur un site témoin (coupe rase et débardage par câble) et sur un site tassé (débardage par tracteur) et photos de profils racinaires.

- > **Sur un sol humide** : À noter qu'entre 80 et 90 % du tassement des horizons de surface a lieu entre le premier et le troisième passage d'engins. Ce phénomène est dépendant de la composition du sol et de sa teneur initiale en eau. En effet, la présence d'eau va agir comme un lubrifiant et augmenter la capacité de réarrangement des grains en limitant les frottements (Koscielny, 2008).
- > **Sur un sol acide avec une faible activité biologique** : la restauration structurale spontanée de ce type de sol peut être extrêmement lente. Ainsi, la modification des propriétés du sol induite par le passage des engins peut perdurer de nombreuses années si aucune correction n'est apportée :

Par ailleurs, la compaction du sol peut entraîner :

- > **Une incidence sur le développement de la végétation**, notamment au travers de la modification de la réserve hydrique des sols, limitant ainsi son développement racinaire

(Goutal et al., 2013). Les chances de recolonisation naturelle par les espèces indigènes (Scotton, 2021) semblent également réduites au regard des impacts sur les milieux naturels ou semi-naturels environnants.

- > **La modification de l'hydrologie du versant** : la **compaction des sols** entraîne une augmentation de la vitesse de ruissellement et donc du ratio ruissellement/infiltration. Après la réalisation de plusieurs aménagements, l'hydrologie du bassin versant peut se voir largement modifiée, et le débit de pointe de certains cours d'eau augmenté, pouvant causer des événements hydrologiques tels que des laves torrentielles (Poncet, 1978).

Il convient de limiter au maximum la réduction de la perméabilité des surfaces, et donc, le compactage des horizons de surface des sols par le passage répété d'engins de chantier. Des méthodes de calcul (comme la méthode des pluies) peuvent être utilisées pour évaluer le débit potentiel du cours d'eau en fonction des conditions propres à chaque site. Dans le cas où un risque hydrologique est avéré, des aménagements de stockage des eaux ou de protection pourront être mis en place.

Bien que ces impacts liés aux tassements ne puissent, en général, être entièrement évités, il est possible de réduire l'impact du passage répété des engins sur le site et le milieu adjacent. L'anticipation est de rigueur ainsi que le choix d'un matériel adéquat :

- > **Les engins de chantier** : Privilégier le matériel avec la meilleure répartition de la charge au sol. En effet, les risques de tassement dépendent en partie du poids de l'engin et de la zone de contact au sol. Plus le poids de l'engin est faible, plus la pression exercée sur le sol est faible. Plus l'emprise des roues ou des chenilles au sol est grande et large, plus la pression sur le sol diminue à poids égal. Il convient donc de choisir des engins de petites tailles et/ou idéalement à chenilles larges en caoutchouc.
- > **Le plan d'installation de chantier, le plan de circulation détaillé et le balisage du site** : Définir des itinéraires et des zones de circulation pour les véhicules permettant de réduire l'emprise des impacts sur le sol. Il est préconisé de privilégier des formes traditionnelles suivant les courbes naturelles du terrain en évitant les pentes les plus fortes et les milieux les plus sensibles. Il est également recommandé le cas échéant de baliser ces tracés sur site à distance des zones à enjeu afin d'éviter les phénomènes d'érosion en pourtour de celle-ci venant les élargir et ainsi dégrader davantage le milieu (Rul, 2017).
Inclure également **la localisation des plateformes de stockage de terres ou de matériel des produits dangereux tels que les hydrocarbures** pour limiter le risque de contamination du milieu naturel.
- > **Le calendrier d'intervention adapté en fonction des conditions météorologiques** : il est recommandé de réaliser les travaux pendant les périodes où le sol est sec notamment si le sol est sensible au tassement (limoneux à argileux peu caillouteux). S'il est souvent difficile de repousser la venue des entreprises de TP, il est possible d'adapter les chantiers au sein du domaine skiable en fonction des conditions météorologiques et des caractéristiques du sol. Par exemple, en cas de contrainte de planning, prioriser les interventions en condition humide sur des sols sablo-caillouteux plutôt que sur des sols limono-argileux sensibles au tassement.

La définition du cahier des charges permettra de mettre en avant les **personnes ressources et moyens locaux** pour le projet et d'orienter **le choix des entreprises compétentes** au cas par cas pour la réalisation des travaux.



Entretiens

Selon les témoignages recueillis auprès des acteurs locaux, le choix des entreprises est déterminant pour le succès de ce type de projet. Dans certains cas, il est même souligné que le recours à des **opérateurs spécifiques** au sein des entreprises de TP, dotés de **compétences particulières**, permet de mener à bien des travaux spécifiques (par exemple : l'étrépage).

“Le cahier des charges est primordial. Les entreprises qui font du bon travail, on les connaît et on essaie de les privilégier. Attention à la différence entre le moins-disant et le mieux-disant, cela n’a rien à voir ! Sur de gros chantiers, ce sont de grosses entreprises qui prennent les travaux alors qu’elles ne sont pas forcément compétentes sur tous les domaines, notamment la remise en état. Il faut les suivre durant les travaux et les conseiller. La remise en état des terrains, cela relève plus du domaine agricole que du domaine des travaux publics” Les alpagistes des Saisies.

“Lors du choix des entreprises de TP, nous demandons qui sera le chauffeur ! C’est une des clés de réussite ; il faut des entreprises et des personnes compétentes. Il faut des montagnards, pas des entreprises autoroutières. Malgré les travaux au GPS et la disponibilité du Lidar il y a une grande part de réussite liée à l’humain. Le profil pelliste / dameur, c’est le top pour des travaux de piste.” Entretien SEM Valmeinier.

La réduction des impacts des travaux d'aménagements

Pour réduire l'impact sur l'environnement, notamment sur le sol et l'hydrologie du bassin versant, des mesures préventives doivent être mises en œuvre dès le début des travaux d'aménagement, notamment lors du défrichage (FICHE 3), du terrassement et du surfacage (FICHE 4) et de l'installation des systèmes de drainage (FICHE 5).



Figure 9 : Présentation des fiches techniques concernant la réduction des impacts des travaux d'aménagements

Toutes ces mesures doivent être intégrées dans le cahier des charges. La personne référente de la réhabilitation doit s'assurer de l'application des bonnes pratiques. De plus, elle doit être disponible pour adapter les directives en fonction des contraintes et des imprévus sur le terrain, et doit faire preuve de réactivité pendant toute la durée des travaux.

FICHE 3 – LE DÉFRICHEMENT



À retenir

Lors du défrichage, il est recommandé de **prendre en compte l'intégration paysagère et d'anticiper les événements naturels** qui peuvent survenir, tel que les chablis et l'augmentation des écoulements d'eau.

Le débardage par câble doit être privilégié lorsque cela est possible.

La remobilisation du broyat lors du défrichage apparaît comme essentielle. Cette matière constitue une ressource précieuse pour enrichir le sol et réduire l'érosion du substrat et des semences, mais il faut s'assurer de ne pas apporter un excès de carbone.

Une attention particulière doit être apportée **aux zones colonisées par l'aune vert**. Leur déboisement peut présenter des avantages paysagers, écologiques et pastoraux, mais il peut également perturber significativement les caractéristiques du sol et induire des difficultés dans les processus de réhabilitation.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Le défrichage correspond à toute opération ayant pour effet de détruire l'état boisé d'un terrain et de mettre fin à sa destination forestière.

Au sein des étages collinéens, montagnards et subalpins, la végétation est constituée en majeure partie d'une strate arborescente. La création ou l'élargissement d'une piste de ski en milieu forestier entraîne donc généralement une action de défrichage pour aboutir à l'ouverture du milieu.



Figure 10: Défrichage d'une nouvelle piste et mise en place du broyat sur la piste (L. BENAS, 2022).

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Les étapes du défrichage, lors des travaux de réhabilitation des sols dégradés, sont les suivantes :

① Étape 1. Travail préparatoire

Le travail préparatoire lié au défrichage doit être réalisé lors de la phase de conception du projet afin de limiter l'impact paysager du projet et prendre en compte d'éventuels risques naturels liés au défrichage (érosion, instabilité du manteau neigeux, etc.).

Au moment de concevoir le projet, il est possible de minimiser les conséquences du défrichage sur le paysage par deux approches complémentaires :

- > **Éviter les lisières rectilignes** : lorsque la végétation environnante est principalement forestière, les cicatrices formées par la piste de ski viennent grandement impacter le paysage. La réduction de lisière franche permet une meilleure continuité visuelle et diminue l'impact paysager (Rul, 2017). Bien que les lisières rectilignes soient

plus adaptées à la pratique du ski (moindre risque de collision avec la végétation), leur limitation sur des versants venteux diminuerait les risques de chablis (Collin et al., 2006).

- > **Conserver des bandes forestières les plus larges possibles entre les aménagements** : les bandes forestières entre les milieux ouverts (pistes de ski ou passage de téléphérique) sont exposées aux intempéries (insolation, vents (chablis), dessèchement ou effet de congères). L'impact de ces phénomènes s'intensifie lorsque l'épaisseur de la lanière de forêt diminue. La forêt est alors moins productive et moins résiliente (Poncet, 1978).

Parallèlement, il est important **d'estimer le rôle du couvert forestier** dans la réduction des risques naturels tels que les avalanches et les crues. En ce sens, la réduction de la surface boisée peut nécessiter la réalisation d'ouvrages de compensation qui devront être opérationnels au moment de la réalisation du défrichement.

② Étape 2. Réalisation de la coupe rase

Cette étape consiste à abattre l'intégralité du couvert forestier sur une surface donnée. Dans le cas de la création d'une piste de ski, il est indispensable de réaliser **un dessouchage complet de la piste**.

À noter que les surfaces boisées ne sont que très peu valorisées par les alpagistes et que le défrichement sous-entend qu'une nouvelle surface sera par la suite mise à disposition pour le bétail. Le dessouchage permet alors le développement d'un couvert végétal uniforme si l'ensemble des étapes de réhabilitation sont réussies.

Selon le projet Robustalps, le défrichement d'une zone colonisée par l'aulne vert entraîne une augmentation de sa valeur écologique et environnementale. En effet, **la colonisation par l'aulne vert réduit la diversité animale et végétale du milieu et favorise le lessivage des nitrates et du carbone organique**, induisant ainsi des risques de pollutions des cours d'eau environnants. Le défrichement des aulnes verts a également un impact paysager et touristique positif.

Les résultats de l'étude DSF (2024) montrent par ailleurs que les pistes où les aulnes verts ont préalablement été défrichés présentent des quantités très élevées de carbone organique même 15 années après la réhabilitation, en comparaison avec le site témoin (landes à myrtilles). La présence d'aulnes avant le défrichement entraîne ainsi un déséquilibre entre la teneur en azote et carbone du sol, ce qui peut avoir un effet négatif sur la minéralisation de la matière organique et réduire la disponibilité en azote pour les plantes. De plus, dans ce contexte perturbé, l'activité biologique du sol est souvent réduite, ce qui se traduit par une faible vitesse de minéralisation du carbone, ce qui génère son accumulation dans le sol et dans le temps. Ces dysfonctionnements peuvent impacter la biomasse et la résilience du milieu à moyen terme. Les apports réalisés devront être adaptés sur ces sites (FICHE 13).

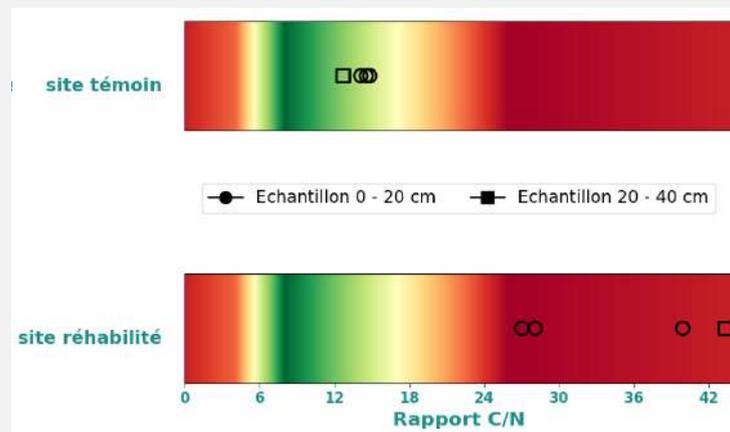


Figure 11 : Mesure du ratio Carbone/Azote (C/N) dans les deux horizons de la piste réhabilitée (en bas) et du site témoin (en haut). Sur le site réhabilité où des aulnes étaient initialement présents, la teneur en carbone organique dans les sols est très importante, de même en ce qui concerne le C/N.

③ Étape 3. Évacuation des arbres

Deux techniques peuvent être utilisées pour le débardage des grumes² :

- **Le débardage par câble** : une ligne câblée est installée comprenant à son extrémité un mât télescopique de 12 à 16 m de haut. Les arbres coupés sont transportés, suspendus par le câble puis à l'arrivée, ils sont déposés sur la zone de dépôt en bord de route ou de piste. Avec cette technique, il est possible de débarder les arbres situés à une distance de 40 m de part et d'autre du câble.
- **Tracteur débardeur** : les pistes forestières à proximité de la coupe permettent également l'enlèvement des grumes à l'aide d'un tracteur.

Les deux techniques d'évacuation des arbres présentent chacune des avantages et inconvénients, résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 4).

Tableau 4. Comparaison des avantages du débardage par câble et par tracteur

Débardage par câble	Débardage tracteur
> Facilite le débardage dans les pentes importantes et en l'absence de piste d'accès	> Présence d'un grand nombre de pistes en station facilitant le débardage
> Peu impactant pour le sol : évite le compactage (cf. les impacts du tassement en FICHE 2) et la perturbation des horizons de surface	> Coût plus faible
> Impact limité sur la végétation environnante	> Matériel standard

Le débardage par câble semble plus pertinent dans la majorité des cas, mais entraîne souvent un coût plus élevé. De plus, les câbles étant mis en place sur la végétation comme support, des contraintes techniques peuvent être rencontrées lorsque la végétation environnante n'est pas constituée de ligneux assez hauts et robustes pour supporter le poids des grumes. Enfin, bien que moins énergivore, il nécessite davantage de main-d'œuvre (minimum deux personnes) et un matériel coûteux.

En revanche, **le débardage par tracteur** induit un certain nombre d'impacts sur les sols dû au passage répété d'engins (Rohand et al., 2000) et représente un facteur d'échec en cas de circulation non maîtrisée (FICHE 2).

④ Étape 4. Réutilisation des matériaux

Il est possible de **procéder au broyage des produits de coupe afin de les épandre sur le substrat remanié ou de les incorporer à celui-ci**. Cette action présente plusieurs avantages :

- > Enrichissement du substrat en matière organique à décomposition lente.
- > Structuration du substrat en limitant l'érosion de la matrice fine.
- > Conservation de la biomasse issue du site.
- > Limitation du transport de grumes (Dinger, 1997).

Néanmoins, il se peut que la quantité à broyer soit trop importante par rapport à la surface défrichée. Il convient de **veiller à ce que l'équilibre carbone/azote du sol ne soit pas trop fortement perturbé avec un enrichissement excessif en carbone**, propice à l'enclenchement du processus de faim d'azote (manque d'azote pour les plantes à cause du métabolisme élevé des microorganismes du sol immobilisant les nutriments du sol). Il convient également de contrôler le pH, en particulier lors de l'enrichissement du substrat avec des copeaux d'épicéa qui auront tendance à acidifier le sol.

La quantité de broyat à utiliser devra être définie, au cas par cas, en fonction des autres amendements disponibles et des conditions initiales du milieu (FICHE 13).

² Tronc d'arbre non équarri

FICHE 4 – LE REMANIEMENT DU RELIEF



À retenir

Lors du remaniement du relief, il est important de **minimiser les impacts des travaux**, en particulier sur les sols sensibles aux tassements, et de limiter la mobilisation d'éléments grossiers lorsque le matériau parental est friable (tel que les schistes et les roches calcaires).

Malgré les précautions prises à travers **le cahier des charges et le plan de circulation**, l'action la plus efficace pour limiter les impacts consiste à **réduire la compaction des horizons profonds (horizon de sous-face)**. En fin des travaux, le griffage de l'horizon profond à l'aide d'une pelle mécanique perpendiculairement à la pente peut aider à limiter l'effet du tassement.

Enfin, il est important de **valoriser les remblais liés au remaniement du relief** à proximité (éviter les impacts sur les milieux pâturés), tout en préservant la cohérence physico-chimique avec le milieu récepteur.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

La création, l'élargissement et **l'entretien d'une piste nécessitent le remaniement du relief** pour permettre la pratique du ski dans des conditions optimales de sécurité et de confort (pente trop raide, correction de dévers...).

Ces travaux interviennent aussi lors de la mise en place de réseaux de neige de culture ou de réseaux électriques ainsi que pour la création de nouvelles remontées mécaniques.



Figure 12 : Réalisation du terrassement de la piste des secrets aux Arcs (L. Tixier, 2018)

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Lors de la conception d'une piste de ski, les travaux de remaniement du relief sont quasiment inévitables. Généralement, les horizons de surface sont décapés, puis stockés (FICHE 6) afin de pouvoir réaliser les travaux de remaniement.

Dans ce contexte, il est important d'avoir connaissance des impacts majeurs engendrés par ces travaux dans le but de les minimiser puis de les corriger lors des étapes de réhabilitation écologique.

Les impacts des travaux de remaniements du relief sont multiples sur les sols, que ce soit en surface ou en sous-face.

En effet, **le passage des engins entraîne une compaction significative** de la future couche profonde, étant donné que l'horizon de surface a été décapé préalablement. La compaction de l'horizon de sous-face limite le développement du système racinaire en profondeur soumettant la végétation à un risque accru de stress hydrique notamment en adret. Malgré des pratiques qui tendent à finaliser le nivellement par compaction, dans le cadre d'une réhabilitation, les tassements sont à éviter autant que possible.

Par ailleurs, **le passage de la lame du bulldozer ou de la pelle mécanique tend à lisser la surface du sol, ce qui peut générer des débris minéraux**. Les fines issues de ces débris peuvent obstruer les pores du sol, notamment lorsque les sols

sont riches en limons et argiles, **formant une croûte de battance et limitant ainsi l'infiltration de l'eau** (Koscielny, 2008, FICHE 2). De la même manière que pour la compaction, ces pratiques de lissage sont à éviter au maximum, surtout dans le cas où elles ne sont pas indispensables.



Observation de terrain

La photo ci-dessous illustre une **structure lamellaire** se formant à environ 20 cm de profondeur sous l'action d'une **compaction de nature anthropique** (Figure 13). Malgré une texture favorable à l'exploration racinaire et à des travaux de réhabilitation menés en 2012, **aucune racine ne peut pénétrer cet horizon**.



	Structure(s)	Texture	Racines	% EG	Compacité
0-10	Polyédrique subangulaire	Lsa	Très abondantes	15	Meuble
10-20	Polyédrique subangulaire	Lsa	Fines, peu abondantes	70	Moyennement compact
20-40	Lamellaire	Lsa	Absentes	70	Compact
40-50	Lamellaire massive	Lsa	Absentes	90	Très compact

Figure 13 : Observation d'une fosse pédologique lors de l'étude de la réhabilitation opérationnelle des terrains d'alpages. (DSF, 2024)

Les remaniements du relief ont également un impact sur :

- > **La circulation d'eaux superficielles et souterraines.** Les terrassements peuvent entraîner des modifications de la circulation de l'eau jusqu'à observer des changements dans l'hydrogéologie locale tels que le tarissement de sources, mais aussi l'augmentation des ruissellements.
- > **La fraction en éléments grossiers.** En effet, la fraction minérale du sol et la teneur en éléments grossiers (> 2mm) sont en général plus élevées après travaux en **raison de l'écrasement mécanique des pierres et du passage de la lame du bulldozer ou de la pelle mécanique** (Barberis et al., 2023; Gros et al., 2004). Par ailleurs, avec l'érosion, la matrice fine est plus rapidement entraînée (ou compactée), ce qui augmente la proportion d'éléments grossiers massifs restés en place (Figure 14).

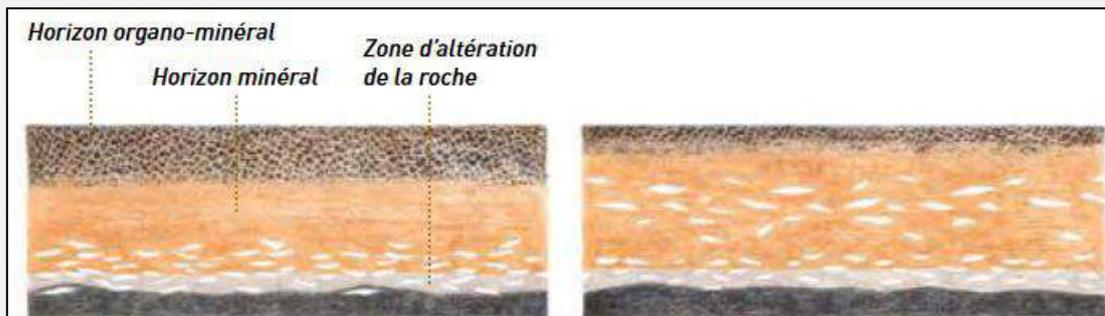


Figure 14 : Structure du sol avant terrassement (gauche) et après terrassement (droite) avec un effet de foisonnement de l'horizon de sous-face, une remobilisation des éléments grossiers dans toute l'épaisseur du profil et une réduction de l'horizon de surface organo-minéral par perte de matière fine et/ou tassement (Dupin et al., 2019).

Cet effet a été constaté à de multiples reprises sur le terrain. La géologie semble exercer une influence sur la proportion d'éléments grossiers libérée lors du remaniement du substrat. Les couches géologiques telles que les dépôts glaciaires ou les roches plus friables tendent à libérer une proportion plus importante d'éléments grossiers. La compaction de la matrice fine accentue cet effet d'augmentation de la proportion du sol occupée par des éléments grossiers.

À noter que la majorité des éléments grossiers retrouvés sur les sites réhabilités sont des cailloux et des pierres (diamètre < 7,5 cm). Les travaux de remaniement ne semblent pas, dans le cadre de cette étude, remobiliser beaucoup de blocs ou de graviers (diamètre > 7,5 cm).

> **Le pH du sol quel que soit le type de sol et la géologie.**

Sur les sols acides, la légère augmentation de pH des sols réhabilités les rapprochant d'un pH neutre, permet d'améliorer légèrement leur qualité agronomique facilitant ainsi la reprise de la végétation. Sur les roches basiques (gypse, dolomie), les remaniements génèrent souvent **la libération d'une quantité importante de carbonates** à l'origine de la saturation de la capacité d'échange cationique (CEC, encadré ci-après). Cette augmentation entraîne en général **une augmentation de pH plus marquée que sur sols acides**. La CEC étant déjà réduite en raison de la perte d'argile induite par les travaux, il convient d'être vigilant lors du remaniement des sols carbonatés à faible concentration en argile (cas des terrains plus haut en altitude), pour éviter de libérer trop de carbonate et de saturer la CEC.

À savoir :

La CEC, ou Capacité d'Échange Cationique, désigne la capacité d'un sol à retenir et à échanger des ions positifs, appelés cations. En d'autres termes, c'est la mesure de la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs essentiels pour les plantes, tels que les ions calcium, magnésium, potassium et sodium. Une CEC élevée indique une capacité accrue du sol à retenir ces éléments, ce qui est bénéfique pour la fertilité du sol et la croissance des plantes.

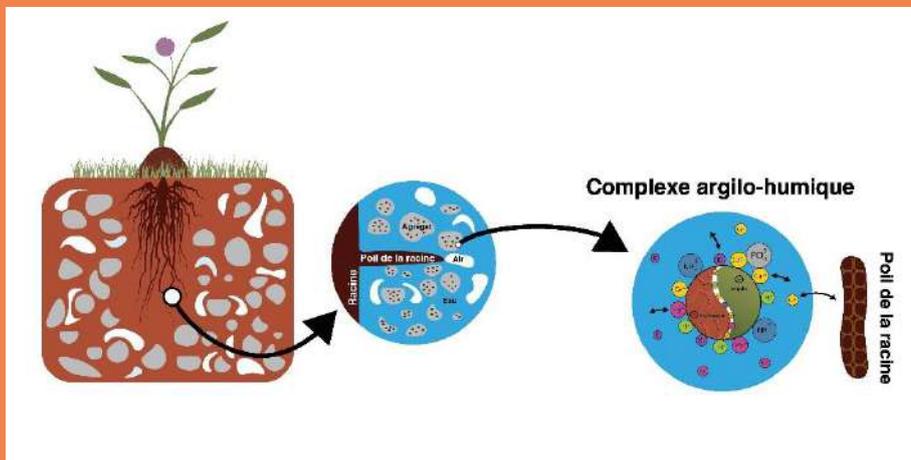


Figure 15 : Zoom sur la porosité du sol (agrégats, eau et air) puis zoom sur une partie des agrégats comportant le complexe argilo-humique permettant de fixer et de libérer des nutriments dans la solution du sol pour qu'ils soient disponibles au niveau des poils des racines.

La saturation de la CEC par des carbonates dans le cas de remaniement sur roches basiques, peut limiter la capacité du sol à retenir d'autres ions et ainsi limiter la réserve en éléments nutritifs essentiels pour les plantes (Figure 16).

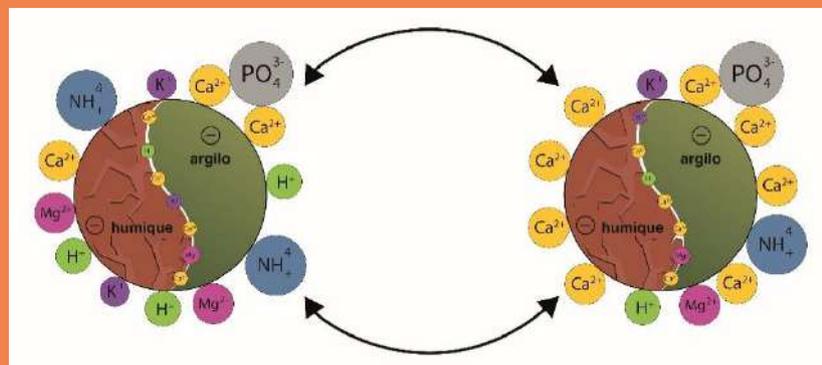


Figure 16: Saturation de la CEC par les ions carbonates libérés par le remaniement de sols calcaires

- > **La structure et la composition de la communauté microbienne.** Une étude a révélé que la construction de pistes de ski pouvait entraîner une **diminution de la biomasse bactérienne** (Gros et al., 2004). De même, lors de l'étude DSF (2024), il a été observé que la **quantité d'ADN microbien mesurée sur les sites réhabilités était généralement inférieure à celle des sites témoins**. Ces observations sont probablement attribuables à la dessiccation du milieu, à la déstructuration mécanique du sol, au compactage du sol et à la destruction du couvert végétal, notamment de son réseau racinaire.

À savoir :

La diminution de la biomasse microbienne dans les sols alpins est problématique pour plusieurs raisons :

- > Les micro-organismes du sol jouent un rôle essentiel dans la décomposition de la matière organique et la libération de nutriments nécessaires à la croissance des plantes.
- > Ils sont également impliqués dans des processus tels que la fixation de l'azote, la dégradation des polluants et la régulation des cycles biogéochimiques.

Les retours d'expérience disponibles jusqu'à présent ne permettent pas de déterminer avec précision l'impact des travaux d'aménagement sur les communautés microbiennes.

Cependant, il est intéressant de faire le lien avec une étude montrant que le labour est plus préjudiciable pour les mycorhizes, car le travail du sol altère directement leur intégrité physique (hyphes ou filaments) et modifie les macro-agrégats. En revanche, les bactéries, de taille plus réduite, sont moins affectées, suggérant un intérêt potentiel à approfondir la recherche dans ce domaine.

Ces éléments bibliographiques soulignent l'importance de comprendre l'influence des champignons mycorhiziens dans le succès de la réhabilitation en milieux montagnards.

En résumé, **les travaux de remaniement du relief modifient fortement les propriétés des sols.**

Ci-dessous sont présentées les différentes étapes du remaniement du relief, les contraintes rencontrées par les opérateurs techniques ainsi que les actions pouvant être mises en place afin de minimiser ces impacts.

① **Étape 1. Travaux préparatoires** (Dinger, 1997)

Il est important **d'analyser le terrain** (pente, géologie, végétation, hydrologie) et de **concevoir** l'aménagement en tenant compte des caractéristiques naturelles afin d'adapter les techniques utilisables et anticiper leur intégration (FICHE 1).

À noter qu'une **modification drastique de la topographie naturelle risque de créer une rupture dans le paysage très visible** (talus, relief irrégulier vis-à-vis de la topographie naturelle...) (Rul, 2017).



Cas particulier des talus

- > **D'un point de vue technique**

Les talus présentent des caractéristiques spécifiques qui nécessitent une approche différente de celle utilisée pour la création d'une piste de ski. Leur remaniement implique **des défis particuliers en termes de stabilité et de durabilité**.

Cette analyse supplémentaire devrait inclure **une évaluation détaillée des contraintes environnementales** auxquelles le talus est soumis telles que : **la géologie du talus, son exposition à l'ensoleillement (stress hydrique élevé) et son inclinaison**. Sur la base de ces informations, des mesures spécifiques de stabilisation et de renforcement peuvent être recommandées. En ce qui concerne **le compactage des sols, il peut être nécessaire d'adapter les recommandations pour tenir compte des caractéristiques particulières du talus**.

Il est également important de prendre en compte l'impact potentiel du remaniement des talus sur l'hydrologie locale, notamment en ce qui concerne le **drainage des eaux de surface et des eaux souterraines**. Des **dispositifs de drainage appropriés** doivent être intégrés dans la **conception du remaniement** pour éviter les problèmes d'instabilité liés à l'accumulation d'eau.

> **D'un point de vue agro-pastoral**

Les talus sont des zones qui sont plus difficilement pâturables. La gestion des refus et le broyage sont aussi plus complexes.

« L'intérêt pastoral grandit donc à mesure que la pente des talus diminue, mais il faut plus de matériaux et cela coûte plus cher. Pour le domaine skiable, l'enjeu économique est très fort ; changer l'angle de talutage modifie grandement les prix, c'est pour ça que l'on observe souvent des pentes très raides. » Ancien chef des Pistes des Saisies et alpagiste.

À noter enfin que le domaine skiable doit anticiper les accès pour les alpagistes et les troupeaux par rapport aux équipements pastoraux en place : emplacements de traite, points d'eau, accès pour engin agricole de broyage ou d'épandage. **L'angle de talutage ne doit donc pas être trop important sur les zones de passage.**

② Étape 2. Remaniement du relief

Deux techniques sont généralement mises en œuvre de manière combinée ou non :

- > **Le terrassement** : il correspond au modelage de la topographie afin d'homogénéiser la surface en reprenant les dévers et en corrigeant les pentes. Ce sont des aménagements lourds qui interviennent surtout lors de la création et de l'élargissement des pistes. Lors de la phase de travaux, **l'entièreté de la végétation est retirée ainsi qu'une partie plus ou moins importante du sol**.
- > **Le surfaçage** : il relève plutôt d'un travail du sol en surface afin de supprimer les irrégularités (cunettes, têtes rocheuses). Il est réalisé en général à la suite des travaux de terrassement et peut aussi intervenir lors de l'entretien des pistes.

Les conditions naturelles du site peuvent soumettre les opérateurs à différentes contraintes :

- > **Les contraintes géologiques** (Dinger, 1997) :

Sur calcaires lapiazés³ : le risque d'effondrement est particulièrement élevé lors des travaux de terrassement (OFED & Bellini, 2015). Les travaux de terrassement dans ces terrains peuvent également entraîner des conséquences négatives sur la qualité des eaux souterraines et sur la stabilité des formations souterraines.

Sur roches siliceuses résistantes : Les roches siliceuses, telles que le granite, sont très résistantes et difficiles à travailler. Les travaux de terrassement dans ces terrains peuvent nécessiter l'utilisation d'explosifs, ce qui peut entraîner des conséquences négatives sur l'environnement et les paysages.

Sur cargneules et gypses : Les cargneules et les gypses sont des substrats très friables et peu résistants, qui peuvent être à l'origine d'affaissements et de ravinements lors des travaux de terrassement. Ces terrains peuvent également être sujets à l'érosion et à la désagrégation, ce qui peut compliquer les travaux de terrassement.

- > **Les contraintes topographiques** : les pentes fortes constituent également une contrainte technique importante selon Rohand et al. (2000).

³ Les calcaires lapiazés sont des terrains qui présentent des formes karstiques, telles que des gouffres, des grottes, des puits et des dolines. Ces formes karstiques sont souvent le résultat de la dissolution du calcaire par des eaux souterraines acides, ce qui crée des cavités et des passages souterrains.

- > **Les contraintes paysagères** : selon les acteurs locaux, certaines roches, notamment le quartzite, ont un impact significatif sur le paysage en raison de leur couleur blanche qui les rend visibles de loin une fois la zone terrassée et lorsque le sol est absent à l'état initial.



Figure 17 : Terrassement d'une piste de ski sur Quartzite avec quasiment aucun sol présent à l'état initial (L. BENAS, 2022)

③ Étape 3. Favoriser le lien entre les différents horizons

Lors de l'étude DSF (2024), **aucune différence majeure n'a été observée dans la fertilité des horizons de sous-face (20-50 cm) entre les sites réhabilités et les sites témoins.**

À ce stade, il ne semble pas nécessaire d'apporter des amendements, mais il est **important de noter que ce sont généralement les paramètres physiques du sol qui sont altérés à cette profondeur.**

La compaction (sur les sols sensibles) et la formation de croûte de battance (notamment sur les sols limoneux) rendent difficile le lien entre les horizons de sous-face et de surface.

Pour préparer le sol en vue de la remise en place des horizons de surface (FICHE 6), il est recommandé de réaliser un griffage perpendiculaire à la pente à l'aide d'une pelle mécanique pour décompacter l'horizon de sous-face et faciliter ensuite l'enracinement de la végétation.

Cette opération revêt une importance particulière sur **les sols argileux et limoneux ayant subi une forte compaction et présentant une faible teneur en éléments grossiers et notamment sur les sols formés sur roches calcaires ou moraines basiques.**

④ Étape 4. Gestion des matériaux

Les travaux de remaniements peuvent donner lieu à **des flux importants de matériaux en déblais / remblais.**

L'export ou l'import de matériaux est coûteux notamment dans des milieux difficiles d'accès tels que les milieux ouverts de montagne (pente forte, en altitude, milieux enclavés au sein des vallées...). **La gestion raisonnée des déblais et leur réutilisation en remblai permettent de limiter l'apport de matériaux exogènes.**

Il est crucial d'anticiper la gestion des déblais afin de saisir les opportunités de les intégrer efficacement dans les projets d'aménagement à venir, **évitant ainsi de perturber une zone uniquement pour le stockage de ces matériaux.**



Observation de terrain

Dans le cas d'utilisation de remblais sur un site, il est néanmoins nécessaire de s'assurer de la **cohérence de la composition physico-chimique** (notamment le pH) des déblais avec celle de la zone qui les reçoit.

La géologie joue un rôle majeur à cet égard, comme le montre l'étude DSF (2024), où la mise en place de remblais a induit une augmentation du pH du substrat, et ce quelle que soit la nature du matériau parental.

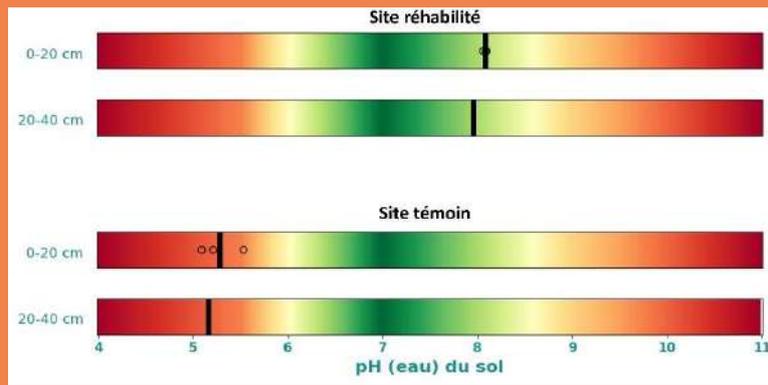


Figure 18 : Mesure du pH sur la profondeur 0-20 cm et 20-40 cm d'un site réhabilité remblayé en comparaison avec un site témoin à proximité (DSF, 2024)

Cette modification peut entraîner une déconnexion entre la zone concernée et les sols environnants, influençant notamment le type de végétation qui peut s'y développer.

FICHE 5 – LE DRAINAGE



À retenir

Le drainage nécessite une attention particulière quant au **dimensionnement des drains**, notamment en ce qui concerne leur **profondeur et leur espacement**. Ceux-ci doivent être adaptés en fonction de la topographie, du **volume d'eau ruisselée et de l'état du sol après les travaux (notamment la texture)**.

Le rebouchage des drains présente des avantages esthétiques, mais il convient de veiller à ne pas causer de dommages excessifs lors de cette opération sur les zones réhabilitées.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Lors de la réalisation d'une piste de ski, la gestion des eaux est une question centrale. Dans certains contextes (en combe à neige et en bas de versant par exemple), le drainage profond des sols peut se révéler indispensable pour **éviter la saturation du sol en eau et assurer la stabilité du substrat**, en particulier durant la période de la fonte des neiges.

Par ailleurs, suite aux travaux de terrassement, le **coefficient de ruissellement (quantité d'eau de ruissellement/précipitation totale)** est, en général, augmenté.

Dans ce contexte, le drainage de surface peut constituer **une bonne méthode de préservation du substrat** en attendant le développement du couvert végétal.



Figure 19 : Drain bétonné pour l'évacuation des eaux de ruissellement sur une piste de ski (La Plagne) (Hassid et al., 2006).

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Lors de l'étude DSF (2024), les vitesses d'infiltration ont été mesurées sur les pistes réhabilitées ainsi que sur les sites témoins. Il est apparu que certaines caractéristiques des milieux après réhabilitation impactent la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. **En effet, la compaction du sol, la modification de sa structure, la diminution de la matière organique et la perte de la matrice fine semblent contribuer à une réduction de la vitesse d'infiltration de l'eau.**

Le ruissellement, de ce fait plus important, risque alors d'engendrer de **l'érosion et une détérioration des sols puis dans un second temps l'érosion des semences ou des fertilisants.**

Ces effets peuvent être réduits ou évités grâce au drainage superficiel et notamment à la **mise en place de cunettes ou de revers d'eau perpendiculairement à la pente ou à la mise en place d'un drainage profond.**

Les étapes de la gestion des eaux de surface et de sous-sol lors de la réalisation d'une piste de ski sont les suivantes :

① Étape 1. Évaluation des contraintes hydriques du site

Avant de procéder au dimensionnement du système de drainage, la **quantité d'eau à évacuer doit être évaluée.**

Pour ce faire, **différentes méthodes de calcul, telles que la méthode des pluies**, combinées aux caractéristiques environnementales spécifiques de chaque site (vitesse d'infiltration), permettent d'estimer le volume d'eau de ruissellement.

Pour définir la **vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol**, il est recommandé de réaliser **des tests de perméabilité** avant le début des travaux d'aménagement. L'infiltration de l'eau étant généralement réduite après les travaux, il convient d'appliquer un **facteur correctif de la perméabilité**. Cette démarche permet également de comparer les niveaux de perméabilité avant et après les travaux, afin d'ajuster les traitements si nécessaire.

Plusieurs méthodes sont disponibles pour évaluer la **perméabilité du sol**, telles que le simple anneau, le double anneau ou le perméamètre de Guelph. Lors de l'étude DSF (2024), des incertitudes importantes ont été observées sur certains sites avec la méthode du simple anneau, notamment en raison de contraintes telles que la pente et la présence d'éléments grossiers. Ainsi, **le perméamètre de Guelph semble être plus adapté pour les milieux montagnards**.

Les calculs doivent être **ajustés en fonction de la période de fonte du manteau neigeux**, période critique où la quantité d'eau de ruissellement est maximale.

> **Cas du drainage en profondeur**

Une **reconnaissance du site est conseillée pendant la période de fonte** afin d'identifier les dynamiques hydrologiques sur le versant et les sources intermittentes. La nécessité de réaliser un drainage profond sera établie par un professionnel et le dimensionnement des drains sera alors adapté à la quantité d'eau à évacuer afin de protéger les aménagements et limiter les risques de glissement de terrain ou divers processus d'érosion plus ou moins profonds.

> **Cas du drainage superficiel**

Lors de la réalisation de cunettes, il est possible de faire varier plusieurs paramètres. Selon Hassid *et al.*, 2006 et Dupin *et al.*, 2019, les opérateurs peuvent jouer sur **l'écartement entre les drains**. En réduisant l'écartement, l'eau est prise en charge plus rapidement ce qui **limite sa vitesse et son érosivité**. **À noter néanmoins que la multiplication des drains entraîne des coûts plus élevés, un impact visuel plus important et augmente les difficultés liées à la circulation d'engins agricoles chargés.**

À savoir :

La question du dimensionnement des drains (notamment superficiels) est peu traitée dans la littérature (peu d'informations sont disponibles notamment sur les ordres de grandeur pour l'espacement entre les drains ou leur profondeur). **Il semble, pourtant, qu'un travail précis puisse considérablement limiter les processus d'érosion du substrat.**

Différents paramètres peuvent être pris en compte :

- > **La granulométrie du substrat** : une granulométrie grossière réduit la vitesse de ruissellement par rapport à une granulométrie plus fine et réduit ainsi l'entraînement des particules fines par les eaux de ruissellement. Dans le cas où le substrat est composé d'une matrice très fine, il faut envisager le resserrement des drains (Dupin *et al.*, 2019).
- > **La topographie** : l'espacement entre les drains devra être réduit à mesure que la pente augmente. De la même manière, plus la piste est large, plus les drains doivent être resserrés. Les zones de replat ne sont pas à négliger. La décompaction des terrains compactés par le passage d'engins de chantier et l'installation de drains superficiels au niveau des zones de rupture de pente peuvent s'avérer utiles pour éviter l'érosion au passage des eaux de ruissellement sur des terrains plus perméables.
- > **La pluviométrie** : l'évaluation des contraintes hydriques du site permet d'estimer un volume d'eau ruisselée (FICHE 5). Plus le volume est important, plus l'implantation des drains superficiels devra être resserrée.

Par ailleurs, l'eau collectée devant être évacuée, il est **préconisé de réaliser une pente d'environ 4% maximum** au travers de la piste pour permettre l'écoulement et limiter l'érosion de la cunette elle-même (Dupin *et al.*, 2019).

② **Étape 2. Gestion des eaux à l'exutoire des drains / fossés**

Afin de minimiser les modifications de l'hydrologie du versant, il semble intéressant de **gérer l'eau issue des drains ou des cunettes en la dispersant tout au long du versant**, ce qui favorise l'infiltration et le ralentissement des écoulements (Hassid *et al.*, 2006). Un effort de **revégétalisation de ces cunettes permettrait par ailleurs de réduire la vitesse d'écoulement et de favoriser l'infiltration en profondeur**.

Dans le cas où l'eau récupérée ne peut pas être dispersée sur les versants, il est nécessaire de mettre **en place des collecteurs** qui se déverseront dans le milieu naturel avec un débit de fuite limité.

③ Étape 3. Rebouchage des drains superficiels

Après le retour d'un couvert végétal homogène et suffisamment dense pour assurer l'ancrage du sol par les racines et l'infiltration de l'eau, **les drains superficiels peuvent être rebouchés ou partiellement rebouchés**. Cela **favorise la réhabilitation des milieux naturels, limite les effets des sécheresses estivales sur les prairies, favorise la circulation des exploitants agricoles et réduit l'impact paysager**.

L'étude DSF (2024) a révélé que la **présence de drains superficiels non rebouchés** peut impacter le paysage malgré une réhabilitation réussie en termes de recouvrement et de type de végétation.

De plus, l'accessibilité des parcelles par les alpagistes et notamment pour l'épandage de matière organique **peut s'avérer difficile lorsque des cunettes profondes sont réalisées**.

Cependant et en particulier sur des pentes élevées et en altitude, il est essentiel **d'évaluer attentivement les risques de dommages (compaction irréversible des sols) causés par des travaux de rebouchage des drains dans un unique objectif paysager, notamment sur les végétations les plus sensibles**.

Pour aller plus loin

Dans certains cas, notamment lorsque la pente est prononcée, **un léger compactage en surface peut être bénéfique pour limiter l'érosion du substrat lors de la remise en place du substrat**.

Cependant, cela peut également réduire la vitesse d'infiltration des eaux et augmenter le ruissellement malgré la présence de la végétation.

Dans le cas où les mesures de perméabilité réalisées après le développement de la végétation indiquent **une diminution conséquente de l'infiltration de l'eau**, il serait pertinent d'explorer la **possibilité d'utiliser un aérateur à pointes** après le développement de la végétation pour **favoriser l'infiltration des eaux dans ces conditions**. Cependant, aucune expérience documentée n'a été rapportée à ce sujet jusqu'à présent.

La réhabilitation écologique des sols dégradés

A l'issue des travaux d'aménagement, la phase de réhabilitation écologique des sols dégradés débute avec une phase de préparation des sols visant notamment à préparer le substrat pour favoriser la germination des semences en phase de revégétalisation et le développement du couvert.

Cette section traite également des techniques liées à la fertilisation des sols, à la protection du lit de semence ainsi que des recommandations pour le suivi du site.

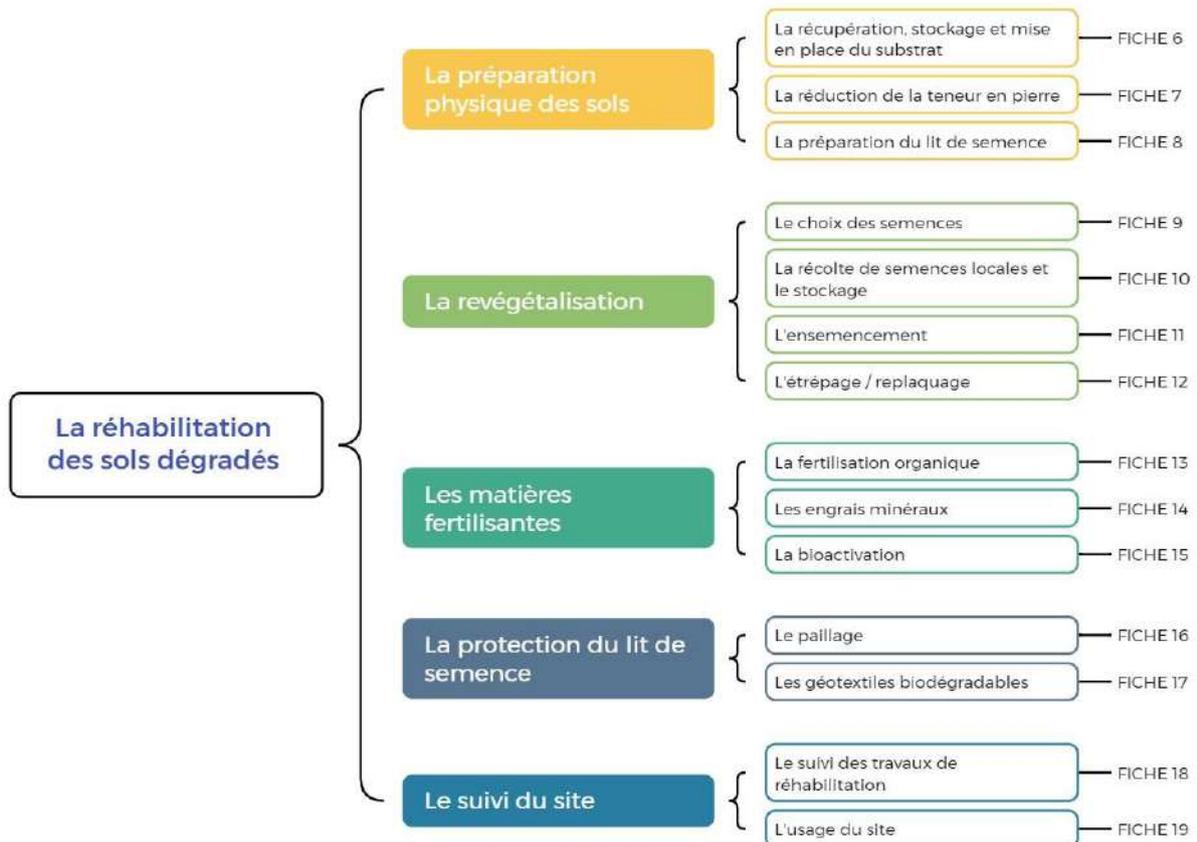


Figure 20 : Présentation des fiches techniques concernant la réhabilitation des sols dégradés dans les milieux ouverts de montagne

A. Préparation physique des sols

FICHE 6 – LA RÉCUPÉRATION, LE STOCKAGE ET LA MISE EN PLACE DU SUBSTRAT



À retenir

La manipulation du substrat depuis son décapage jusqu'à sa remise en œuvre doit être exécutée avec précision afin de **préserv**er au mieux la matrice fine, de limiter la perte de matière organique, et enfin de minimiser l'altération des propriétés physiques du sol.

Alors que le décapage et le stockage des terres fertiles deviennent de plus en plus courants, il est **recommandé d'incorporer au substrat, lors de sa mise en andain ou de sa remise en place, un mélange d'amendements et de fertilisants pour lutter contre la dégradation du sol.**

Le griffage perpendiculaire effectué, sur l'horizon de sous-face avant la remise en place de l'horizon de surface, doit permettre de rétablir les liens entre ces deux horizons facilitant ainsi la pénétration des racines.

Enfin, il est essentiel de **sensibiliser les entreprises de travaux publics pour éviter à la fois le lissage de la surface** couramment réalisé par le pellicier **et à la fois éviter tout passage d'engins après la remise en place.**

CONTEXTE ET DESCRIPTION

La réalisation de travaux d'aménagement dans les milieux montagnards entraîne généralement la perte partielle ou totale de l'horizon de surface du sol. Cet horizon est naturellement le plus fertile et ainsi le plus propice au développement de la végétation avec notamment la présence d'une banque de graines associée Figure 21 ainsi qu'une flore microbienne spécifique (Kangas et al., 2009; Krautzer & Wittmann, 2006; Van der Heijden et al., 1998). Des études ont par exemple montré un effet de la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires sur le développement de 80 % des espèces végétales du fait de liaisons symbiotiques, conditionnant ainsi la productivité de l'écosystème et sa composition floristique (Van der Heijden et al., 1998).

Afin d'optimiser les chances de succès des travaux de réhabilitation des sols dégradés, il est indispensable **de préserver cet horizon de surface** (horizon A sur la Figure 21 ci-dessous). Ainsi, en amont de tous travaux d'aménagement, **cet horizon doit être soigneusement décapé, stocké dans de bonnes conditions**, avant d'être remis en place une fois les travaux de terrassement terminés.

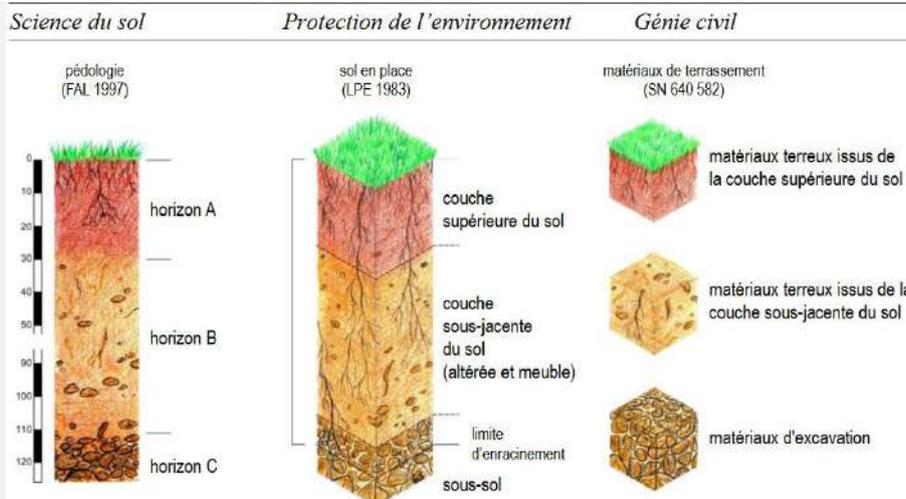


Figure 21 : Les différentes définitions du sol et champs d'application de la Loi sur la protection de l'environnement (OFED & Bellini, 2015).

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Dans les milieux de montagne, la bonne conservation et remise en place du substrat est **un facteur majeur conditionnant la réussite de la réhabilitation écologique**. Sur les pistes de ski des Alpes siliceuses d'Italie, Scotton et al. (2021) ont par exemple montré que pour les parcelles où la terre n'avait pas été décapée et stockée, le recouvrement du couvert végétal n'était toujours pas optimal après 9 ans d'étude.



Résultats issus des entretiens

Pour les alpagistes, la préservation de la terre végétale est un sujet central dans les discussions concernant la réhabilitation. De nombreux avis convergent pour souligner l'importance de préserver correctement la terre végétale jusqu'au démarrage de la végétation.

"Aujourd'hui, la terre végétale est systématiquement mise de côté et réemployée. Ce n'était pas le cas historiquement et c'est un vrai progrès" Les alpagistes des Arcs.

"Il manque de terre, il faudrait en rapporter. Beaucoup de soucis de perte de sol et de lessivage, car les travaux sont souvent menés sur une saison d'été ou deux. Dans les années 70, les pistes ont été ouvertes au bulldozer, en poussant les matériaux, sans tri de la terre végétale. Aujourd'hui, c'est évidemment bien mieux réalisé." Les alpagistes de La Plagne

"À Valcenis, la conservation et la remise en place de la terre végétale est le facteur le plus important, conditionnant la réussite de la réhabilitation. Il y a toujours de la perte en terre végétale, il faut être très strict sur cette étape, trier la fraction minérale..." Les alpagistes de Val Cenis.

"Nous n'avons que des cailloux sans terre végétale. Dès qu'il y a des travaux, il y a imperméabilisation. L'enjeu terre végétale et matière organique est donc important pour nous. Attention au concassage, car une fois le concassage réalisé, la matrice fine induit un compactage important de l'horizon de surface. De ce fait, nous ne faisons pas de criblage." SEM Valmeinier.

"La terre végétale est peu présente sur les adrets de Maurienne, notamment au-dessus de 2000m. La remise en place de la terre végétale est pourtant un facteur clé de reprise réussie de la végétation.

*Idéalement il faudrait remonter de la terre végétale depuis les villages.
"Les alpagistes à Aussois.*

"Les pellistes veulent du lisse et du propre, or c'est contre-productif pour la remise en état; gratter avec les dents du godet pour décompacter et obtenir du microrelief, c'est pertinent", alpagistes de la Plagne.

L'étude DSF (2024) a mis en évidence **les conséquences des actions de déplacement, stockage et remise en place du substrat sur les propriétés physico-chimiques des horizons de surface**. On observe en effet le **lessivage des sols stockés** ou l'érosion lors de la remise en place du substrat, avant développement de la végétation ce qui entraîne généralement une réduction de la matrice fine, notamment des argiles. Cette diminution des argiles altère généralement les fonctions du sol telles que **sa fertilité** et ses capacités de **stockage de l'eau**. Ce risque est d'autant plus grand que la **texture** du sol est équilibrée (teneur en argile d'environ 20 %).

Tableau 5 : Influence de la teneur en argile initiale sur la perte d'argile pendant les travaux

Sol pauvre en argile (<10%, cas de l'étude : sols sur micaschistes)	Sol avec des teneurs moyennes en argile (environ 20%)	Sol avec des teneurs importantes en argile (30-40%)
Pas de diminution significative de la teneur en argile.	Diminution importante avec une quantité restante contraignante pour répondre aux besoins du milieu.	Diminution importante, mais la teneur restante permet de répondre aux besoins du milieu.

Le remaniement du substrat conduit par ailleurs pour la majorité des sites à une réduction de la teneur en matière organique et donc de la teneur en azote total et en carbone (Figure 22) aboutissant à une perte majeure de la fertilité chimique des sols.

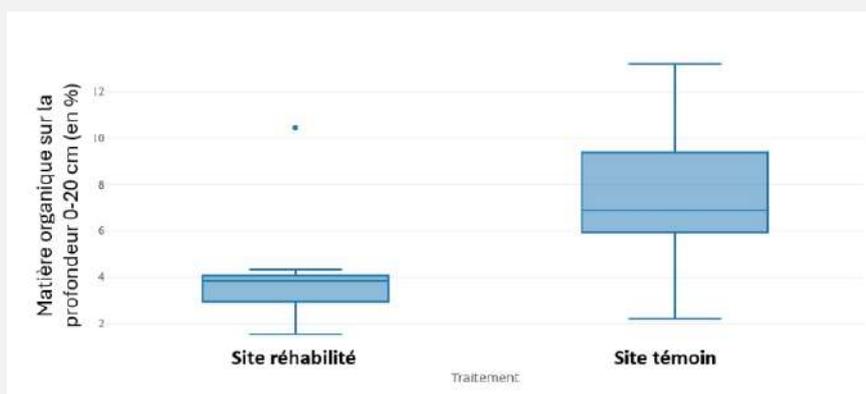


Figure 22 : Teneur en matière organique moyenne des horizons de surface des sites réhabilités et des sites témoins (DSF, 2024)

Préserver l'horizon de surface est donc une étape clé pour le succès de la réhabilitation écologique.

Les étapes de décapage, stockage, amendement et remise en place du substrat sont décrites ci-après (Barni et al., 2007; Dinger, 1997; Pohl et al., 2009) :

① Étape 1. Planification de l'opération

Il s'agit tout d'abord de définir les modalités de décapage (épaisseur des horizons), de stockage (lieu, itinéraire), d'amendement (quantité et produits utilisés) et de remise en place du substrat (ordre, circulation...).

Les horizons à décapager doivent tout d'abord être identifiés. Ce sont **les horizons qui présentent les caractéristiques agro-pédologiques les plus favorables qui seront prioritairement préservées**. Pour les repérer, il est indispensable de réaliser **une description pédologique éventuellement associée à une analyse des propriétés physico-chimiques** des différents horizons (FICHE 1). Cette analyse permet de privilégier les sols avec les teneurs en argile les plus élevées et les pourcentages d'éléments grossiers les plus faibles.

La planification des travaux doit par ailleurs être réalisée lors des périodes les plus favorables (en été en période sèche, voire dès le printemps) et en prévoyant des marges suffisantes en cas d'intempéries (OFED & Bellini, 2015) afin que chaque étape de travaux évite au mieux l'altération des propriétés du sol évoquée dans la FICHE 2 en lien notamment avec le passage répété des engins (Koscielny, 2008).

À savoir

Pour le décapage et la remise en place du substrat, il est important de veiller à travailler **en période sèche sur des sols ressuyés**.

Lorsque les travaux débutent alors que les sols ne sont pas totalement ressuyés (24h au moins après les dernières pluies), il convient de **privilégier les zones présentant une texture plus sableuse et une plus grande proportion d'éléments grossiers afin de réduire les risques de compaction** (FICHE 2).

La teneur en argile est fonction de l'altitude (réduction de la teneur en argile en altitude) et de la géologie avec par exemple **des sols calcaires susceptibles d'avoir des teneurs en argile plus élevées**.

Il est également important de **limiter la destruction des agrégats du sol**, qui, une fois remis en place, permettront de limiter l'érosion. De la même manière, les matériaux fins et peu structurés doivent être **maniés avec précaution pour maximiser leur récupération et optimiser le développement racinaire par la suite**.

À noter que la manipulation de volumes de sol importants nécessite davantage de précautions. Le niveau d'expérience de l'opérateur ainsi que la présence d'une personne compétente chargée de superviser l'application du cahier des charges pourront être déterminants. La personne référente pourra **établir un protocole détaillé des manœuvres à effectuer à chaque étape du chantier** (FICHE 2) et ainsi guider le conducteur de travaux pour garantir le bon déroulement de l'ensemble des opérations sur le terrain.

② Étape 2. Décapage

L'objectif est de **réaliser un décapage sélectif**, horizon par horizon, afin de pouvoir restituer un sol similaire au sol naturel après remise en état. Dans le cas de sols peu épais, notamment sur calcaire lapiazé, il semble pertinent de décapager le plus de matériel possible sans pour autant prélever les éléments grossiers.

La présence de quelques éléments grossiers dans le matériau collecté peut être corrigée par la suite lors de la préparation du lit de semences (FICHE 8). Sur roches siliceuses très blanches, les travaux d'aménagement s'intègrent difficilement au paysage, la remise en œuvre du substrat terreux permet d'atténuer ce phénomène (FICHE 6).

Après le décapage, les travaux de terrassement et/ou de surfacage peuvent être réalisés (FICHE 4).

À noter : Dans le cas d'une **forte pierrosité**, il peut être envisagé de réaliser un **criblage** de l'horizon le plus caillouteux (FICHE 7). Cette pratique a déjà été utilisée dans le but de reconstituer des sols supports d'espaces verts (région Grand Est, en contexte urbain). En montagne où les conditions peuvent être plus difficiles (envol de terres fines), il convient de vérifier les **bonnes conditions** avant sa mise en pratique (garantir une non-exposition au vent). Il peut être **innovant** de placer le refus de criblage (éléments grossiers) en profondeur sur les sols à réhabiliter avant remise en œuvre de l'horizon de surface de terre fine en recouvrement (Étape 5. Remise en place du substrat). Si cette technique est envisagée, elle nécessitera une **mise en œuvre à l'avancement**, à savoir le criblage et la mise en œuvre directe de la fraction grossière (en sous-face) et de la fraction fine (en recouvrement).

③ Étape 3. Amendement du substrat

Concernant les amendements, trois questions doivent être posées :

> Dans quel but réaliser les amendements ?

L'ajout de matière organique permet la création du complexe argilo-humique. Celui-ci **réduit les risques de lessivage des argiles et améliore la structure du sol (agrégation)**. L'apport d'amendement permet également **de lutter contre la diminution de la matière organique et la baisse de fertilité du sol** entraînée par les travaux. Il est donc nécessaire de connaître la teneur en matière organique avant travaux afin de s'assurer d'égaliser ce taux à minima après travaux.

> À quel moment et comment réaliser les amendements ?

Il est **recommandé de réaliser un mélange d'amendements et/ou de fertilisants adaptés et de l'incorporer directement au substrat de surface (0-20 cm état fini)**, conformément à la FICHE 13.

Il est vivement recommandé de réaliser le mélange de la terre fine avec l'amendement à l'avancement lors de la remise en œuvre de l'horizon de surface. Il est également possible **d'incorporer l'amendement sur l'horizon de surface à l'aide d'une pelle mécanique ou grâce au passage d'un broyeur à pierre**. Le stockage de la terre fine **amendée** n'est pas recommandé. En revanche en cas de stockage sur de longue durée, l'andain de terre fine peut être amendé à la surface du stock entre 0 et 30cm. Un ensemencement du stock peut faciliter le maintien du stock dans le temps et préserver la qualité des terres (structure, vie du sol, stock de graines).



Résultats des entretiens

Selon les alpagistes, **l'intégration de la matière organique grâce à un broyeur à pierre dans les premiers centimètres du sol est une solution efficace**. Cependant, il est nécessaire de procéder à un ensemencement rapide pour limiter la perte de la matrice fine.

*“La meilleure solution technique pour retrouver un substrat de qualité consiste à utiliser **un broyeur à pierre pour mélanger la terre végétale, les premiers horizons minéraux et la matière organique apportée de manière exogène**. Cela apporte de bons résultats, et l'on obtient un mélange fin, intéressant qui limite le compactage (fraction organique du mélange). Sur la piste Écureuil qui est une réussite, **le broyeur a été utilisé avec un tracteur agricole puissant (300ch)**. L'entreprise de travaux publics a fait appel à une entreprise de travaux agricoles pour l'occasion.” Les alpagistes des Saisies. “Mais attention, **il faut semer très rapidement derrière, au risque que le substrat se compacte fortement et/ou que des phénomènes d'érosion se mettent en œuvre.**” Les alpagistes des Arcs.*

> Quels amendements et/ou fertilisants ajouter et en quelle quantité ?

Le choix du **mélange d'amendement et/ou fertilisant et la quantité à incorporer** devra être déterminé en fonction de la **teneur naturelle en matière organique du sol, des objectifs de réhabilitation ainsi que des ressources locales disponibles**. Pour cette partie, il est indispensable de se référer à la FICHE 13.

Il est par ailleurs **essentiel de respecter les profondeurs d'enfouissement de la matière organique** afin de garantir une dégradation efficace de celle-ci et d'optimiser ses effets bénéfiques sur la qualité du sol (entre 0 et 20cm de profondeur maximum).

La quantité de matière organique apportée ne doit pas engendrer un apport trop important d'azote, de carbone ou de phosphore, mais doit correspondre aux caractéristiques du milieu naturel. Selon les enjeux, qu'ils soient écologiques ou pastoraux, la nature de la matière organique à apporter ainsi que son volume diffèrent. Il est par exemple préjudiciable d'apporter une matière organique trop riche avec un C/N trop bas lorsqu'il s'agit de restaurer des milieux à fort enjeu écologique au risque de voir rapidement dominer certaines graminées à croissance rapide.

Enfin, il convient de tenir compte **des contraintes réglementaires** telles que la nécessité de réaliser un plan d'épandage pour certaines matières organiques ou de vérifier les restrictions d'épandage dans les zones de captage des eaux potables. Si la réglementation limite l'usage de la matière organique, il est possible d'envisager des substituts pour limiter le risque de lessivage des argiles et enrichir le sol (FICHE 15).

④ Étape 4. Stockage

Pour le stockage du substrat, il est **déconseillé de déplacer la terre sur des distances importantes** (risque de tassement).

La cause principale de la détérioration du substrat est en effet le manque d'oxygène lié à la compaction du sol. Afin de limiter cette compaction, il est préférable de **stocker le substrat sous forme d'andain de section triangulaire ou en trapèze** de 1 à 2m maximum à la **pelle mécanique**. Le dépôt doit se faire en une seule fois et aucun engin ne doit circuler sur les andains (Figure 23).

Les andains doivent être placés sur une surface drainante et légèrement en pente afin d'évacuer les eaux de pluie et éviter la stagnation de l'eau. Si **plusieurs horizons sont distingués, il est important de réaliser plusieurs andains** (un andain par horizon) afin de faciliter la récupération du substrat et le rétablissement des horizons selon le profil initial.

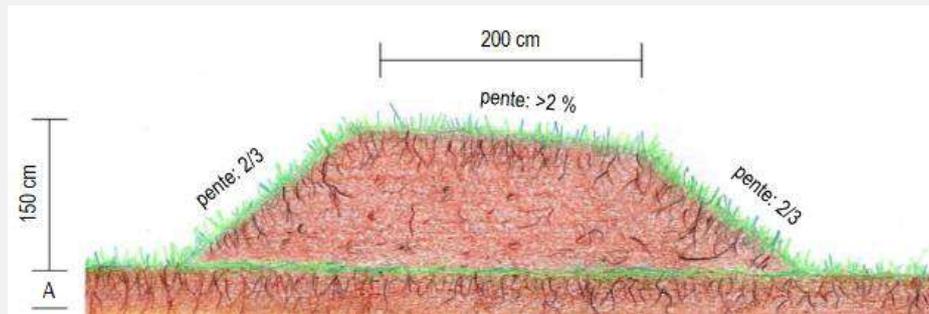


Figure 23 : Stockage du substrat (OFED & Bellini, 2015)

Pour rappel, les matériaux fins et peu structurés nécessitent d'être traités avec une attention particulière (FICHE 4).



Cas particulier du stockage longue durée (> 3 mois)

Dans le cas, d'un stockage longue durée de la terre fine sous la forme d'andain, il est recommandé de réserver une part de la terre fine pour réaliser un **mélange des amendements et/ou fertilisants avec le substrat (terre fine)**. Ce mélange permettra de recouvrir l'andain sur maximum 30 cm d'épaisseur et ainsi de préserver ses propriétés physico-chimiques en surface telles que son activité biologique durant toute la durée de stockage.

Il est également recommandé d'**ensemencer les andains avec des semences** de graminées à levée rapide, afin de limiter l'érosion (système racinaire développé stabilisant le sol), et à l'aide de légumineuses pour enrichir le substrat.

Si la durée de stockage est longue et que la pluviométrie est importante, l'andain peut subir un lessivage important conduisant à une perte en nutriments, de minéraux et à une modification de la structure du sol. Dans ces conditions, **une protection supplémentaire des andains peut être envisagée et adaptée en fonction des périodes de fortes pluies (bâches)**. Attention, cependant à la libération de microplastiques avec l'utilisation de la bâche, notamment si la bâche est fortement exposée au soleil.

Quel que soit le contexte pédo-climatique (plaine, montagne), une durée de stockage supérieure à 6 mois est à proscrire (Direction paysage et biodiversité, 2021).

⑤ Étape 5. Remise en place du substrat

Avant de remettre en place le substrat, il est **essentiel d'effectuer un griffage perpendiculaire à l'aide d'une pelle mécanique sur les horizons de sous-face**. Souvent, lors du remaniement du substrat, les horizons profonds du sol sont compactés, cette opération vise à décompacter le substrat et à restaurer les liens entre les différents horizons remis en place (FICHE 4).

Lorsque plusieurs horizons du sol ont été identifiés, décapés et stockés séparément, leur remise en place doit **respecter l'ordre naturel de succession des horizons**.

Le mélange d'amendements et/ou fertilisants peut être intégré directement à l'étape de remise en œuvre de l'horizon de surface (FICHE 13).

Cette opération doit avoir lieu le plus rapidement possible après les travaux de terrassement pour permettre **l'ensemencement avant la période hivernale et favoriser la levée de dormance des semences**. Si la proportion en éléments grossiers est importante, il est possible d'effectuer un épierreage manuel pour réduire la teneur en pierre à la surface du sol (FICHE 7).

Après la remise en place du substrat, il faut veiller à éviter toute circulation d'engins au risque de créer un tassement pouvant altérer toute la remise en état. **La finition des sols avant le semis constitue une étape fondamentale. Ce constat a été partagé par plusieurs interlocuteurs des domaines skiables ainsi que par les alpagistes.**

En revanche, dans des situations très spécifiques, surtout lorsque les risques d'érosion sont élevés, il pourrait être avantageux d'effectuer **un léger compactage en surface du sol, soit avec le godet de la pelle mécanique, soit en utilisant les chenilles de la machine** (FICHE 8). Cette mesure vise à limiter les phénomènes d'érosion hydrique et éolienne du substrat. Cependant, ces techniques doivent être utilisées avec parcimonie et uniquement lorsque cela est absolument nécessaire. Dans les autres cas, **des alternatives telles que l'utilisation d'un paillage (FICHE 16) peuvent être préférables pour réduire les risques d'érosion du sol.**

En résumé, l'ensemble des étapes du décapage à la remise en place du substrat sont présentées dans la figure ci-dessous.

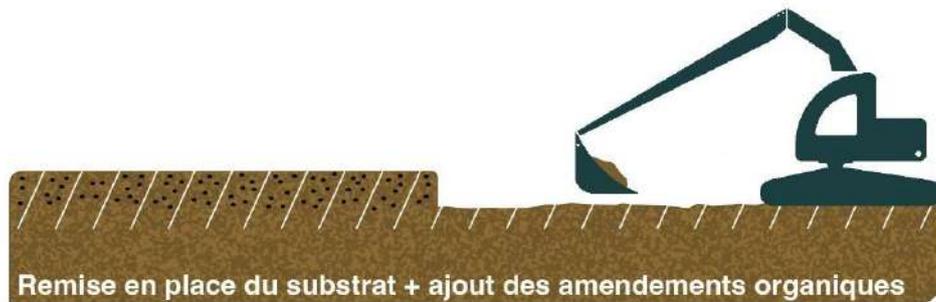
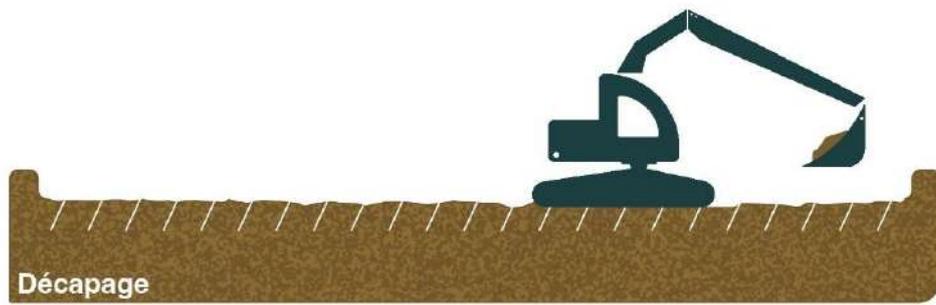


Figure 24 : Ensemble des étapes du décapage à la remise en place du substrat (Soltis environnement)



Cas particulier : Apport de matériaux exogènes pour la reconstruction de sols

Lors de l'étude DSF (2024), deux cas de figure ont été examinés concernant l'apport de matériaux exogènes dans la reconstruction des sols.

Dans un premier cas, des sédiments de barrage ont été utilisés pour couvrir un site naturellement très érodé, tandis que dans un autre cas, de la terre végétale a été apportée.

Les sédiments de barrage ont été efficaces pour reconstituer un sol relativement profond, mais leur texture, principalement limoneuse-sableuse, a limité leur capacité de rétention en eau et en nutriments.

La terre végétale, bien que son transport en montagne soit souvent difficile et coûteux, offre l'avantage de recréer un horizon de surface propice à la germination et au développement des plantules.

Dans les deux cas, **ces matériaux représentent une ressource importante pour la reconstruction des sols.**

Lorsque le sol est quasiment absent, l'utilisation de sédiments semble être une option intéressante. **Pour améliorer la fertilité et recréer un sol propice à la croissance végétale, la terre végétale est idéale.**

Cependant, des incohérences ont été observées entre **les caractéristiques chimiques des matériaux et celles du milieu naturel** (notamment au niveau du pH). Par conséquent, il est essentiel de réaliser un diagnostic initial pour s'assurer de la compatibilité des matériaux avec le milieu naturel et éviter de créer des îlots déconnectés de leur environnement (FICHE 4).

FICHE 7 – LA RÉDUCTION DE LA TENEUR EN PIERRES



À retenir

Tout d'abord, il est important de garder à l'esprit que toute méthode utilisée est préférable à l'inaction.

Si la teneur en éléments grossiers est tolérable et que la main-d'œuvre est disponible, l'épierrage manuel peut être approprié. Sinon, il est recommandé d'effectuer au moins un épierrage mécanique lors de la remise en place du substrat.

En cas de teneur élevée en éléments grossiers, l'utilisation de concassage et de criblage semble plus adaptée. Il est conseillé de privilégier le criblage pour les sols profonds et le concassage pour les sols peu profonds. Il est important d'ajuster la granulométrie lors du concassage et de limiter la perte de la matrice fine.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Certains sols présentent une fraction minérale importante. Le remaniement des sols engendre également la remontée en surface des éléments grossiers. **Leur présence réduit la surface disponible pour la végétation et limite la mise en place d'un couvert dense et homogène.** Afin de limiter ces contraintes, il est possible d'utiliser un concasseur pour réduire la taille de la fraction grossière. Un épierrage manuel ou mécanique (godet cribleur) peut, aussi, être conduit pour réduire la teneur en pierre.



Figure 25 : Godet cribleur.

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Lorsque la fraction minérale est jugée trop importante, la réduction de la teneur en pierre semble être bénéfique pour le développement et l'homogénéité du couvert végétal. Selon Scotton et al. (2021) par exemple, les travaux de réhabilitation menés entre 1500 et 2000 m qui aboutissent à des échecs sont souvent engendrés par une surreprésentation de la fraction minérale dans le sol (> à 70%). En revanche, lorsque la terre végétale est présente en quantité, la question de la pierrosité ne semble pas être un sujet selon les alpagistes de La Plagne.

Les quatre techniques d'épierrage couramment utilisées sont :

① Le concassage

Cette technique permet de **concasser les roches présentes dans le sol à la granulométrie souhaitée.** Il est possible d'avoir recours à un godet concasseur ou à un concasseur.

Le godet pourra être installé sur le bras d'une pelle mécanique utilisée pour réaliser l'ensemble du terrassement alors que le concasseur est une machine autonome qui devra être apportée sur site. En milieu de montagne,

souvent accidenté et difficile d'accès, le **godet concasseur, plus léger et plus compact, est généralement plus adapté.**

Le diamètre des particules concassées pourra être adapté selon la granulométrie souhaitée, une granulométrie équilibrée (ni trop fine, ni trop grossière) est à rechercher pour notamment limiter l'érosion de la matrice fine dans des conditions de forte pluie ou de ruissellement rapide tout en limitant la charge en éléments grossiers.

② Le criblage

Installé sur le bras de la pelle mécanique, le godet cribleur permet de **cribler le sol et de séparer les matériaux grossiers des matériaux fins**. Une fois criblé, il est possible de remettre en place le sol en appliquant d'abord les matériaux grossiers puis dans un second temps les matériaux les plus fins afin d'obtenir un **lit de semences adapté à la germination et au développement des plantules**. Dans certains cas, la fraction minérale est directement évacuée du site.

Les **avis concernant l'usage du criblage**, dans le cadre la réhabilitation des terrains d'alpage semblent **divergents**. Cribler la terre est primordial pour enlever un maximum de cailloux (Simon Bibollet, GP des Avals), pour autant le criblage de la terre végétale doit être bien réfléchi en raison du risque d'éviction des mottes de végétation autochtone (alpagistes d'Aussois).

③ L'épierrage manuel

Le processus d'épierrage manuel implique que **les opérateurs retirent les pierres du substrat à la main pour les évacuer**. Cette étape peut être effectuée après l'étalage du substrat et avant l'ensemencement, mais elle est généralement réalisée l'année suivante, voire au-delà, car les éléments grossiers ont tendance à remonter à la surface du sol au cours du temps.

Alors que l'utilisation d'engins risque d'impacter le couvert végétal fraîchement développé, l'épierrage manuel permet de **limiter la compaction des sols et d'augmenter la surface colonisable par les plantes**. Elle est cependant **très chronophage lorsqu'elle est appliquée sur de grandes surfaces et nécessite beaucoup de main-d'œuvre**.

Les éleveurs d'Aussois considèrent que l'épierrage manuel donne de très bons résultats et permet notamment le fauchage. Il doit être réalisé un an après la finalisation des travaux.

④ L'épierrage à la pelle mécanique

Cette méthode consiste à **enlever les éléments grossiers à l'aide des dents du godet de la pelle mécanique** lors de la remise en place du substrat. Cette méthode permet d'évacuer les éléments grossiers, bien qu'elle ait un effet limité. Toutefois, elle présente l'avantage **d'être réalisable sans recours à un matériel supplémentaire et peut être entreprise dès la remise en place du substrat**. Attention à préserver au mieux l'horizon de surface du mouvement des chenilles sur le sol lors de l'épierrage.



Observations de terrain

Dans le cadre de l'étude DSF (2024), il a été observé qu'au sein de l'ensemble des sites réhabilités, ceux où le concassage et l'épierrage ont été réalisés **présentaient en moyenne une réduction de 10% de la quantité d'éléments grossiers en surface** en comparaison aux sites réhabilités où aucune mesure n'avait été prise.

Il est cependant important **d'adapter la technique de mise en œuvre en fonction du domaine skiable et des conditions du site (Tableau 6)**. Ainsi comme le soulignent les alpagistes de la Rosière, "Le concassage ne semble pas forcément être très adapté à la Rosière, car cela engendre beaucoup de graviers et densifie les sols. Le criblage permettrait un sol moins dense et plus perméable.

En résumé, chaque technique présente des avantages et des inconvénients qui dépendent du milieu et de ses caractéristiques, ainsi que des disponibilités en termes de matériel, de main-d'œuvre et de budget (Tableau 6).

Tableau 6 : Avantages et inconvénients des mesures de réductions de la teneur en élément grossier en fonction des conditions du milieu.

	Concassage	Épierrage manuel	Épierrage à la pelle mécanique	Criblage
Avantages en fonction des sites	<ul style="list-style-type: none"> > Permet de limiter l'exportation de matériaux > Peut-être favorisé lorsque le substrat est très minéral notamment sur sol peu profond > Crée une matrice fine favorable et favorise le drainage, mais augmente la teneur en sable : à éviter sur les sols argileux et limoneux notamment sur des sites exposés à la sécheresse 	<ul style="list-style-type: none"> > Très efficace, mais demande de revenir plusieurs années de suite > À privilégier sur des milieux sensibles : sensible à la compaction, notamment des sols argilo-limoneux, avec une pente forte et/ou lorsque la végétation n'est pas encore installée. > Pas adapté lorsque la teneur en éléments grossiers est élevée 	<ul style="list-style-type: none"> > Risque de compaction des horizons de surface : à éviter sur les sols limoneux et argileux > Technique avec le rendement le moins favorable, mais peut-être facile à réaliser lorsque le substrat vient d'être remis en place. 	<ul style="list-style-type: none"> > Pas de retour d'expérience, mais semble pertinent lorsque le pourcentage d'éléments grossiers est élevé et le sol profond. > Il faut avoir la possibilité d'enfouir les pierres (mise en œuvre d'un horizon pierreux en profondeur avant remise en état de l'horizon de surface)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> > La littérature sur la granulométrie à privilégier en fonction du milieu est peu étudiée. > Le concasseur peut techniquement être difficile à mettre en place en montagne. 	<ul style="list-style-type: none"> > Entraîne des risques de compaction du sol > Ne permet pas d'obtenir un résultat aussi satisfaisant que les autres techniques 	<ul style="list-style-type: none"> > Nécessite la mobilisation d'un grand nombre de personnes. > Méthode pouvant être chronophage. 	<ul style="list-style-type: none"> > Si le choix est fait d'enfouir la majeure partie de la fraction minérale, elle peut à terme, réapparaître en surface. > Si le choix est fait de l'extraire du site, cela induit une perte de matière et nécessite un moyen d'évacuation.

De manière générale, les retours d'expériences relatifs aux effets du concassage ou du criblage sur la refonctionnalisation des sols restent insuffisants pour privilégier l'une ou l'autre technique.

FICHE 8 – LA PRÉPARATION DU LIT DE SEMENCES



À retenir

La préparation du lit de semence peut répondre à des enjeux bien distincts dans le processus de réhabilitation.

Le hersage ou le griffage, par exemple, contribue à décompacter la surface, favorisant ainsi la germination des semences. D'autre part, **le chenillage est particulièrement efficace pour prévenir l'érosion,** protégeant ainsi les semences et le substrat.

Dans les zones présentant des pentes prononcées et où le risque de tassement du sol est faible, le chenillage est préférable bien que des méthodes alternatives peuvent être mises en place (paillage ou roulage des semences).

Le choix entre le griffage et le chenillage dépend de plusieurs facteurs :

1. **La taille du site** : une grande surface peut rendre le griffage difficile à réaliser.
2. **La disponibilité du matériel** : généralement la pelle mécanique est déjà sur place lors de la remise en place du substrat, opter pour le griffage peut être plus pratique. L'accès à une herse peut s'avérer contraignant pour les aménageurs.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Plusieurs opérations peuvent être menées pour préparer le substrat avant ensemencement. **Ces opérations incluent le griffage, le hersage et le chenillage.**

De manière générale, elles **favorisent la stabilisation des semences en surface** en cas d'érosion et donc **leur conservation, leur germination et enfin le développement et la croissance du couvert végétal.**



Figure 26 : Photo d'une herse peigne permettant de réaliser le hersage (Wikipédia).

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

La préparation du lit de semence permet d'optimiser la réussite des travaux de réhabilitation. Comme mentionné précédemment, il existe globalement trois méthodes pour préparer le lit de semence : **le griffage, le hersage et le chenillage.** Les modalités de mise en œuvre sont indiquées dans le Tableau 7.

Les étapes de préparation du lit de semences sont les suivantes :

- ① **Étape 1. Définition de l'objectif**

Le choix de la technique est relatif à la compacité du sol attendu.

Alors que le **griffage et le hersage permettent d'aérer et de décompacter le sol**, le **chenillage induit une pression supplémentaire sur le sol qui viendra le compacter davantage**.

Il est donc **nécessaire d'identifier si la préparation du lit de semence a pour objectif de décompacter le sol pour favoriser la germination et le développement racinaire du couvert végétal** ou si au contraire le but est de limiter l'érosion de la matrice fine en venant compacter légèrement en surface.

“Les meilleurs résultats que nous obtenons se font par foisonnage (griffage) pour rendre le terrain perméable. En profondeur c'est bien sûr tassé, avec des engins à 40T, pas de mystère. Il faut un semis directement derrière cette opération. Cheniller dans les parties les plus pentues peut apporter de bons résultats : ça tient le terrain tout en permettant l'accroche des graines.” JS Joly, SEM Valmeinier



Observations de terrain

Dans la littérature, il a été souligné que l'utilisation du chenillage peut avoir un effet de décompactage en créant de petites aspérités en surface, ce qui favorise l'implantation des plantules. **Cette observation n'a pas été confirmée par l'étude DSF (2024) notamment sur les sols sensibles aux tassements.**

L'étude DSF (2024) a **mesuré la densité apparente en surface sur deux sites réhabilités** (non chenillé et chenillé) situés à proximité directe et ayant subi les mêmes interventions à l'exception du chenillage. La densité apparente est une mesure de masse volumique du sol qui traduit le niveau de compaction des horizons des sols.

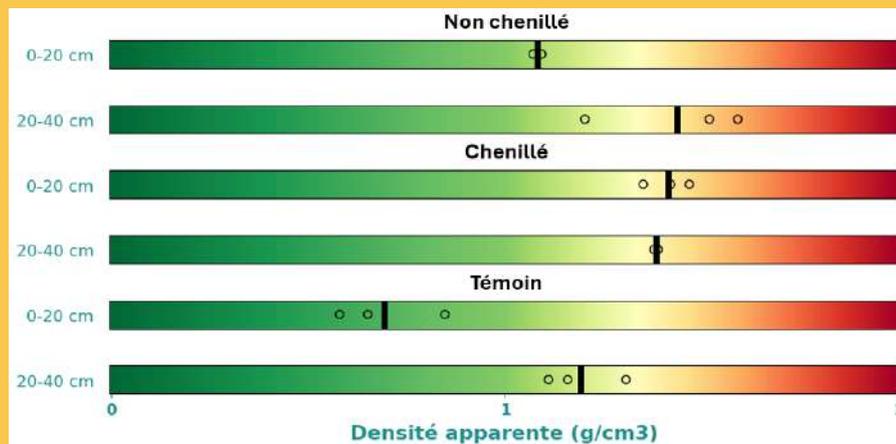


Figure 27 : Mesure de la densité apparente sur deux sites réhabilités et un site témoin (DSF, 2024)

Les mesures de densité apparente indiquent que sur un sol présentant une texture équilibrée, la compaction en surface est plus importante lorsque le sol a été chenillé (Figure 27).

Il est possible de supposer que les passages des engins pour la réalisation du chenillage peuvent entraîner une compaction, pouvant à terme réduire la résistance du couvert végétal face à la sécheresse. Cette compaction diminue la réserve utile en eau et la porosité du sol, limitant ainsi l'accès des plantes aux nutriments.

② Étape 2. Choix de la méthode et modalités de mise en œuvre

Il est nécessaire de choisir la méthode en fonction de l'objectif et aussi des caractéristiques du site d'étude ou de la disponibilité du matériel.

La topographie du site est un des éléments permettant d'orienter le choix :

- > Sur des pentes fortes, l'érosion, notamment hydrique, risque d'emporter les semences et la matrice fine du sol. Le chenillage permettra de retenir les semences sans pour autant créer un substrat trop fin facilement érodable.
- > À l'inverse, sur des sites où la pente est relativement faible, les secteurs compactés par les chenilles risquent d'être exposés à des phénomènes de battance. Le développement de la végétation sera très limité, en lien avec les caractéristiques du substrat (Figure 28). Le chenillage dans ces conditions de faibles pentes est à proscrire.



Figure 28 : Recouvrement végétal d'une parcelle 5 ans après la réalisation d'un chenillage sur un sol grumeleux et peu pentu (Dupin et al. 2019).

La texture du sol influence aussi le choix de la méthode :

- > **En cas de forts risques d'érosion sur sols limono-argileux sensibles aux tassements** (FICHE 2), l'utilisation du chenillage doit être étudiée au cas par cas afin d'estimer l'intensité des forces érosives. Le cas échéant, il est possible d'envisager des méthodes moins impactantes comme le roulage des semences (FICHE 11) ou de venir directement protéger le lit de semences grâce à la mise en place d'un paillage ou d'un géotextile (FICHE 16 et FICHE 17).

La disponibilité du matériel et la surface du site à réhabiliter peuvent être contraignantes dans le choix des méthodes :

Si l'objectif est de réaliser un décompactage de l'horizon de surface, il est nécessaire de choisir entre le hersage et le griffage.

- > Dans le cadre de travaux de réhabilitation, **le griffage semble être la méthode la plus simple à mettre en œuvre puisque le matériel est souvent sur place** pour la réalisation du terrassement (notamment la pelle mécanique) alors que **le hersage nécessite d'avoir à disposition un tracteur et une herse**.
- > En revanche, le hersage moins chronophage sera plus pertinent pour le décompactage **de surfaces importantes**. La concertation avec les agriculteurs lors des travaux de réhabilitation peut permettre de mutualiser le matériel et les compétences et ainsi faciliter la mise en place des techniques les plus adaptées.

À noter que si le substrat est très rocailleux et/ou présente de nombreux affleurements de la roche mère, **ces méthodes de préparation du sol seront difficiles à mener et ne présenteront pas d'intérêt particulier**

Le tableau ci-dessous résume les modalités techniques de mise en œuvre de préparation du lit de semences et propose des critères pour choisir la méthode la plus adaptée.

Tableau 7 : Modalités techniques et de mise en œuvre du griffage, hersage et chenillage (Dupin et al., 2019; Isselin-Nondedeu et al., 2006 ; DSF., 2024)

	Le griffage	Le hersage	Le chenillage
Modalités techniques			
Outil	Râteau ou dents du godet de la pelle mécanique	Tracteur avec une herse	Pelle mécanique légère sur chenilles
Mise en œuvre	Griffage perpendiculaire à la pente	Passage de l'engin pour créer des rainures perpendiculaires à la pente	Passage de l'engin face à la pente pour créer des rainures parallèles
Choix de la méthode			
Intérêts principaux	Décompactage et aération du sol pour obtenir un substrat fin et grumeleux en surface et créer une irrégularité qui facilitera l'adhésion des semences au sol		Création de rainures afin de retenir les semences et de diminuer la vitesse de ruissellement ainsi que l'érosion du sol
Surface du site	Quelques dizaines à centaines de m ²	Centaines de m ² à plusieurs hectares	Centaines de m ² à plusieurs hectares
Disponibilité du matériel	Facile et peu coûteux	Potentielle coopération avec les agriculteurs	Matériel sur place pour la remise en place du substrat
Pente	Faible à moyenne	Faible à moyenne	Forte
Substrat	Moyennement à très compact	Moyennement à très compact	À éviter lorsque les sols sont fins ou grumeleux et sensibles aux tassements (FICHE 2)
Fraction minérale	Faible à moyenne		
Période de réalisation	En amont de l'ensemencement afin de minimiser le risque d'érosion (FICHE 11)		

B. Revégétalisation

Pour accélérer la restauration du couvert végétal, pour prévenir l'érosion et restaurer au mieux la qualité des paysages et des prairies pastorales, les sols réhabilités sont revégétalisés. La revégétalisation ne se limite pas à l'ensemencement du site. Une attention particulière doit être portée sur le choix des semences et leur récolte.

FICHE 9 – LE CHOIX DES SEMENCES



À retenir

L'utilisation de **semences locales** dans les projets de réhabilitation offre des avantages concrets.

À court et à moyen terme, elle favorise **l'émergence d'une végétation diversifiée, assurant ainsi la durabilité du système dans le temps, tout en garantissant un meilleur recouvrement du sol**. De plus, elle constitue une ressource précieuse pour les alpagistes.

Cependant, la disponibilité de ces semences peut parfois être limitée. Il est crucial de les **privilégier lorsque les enjeux pastoraux, paysagers et écologiques sont importants, notamment à des altitudes élevées et dans les zones où l'utilisation d'amendements est réglementée**.

Pour les sites sujets à des processus d'érosion importants, **la création de mélanges de semences exogènes et locales permet** d'accélérer le développement végétal, contribuant ainsi à limiter l'érosion tout en apportant des espèces locales.

Par ailleurs, l'utilisation de cultivars tels que le blé peut présenter un réel intérêt, bien que les retours d'expérience de cette méthode restent limités. Le semis de blé la première année sur une parcelle remise en état **permet un développement rapide du système racinaire**. Après la première année, l'introduction de semences locales et la coupe du blé peuvent favoriser la formation d'un paillis, enrichir le sol en matière organique et permettre le développement d'espèces locales.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Les prairies alpines et subalpines sont soumises à des contraintes environnementales importantes, telles que l'enneigement, une saison de végétation réduite, des variations de température et de luminosité, entre autres.

Adapter le choix des semences en fonction de ces contraintes spécifiques permet de **garantir la pérennité du couvert végétal dans le temps**.

Selon les enjeux visés, **l'utilisation de semences locales doit par ailleurs être privilégiée**.



Figure 29 : Prairie d'alpage au sein d'un domaine skiable de Savoie non impacté par les travaux d'aménagement

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

On distingue trois catégories de semences : **les semences locales**, **les cultivars** ou **les semences exogènes**, présentées ci-dessous :

- > **Les semences locales** sont issues d'espèces indigènes récoltées dans le milieu naturel ou multipliées à partir de semences mères, elles-mêmes prélevées dans le milieu naturel, et dans une zone bioclimatique correspondant au site à réhabiliter.

Il est possible de les **récolter soi-même** (FICHE 10) pour savoir dans quel contexte il est possible de récolter ses propres graines), en vue de travaux de réhabilitation ou de les **acheter à des organismes certifiés**. Les entreprises semencières peuvent fournir soit des mélanges soit les semences d'espèces pures permettant aux clients de réaliser eux-mêmes le mélange idéal.

A savoir

Le label végétal local des entreprises permet de certifier la provenance des semences et doit répondre à un cahier des charges strict, dont les principales clauses sont les suivantes :

- > Les sites de collecte **ne doivent pas avoir été ensemencés depuis 1970**, et doivent être localisés dans l'aire de répartition naturelle du site réhabilité. Si le semencier prévoit une multiplication, celle-ci doit se faire localement.
- > Les récoltes doivent être réalisées de manière à recueillir l'ensemble des semences (sans sélection).



Le nombre de générations cultivées est limité à cinq.

- > **Les semences exogènes** correspondent à l'ensemble des semences proposées par les semenciers à grande échelle provenant d'autres pays ou d'autres conditions biogéographiques (Huc et al. 2018).
- > **Les cultivars** sont des plantes qui **présentent un intérêt pour l'alimentation humaine ou animales** et qui ont été sélectionnées pour être cultivées par l'homme. De fait, elles disposent d'une diversité génétique réduite (par exemple, le blé). Elles sont généralement **utilisées en raison de leur croissance rapide et présentent une forte capacité à enrayer rapidement l'érodabilité du substrat et à produire une ressource d'intérêt pour l'alpagiste** dès la première année. Cependant, ce sont généralement des cultures annuelles nécessitant donc un réensemencement chaque année.

L'utilisation de cultivars semble avoir été satisfaisante lors de la mise en place de certaines stations en Savoie, mais les détails concernant **cette méthode restent limités dans la bibliographie disponible**. Il est possible que cette technique présente un intérêt dans des conditions spécifiques, telles que la **stabilisation rapide du substrat**. De plus, elle **permet le paillage du sol après la première année**, favorisant le développement des semences laissées sous le couvert végétal. Des études supplémentaires pourraient être entreprises pour valider l'efficacité de cette approche et déterminer les situations dans lesquelles son utilisation est la plus appropriée.



Résultats des entretiens

Certains mélanges, couramment utilisés lors des travaux de réhabilitation dans les terrains d'alpage de Savoie, ont suscité des avis mitigés quant à leur intérêt pastoral. La création d'un mélange adapté à chaque station semble en revanche faire l'unanimité.

"Aux Saisies, l'entrée pastorale est essentielle. Le mélange 3 Vallées n'est pas adapté, car trop précoce et présentant une densité de graminées trop importante. Ce mélange stabilise bien le sol (rapide et précoce du fait des engrais de synthèse liés), mais est peu intéressant d'un point de vue agricole. Nous avons développé des mélanges spécifiques à notre contexte, notamment selon que les terrains sont fauchés ou pâturés. C'est le domaine skiable qui resème en interne (acquisition d'un hydroseeder). L'équipe estivale est compétente, et c'est une des clés de

la réussite. Ce sont des gens en partie issus du milieu agricole, qui ont une sensibilité vis-à-vis de la gestion de l'herbe et des compétences dans l'utilisation d'engins agricoles." Ancien chef des Pistes et alpagiste.

"Le mélange 3 Vallées, type fléoles et trèfles, ça monte très vite "en buche", donc ce n'est pas extraordinaire à pâturer. En revanche c'est très intéressant pour la fauche, il y a de la biomasse. Sur les Arcs, plusieurs mélanges sont proposés selon l'altitude et la pratique agricole." Alpagistes des Arcs.

"En altitude, lors de semis, on ne retrouve pas de belles prairies alpines, mais des graminées assez hautes (fléole, par exemple). C'est de la tige et on a perdu la belle pelouse alpine caractéristique des alpages d'altitude à Beaufort." Alpagistes de La Plagne.

"Sur des projets de type réseau qui prennent du temps à se réaliser, il pourrait être pertinent d'ensemencer à l'avancement⁴, par exemple avec des céréales qui n'auraient que l'objectif de tenir le terrain via les racines." Les alpagistes de la Rosière.

- > **Les fonds de grange peuvent également être mobilisés auprès des agriculteurs.** C'est-à-dire récolter les semences directement à partir du fond de granges ou de hangars où le foin et d'autres cultures ont été stockés. Ainsi, comme l'indiquent les alpagistes de la Plagne, "Nous avons réalisé des semis avec des fonds de grange. Cela a repoussé plus vite qu'avec des semences du commerce. C'est plutôt positif, mais ne permet pas de couvrir tous les travaux réalisés !".

Cette technique peut néanmoins engendrer le semis d'espèces peu désirables d'un point de vue pastoral comme le rumex alpin ou des espèces envahissantes. Il n'y a par ailleurs pas de garantie sur l'adaptation du mélange de graines à l'altitude, le foin étant généralement réalisé dans les zones de basses altitudes.

En raison des informations limitées sur les cultivars et du faible intérêt de l'utilisation des fonds de granges, le reste de la présente fiche se concentrera sur **la comparaison entre les semences exogènes et locales.**

① Comparaison entre les semences exogènes et locales

Le projet SEM/LESALPES mené entre 2016 et 2018 a comparé les semences exogènes et locales dans le cadre de travaux de réhabilitation des milieux naturels en montagne (Huc et al., 2018).

Les principaux avantages et inconvénients de ces deux types de semences sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8 : Comparaison des semences exogènes et locales en termes de succès dans le cadre de la réhabilitation.

Les semences exogènes	Les semences locales
<ul style="list-style-type: none">> Quantité de semences nécessaires plus importante (250 kg/ha contre 100kg/ha).> Nécessité d'apporter d'importantes doses de fertilisants.> Faible pérennité des couverts végétaux semés (notamment à moyen et long terme) du fait de leur non-adéquation avec le milieu avec risque fort d'érosion des sols peu protégés.> Risque d'hybridation et de compétition avec la flore locale induisant une modification des communautés végétales et une artificialisation des paysages.	<ul style="list-style-type: none">> Recouvrement plus élevé à court et moyen terme permettant un meilleur maintien du sol par les racines, une meilleure tenue du manteau neigeux et donc d'enrayer plus rapidement les phénomènes d'érosion.> Diversification des prairies productrices de fourrages, meilleure qualité et biodiversité plus riche.> Présence d'espèces et d'écotypes⁵ précoces et tardifs permettent d'échelonner les floraisons et de diversifier les paysages de montagne.

Les résultats obtenus soulignent le risque de colonisation et d'hybridation du milieu naturel par des espèces exogènes introduites. Selon les travaux de Kangas et al. (2009) réalisés en Finlande, ces risques sont réduits lorsque le milieu environnant est un milieu forestier : les espèces prairiales ayant potentiellement plus de difficultés à coloniser un écosystème boisé qu'une prairie subalpine naturelle.

⁴ Semer au fur et à mesure que le substrat est remis en place.

⁵ Sous-espèce engendrée par la sélection au sein d'un habitat particulier et s'étant adaptée génétiquement à cet habitat, mais qui peut se croiser avec d'autres membres de l'espèce (actu-environnement.com).

En résumé, bien que les **semences exogènes puissent parfois montrer un développement plus précoce** avec une stabilisation plus rapide du versant, l'usage de **semences locales apparaît plus adapté, à long terme, et aboutit en général à de meilleurs résultats en termes de stabilité du versant, de recouvrement et de diversité.**

La récolte de semences locales directement sur site n'est néanmoins pas toujours possible et les entreprises semencières permettant leur approvisionnement ne sont pas encore assez développées pour fournir en quantité suffisante tous les opérateurs de travaux de réhabilitation en montagne.

La disponibilité des semences locales issues des entreprises semencières a déjà été abordée comme pouvant être un frein à leur utilisation. Le coût est également plus élevé que celui des semences exogènes. Selon Malaval et al. (2015), les productions sur deux ans des neuf espèces principalement utilisées comme semences locales varient de 160 kg/ha à 1 000 kg/ha, avec un **rendement moyen de 461 kg/ha**. Avec un montant des contrats de production de l'ordre de **3 000 euros/ha** pour deux ans de culture, le coût des semences après récolte est en moyenne de 6,5 euros/kg. En incluant les coûts de transport, de tri, d'ensachage et de commercialisation des graines, ces semences sont vendues entre 15 et 20 euros/kg. Par comparaison, le prix d'un mélange commercial de semences exogènes se situe aux alentours de 4 à 5 euros/kg.

Il est néanmoins important de noter que les semences locales sont moins lourdes que les semences exogènes. La quantité nécessaire est donc moindre, réduisant considérablement la différence de coût entre les deux types de semences. Les coûts de gestion sont également moindres, car les traitements correctifs, notamment le réensemencement, sont moins fréquents (Krautzer et al., 2012).

② Dans quel contexte utiliser les semences locales ?

La disponibilité étant limitée, l'usage de semences locales doit alors être priorisé sur les sites où les enjeux sont les plus importants notamment en fonction de **l'altitude, de la pente, des enjeux pastoraux, paysagers, biodiversité et enfin des amendements organiques disponibles**. Le tableau ci-dessous synthétise les principaux critères de sélection :

Tableau 9 : Critères de sélection des semences locales et exogènes.

Caractéristiques du site	
Altitude	Plus l'altitude est élevée, plus les contraintes sont importantes. Dans ce contexte, les semences exogènes auront plus de mal à s'installer et à perdurer dans le temps, nuisant au succès de la réhabilitation (Argenti & Ferrari, 2009).
Topographie	Le recouvrement du couvert végétal après plusieurs années sur des pentes fortes est meilleur lors de l'utilisation de semences locales. Les processus d'érosion sont plus rapidement enrayés. A noter que l'utilisation d'un mélange diversifié augmentera la résilience du couvert face aux événements extrêmes (Huc et al., 2018).
Intérêt pastoral, paysager ou biodiversité	Les prairies diversifiées assurent une production fourragère et pastorale de bonne qualité. L'usage de semences d'origine locale contribue à la diversité génétique et favorise leur capacité d'évolution. Il peut s'avérer pertinent d'utiliser des semences locales sur des sites dont les enjeux pastoraux sont élevés. De la même manière, si cette zone présente un enjeu paysager important, il semble que l'usage de semences locales permette d'améliorer son intégration paysagère.
Restriction liée à la fertilisation du site	Les semences d'origine locales sont adaptées aux conditions bioclimatiques et plusieurs études ont mis en évidence leurs capacités d'adaptation sur sols pauvres (Huc et al., 2018; Krautzer & Wittmann, 2006; Scotton, 2021). Dans certains contextes, la fertilisation du site réhabilité peut être restreinte notamment dans les périmètres immédiats et rapprochés de captages en eau potable. L'utilisation de semences exogènes, moins adaptées, semble moins pertinente dans ce cas.
Surface à ensemercer	Dans le cas de petites surfaces à réensemencer, telles que la réhabilitation post travaux de réseaux de neige de culture, la recolonisation naturelle est relativement rapide, mais cela résulte aussi du fait de la proximité de la végétation alentour (étude DSF (2024)). Cependant, la récolte de semences pour une grande surface à ensemercer semble être assez contraignante pour les acteurs locaux, à la fois sur le plan financier et pour préserver les milieux jusqu'à la montaison en graine et cela, notamment pour les alpagistes.

Globalement, **l'usage de semences locales est fortement recommandé à haute altitude, pour des pentes fortes avec risque d'érodabilité ou encore lorsque l'on note des enjeux pastoraux, paysagers et/ou de biodiversité importants**. Les restrictions liées aux amendements organiques doivent également être prises en compte.

③ Utilisation d'un mélange mixte

Il est également envisageable **d'utiliser un mélange mixte** composé en général de 20% de semences locales et de 80% de semences exogènes. **Ceci permet de lutter contre l'indisponibilité des semences locales tout en assurant un couvert adapté aux conditions du milieu et une stabilisation rapide du site.**

Dans des conditions standards de réhabilitation de milieux ouverts en montagne, il est estimé que l'utilisation d'un mélange mixte augmentera d'environ 4% le coût global en comparaison à un mélange conventionnel (Dupré La Tour et al., 2018).

Observations de terrain

Lors de l'étude DSF (2024), l'utilisation de mélanges mixtes semble avoir favorisé une reprise rapide de la végétation, avec une diversité assez importante dès la deuxième année. Les sites traités ont présenté **une richesse spécifique de 17 et 18 espèces, comportant plus d'espèces en commun avec le milieu naturel** que les sites n'ayant pas reçu de semences locales. Ce mélange "de raison" 80/20 est notamment utilisé à Courchevel et aux Arcs.

Si l'utilisation de semences locales est considérée comme essentielle pour la réhabilitation du site, mais que la récolte de ces semences n'est pas réalisable, l'étrépage peut être une alternative envisageable (FICHE 12).

④ Création d'un mélange adapté à son domaine skiable

Au-delà de l'utilisation de semences locales ou exogènes, il est également possible **de sélectionner certaines espèces pour leurs caractéristiques**, telles que la structure du système racinaire ou la morphologie du feuillage. Ainsi, A Val-Cenis, la station a travaillé avec le service agronomie de la Chambre d'Agriculture pour définir des mélanges de semences adaptés aux attentes des agriculteurs selon l'altitude et les pratiques. La station ne stocke plus de graines et achète annuellement des mélanges afin d'être certaine de la fertilité des semences » (Issu de l'entretien avec les alpagistes et les responsables du domaine skiable)

Le manuel SEM'LESALPES **présente une liste d'espèces pour revégétaliser en moyenne et en haute montagne**. Les espèces ont été choisies pour leurs critères écologiques, techniques (récolte, germination, mise en culture) puis économiques (coût de production cohérent avec le marché).

Il est ainsi possible de créer son propre mélange en fonction des caractéristiques de son domaine skiable.

Les critères de sélection sont les suivants :

- > **La topographie** : sur des pentes allant de 25 à 35%, les graines plates sont celles qui résistent le mieux à l'érosion hydrique et au vent (Isselin-Nondedeu et al., 2006).
- > **Le substrat** : l'apport d'engrais minéral azoté sur des sols meubles est rapidement lessivé. Dans le cas de sols pauvres ou sujets au lessivage, il est important d'inclure dans le mélange grainier des espèces fixatrices d'azote atmosphérique (légumineuses) (Scotton, 2021).
- > **L'érodabilité du site** : le développement du réseau racinaire participe à la stabilisation du sol. Pour stabiliser un sol épais et meuble, certaines espèces avec un système racinaire profond sont à privilégier. Ce sont particulièrement les racines fines et très fines (<1mm) qui jouent ce rôle d'ancrage. Les réseaux denses de racines fasciculées permettent également de décompacter le sol et d'améliorer l'infiltration de l'eau (Pohl et al., 2009).
- > **L'érosion hydrique** : la partie aérienne des plantes peut également jouer un rôle dans la protection des sols. De grandes feuilles couchées protègent le sol de l'impact des gouttes d'eau, les rhizomes en surface ralentissent le ruissellement et les tapis de végétaux protègent le sol contre l'érosion (Dupin et al., 2019).

En résumé, le choix des espèces dépend de l'usage du site (période de végétation, intérêt pastoral du site réhabilité) et des conditions édapho-climatiques (géologie, pluviométrie, pente, type de substrat, érodabilité du site). La diversité du mélange semble être un aspect clé pour réduire la compétition entre les végétaux et accroître la résilience du milieu face aux différents stress. **À noter enfin que la stabilité des agrégats du sol (permettant de limiter l'érosion du substrat) semble linéairement corrélée avec la diversité et le taux de recouvrement du couvert végétal.** (Pohl et al., 2009).

FICHE 10 – LA RÉCOLTE ET LE STOCKAGE DES SEMENCES



À retenir

La récolte de semences nécessite d'identifier et de protéger une parcelle **présentant une superficie suffisante, jusqu'à la montée en graine des plantes.**

Deux méthodes peuvent être employées pour la récolte : la récolte de foin vert et la récolte de semences.

La récolte de foin vert semble plus intéressante, car elle permet, en plus de la récolte de graines, la formation d'un paillis bénéfique en cas de stress hydrique important (à éviter malgré tout en contexte de fortes pentes).

La **récolte des semences** peut être privilégiée à l'aide d'une brosseuse et/ou d'un aspirateur, notamment lorsque **les alpagistes ne peuvent pas assurer la fauche, l'andainage, le conditionnement, ou encore dans le cas de sites de grandes surfaces.** Cette méthode est également favorable à la réhabilitation lorsque l'épandage du foin n'est pas réalisé immédiatement après la récolte (le séchage du foin entraînant une perte de graines importante).

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Si le choix des semences s'oriente vers l'utilisation de semences locales collectées directement sur site, **il est possible d'utiliser plusieurs méthodes telles que la récolte de semences ou la récolte de foin vert.**

Dans le cas des semences, la récolte peut se faire manuellement, **espèce par espèce, ou directement en mélange.**

Dans le cas de la récolte de foin vert (ou sec), **l'entièreté de la biomasse est prélevée** puis épandue directement (ou après séchage) sur la zone à réhabiliter.



Figure 30: Brosseuse électrique rotative pour la récolte de semences (cbn-alpin.fr)

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Les étapes pour la récolte de semences locales, lors de la réhabilitation de sols dégradés en montagne, sont décrites ci-après.

① Étape 1. Le choix du site de récolte et la période de récolte

Dans le cas où **les semences sont collectées directement aux abords du site**, le rapport du projet SEM'LESALPES (Huc et al., 2018) préconise **pour le choix du site, la surface et la période de récolte :**

- > **D'identifier la prairie qui réunira le plus de caractéristiques (pente, altitude, exposition, géologie, pédologie) communes avec le site à réhabiliter et ayant une communauté végétale correspondant à celle attendue (diversité floristique, intérêt pastoral, intérêt patrimonial, absence d'espèce adventice ou envahissante).**

Lors du projet, il a été développé un outil permettant d'identifier les zones potentiellement favorables à la récolte des semences et consultable dans le rapport final du projet SEM'LESALPES.

- > **D'identifier la surface nécessaire.** Pour **1 surface** revégétalisée, il faut récolter l'équivalent d'environ **2 fois cette surface** pour les prairies de fauche de montagne, **5 fois cette surface** pour les pelouses subalpines et **10 fois cette surface** pour les pelouses alpines.



Résultats des entretiens

Certains alpagistes sont **disposés à s'organiser et à adapter leurs pratiques pour mettre à disposition des surfaces intéressantes pour la récolte du foin vert** moyennant une compensation financière pour subvenir aux besoins en foin de leur bétail (ressource fourragère limitée).

“Si c'est vraiment plus efficace pour retrouver de belles prairies, je veux bien tenter l'aventure du foin vert et perdre un an de fourrage. En revanche, il est nécessaire que je sois indemnisé pour compenser économiquement cette perte en foin.” Exploitant à Valmeinier.

- > **De privilégier la période durant laquelle la majorité des plantes produisent des graines à maturité et récolter celles-ci avant qu'elles ne tombent au sol.** Ceci nécessite de repousser les premières fauches qui arrivent normalement avant la maturité des graines. **En ce sens, les champs pâturés doivent être mis en défens au moins 3 mois avant la récolte.**

À noter que **les compétences des opérateurs sont cruciales pour assurer une récolte optimale.** Ils doivent être en mesure de **sélectionner un site** présentant des conditions environnementales similaires et une flore bénéfique pour favoriser la réhabilitation de la parcelle. De plus, il est important qu'ils aient **une connaissance approfondie de la phénologie des espèces présentes afin de pouvoir déterminer le moment optimal pour la récolte**, c'est-à-dire lorsque la majorité des graines d'intérêt sont à maturité. Il est par ailleurs nécessaire que l'agriculteur soit en mesure de modifier sa gestion pastorale habituelle pour pouvoir retarder le pâturage dans le cas de la récolte de semences ou que l'export de foin vert n'entraîne pas une perte de fourrage trop importante notamment dans les zones AOP.

Pour ces raisons, la récolte de semences locales peut s'avérer rapidement très contraignante. En revanche, les semences locales confèrent un gain de temps et d'argent sur le long terme, car elles réduisent la nécessité de traitements correctifs et l'apport de fertilisants.

② Étape 2. Le choix de la méthode de récolte

La récolte de semences locales directement sur site est réalisée selon **deux méthodes.**

L'une consiste à **prélever l'intégralité de la biomasse**, c'est-à-dire le prélèvement du foin vert une fois fauché. L'autre consiste à **ne prélever que les semences.**

- > **Le prélèvement de foin vert**

L'étude DSF (2024) met en évidence que la méthode du foin vert permet de restaurer un milieu avec une couverture végétale diversifiée, présentant un indice de diversité (indice de Shannon) similaire à celui du site témoin. Selon Dupin et al. (2019), l'utilisation du foin vert permet de récolter entre 60 et 95 % des graines de la prairie, assurant ainsi une quantité de graines suffisante pour l'établissement du couvert végétal.

La récolte du foin vert implique plusieurs étapes. Il est nécessaire de faucher le foin, puis de l'andainer et enfin de le conditionner (bottelage ou chargement en vrac dans une auto-chargeuse). Pour obtenir de meilleurs résultats lors de la récolte du foin, **il est recommandé de le récolter humide**, du fait d'une meilleure adhérence des graines.

Le coût de la récolte et de l'épandage du foin vert dépend grandement du matériel agricole disponible et de la mobilisation volontaire des agriculteurs.

Le rapport final du projet **Sem'LesAlpes propose un protocole de mise en œuvre adapté aux milieux ouverts de montagne.**

- > **La récolte de semences**

La récolte des semences préserve la biomasse valorisable par les alpagistes. Il existe plusieurs possibilités de récolte : **aspirateur portatif, brosseuse portative, aspirateur automoteur, brosseuse tractée.** La moissonneuse-batteuse représente souvent un coût élevé et est rarement utilisée en montagne.

Pour cette opération, le matériel choisi dépend de **la topographie du site, des moyens financiers et humains ainsi que de la surface à réhabiliter.** Le rendement et le coût des quatre outils sont présentés dans le Tableau 10 ci-dessous (Koch

et al., 2015). À noter que les rendements sont donnés à titre indicatif puisqu'ils dépendent des sites récoltés et de la réalisation de la récolte par les opérateurs.

Tableau 10 : Comparaison des différentes techniques de récolte des semences.

	Aspirateur portatif	Brosseuse portative	Aspirateur automoteur	Brosseuse tractée
Quantité de graines nettoyées (kg/ha)	6.8	2.4	11.8	4.6
Productivité (kg graines/h)	0.2	0.1	1.4	1.3
Prix de la machine	Entre 400 et 1000 €	2000 €	1700 €	10000 à 15000 €
Pente	Peu pentu	Peu pentu	Peu pentu	Jusqu'à 20%
Hauteur d'herbe	Basse	Basse/Haute	Basse	Haute

La productivité de l'aspirateur portatif et de la brosseuse portative est faible pour un temps de travail élevé, ne facilitant pas la mise en place de ces deux méthodes. **Le choix semble s'orienter entre l'aspirateur automoteur et la brosseuse tractée s'il est possible d'utiliser des machines automotrices ou tractées.**

Afin d'accompagner le choix entre les deux types de récolte (les semences ou le foin vert), le manuel SEM'LESALPES propose un arbre de décision sous la forme de questions permettant d'aboutir au choix le plus adapté (Page 18-19). En croisant ces données avec les retours d'expérience des acteurs locaux, quelques points clés ont été résumés ci-dessous :

- > **Mécanisation du site de récolte** : Est-il possible d'accéder au site de récolte avec un tracteur pour effectuer les opérations de fauche, d'andainage et de bottelage ou de chargement du foin ? Si ce n'est pas le cas, la récolte de semences peut être réalisée à l'aide de matériel spécialisé tel que la brosseuse ou l'aspirateur.
- > **Possibilité de semis immédiat** : Est-il possible de semer immédiatement après la récolte ? Si cela n'est pas envisageable, il est plus judicieux de prioriser la récolte de semences plutôt que le foin vert, car le séchage du foin vert, au-delà de la nécessité de disposer d'une grande surface, peut entraîner une perte importante de semences.
- > **Impact financier sur l'alpagiste** : La parcelle à récolter représente-t-elle une perte financière significative pour l'alpagiste ? Si tel est le cas, la récolte de semences permet de limiter cette perte en minimisant l'impact sur la production de biomasse végétale. En repoussant la première fauche pour la récolte de semences, la réduction de la production fourragère est estimée à environ 14 % sur l'année. Il est également envisageable de mettre en place une compensation financière pour l'alpagiste.
- > **Disponibilité du matériel de récolte** : Est-ce que le domaine dispose du matériel nécessaire pour réaliser la récolte des semences, tel que la brosseuse ou l'aspirateur ? Est-il possible de travailler en partenariat avec les alpagistes pour effectuer la coupe de foin, l'andainage et le transport ? Si le domaine ne possède pas le matériel adéquat, il peut en effet être avantageux de collaborer avec les alpagistes.
Si la collaboration ne peut pas aboutir, le matériel de récolte de semences peut être loué auprès d'organismes spécialisés. Cependant, il convient de noter que le nombre de machines disponibles est souvent limité avec une demande pouvant être élevée sur une même période. Il est donc vivement recommandé de planifier la location du matériel.
- > **Condition du site à réhabiliter** : la méthode du foin vert permet également un transfert de matière organique et de micro-organismes, conduisant ainsi à des bénéfices similaires à ceux du paillage. Elle est donc conseillée sur des sols peu aptes à retenir l'eau, tels que les sols sableux, pauvres en matière organique ou légèrement compactés, ainsi que sur les sites exposés à des conditions climatiques sèches, comme les versants secs. Enfin, pour garantir le maintien en place du paillage, cette méthode doit être mise en œuvre sur des pentes faibles à modérées.

À noter que, selon Koch et al. (2015), le rendement optimal serait obtenu lors de l'utilisation combinée de ces deux machines. Cependant, plusieurs contraintes peuvent limiter l'utilisation de ces deux méthodes. La brosseuse tractée nécessite d'avoir le matériel disponible pour charger la brosseuse (camion) et pour la tracter (tracteur, quad ou 4x4). Pour l'aspirateur automoteur, une pente moyenne ou importante et des terrains irréguliers peuvent compliquer grandement la réalisation de la récolte.

FICHE 11 – L'ENSEMENCEMENT



À retenir

La **quantité de graines appliquée est généralement plus importante pour les semences exogènes que pour les semences locales**. Cette quantité peut également être augmentée en cas de **fortes pentes ou lorsque la présence d'espèces envahissantes est détectée**.

La période d'ensemencement doit être adaptée en fonction des travaux. La **réalisation de la végétalisation par les domaines skiables, eux-mêmes, semble favoriser la réalisation de l'ensemencement à la bonne période**. Sur les versants secs, l'ensemencement au printemps ne semble pas idéal.

Concernant **le choix de la méthode, voici quelques recommandations** :

- > **Le foin vert** : adapté aux pentes faibles à modérées, aux versants secs et aux sites disponibles pour la récolte du foin (idéalement en dehors des zones AOP).
- > **Hydroseeder** : convient à tout type de pente et permet d'adapter le mulch en fonction du risque d'érosion. Favorise la germination et le développement des plantules.
- > **Semis à la volée** : évite le compactage du sol et présente un coût faible pour des surfaces modérées.

Il est possible de **rouler les semences ou de faire passer le troupeau** après l'ensemencement pour éviter le lessivage des semences.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Diverses techniques peuvent être employées pour ensemençer les sites : le transfert de foin, le semis à l'hydroseeder, le semis au semoir mécanique, le semis manuel à la volée et enfin l'absence d'intervention conduisant à une recolonisation spontanée.

Le choix de la technique ainsi que la période d'ensemencement et la quantité de semences appliquée dépendent des caractéristiques du site et de son contexte environnemental.



Figure 31: Épandage de foin vert sur le site réhabilité (SEM'LESALPES, 2018)

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Les étapes d'ensemencement sont les suivantes :

① Étape 1. Estimation de la quantité de graines à semer

Lors de l'utilisation de semences exogènes, il est préconisé d'appliquer **250 kg de semences par hectare contre 100 kg de semences locales par hectare** (les graines locales sont plus petites et donc plus légères) (Malaval et al., 2015). Il est important de respecter ces préconisations afin d'assurer le développement d'un couvert dense sans pour autant inhiber la colonisation naturelle par des espèces indigènes (Schmid et al., 2007).

Néanmoins, **la quantité de semences doit être adaptée aux contraintes du site**. Par exemple, sur une **pente importante**, la quantité doit être plus importante pour compenser le lessivage des graines (Dupin et al., 2019). Si **la présence d'espèces exotiques envahissantes a été identifiée** en amont des travaux d'aménagement, il peut également être judicieux d'apporter une quantité de graines plus importante afin de favoriser le retour des semences sélectionnées et de limiter le retour des espèces envahissantes.



Observation de terrain

Selon l'étude DSF (2024), il semble que les responsables des travaux de réhabilitation aient tendance à utiliser **moins de semences lorsque l'ensemencement est réalisé avec un hydroseeder**. L'hydroseeder permet en effet de fixer les graines sur le substrat grâce à l'ajout de cellulose, limitant ainsi la perte de semences et donc la nécessité d'utiliser une grande quantité de celles-ci.

② Étape 2. Identification de la période d'ensemencement

Il est souvent préférable de **réaliser l'ensemencement à l'automne**. Certaines graines ont en effet besoin de changements de température pour sortir de leur dormance et germer au printemps. Le risque pour les plantules franchement développées est toutefois de **subir les effets du gel avant les premières neiges**. Sur les sites ombragés, l'ensemencement peut avoir lieu plus tôt que sur les sites ensoleillés (août *versus* septembre) (Dupin et al., 2019).

Dans le cas d'un ensemencement au printemps, le semis doit être effectué après la fonte des neiges facilitant par là même l'accès au site par les engins en charge de l'ensemencement. Les plantules peuvent présenter une **moindre résistance à la sécheresse estivale en raison d'un temps de croissance réduit** comparativement à des semis réalisés à l'automne. Par conséquent, il est nécessaire d'éviter l'ensemencement au printemps sur les versants secs en fonction des contextes climatiques locaux.



Résultats des entretiens

Selon les alpagistes interrogés, on comprend que les contraintes locales varient fortement entre les différents domaines. Sur les stations de Haute Maurienne, par exemple, sont confrontés à des conditions climatiques particulièrement sèches. Ainsi, **selon les agriculteurs rencontrés à Valcenis, il n'est plus envisageable de ressemer des prairies agricoles au printemps (trop sec)**, les semis doivent s'envisager à l'automne pour s'assurer de la bonne reprise des végétations.

Pour autant, "les travaux de remise en état par les entreprises se font quand elles ont le temps en fin de chantier. C'est une variable d'ajustement". "Mais si ça ne pleut pas, les graines ne partent pas ! Les sécheresses sont des aléas prégnants à prendre en compte aujourd'hui dans ce type de projet. D'une manière générale, il y a moins de ressource en herbe en Maurienne depuis quelques années." Alpagiste à Valcenis.

À Aussois, station sèche des adrets de Maurienne, **l'arrosage des parcelles réhabilitées est pratiqué lorsque les équipements le permettent (adduction en place)**. Cela permet de standardiser la reprise et la levée des graines. Sans cette pratique, les résultats seraient plus hasardeux. Les alpagistes de Valcenis partagent la difficulté de "faire partir l'herbe" en Haute-Maurienne.

Il semble qu'il y ait un réel intérêt à ce que **l'ensemencement soit réalisé en interne par les domaines skiables**. Étant sur place, ils peuvent **réagir plus rapidement en fonction des conditions météorologiques** pour adapter la période d'ensemencement.

*“Il faut être un peu paysan dans l'âme, **guetter la météo et les conditions pluvieuses** pour s'assurer d'une bonne reprise de la végétation. **Les services des pistes peuvent avoir cette sensibilité en interne**, les semis par les entreprises sont quelques fois plus hasardeux, car leur calendrier d'intervention est plus contraint. On est capable d'être réactif en exploitation du domaine skiable pour le damage ou le PIDA, il faut faire pareil l'été.” (Les alpagistes de la Rosière - idée partagée par les alpagistes d'Aussois).*

*Les alpagistes de La Plagne partagent ce constat : “La revégétalisation arrive en dernière étape, dans un calendrier de travail très contraint, au moment où les retards s'accumulent. **Si les délais sont trop tardifs, rien ne sert d'étaler la terre végétale et de semer en novembre !”***

L'ensemencement pendant la période estivale est à proscrire sauf pour l'épandage du foin vert qui nécessite une mise en place directe après la fauche.

③ **Étape 3. Choix de la méthode d'ensemencement**

Pour réaliser l'ensemencement, plusieurs méthodes peuvent être utilisées : **le transfert de foin, l'hydroseeder, le semis au semoir mécanique, le semis manuel à la volée ou la recolonisation spontanée.**

Voici les modalités techniques de mise en œuvre ainsi que les situations les plus adaptées à leur mise en place :

> **Transfert de foin**

Une fois récolté (lorsque les graines sont à maturité), **le foin vert doit être épandu le plus rapidement possible** en déroulant des bottes rondes si la pente n'est pas trop raide ou en l'étalant manuellement s'il a été chargé en vrac.

Il est toutefois possible, notamment lorsque les travaux ne sont pas terminés au moment de la récolte **de laisser sécher le foin, de le stocker et de l'étaler à l'issue des travaux**. Néanmoins, **il faut s'attendre à une réduction de la quantité totale de graines en raison des différentes manipulations et à un pouvoir germinatif des semences inférieur**. Une **épaisseur maximale de foin de 2 cm** est nécessaire sur l'intégralité de la parcelle pour un semis supérieur ou égal à 2g/m² (Huc et al., 2018). Cette technique peut être réalisée par les acteurs locaux. **En cas de fortes pentes, cette technique n'est pas la plus adaptée** (Dupin et al., 2019).

Le prélèvement et l'étalement de foin vert permettent de transférer 60 à 95% des graines de la prairie. Une fois étalé, le foin agit comme un paillis et **permet de protéger le sol contre l'érosion et les hautes températures**. Il favorise ainsi la germination des graines ainsi que la croissance des plantules et permet de réduire l'impact paysager en recouvrant le substrat notamment lorsque la profondeur du sol est faible et que la roche est mise à nu (FICHE 16).

Bien que cette technique soit très intéressante pour favoriser la diversité floristique et valoriser l'adaptation des espèces locales, **une vigilance majeure doit être prise en compte dans les aires d'Appellation d'Origine Protégée fromagère**. En effet, les **cahiers des charges des AOP imposent des taux importants d'autonomie fourragère** (70% en AOP Beaufort). Ainsi la valeur des **prairies fauchables ne permet pas à priori la récolte de foin vert pour la restauration des pistes de ski**. Des compromis peuvent certainement être trouvés localement et doivent être abordés et discutés avec les exploitants agricoles.

> **Le semis à l'hydroseeder**

Cette technique consiste à projeter les semences à l'aide **d'un hydroseeder dans un mélange d'eau, de fertilisants, d'agents fixateurs et/ou mulchs**. Il permet de semer efficacement des zones assez pentues et irrégulières.



Figure 32 : Ensemencement à l'hydroseeder de la piste de l'Éclipse à Courchevel (D. Vignon, 2021)

Le mulch est un produit de recouvrement de sol à base de fibres diverses (généralement d'origine végétale). **Cette solution favorise l'adhérence des semences au sol et crée des conditions favorables à leur développement.**

On distingue les différents mulchs selon leur efficacité à limiter l'érosion (Figure 33) :

- **Le mulch de cellulose** est adapté pour des pentes modérées.
- **Le mulch de bois** est utilisé sur des sites fortement exposés à l'érosion. Il doit être en contact étroit avec les semences et recouvrir l'intégralité du substrat. Selon la quantité et les conditions du site, le mulch se dégradera plus ou moins rapidement, il faut donc prendre en compte l'apport de matière organique et adapter les amendements en conséquence (Dupin et al., 2019).
- **Les mulchs composés de matrices fibrillaires⁶** sont spécialisés pour lutter contre l'érosion, ils sont adaptés à de fortes pentes, voire à des conditions érosives extrêmes.

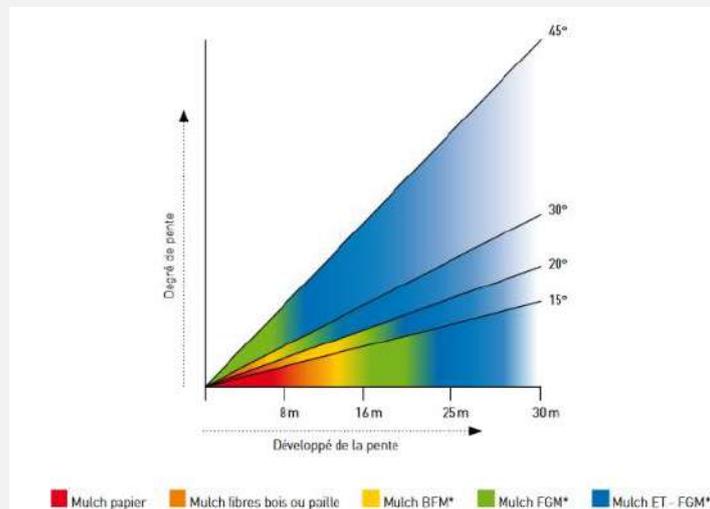


Figure 33: Spectre d'utilisation de différents types de mulch en fonction de la longueur et du degré de la pente (Lignier & Rosset, 2012).
FGM : Flexible Growth Medium. BFM : Bonded Fiber Matrix.

La quantité de mulchs à appliquer est plus importante en altitude et sur les fortes pentes. Elle peut en revanche être **plus faible sur des versants bien exposés au soleil.** Le choix et la préparation des agents fixateurs ou des mulchs ainsi que leur quantité, mêlés à l'eau et aux semences, peuvent influencer la qualité du semis. Il est important de se référer aux conseils d'utilisations (Lignier & Rosset, 2012).

À noter que **des engrais sont généralement apportés avec le mulch lors de l'hydroseeding.** Il est donc important de se référer à la partie amélioration du substrat (FICHE 13, FICHE 14 et FICHE 15) avant de définir la quantité de mulchs et d'engrais à prévoir pour l'hydroseeding.



Résultats des entretiens

Il est encourageant de constater que les retours sur l'utilisation de l'hydroseeder sont plutôt positifs lors des entretiens. Cette méthode semble effectivement favoriser le développement de la végétation, ce qui représente un enjeu central dans les projets de réhabilitation.

"Indépendamment des précipitations naturelles recherchées juste après le semis, l'hydroseeder apporte l'humidité initiant la germination avec 10 à 12m³/ha." Ancien chef des Pistes aux Saisies et alpagiste.

"L'hydroseeding est une bonne méthode, notamment la première année, ça part bien. Mais s'il n'y a pas assez de terre végétale / fumier dans le sol la ressource en herbe est faible dès la seconde année". Les alpagistes de Valcenis.

> Le semis au semoir mécanique

Cette technique vise à épandre directement les semences à l'aide du semoir permettant **une régularité dans les semis**. L'usage d'un semoir mécanique est relativement **peu coûteux et un apport de matière organique peut être directement intégré dans le semoir**, évitant de multiplier les traitements sur un même site.

L'ensemencement doit être réalisé uniquement sur **des sites relativement plats**, par **temps sec** pour limiter le compactage et l'érosion hydraulique des semences.

Les **semoirs centrifuges sont déconseillés** notamment dans les zones venteuses, les semences les plus légères pouvant être emportées.

> Le semis manuel à la volée

Par cette technique, **les opérateurs sèment les graines en les projetant à la volée**. Cette technique est pertinente **pour les petites surfaces ou sur les sites difficilement atteignables** puisqu'elle ne nécessite aucun engin. La réussite et l'homogénéité du semis peuvent grandement varier d'un opérateur à un autre. Il faut veiller à semer la bonne quantité de graines et de manière homogène sur le site.

> La recolonisation spontanée

La recolonisation spontanée correspond à **un processus naturel par lequel les espèces végétales indigènes recolonisent le milieu**, sans intervention directe de l'homme. Ce phénomène peut survenir grâce à la présence de graines ou de matériel végétal dans le sol, au transport de semences par le vent ou par les animaux.

Dans le contexte de la réhabilitation des terrains d'alpages, **cette technique ne semble pas pouvoir limiter efficacement les phénomènes d'érosions et induire le rétablissement rapide d'un couvert végétal**. Sur des pistes de ski nivelées à haute altitude, Urbanisa et al. (1997) a constaté que seules les espèces situées à une distance maximale de 15 m colonisaient efficacement la piste de ski 9 à 10 ans après le nivellement.

La recolonisation spontanée n'est pas donc pas recommandée dans un contexte où le sol constitue un enjeu majeur de préservation.

Le Tableau 11 ci-dessous compare les différentes méthodes d'ensemencement afin d'orienter les choix les plus adaptés en fonction des contraintes. À noter que la technique de l'étrépage-replaquage est détaillée dans la FICHE 12 ci-après.

⁶ Complexe biodégradable composé de fibres végétales (par exemple *Betula papyrifera* / *Populus tremuloides*) avec adjonction de fibres de renforcements, d'agents stabilisants et d'activateurs de germination et de croissance.

Tableau 11 : Comparaison entre les différentes techniques de végétalisation.

Critères	Hydroseeder	Foin vert	Semoir mécanique	Semis à la volée	Etrépage-replaquage
Végétalisation à l'automne	+	-	+	+	+
Végétalisation en été	-	+	-	-	- (Printemps oui)
Superficie élevée	+	+/-	+	-	+/-
Pente faible	+	+	+ (si érosion faible)	+	+
Pente modérée	+ (mulch de cellulose si érosion faible, sinon mulch de bois)	+ (si érosion faible)	-	+	+
Pente forte	+ (mulch type matrices fibrillaires si érosion)	-	-	+	+ (si érosion faible)

Le choix de la méthode peut aussi être **influencé par les différences de coûts entre les techniques**. L'hydroseeding nécessite l'achat de mulch, qui peut être plus ou moins onéreux notamment en fonction de leur performance dans la lutte contre l'érosion et des fournisseurs. L'étrépage peut aussi entraîner des coûts de main-d'œuvre importants.

La **disponibilité du matériel peut également être un frein à la mise en place de telles pratiques**. L'hydroseeder est une machine spécifique et nécessite d'être utilisé à proximité d'un point d'eau. L'épandage de foin vert nécessite quant à lui de disposer du matériel adéquat et d'un savoir-faire agricole.

④ Étape 4. Le roulage des semences

Lors d'un semis au semoir mécanique ou à la volée, **un roulage mécanique de graines peut permettre une meilleure adhésion des graines** dans le substrat et limiter l'érosion en surface. Ainsi, une quantité plus importante de graines restera en place. Attention, cependant, à ne pas compacter le sol de manière excessive (FICHE 2).

Isselin-Nondedeu et al. (2006) ont montré les effets positifs **des empreintes de sabots de vaches sur la réduction de la distance parcourue par les graines après ensemencement**. Selon les **alpagistes de la Rosière** "cette pratique est importante et permet de limiter l'érosion des graines, mais aussi de compacter un minimum le sol afin de retenir l'eau et la matrice fine".

On peut supposer que l'effet d'un piétinement léger induit par des bovins (cas idéal) vient imiter l'effet d'un roulage mécanique des semences. Ainsi, les pistes fraîchement semées peuvent être utilisées comme **couloir de passage pour les herbivores à condition qu'ils ne stationnent pas sur place pour consommer les plantules en cours de développement**.

Ces deux techniques permettraient également de limiter les risques d'érosion du substrat sur des pentes moyennes à fortes, **offrant ainsi une alternative à l'utilisation du chenillage qui entraîne des risques importants de compactage**, notamment sur les sols argileux et limoneux.

FICHE 12 – L'ETREPAGE - REPLAQUAGE



À retenir

L'étrépage permet de préserver les caractéristiques du milieu, notamment celles du sol et de la végétation. Il consiste à décaper des plaques d'une profondeur d'environ 20 à 30 cm. Idéalement, ces plaques doivent être **replaquées au fur et à mesure de l'avancement des travaux**, de préférence au printemps ou à l'automne.

Si les plaques sont stockées, il est essentiel de veiller à **ne pas dépasser une période de 3 semaines sans arrosage** et de **limiter leur exposition directe au soleil**.

Pour compenser les pertes, il est recommandé de **replacer les plaques sous forme de mosaïques** sur le site réhabilité. Dans le cas de versants secs, un arrosage peut être nécessaire durant le premier été.

Le transplanteur de ligneux bas (type myrtilles, etc...) peut éventuellement être envisagé lorsque le pH du sol n'est pas fortement modifié après le remaniement, sur des sols présentant une teneur faible à moyenne en éléments grossiers, et lorsque le site ne présente pas d'intérêt pour le pâturage.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

L'étrépage-replaquage désigne une technique ayant lieu avant les travaux d'aménagement. Elle consiste au prélèvement, avant travaux, de plaques de sol par pelle mécanique, sans endommager la végétation. Ces plaques sont ensuite replaquées sur le site d'origine après travaux.

Il est également possible de collecter ces plaques de sol dans un milieu cible correspondant à la communauté naturelle visée dans le cadre de la réhabilitation.

Cette méthode peut se substituer à toutes les étapes préalablement citées concernant la préparation du lit de semences et la revégétalisation.



Figure 34: Prélèvement d'une plaque à la pelle mécanique (Dupin et al., 2019).

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

L'étrépage-replaquage de la végétation est une méthode permettant de **prélever le substrat tout en conservant les communautés végétales existantes, la diversité faunistique et microbienne ainsi que l'ensemble des propriétés du sol prélevé**.

Ainsi, l'étrépage constitue une méthode très satisfaisante, notamment **pour des surfaces modérées**, lorsque **la végétation présente un intérêt particulier**, ou lorsque le site est identifié comme difficile à réhabiliter au niveau des caractéristiques du sol telles que **des sols argileux, exposés à l'érosion et peu profonds**. Elle est d'autant plus préconisée lorsque le milieu présente un **fort intérêt pastoral, paysager ou écologique**.

Le coût initial de cette méthode semble être un obstacle, comme l'indique le témoignage d'un responsable de chantier qui rapporte qu'elle prend deux fois plus de temps qu'un terrassement classique sans valorisation des couvertures végétales existantes (Malaval et al., 2015). Par conséquent, **le coût global est estimé être deux fois plus élevé**, avec une estimation de 20 000 euros par hectare en 2022 (Mazoyer, 2022). Cependant, cette approche pourrait potentiellement réduire ou même éliminer les coûts liés à l'achat de semences et à l'ensemencement, ainsi que les besoins en matières fertilisantes.

Notons enfin, qu'il est souvent **difficile de recouvrir intégralement la zone étrépee** avec les mottes d'origine (du fait d'un tassement léger exercé sur les mottes lors du prélèvement). Cette situation peut poser problème, notamment dans **les zones sujettes à une forte érosion**, car cela rend la colonisation des plantes entre les mottes plus difficiles.



Observations de terrain

Dans l'étude DSF (2024), le site réhabilité grâce à cette méthode d'étrépage-replaquage a été un succès, permettant de rétablir **70% des espèces présentes sur le site témoin** en seulement 3 ans. **La richesse spécifique** sur le site réhabilité s'est même révélée **plus importante** que sur le site témoin (Figure 35).



Figure 35 : Nombre d'espèces végétales présentes sur le site réhabilité (en bleu) et sur le site témoin (orange)

Il a également été vérifié que **les caractéristiques physico-chimiques du sol**, telles que sa profondeur, sa granulométrie et sa faible compaction, **ont pu être préservées grâce à cette technique**.

Néanmoins, le processus de replaquage des mottes n'a pas abouti à une couverture complète de la surface, entraînant **une forte hétérogénéité sur l'ensemble du site**, avec des zones dépourvues de sol.

Les étapes de mise en œuvre de cette technique sont décrites ci-après :

① Étape 1. L'étrépage

L'étrépage consiste en l'extraction sur le site avant travaux ou sur le site source situé à proximité de **mottes de sol recouvertes de végétation**.

Le prélèvement se fait sous la forme de plaques sur une profondeur minimale de 10 cm pour permettre leur transport sans dégradation. Dans le cas où le sol est suffisamment profond, **il est préconisé de prélever sur une profondeur de 20 à 30 cm** (Dupin et al., 2019).

L'enjeu de cette technique réside dans le **choix d'un pelliste performant** pour réaliser ces manipulations. La qualité de l'opération et sa réussite sont en effet largement dépendantes de l'expérience de l'opérateur puisque **la détérioration des mottes aura un impact élevé sur la reprise du couvert végétal**.

② Étape 2. Le stockage

Il convient de **privilégier le replaquage des mottes instantanément après le prélèvement**.

Toutefois, si la phase de stockage ne peut être évitée, il faut veiller à **limiter au maximum sa durée**. **Le stockage des plaques doit être réalisé en andain d'un mètre de haut maximum par 1m de large**. Ce stockage superposé permet de conserver l'état d'humidité des plaques et ainsi de préserver les systèmes racinaires. Il permet également d'éviter un stockage des plaques sur des végétations alentour au risque de les dégrader.

En **période sèche**, sans précipitation, **la durée de stockage ne doit pas excéder trois semaines**. Avec un arrosage régulier, les plaques peuvent être conservées jusqu'à quatre mois (Aradottir, 2012; Dupin et al., 2019).

Si les travaux d'aménagement se déroulent au cours de la période estivale, il faudra **reporter le replaquage à l'automne** et assurer un stockage à l'abri du soleil et dans de bonnes conditions (Dupin et al., 2019).

③ Étape 3. Le replaquage

Au préalable de la réalisation du replaquage, il est nécessaire de vérifier **l'état du fond de forme correspondant aux horizons profonds restés en place et possiblement altérés par compaction lors des travaux**.

Le cas échéant, il est recommandé de réaliser **un griffage perpendiculaire** afin de décompacter les horizons de sous-face et de favoriser le lien entre l'horizon en place et la plaque étrépee.

De plus, **des précautions sont à prendre vis-à-vis de la sécheresse** et notamment pour les versants exposés au vent ou à l'adret. Lors du replaquage, **les plaques auront besoin d'eau pour la reprise de la végétation et pour limiter le stress hydrique**. La période des travaux de replaquage à privilégier est le printemps.

Si la totalité de la zone ne peut pas être recouverte ou si les plaques proviennent d'un milieu source, **un replaquage en mosaïque peut être réalisé** (Figure 36) pour permettre une meilleure recolonisation du site (Mazoyer, 2022). Du substrat terreux issu du site ou à proximité (mêmes caractéristiques physico-chimiques) peut également être réparti entre les plaques de façon à faciliter la recolonisation de la végétation entre celles-ci.

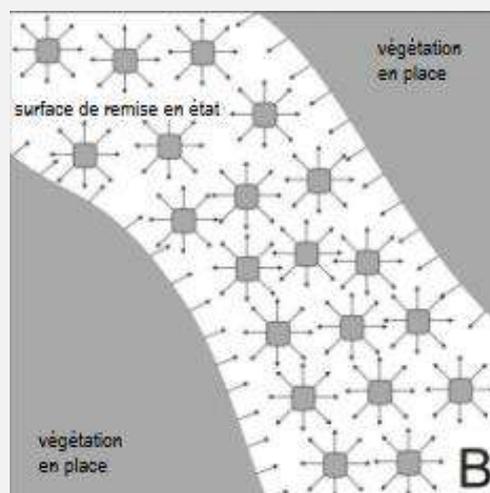


Figure 36 : remise en place des plaques en mosaïque (OFED & Bellini, 2015).

La technique de l'étrépage-décapage est comparée aux autres techniques de végétalisation dans le Tableau 11 (FICHE 11).



Cas particulier : Transplants des ligneux bas

Dans certains cas, il peut être bénéfique de réintroduire des ligneux bas sur une piste de ski (nécessité réglementaire dans le cadre d'étude d'impact écologique ou site soumis à des épisodes de sécheresses importants).

Cette option peut être envisagée lorsque le site n'a aucun intérêt pastoral et que cela contribuerait à améliorer l'intégration paysagère de la piste.

Cependant, les landes typiques de myrtilles et d'airelles (ligneux bas) se développent généralement sur des substrats acides. Il est donc nécessaire de vérifier la compatibilité avec le pH, qui aura augmenté suite au remaniement du substrat (FICHE 4).

De plus, sur des sols caillouteux, le prélèvement de ligneux peut s'avérer difficile, car une partie des racines risque d'être fortement endommagée.

Dans les entretiens menés lors de l'étude DSF, un seul cas de figure a été souligné comme bénéfique par un alpagiste. **La lande peu dense lui a permis d'allonger la période de pâturage.** Sur un versant très sec, la lande a permis le maintien d'une humidité favorable au développement d'une biomasse végétale fraîche intéressante pour le bétail notamment en cœur et fin d'été.

Cependant, c'est plus communément **le changement d'habitat de landes à prairies qui convient le mieux aux alpagistes.** Sur les sites laitiers présentant de fortes densités de landes, les pistes de ski retravaillées offrent une ressource herbagère, certes artificielle, mais qui permet d'alimenter efficacement les animaux en lactation (ex. ubac de Valmeinier, sommet de Vallandry).

C. Amélioration du substrat, optimisation de la germination et développement des plantules

Comme mentionné dans les FICHE 4 et FICHE 6, le remaniement du sol et les processus de décapage, de stockage et de remise en place du substrat entraînent généralement une **diminution significative de la matière organique**, réduisant ainsi les teneurs en azote total et en carbone organique dans les sols.

La destruction de ce complexe argilo-humique expose les particules d'argile à un risque accru d'érosion. Cette modification altère les fonctions de **stockage de l'eau et des nutriments ainsi que les fonctions du sol en tant que support pour l'activité biologique, le développement et la croissance de la végétation.**



Résultats des entretiens

Les alpagistes consultés lors des entretiens ont pu observer ce phénomène de perte de matière organique ainsi que les conséquences que cela implique sur la production de biomasse végétale sur les sites réhabilités. **Il est constaté une diminution significative de la biomasse quelques années après la réhabilitation, surtout lorsqu'aucun apport de matière organique n'est réalisé ni par la station ni par les alpagistes.**

Ils estiment alors nécessaire d'apporter un mélange de matière organique lors de la remise en place du substrat.

*"Nous pensons que mélanger la terre végétale avec du fumier serait la meilleure solution pour ne pas perdre de volume de matière organique. Cela permet donc de gonfler le volume restitué et de nourrir le végétal."
Les alpagistes de Valcenis.*

Dans ce contexte, la phase d'amélioration du substrat constitue une nouvelle étape clé dans le succès de la réhabilitation. **Cette étape doit remplir plusieurs objectifs :**

- Tout d'abord, il faut veiller à **limiter la perte de la matrice fine liée à la matière organique** dès le décapage des horizons de surface.
- Ensuite, il est nécessaire de réaliser des apports de matières fertilisantes⁷ pour **favoriser un retour rapide de la végétation** en lui donnant un véritable « coup de boost », réduisant ainsi les risques d'érosion du substrat. La présence d'éléments structurants grossiers dans le mélange permettra de réduire mécaniquement les risques d'érosion.
- Enfin, il est important de **créer un mélange favorisant le recyclage de la matière organique pour recréer le complexe argilo-humique**, garant du maintien de la végétation sur le long terme.

Cette approche globale vise à **assurer la durabilité du milieu tout en minimisant les interventions futures.**

Par conséquent, il est nécessaire de **définir quels apports seront réalisés et à quel(s) moment(s)**, tout en respectant la réglementation en vigueur (compost et boues d'épuration, zones de captage, AOP Beaufort...), et de veiller à la **cohérence de ces apports vis-à-vis de l'état initial du site**. L'**usage futur du site** doit également être pris en compte, notamment dans le cas du pastoralisme qui nécessite le rétablissement (rapide) de milieux productifs pour assurer une gestion durable de la ressource fourragère.

⁷ Selon l'Anses, les matières fertilisantes sont définies comme des produits destinées à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux, ainsi que les propriétés du sol.

La question de l'apport de matières fertilisantes étant cruciale pour la réussite du projet, il est recommandé de faire appel à un professionnel compétent pour la régénération des sols et la création de terres fertiles. Ce dernier aura pour objectif de :

- > Déterminer les ressources organiques disponibles sur le territoire pour l'amendement du sol.
- > Vérifier la compatibilité de l'épandage avec les caractéristiques spécifiques du site en élaborant un plan d'épandage approprié.
- > Formuler un mélange d'amendements cohérent, prenant en compte la réglementation en vigueur, les ressources disponibles localement, et en garantissant la cohérence avec l'état initial du site.

Afin de créer ce mélange, trois catégories de matières fertilisantes peuvent être utilisées.

On distingue :

- > **Les amendements**, destinés à modifier ou à améliorer les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols.
- > **Les engrais**, qui fournissent des éléments directement utiles à la nutrition des plantes tels que l'azote, le phosphore et le potassium.
- > **Les biostimulants** dont la fonction est de stimuler les processus naturels des plantes ou du sol. Ils agissent en facilitant l'absorption des éléments nutritifs, en améliorant la résistance aux stress abiotiques (stress hydrique, etc.) ou en améliorant les caractéristiques des végétaux (prolongement des racines).

Les 3 fiches suivantes se focaliseront sur chacune des matières fertilisantes décrites précédemment.

FICHE 13 – LES AMENDEMENTS ORGANIQUES ET MINÉRAUX



À retenir

Pour réaliser des apports de matières fertilisantes lors des travaux de réhabilitation, il est important de suivre plusieurs étapes :

- > Établir un calendrier d'épandage.
- > Estimer les quantités de matières fertilisantes nécessaires.
- > Déterminer le mélange adapté en fonction des besoins spécifiques, notamment : limiter la perte de la matrice fine, fournir les ressources nécessaires pour favoriser un retour rapide de la végétation, et favoriser la minéralisation de la matière organique (voir également FICHE 14 et la FICHE 15).
- > Identifier les gisements des amendements organiques disponibles sur le territoire.
- > Examiner les contraintes réglementaires associées au site.

Toutes ces étapes peuvent être réalisées dans le cadre du plan d'épandage.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Les amendements sont destinés à améliorer les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols par l'apport de minéraux ou des matières organiques.

En montagne, l'apport **d'amendement organique** inclut généralement le compost de boues de station d'épuration, le compost agricole, le fumier et le lisier ainsi que le bois raméal fragmenté (BRF).

Pour **l'amendement minéral**, les composés les plus communément épandus sont l'oxyde de calcium (CaO) ou le carbonate de Calcium (CaCO₃). Ces derniers servent à la réalisation d'un chaulage visant à corriger l'acidité du sol par un apport calcique ou calco-magnésien.



Figure 37 : Épandeur à fumier ou compost (Agriculture)

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Les différents types d'amendements organiques et minéraux pouvant être utilisés au sein des domaines skiables sont présentés ci-dessous :

> **Le compost de boue d'épuration**

Le compost est **composé de boue de station d'épuration** dont la teneur en eau a été réduite par différents procédés (centrifugation, séchage thermique...). La boue est ensuite mélangée avec **un co-produit structurant** (Figure 38).

À savoir

Dans les vallées de montagne, ce sont souvent **les déchets verts qui sont broyés et réutilisés comme co-produits dans le compost de boue de station d'épuration**. Les morceaux de bois maintiennent la porosité nécessaire pour l'aération du tas de compost lors de la fermentation. Un criblage du compost est réalisé avant la phase de maturation. Les morceaux les plus importants sont retirés, mais **une partie des débris de bois est maintenue pour permettre une meilleure cohésion du compost** une fois épandu.

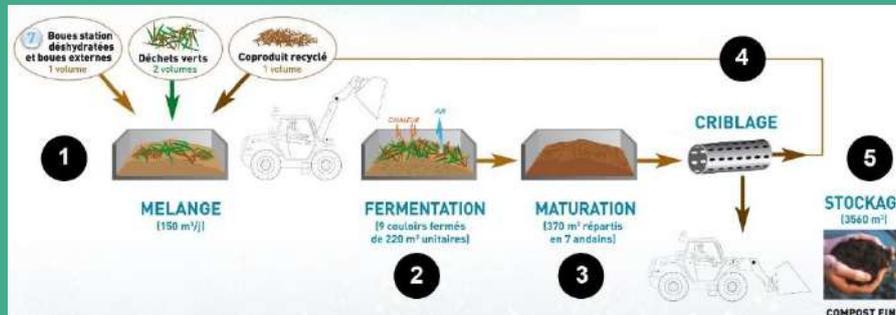


Figure 38 : Unité de compostage des boues de station d'épuration des eaux usées (STEP) et des déchets verts (Isoagallo.fr)

À noter que l'épandage de **boue liquide** est possible, mais les contraintes topographiques et réglementaires rendent son utilisation anecdotique sur les versants de montagne. **Le compostage permet de réduire les nuisances olfactives et facilite la manipulation**, car la matière est plus sèche et homogène. Ce sont généralement les domaines skiables qui gèrent l'épandage des composts de boues.

Les caractéristiques physico-chimiques du compost de boues d'épuration peuvent varier en fonction du processus de compostage utilisé et de la composition initiale des boues ainsi que des co-produits utilisés. Cependant, en général, **le compost de boues présente un rapport carbone/azote (C/N) équilibré (d'environ 10)**, ce qui favorise sa décomposition et sa transformation en humus dans le sol. Le **pH du compost de boues d'épuration est généralement neutre à légèrement alcalin**, ce qui le rend adapté à une large gamme de cultures. En revanche, la **teneur en phosphore est souvent élevée**, ce qui peut créer une différence significative avec les milieux environnants. De plus, la **présence de déchets non désirés dans le compost**, signalée par de nombreux acteurs locaux, peut rendre le compost inutilisable ou nécessiter un tri supplémentaire pour garantir sa qualité.

“Le compost de boue dure bien dans le temps en termes d'apport de nutriments à la végétation, en revanche attention aux plastiques potentiellement contenus dans le compost, le process de production doit être irréprochable.” Entretien avec la SEM Valmeinier.

> Les apports agricoles

On distingue plusieurs types d'apports agricoles :

- **Le fumier** : mélange solide et organique de matières fécales animales, de paille, de litière ou d'autres matériaux comme les résidus alimentaires.
- **Le compost de fumier**.
- **Le lisier** : mélange liquide organique de matières fécales et d'urine d'animaux d'élevage. Le lisier peut être comparé à l'ajout d'engrais minéraux en raison de leur concentration en éléments nutritifs. Lorsque le lisier est épandu, il fournit une source riche en azote, phosphore, potassium et autres nutriments essentiels pour la croissance des plantes. Cela peut entraîner un effet de boost de la végétation, stimulant la croissance et augmentant la production de biomasse, de manière temporaire.

Les différents fumiers et composts jouent un rôle dans l'amélioration de la structure du sol et dans sa **capacité de rétention en eau**. Ils enrichissent également le sol en **éléments nutritifs essentiels et favorisent l'activité biologique**. Cependant, il est important de noter que tous les types de fumiers et de composts ne confèrent pas les mêmes propriétés au sol. Chacun apporte des nutriments spécifiques et peut avoir des effets différents sur la structure et la fertilité. Par conséquent, **le choix du type de fumier ou de compost doit être fait en fonction des besoins spécifiques du sol et des ressources disponibles**.

Les zones d'épandage des apports agricoles sont généralement laissées à l'appréciation de l'alpagiste, qui, après observation, évalue la nécessité de fertiliser ou non. Il est par ailleurs conseillé de réaliser ces apports en partenariat avec les domaines skiabiles lors de travaux de réhabilitation ou lors des traitements correctifs de suivi.

“Le fumier est plus complexe à mettre en œuvre que le lisier, pourtant ça apporte du structurant au sol.” Agriculteur à Valcenis.

Tableau 12 : Caractéristique physico-chimique moyen des fumiers et composts équin et bovins d'après environ 75 analyses (IFCE, 2019. Les valeurs moyennes indiquées ci-dessus peuvent significativement varier entre les fumiers et composts de différentes exploitations en raison des pratiques de gestion des litières et des conditions de stockage, notamment la durée et les installations utilisées.

Type de produits	Fumier équin à base de paille	Fumier compact de bovins	Composts équins à base de fumier de paille	Compost de fumier de bovins
pH	8	7	7.9	8.9
C/N	24.5	18.5	13.3	12.2
Matière sèche (%)	36.9	19.6	40.4	26.2
Matière organique (g/kg)	259	168	170	160
Azote total (g/kg)	5.8	4.7	6.8	6.7
Phosphore Olsen (g/kg)	3.2	2.3	4.3	3.6

> **Le bois raméal fragmenté (BRF)**

Le BRF est une technique agricole et sylvicole qui consiste à broyer des branches d'arbres et d'arbustes en **petits fragments de bois d'environ 5 à 10 cm de longueur**.

Ces fragments sont ensuite utilisés comme matériau organique pour améliorer la fertilité des sols, permettre la protection du substrat contre l'érosion et favoriser le maintien de l'humidité du sol. **Les caractéristiques physico-chimiques du bois raméal dépendent des essences d'arbres broyés.**

Il convient de signaler que le **rapport C/N généralement élevé** signifie une teneur en carbone élevée pouvant temporairement générer une immobilisation de l'azote lors de la décomposition du BRF par les organismes du sol (et donc réduction de la fertilité disponible pour la végétation, c'est le phénomène de « faim d'azote »). De plus, **le pH du BRF peut varier en fonction du type de bois**, mais il est souvent légèrement acide à neutre. La décomposition du BRF peut donc entraîner une légère acidification du sol.

> **Le chaulage**

Cette pratique agricole vise à ajuster le pH des sols (par une augmentation) pour favoriser leur fertilité et améliorer les conditions de croissance des plantes. Le chaulage peut être mis en place par les alpagistes sur les domaines skiabiles, mais dans le cadre des travaux de réhabilitation écologique, **il semble que cette technique n'ait pas un grand intérêt**. En effet, dans l'étude DSF (2024) il est démontré que le remaniement des sols lors des travaux d'aménagements induit souvent une basification des sols et donc une augmentation du pH.

Les étapes de l'amendement organique, lors des travaux de réhabilitation des sols dégradés, sont les suivantes :

① Étape 1. Évaluation du besoin

La création ou le remodelage d'une piste de ski implique des travaux qui perturbent les sols et entraînent une diminution de la matière organique. Cette diminution peut entraîner des conséquences néfastes sur la santé globale des sols et sur sa capacité à soutenir la végétation à long terme. Des mesures existent pour compenser cette perte de matière organique.

La perte de matière organique engendrée nécessite d'être compensée par la définition d'un mélange à incorporer dans les 10-20 premiers centimètres de sol. Attention, le but de cet apport est de compenser les pertes, la quantité apportée doit donc être raisonnée en fonction du site initial ou du site témoin.

Ce mélange doit répondre à plusieurs objectifs :

1. **Limiter la perte de la matrice fine** après la remise en place du substrat pour maintenir les propriétés et les services rendus par le sol, tels que la **fertilité et la rétention en eau du sol**. Sur les versants exposés à des sécheresses importantes ou lorsque le sol est moyennement à très argileux, il est nécessaire de restaurer la matrice fine via des apports organiques afin de **garantir le succès écologique de la réhabilitation**.
2. **Assurer un développement rapide de la végétation**, notamment sur les sols exposés à des forces érosives importantes et avec une forte pente.

Pour les sites où le pastoralisme est prépondérant, cela permettra non seulement **d'installer plus rapidement un couvert végétal et une biomasse plus abondante, favorable d'un point de vue paysager**, mais également de disposer davantage de ressources mobilisables pour les alpagistes dès les premières années.

3. **Favoriser la création du complexe argilo-humique**, facilitant ainsi la formation d'humus et assurant des ressources essentielles à la végétation à long terme, **limitant ainsi la diminution de la productivité végétale au bout de quelques années**. Cela permettra de réduire la nécessité d'interventions les années suivant la réhabilitation et de maintenir une ressource intéressante pour les alpagistes.

D'autres avantages indirects peuvent découler de la création de ce mélange. En effet, lorsque les apports contiennent des fragments, comme dans le compost ou le BRF, cela **contribue à la conservation de l'humidité dans le sol, limitant aussi l'érosion et renforçant ainsi la stabilité du sol**. Enfin, la matière organique **stimule l'activité biologique du sol**, ce qui est bénéfique pour sa santé globale.

② Étape 2. Établissement du plan d'épandage

Le plan d'épandage permet d'encadrer les pratiques d'épandage d'effluents sur les parcelles destinées à recevoir des matières fertilisantes organiques et minérales. Il n'est pas obligatoire dans tous les cas de figure, mais est **vivement recommandé lors des travaux de réhabilitation**. Dans le cas de compost non normé (NFU 44-095), il est par ailleurs **obligatoire** de réaliser un plan d'épandage ainsi qu'un bilan agronomique.

Établi à l'échelle du site à réhabiliter, le plan d'épandage peut contenir plusieurs éléments essentiels :

- > **Localisation des zones d'épandage** : Une carte permet de repérer précisément les surfaces où l'épandage des matières fertilisantes est possible, en tenant compte des exclusions réglementaires telles que les zones habitées, les cours d'eau, les points d'eau et les zones hydromorphes. Plusieurs contraintes réglementaires peuvent venir contraindre, voire interdire l'épandage de certaines matières fertilisantes. Une étude réglementaire approfondie spécifique au site d'étude doit être réalisée, mais un aperçu des contraintes potentielles est donné ci-dessous :
 - **Zones de captage des eaux** : il est primordial d'éviter tout épandage à proximité des zones de captage des eaux destinées à la consommation humaine pour éviter toute contamination (se

À savoir

Si la littérature a d'abord montré qu'il était préférable de ne pas amender un milieu restauré si l'on souhaite qu'il redevienne similaire au milieu naturel, l'étude DSF (2024) a cependant montré **des teneurs en matières organiques largement plus faibles sur les sites réhabilités que sur les sites témoins**.

Malgré la capacité des semences locales d'altitude à se développer dans des environnements particuliers, tels que des sols peu profonds et pauvres (Dupré La Tour et al., 2018), les apports organiques permettent de **pallier la perte de matière organique tout en adaptant les quantités et les matières fertilisantes** utilisées en fonction de l'usage du site, des teneurs initiales et post-travaux en matière organique et en argile, mais aussi du type de semences.

référer aux prescriptions de l'Arrêté préfectoral (périmètres de protection rapproché) et au règlement sanitaire départemental).

- **Protection de la biodiversité** : Des réglementations spécifiques peuvent être en place pour limiter les activités d'épandage et ainsi protéger certaines espèces végétales ou animales présentes sur le site. Il est possible que certaines contraintes figurent dans l'étude d'impact.
 - **Zones de pâturage Beaufort et autres zones pastorales** : Certains pâturages, notamment ceux destinés à la production du fromage Beaufort, peuvent être soumis à des réglementations spécifiques pour assurer la qualité des produits.
- > **Réglementation générale sur l'épandage** : Outre les considérations spécifiques à la montagne, les épandages doivent respecter les réglementations nationales ou locales concernant les distances minimales par rapport aux habitations, les périodes autorisées d'épandage, les doses d'application, etc.
 - > **Information sur les prêteurs de terres** : L'identité et l'adresse des propriétaires de terres ayant conclu un contrat écrit avec l'exploitant, ainsi qu'une description des systèmes de cultures envisagées sur ces parcelles.
 - > **Référencement des surfaces** : Un tableau répertoriant les surfaces identifiées sur la carte, avec des détails sur la superficie totale, la superficie épandable, la superficie exclue et les raisons d'exclusion. Dans les zones vulnérables, il est important d'identifier les surfaces de prairies pâturées exclues réglementairement de l'épandage.
 - > **Caractérisation des effluents** : Une description précise des matières fertilisantes utilisées, incluant leur nature, leurs caractéristiques physico-chimiques, ainsi que les quantités épandues (Étape 3).
 - > **Doses maximales admissibles** : Des informations sur les doses maximales admissibles par type de matières fertilisantes et par type de sol, afin de garantir une utilisation responsable des fertilisants (Étape 4).
 - > **Calendrier d'épandage et méthode d'épandage** : Un calendrier prévisionnel d'épandage, indiquant les périodes durant lesquelles l'épandage est interdit ou inapproprié en fonction des saisons et des conditions météorologiques. (cf. Étape 5) ainsi que les techniques spécifiques employées.

À savoir

Les discussions sur l'évolution de la réglementation concernant l'épandage de boues et de ses dérivés sont en cours, notamment vis-à-vis du **durcissement des normes**, ce qui rendrait leur utilisation plus difficile pour les domaines skiables.

En effet, une exigence plus stricte serait mise en place concernant la **quantité de produit** pouvant être épandue en une seule fois.

Selon certains experts, cela rendrait l'utilisation du compost en montagne obsolète. En effet, un épandage en petites quantités sur plusieurs années représenterait une difficulté supplémentaire et un surcoût notamment pour le transport contrairement à un épandage massif sur une année.

En résumé, le plan d'épandage des matières fertilisantes est un outil essentiel pour assurer **une gestion durable et réglementée** garantissant une efficacité tout en **minimisant les risques environnementaux et sanitaires**. Dans les cas où l'épandage de matières fertilisantes est réglementé ou interdit, il est possible d'envisager d'autres méthodes d'amélioration du substrat, telles que la bioactivation (FICHE 15).

③ Étape 3. Choix de l'amendement organique

> Localisation des ressources disponibles

Globalement, le choix de l'amendement organique dépend **principalement des ressources à disposition** dans le secteur des travaux et des contraintes réglementaires définies précédemment. Ces **ressources doivent donc être identifiées pour chaque domaine skiable**.

Selon les partenariats établis entre les différentes parties prenantes, il est possible de disposer de fumier ou de lisier issus d'activités agricoles adjacentes. Dans d'autres cas, la fabrication locale de compost de boues ou la disponibilité de BRF constituent de bonnes alternatives pour assurer un amendement.



Résultat des entretiens

Alors que certains bassins locaux laitiers (Bourg-St-Maurice, Valcenis, Beaufort, ...) sont sûrement excédentaires en termes d'effluents d'élevages et sont donc prompts à mettre à disposition cette matière organique pour les domaines skiables (hautes vallées avec de longs hivernages et de vastes surfaces d'alpage), d'autres secteurs et communes (Aussois par exemple) n'ont pas assez d'effluents pour assurer l'amendement de leurs terres agricoles.

Le domaine skiable doit donc se **mettre en relation** avec les exploitants de son secteur afin de sonder le potentiel. **En termes de structuration de filière d'approvisionnement, une bourse aux effluents d'élevage pourrait être réfléchie avec les Groupements de Développement Agricole locaux.**

Plusieurs ententes ont déjà été organisées entre les domaines skiables, les agriculteurs et parfois les collectivités locales :

- > Les communes de Hauteluze et Villard aident les agriculteurs pour que la matière organique reste dans la vallée et ne reparte pas avec les camions de foin vides. **Les éleveurs déposent la matière organique sur une plateforme gérée par la CUMA. La CUMA fait le compostage à Beaufort pour tout le Beaufortain.** La commune aide financièrement le retour (transport) du compost sur la commune d'origine. Dans les faits, les agriculteurs demandent peu cette aide sur Hauteluze.
- > La SPL des Saisies a des parts dans le matériel de la CUMA (tracteur/épandeur). **Elle achète le compost de fumier à la CUMA à Beaufort (8t/an)** selon un élu de la commune d'Hauteluze.
- > Aux Arcs, **le GAEC des Eulets met du fumier à disposition du domaine skiable.** *“Nous avons de belles surfaces fauchables sur les Arcs. Certes ce n'est plus naturel, c'est diffus et moins divers, mais assez productif.”* Cette pratique est aussi mise en œuvre sur Vallandry.

> **Choix du produit**

Il est important de souligner que **le lisier, le fumier, le compost de boues de station d'épuration ou encore le BRF n'exerceront pas la même influence sur le sol et son fonctionnement.**

Le lisier est généralement plus riche en azote que le fumier, ce qui en fait un choix judicieux si le sol est particulièrement pauvre et que l'enjeu pastoral est important. Cependant, son effet est peu pérenne dans le temps et il peut être difficile à manipuler en raison de sa forte teneur en eau. Le fumier est plus facilement manipulable, **il aide à la structuration du sol en plus d'apporter les nutriments nécessaires à la croissance de la végétation.**

Le compost de boues de stations d'épuration est généralement riche en matière organique et en nutriments, tels que l'azote, le phosphore et le potassium. L'incorporation **de co-structurants comme les copeaux de bois dans le compost de boues permet d'étaler la dégradation du compost sur une plus grande période que pour celle du fumier**⁸. Le compost peut cependant contenir **des contaminants, tels que des plastiques, des métaux lourds et des substances chimiques**, qui peuvent être préjudiciables à la santé des plantes ainsi qu'à l'ensemble de la chaîne trophique et à la qualité des sols s'il est appliqué en excès.

Malgré son potentiel, le Bois Raméal Fragmenté (BRF) n'a été que peu utilisé dans le cadre de la réhabilitation des terrains d'alpages. Ce matériau offre pourtant une piste intéressante pour **apporter du carbone organique au sol**. De plus, grâce à sa structure grossière, le BRF présente un réel intérêt pour **limiter l'érosion de surface**.

Le tableau ci-dessous synthétise les informations par type de produit.

⁸ Le pH devra être surveillé puisque certaines espèces, tel que l'épicéa, peuvent induire une acidification des sols.

Tableau 13 : Intérêt des différents produits organiques.

Intérêt	Nature du produit
L'action boost de la végétation	Le lisier, le fumier frais, ou encore les engrais minéraux lors de l'ensemencement à l'hydroseeder permettent d'augmenter la teneur en nutriments facilement mobilisables par les plantes.
Réactivation du recyclage de la matière organique	Les composts peuvent être utilisés pour réactiver le recyclage de la matière organique par les organismes du sol, pour améliorer la structuration du sol, en intégrant des matériaux structurants comme des copeaux de bois ou de la paille selon les disponibilités.
Limiter l'érosion de la matrice fine	Le mélange des premiers centimètres du substrat avec du fumier frais permet de créer une cohésion entre les particules et de limiter l'érosion de la matrice fine. Les mycorhizes exercent aussi une influence sur la structure du sol et le protègent de l'érosion.
Protection mécanique du substrat	L'apport de paille ou de BRF permet de lutter contre l'érosion en surface.

L'idée d'un mélange composé de fumier, d'engrais minéraux et de BRF en surface est **prometteuse**. Cette combinaison permettrait de fournir aux sols une diversité de nutriments et de matière organique, favorisant ainsi la croissance végétale à court et long terme.



Résultats des entretiens

Selon les alpagistes, le lisier est optimal pour booster la végétation tandis que le fumier structure le sol et permet l'intégration de nutriments sur le long terme.

“L'utilisation du lisier est optimale au printemps quand l'herbe a démarré pour booster la production de biomasse, il accélère la précocité. Nous l'utilisons à l'alpage des Rossets et avons fait régresser les nardaies et les landes. Nous avons gagné 15 à 20 jours d'herbe avec 160 vaches laitières”. GAEC Alpin, Peisey-Nancroix

“La clé de la restauration, c'est d'apporter du fumier en quantité. Sur les bas productifs on arrive à retrouver de beaux milieux, à l'alpin c'est plus discutable” Alpagiste à Vallandry

“Mais attention, en dehors des milieux restaurés, l'apport excessif de fumier fait baisser la biodiversité et donc aussi l'intérêt pastoral” GAEC Alpin, Peisey-Nancroix

Il est possible de réaliser un mélange de différents produits.

Le choix du mélange à utiliser dépend **des caractéristiques spécifiques à chaque site**. Par conséquent, il est nécessaire d'adapter le mélange en **fonction des propriétés particulières du sol, du climat, de l'altitude et d'autres facteurs environnementaux propres à chaque domaine skiable et à chaque site**.

Il convient de noter que le phosphore apporté en grande quantité (au travers des différents amendements) peut représenter une anomalie limitant le retour de certaines espèces végétales. **Par ailleurs, un apport excessif de phosphore peut inhiber les mycorhizes** et ainsi limiter l'accès des plantes à certains minéraux.

④ Étape 4. Quantité de matière organique

La quantité de matière organique apportée doit être adaptée aux objectifs de la réhabilitation.

Il est ainsi nécessaire :

- > **D'évaluer la fertilité initiale du sol ainsi que ses propriétés biologiques et physico-chimiques.**
- > **D'estimer la part de matière organique érodée ou lessivée afin d'ajuster au mieux la quantité apportée (réalisation d'un bilan humide).**
- > **D'estimer la quantité permise par la réglementation (Étape 2)**

À noter que la quantité de matière organique agricole disponible dépend du nombre d'exploitants présents sur le bassin agricole du domaine skiable, de la taille de leur exploitation et surtout de la quantité restante après avoir amendé les

parcelles à basse altitude. Pour chaque exploitant, la quantité de matière organique produite dépend de la taille de son troupeau et du temps passé par le troupeau en stabulation pendant la période hivernale.

⑤ Étape 5. Mise en place des amendements

La mise en place des amendements nécessite l'usage d'une **tonne à lisier** pour le lisier et d'un **épandeur** pour le fumier, le compost ou le BRF.

Les amendements organiques **sont incorporés en surface ou dans les 10 à 20 premiers centimètres** du sol et ne doivent en aucun cas être incorporés plus en profondeur. En effet, la plus faible porosité des sols en profondeur (ou dans les horizons tassés) génère des conditions d'anoxie (manque total d'oxygène) réduisant l'activité microbienne responsable de la bonne dégradation de la matière organique. L'enfouissement de matière organique est de manière générale défavorable au fonctionnement du sol et des racines.

Il est recommandé, en zone de montagne **d'épandre les intrants organiques suffisamment tôt (juin-juillet) notamment lorsque la végétation est en place** (Hassid et al., 2006). Cependant, il est rarement possible de réaliser cette étape au cours de l'été (travaux d'aménagement en cours, pâturage, présence de touristes). Dans ce cas, **l'épandage peut être réalisé à l'automne**. À noter qu'une partie non négligeable du lisier est généralement épandue au printemps, car les fosses à lisier sont remplies à la sortie de l'hiver.

Les alpagistes **orientent, quelques fois, l'emplacement de la machine à traire mobile ou des parcs de nuit des petits ruminants** comme outil d'apport de matière organique, mais cette solution est moins performante que l'apport de fumier qui représente la meilleure technique pour la réhabilitation des terrains selon les alpagistes de Courchevel.

L'apport de matières organiques sur les versants des domaines skiables peut s'avérer techniquement difficile. Lorsque les pentes sont importantes ou que des cunettes profondes ont été réalisées, l'accessibilité du site avec des engins d'épandages (tonne à lisier ou épandeur) peut être rendue impossible (retours des alpagistes d'Aussois, Valcenis et les Arcs). **En contexte de pentes supérieures à 35° et sans couvert végétal** (dans les talus, les composts sont préconisés pour des pentes inférieures à 27° (Hassid et al., 2006)), **les composts et fumiers ont par ailleurs tendance à glisser par gravité**. Il est dans ce cas-là préférable d'attendre que le couvert végétal soit en place pour épandre le compost et favoriser l'assimilation des nutriments par les plantes.

FICHE 14 – LES ENGRAIS MINÉRAUX



À retenir

Les engrais minéraux sont souvent utilisés lors de la réhabilitation des sols pour **stimuler rapidement le développement végétal** et ainsi **contrer efficacement les processus d'érosion du substrat**.

Leur utilisation est simplifiée lorsque l'ensemencement est effectué à l'aide d'un hydroseeder, car **il est possible de les intégrer directement dans la cuve avec les semences**. Le mélange utilisé permet alors de fixer les semences et les engrais, facilitant ainsi leur dispersion et leur absorption par les plantes.

Cependant, ces engrais minéraux **apportent des nutriments aux plantes, mais ne contribuent pas à améliorer la structure ni la fertilité du sol sur le moyen et long terme**.

Il est donc crucial de se référer à la FICHE 13 et de **concevoir un mélange d'amendements et de fertilisants qui répondent à l'ensemble des besoins du sol réhabilité**, en prenant en compte notamment l'amélioration de l'ensemble de ses propriétés physico-chimiques.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Les engrais minéraux sont des substances directement produites par l'industrie chimique ou extraites de gisements naturels. **Leur objectif est d'apporter aux plantes des nutriments directement assimilables.**

On distingue les engrais minéraux **simples** qui apportent un seul élément nutritif (engrais azotés, phosphatés ou potassique) des engrais **composés** de type NPK par exemple.

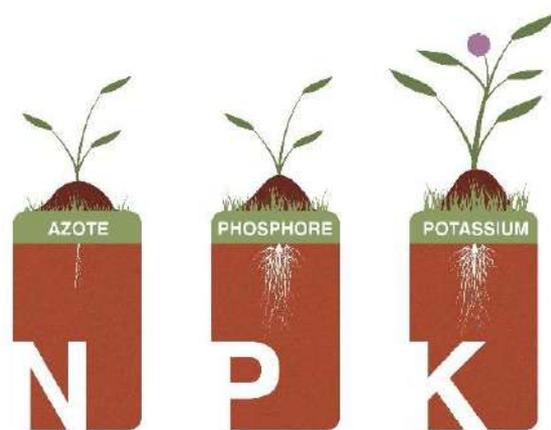


Figure 39 : Les principales influences des différents minéraux N, P et K sur la croissance des plantes (Soltis environnement)

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

L'intérêt de la fertilisation minérale pour réhabiliter les milieux de montagne apparaît relativement controversé dans la littérature scientifique et technique.

> Les +

Certaines études soulignent **l'effet positif des engrais minéraux sur la diversité spécifique** et le recouvrement du couvert végétal en milieux de montagne.

Barberis *et al.* (2023) montre, par exemple, qu'en apportant de l'engrais minéral azoté pendant 5 ans sur des pistes de ski à haute altitude au sein des Alpes Italiennes (2800-2900m), **la diversité spécifique des parcelles augmentait plus rapidement que sur des parcelles témoins avec une accentuation de cette différence au fil des années**. La majorité des espèces ont par la suite colonisé spontanément le milieu et ne sont pas issues de l'ensemencement.

Des résultats contradictoires ont été obtenus par Scotton *et al.* (2021) qui note une faible diminution de la richesse spécifique sur les parcelles ensemencées avec du NPK. Cependant, l'apport annuel d'engrais composé de NPK aurait par ailleurs permis **d'augmenter le recouvrement du couvert végétal d'environ 20% sur les quatre premières années**, cet effet disparaissant à l'arrêt de la fertilisation.

> Les -

En revanche, Gough et al. (2000) et Rajaniemi (2002) ont notamment **constaté une diminution de la richesse en espèces après fertilisation minérale**. Dans un contexte où le couvert végétal est particulièrement développé, la concurrence pour les ressources y est d'autant plus forte et peut conduire au développement des espèces les plus compétitrices uniquement.

Un **apport excessif** d'engrais minéral (notamment azoté) **induirait par ailleurs l'inhibition du développement des plantules** (Magnin, 2003) ainsi qu'une réduction de la teneur en matière organique dans les sols.

L'étude des masses d'eau à proximité de la station de ski de Ruka, en Finlande, a par ailleurs, montré que la **fertilisation annuelle** des pistes avec un engrais composé de type NPK induisait de grandes variations temporelles de **concentration en nutriments dans les eaux**.

Ce lessivage est intensifié lorsque de la **neige de culture** est appliquée sur les pistes puisque le volume d'eau ruisselé est augmenté (Kangas et al., 2009).

① Quand utiliser des engrais minéraux ?

Comme indiqué précédemment, l'utilisation des engrais minéraux est sujette à débat. Il semble néanmoins qu'ils puissent **jouer un rôle utile dans le développement des plantules notamment pour augmenter le recouvrement végétal et limiter l'érosion par stabilisation du substrat**.

Cependant, **sur un milieu stable, leur utilisation pourrait perturber l'équilibre naturel**. Par ailleurs, à l'arrêt de la fertilisation (effet de boost) une **diminution de la biomasse végétale est généralement observée**. Il apparaît ainsi plus judicieux d'assurer un **mélange d'amendements organiques pour pérenniser la fertilité du milieu** (FICHE 13).

Enfin, la fertilisation minérale peut engendrer **des impacts non négligeables sur la ressource en eau et des modifications de la qualité des sols et des communautés végétales en place**. Son usage doit être réfléchi et si possible cantonné à des secteurs très contraints (par exemple en cas de forte pente).

“Avant la station utilisait beaucoup d'engrais minéraux tels que l'ammo-nitrate, mais ils ont voulu arrêter et privilégier des apports qui étaient moins « coup de fouet » et qui agissaient sur le plus long terme tel que le fumier.” Les alpagistes des Saisies

② Quelles méthodes pour les épandre ?

Les techniques utilisées pour épandre les engrais minéraux incluent :

- > **L'hydroseeding** (FICHE 11) : L'hydroseeding est une technique largement répandue pour sa capacité à projeter à la fois les semences et les engrais. Il est possible **d'utiliser les engrais sous forme de granulés pré-mélangés avec le mulch et les agents fixateurs ou de les ajouter sous forme liquide au réservoir d'eau**. Les engrais liquides permettent une répartition homogène sur la surface à traiter.

À savoir

Lorsque **les pentes sont fortes (supérieures à 35°)**, il est généralement courant d'utiliser **l'hydroseeding avec des engrais minéraux et des agents fixateurs tels que la cellulose** pour améliorer le maintien des engrais et semences sur le versant et éviter le lessivage vers le réseau hydrographique. Dans tous les cas, **il est important de noter qu'il n'est pas recommandé d'utiliser les engrais minéraux sans fixateur en altitude** (Dupin et al., 2019).

- > **L'épandage à la main** : c'est la méthode la plus simple et la plus économique, mais aussi la plus laborieuse.
- > **L'épandage mécanique** : les épandeurs sont souvent montés sur des véhicules tels que des tracteurs.

Chacune de ces techniques permet de mutualiser les étapes d'ensemencement et de fertilisation et donc de **limiter les passages et ainsi les coûts de la réhabilitation.**

En résumé, les engrais minéraux jouent le rôle de « booster » pour le démarrage rapide de la végétation et peuvent être bénéfiques pour contrer l'érosion du substrat, notamment lorsque les enjeux pastoraux sont importants.

Cependant, leur effet est limité dans le temps et ne contribue pas à la minéralisation de la matière organique ni à la pérennité du couvert végétal à long terme.

Il est donc essentiel d'apporter également de la matière organique pour restaurer le bon fonctionnement du sol en suivant la FICHE 13 et en ayant un regard attentif sur les contraintes réglementaires vis-à-vis de l'apport d'engrais minéraux.

FICHE 15 – LA BIOACTIVATION



À retenir

La bioactivation peut **compléter ou remplacer certains amendements fertilisants** définis lors de la création du mélange à incorporer au substrat.

Les **prébiotiques** visant à fournir les nutriments nécessaires aux micro-organismes du sol peuvent être utilisés à cette fin.

Leur utilisation peut également **compléter ou remplacer l'utilisation d'engrais minéraux**, et stimuler la végétation.

Les **probiotiques**, quant à eux, consistent à introduire directement des microorganismes dans le sol, offrant parfois des effets similaires à ceux des amendements fertilisants.

En ce qui concerne les **mycorhizes**, il est possible de les prélever sur le site avant les travaux d'aménagement, de les multiplier, puis de les réinoculer lors de la réhabilitation. **Ils contribuent à limiter l'érosion et améliorent la santé du sol.**

Malgré le peu de retours d'expérience à ce jour, il est nécessaire de poursuivre les études dans ce domaine, notamment en ce qui concerne la mycorhization.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

La bioactivation est une méthode récente d'amélioration des qualités agronomiques du sol qui passe par une optimisation de l'activité biologique. Pour cela, des micro-organismes ou des composés organiques spécifiques sont inoculés au sol (prébiotiques, champignons mycorhiziens, rhizobactéries, macrofaune telle que les vers de terre, etc.).

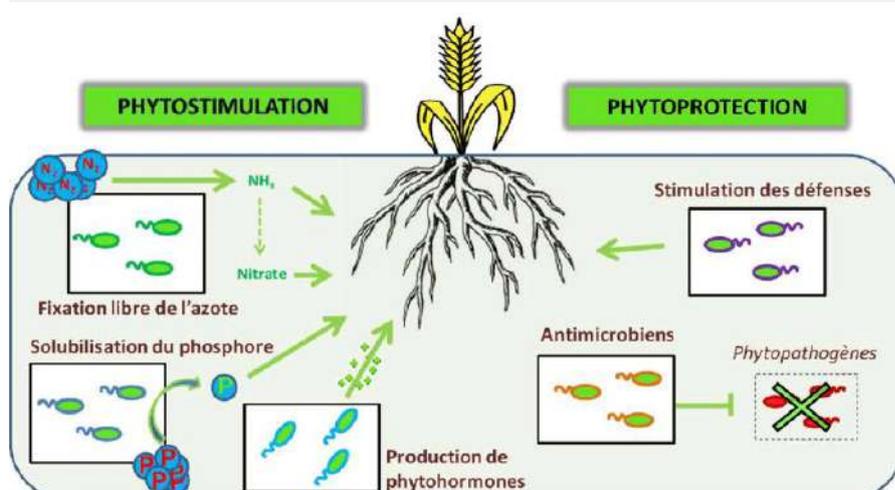


Figure 40 : La phyto-stimulation et phyto-protection grâce aux rhizobactéries (Yvan Moenne-Loccoz).

Lors de l'étude DSF (2024), la quantité d'ADN microbien s'est révélée nettement inférieure sur les sites réhabilités que sur leur site témoin respectif. C'est une observation partagée avec plusieurs alpagistes :

*Les alpagistes de Courchevel constatent que **les bouses ne se dégradent pas sur les pistes retravaillées, à la différence des pelouses naturelles à proximité**. L'absence de vie dans le sol (micro-organisme, pédofaune, ...) en est sûrement la raison. Ce constat est partagé aux Saisies.*

Le remaniement des sols engendre donc selon ces résultats une réduction drastique de la vie biologique des sols.

Différentes techniques existent pour réactiver la flore microbienne.

Parmi les techniques de bioactivation, on recense :

> L'inoculation de vers de terre

L'inoculation de vers de terre dans les sols permet d'aérer le sol et de le rendre plus perméable pour la circulation de l'eau tout en facilitant l'installation des racines. Cependant, lors de l'étude DSF 2024, peu de vers de terre ont été observés. Leur inoculation n'apparaît donc pas pertinente dans un contexte de montagne sous réserve que la saison ait été propice à leur observation.

> Les prébiotiques

Ce sont des substances bénéfiques pour le sol, non digestibles qui **servent de nourriture aux micro-organismes déjà présents dans le sol**. Ils peuvent être utilisés en combinaison avec des probiotiques pour améliorer la croissance et la santé des plantes.

Très peu de retours d'expérience existent concernant ces techniques.

Avant toute utilisation, il est recommandé de réaliser **une comparaison entre l'utilisation des prébiotiques et celle des engrais minéraux lors des travaux de réhabilitation (FICHE 13)**.

"Nous utilisons un produit développé par une entreprise privée. Il s'agit d'un nutriment activateur des micro-organismes présents dans le lisier. Épandage tous les ans sur les parcelles, avec une préconisation d'épandage sur 5 ans avant de bons résultats. Nous n'utilisons plus d'engrais chimique depuis que nous utilisons cette alternative." Les alpagistes des Arcs.

> Les probiotiques

Ce sont des **micro-organismes bénéfiques pour le sol**, tels que les bactéries ou les champignons (incluant les mycorhizes), qui, lorsqu'ils sont introduits dans le sol, favorisent un équilibre au sein de la microbiologie du sol. Ils contribuent à la décomposition des matières organiques, à la fixation de l'azote, à la libération de nutriments et à la suppression des pathogènes. Les probiotiques peuvent être appliqués directement dans le sol sous forme de suspensions ou de solutions contenant des cultures microbiennes bénéfiques.

Les probiotiques comptent les rhizobactéries et les mycorhizes.

Focus sur les champignons mycorhiziens

Les **champignons mycorhiziens** sont les champignons symbiotiques naturellement présents au niveau des racines des plantes. Ils favorisent l'absorption des nutriments, la croissance racinaire, la résistance aux maladies et aux stress environnementaux tels que la sécheresse (Van der Heijden *et al.*, 1998) et contribuent grandement à la stabilité du sol notamment en altitude (Barni *et al.*, 2007; Graf *et al.*, 2019). On distingue deux catégories de mycorhizes :

- > Les **endomycorhizes** sont des champignons mycorhiziens qui pénètrent dans les cellules des racines des plantes, formant des structures appelées arbuscules. En agriculture, les endomycorhizes sont couramment associées à des plantes de culture telles que le maïs, le blé, le riz, les légumineuses et les plantes maraîchères.
- > Les **ectomycorhizes**, quant à elles, ne pénètrent pas dans les cellules des racines des plantes, mais forment une gaine protectrice autour des racines. Les ectomycorhizes sont couramment associées à des plantes forestières telles que les arbres (conifères) et les arbustes.

En général, l'inoculation avec des endomycorhizes est plus courante dans l'agriculture, car elles sont souvent associées à des plantes de culture pour l'alimentation humaine. Cependant, l'inoculation avec des ectomycorhizes peut s'avérer utile dans le cadre d'un projet de réhabilitation ou en foresterie.

Les rhizobactéries, correspondant à des bactéries bénéfiques, se développent dans la zone racinaire des plantes et ont des effets positifs sur la santé des plantes et la qualité des sols. Les rhizobactéries sont souvent classées en fonction de **leur mode d'action et de leur fonction dans le sol**. Les types de rhizobactéries les plus couramment rencontrés sont **les bactéries fixatrices d'azote**, les bactéries solubilisant le **phosphate** et les bactéries produisant des **hormones de croissance**. Leur utilisation est de plus en plus répandue, notamment en agriculture biologique pour **réduire l'utilisation d'engrais et augmenter la productivité**. Les rhizobactéries peuvent être appliquées sur les plantes en tant que solution de pulvérisation ou ajoutées au sol en tant qu'engrais ou amendement organique.

Les mycorhizes jouent un rôle important dans le développement de la végétation et dans le rétablissement des fonctions du sol. **L'utilisation de la mycorhization peut être envisagée en parallèle lorsque les sites à réhabiliter sont particulièrement contraignants ou en substitution lorsque l'utilisation d'amendements organiques est, par exemple, restreinte par la réglementation.**

Il peut être opportun de **considérer l'introduction de mycorhizes** dans les situations où :

- > La **réglementation ne permet pas l'apport d'amendement organique**.
 - o Les **risques d'érosion de la matrice fine sont élevés**.
 - o Les sols sont sensibles au tassement et nécessitent de **limiter la compaction (FICHE 2)**.
- > La **diversité floristique** du site doit être conservée.

À savoir

Les mycorhizes produisent de la glomaline, qui agit comme une colle maintenant en cohésion des micro et macro-agrégats et améliorant ainsi la stabilité de la structure du sol. Par ailleurs, la stabilité du sol pourra être améliorée grâce à un enracinement dense et un taux élevé de matières organiques.

Les mycéliums quant à eux agissent comme de minuscules élastiques avec un effet "mémoire de forme" ramenant les micro-agrégats dans leur position initiale après le passage d'engins lourds.

Une étude a comparé les effets de quatre espèces du genre *Glomus* (champignons mycorhiziens), issus d'une prairie calcaire de montagne en Suisse, sur la composition et la structure de onze espèces végétales caractéristiques de ces milieux (Van Der Heijden et al. 1998). Les auteurs ont ainsi démontré que **huit des onze espèces végétales dépendaient de la présence d'au moins un des champignons pour s'établir durablement**. Dans le contexte de cette étude, la présence de champignons mycorhiziens s'est donc avérée essentielle pour maintenir la diversité de la communauté végétale. En revanche, aucune modification de la biomasse totale n'a été constatée entre les différents traitements testés.

Schmid et al. (2007) ont **testé l'incidence de champignons mycorhiziens, de prébiotiques, de probiotiques⁹ et d'engrais minéraux sur des sols¹⁰ très pauvres en matière organique et largement perturbés par des travaux d'aménagement**. Les résultats indiquent

que l'inoculation mycorhizienne et l'apport de probiotique seul ne sont pas suffisants pour limiter le risque d'érosion. La réussite, vis-à-vis du contrôle de l'érosion, résiderait dans la **combinaison de nutriments organiques, de bactéries symbiotiques et de mycélium mycorhizien** pour permettre le développement rapide de la végétation dès la première année. Cette étude souligne la complexité et l'influence de la vie du sol sur le bon rétablissement du couvert végétal.

Il est donc essentiel de consulter la FICHE 13 afin de créer un mélange adapté en fonction de la disponibilité des amendements organiques, de la réglementation et des spécificités du milieu à réhabiliter.

Deux étapes sont nécessaires pour procéder à une inoculation mycorhizienne :

- > **Le choix des mycorhizes**

Il est possible d'avoir recours à **des mycorhizes du commerce**, ou bien de **développer les mycorhizes spécifiques au site en prélevant des échantillons avant le début des travaux et en les mettant en culture pendant environ 6 mois dans un laboratoire spécialisé**.

Cette dernière méthode semble particulièrement intéressante en montagne, où **les espèces sont souvent adaptées à ces environnements spécifiques**. Cependant, les retours d'expérience ne permettent pas encore d'évaluer la différence entre l'inoculation de mycorhizes spécifiques au site et celles issues du commerce.

⁹ Les modalités testées correspondent à (1) le contrôle, (2) Un inoculum pur de champignons mycorhiziens, (3) Un mélange de micro-organismes, des polysaccharides pour favoriser la germination et un concentré de nutriment organique, (4) un mix des 2 et 3, (5) un engrais organo-minéral.

¹⁰ Etude réalisée au sein des Alpes Suisses dans le canton de Graubünden à Saint-Moritz sur une pente faible (10 à 20°) à une altitude de 2700m.

Il est essentiel de noter que l'effet inhibiteur du phosphore sur les mycorhizes peut compromettre **l'efficacité de l'inoculation de ces derniers lorsqu'ils sont appliqués en même temps que des matières fertilisantes**. Cette interaction complexe doit être prise en compte pour garantir le succès des efforts de la réhabilitation.

> **L'inoculation des mycorhizes**

L'inoculation mycorhizienne implique l'application dans le sol ou sur les racines de **spores** de champignons mycorhiziens ou de **substrats** contenant ces champignons.

L'objectif est d'augmenter **la population de champignons mycorhiziens bénéfiques dans le sol**, ce qui améliorera la colonisation des racines par ces champignons.

Différentes méthodes d'inoculation peuvent être mises en place :

- **Application de spores ou de fragments de mycélium** : Cette méthode consiste à appliquer des spores ou des fragments de mycélium (partie végétative du champignon) directement sur les racines des plantes. Les spores ou les fragments de mycélium sont mélangés avec du substrat ou des granules, puis appliqués sur le sol.
- **Injection de suspension de spores (liquide)** : Dans cette méthode, une suspension de spores est injectée directement sur le sol.
- **Enrobage de semences** : Cette méthode consiste à enrober les semences des plantes avec des spores de champignons mycorhiziens. Lors de semis, les spores sont libérées et colonisent les racines des plantes. Cette méthode est aussi valable pour les probiotiques.

D. Protection du lit de semences

Une fois l'ensemencement réalisé, les semences ainsi que le substrat sont exposés à des conditions naturelles parfois rudes. En milieu de montagne, **le risque d'érosion et de lessivage des graines et de la matrice fine est important**. Certaines actions peuvent être mises en place pour maximiser les chances de reprise de la végétation et limiter les risques d'érosion hydrique en ralentissant les écoulements **avec la mise en place d'un paillage ou d'un géotextile biodégradable**.

Par ailleurs, ces techniques visent à optimiser la réussite de la réhabilitation écologique en créant **un environnement favorable à la germination, au développement des plantules** permettant ainsi une reprise du couvert végétal plus rapide.

FICHE 16 – LE PAILLAGE



À retenir

Le paillage implique l'application d'une couche de foin, de paille ou de copeaux de bois d'une épaisseur de 2 cm sur toute la surface du site. Cette étape, réalisée après l'ensemencement, présente plusieurs avantages :

- > **Maintien de l'humidité** : particulièrement utile sur les versants secs où l'évaporation est élevée.
- > **Réduction de l'érosion** : efficace sur les pentes modérées pour empêcher le lessivage du sol.
- > **Enrichissement du sol** : la matière organique du paillis se décompose progressivement, libérant des éléments nutritifs pour les plantes.
- > **Intégration paysagère améliorée** : idéal pour les sols peu profonds où une couverture végétale est difficile à maintenir.

L'utilisation de foin vert présente l'avantage d'apporter à la fois des semences et un paillis lors de la réhabilitation du site.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Le paillage est une technique consistant à recouvrir le sol avec une couche de matériaux organiques tels que la **paille, les feuilles mortes ou les copeaux de bois**.

Lors de la réalisation d'ensemencement au foin vert ou sec, le paillage est directement intégré.

Il est aussi possible de réaliser un paillage manuel en complément d'autres méthodes de semis à l'aide d'une fourche ou mécaniquement grâce à un épandeur à fumier ou une pailleuse.

"Le paillage est une pratique qui a vraiment du sens chez nous, cela permet un apport de matière organique et le maintien de l'humidité dans le sol en cours d'été." GAEC des Biais, Montvalezan – La Rosière



Figure 41: Revégétalisation avec du foin vert de la piste Vernie Touge à Saint-Léger-les-Mélèzes (Huc et al., 2018)

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Le paillage présente différents avantages dans le cadre de travaux de réhabilitation. Il permet notamment de :

- > **Lutter contre la sécheresse** : le paillage permet de conserver l'humidité du sol en réduisant l'évaporation de l'eau ce qui favorise le développement du couvert végétal.

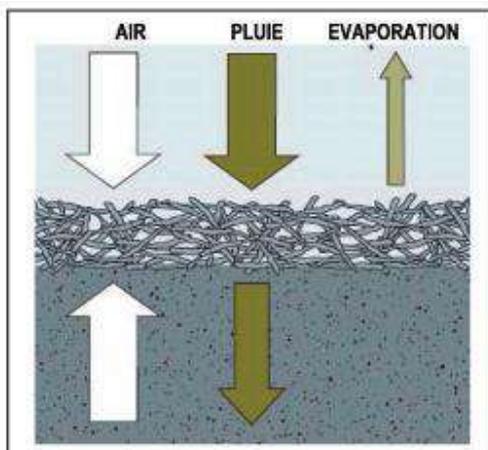


Figure 42 : Intérêt du paillage pour maintenir l'humidité (Lignier & Rosset, 2012)

- > **Limiter l'érosion du sol et des semences** : Un paillage protège le sol et les semences de l'impact des gouttes d'eau et du ruissellement. La dose de semis peut ainsi être réduite de moitié par rapport à une méthode sans paillage. Ceci est particulièrement intéressant lorsque la collecte de graines a été peu fructueuse.

Le paillage favorise également la germination des graines et la croissance des plantules (Dupin et al., 2019). L'étude DSF (2024) montre que l'utilisation de la méthode du foin vert (FICHE 11) a plusieurs avantages. Non seulement cette méthode a permis l'apport de semences, mais elle a également créé un paillage naturel. Sur le site étudié, l'installation de ce paillage pourrait avoir limité les pertes de la matrice fine du sol, préservant ainsi une texture équilibrée.

Enfin, grâce au paillage, il est possible de maîtriser le tassement des horizons de surface sur des sols sensibles (méthode du chenillage).

- > **Améliorer la qualité du sol** : Avec le temps, le paillage se décompose, ce qui permet un apport de matière organique riche en carbone devant être pris en compte lors de l'établissement du mélange à réaliser dans le cadre de l'amélioration du substrat (FICHE 13).
- > **Améliorer l'intégration paysagère** : La mise à nu de certains sols peut être très impactante d'un point de vue paysager avant le développement du couvert végétal. Le paillage permet de limiter l'impact visuel des travaux et de mieux les intégrer au paysage.

En résumé, il est envisageable de privilégier le paillage dans plusieurs situations spécifiques. Tout d'abord, pour limiter le stress hydrique sur des sites exposés au sud ou sur des versants où la pluviométrie est limitée. De même, le paillage est efficace lorsque le substrat est fin et que la pente est prononcée (toutefois, si cette dernière est excessive, l'utilisation d'un géotextile peut être nécessaire, FICHE 17). De plus, le paillage peut être bénéfique sur des sites réhabilités où on peut apercevoir la roche mère.

Au vu de son apport en matière organique, il est en revanche nécessaire de se référer à la FICHE 13 afin d'éviter tout déséquilibre concernant l'apport en carbone.

Les étapes de mises en œuvre du paillage sont les suivantes :

① Étape 1. La sélection de la paille ou du foin

Il est important de **s'assurer de la provenance des fournitures et de privilégier du foin ou de la paille d'exploitations locales** au risque de contaminer la parcelle avec des semences exogènes.

Si la prairie source ne contient pas d'espèces adaptées à la réhabilitation du site, il est malgré tout possible **d'utiliser le foin issu de la deuxième ou de la troisième coupe limitant ainsi le risque de colonisation par des semences exogènes** (Krautzer et al., 2012). Enfin, le paillage au foin semble plus stable que l'utilisation de paille en raison de ses tiges plus fines et de sa structure plus ferme.

Il est aussi possible **d'utiliser des copeaux de bois** lorsque la création de la piste a nécessité un défrichage (FICHE 3) ou lorsque des copeaux sont disponibles.

② Étape 2. La mise en place du paillage

La paille ou le foin (ou les copeaux) peuvent être **appliqués directement après l'ensemencement à l'automne ou après la fonte de la neige**. Le paillage se fait avec une pailleuse, un épandeur à fumier et/ou une fourche.

Il suffit d'étaler la paille sur tout le site sur **une épaisseur de 2 cm laissant passer la lumière** (Huc et al., 2018). Certains retours ont montré que la quantité de matériaux secs représentait entre 300 et 500 g/m² soit entre 300 et 500 kg pour 1000m² (Krautzer et al., 2012).

Le poids et la taille des bottes de paille doivent être adaptés en fonction de la méthode d'épandage choisie. Sur un site difficilement motorisable, l'usage de petites bottes carrées peut être privilégié.

③ Étape 3. La fixation de la paille

Si les caractéristiques du site **engendrent des risques de glissement de la paille sur le versant**, il est possible de suivre le protocole de Schmid et al. (2007) et d'ajouter un adhésif dissous (20 g/m²) et de la cellulose (60g/m²) au-dessus de la paille sèche (300g/m²).

Dans ce contexte, il est aussi possible d'envisager de remplacer le paillage par un géotextile selon les conditions du milieu (Tableau 14, FICHE 17).

La réalisation du paillage peut néanmoins présenter différentes contraintes :

- > **La disponibilité** : Dans certaines vallées, il semblerait que l'approvisionnement en petites bottes carrées de paille ou de foin soit très limité, voire impossible.
- > **L'usage du site** : Pour les domaines skiables se pose la question de la stabilité de la couverture neigeuse en cas de paillage.
- > **Les caractéristiques du site** : Cette technique n'est pas très adaptée sur des pentes importantes, car la paille risque de glisser et d'emporter avec elle le sol et les semences (Dupin et al., 2019). Par ailleurs, le paillage n'étant pas fixé au sol, il est préférable d'éviter de pailler les sols exposés à des vents forts ou à de forts ruissellements (Dupin et al., 2019).

FICHE 17 – LES GÉOTEXTILES BIODÉGRADABLES



À retenir

Dans le cadre de ce guide, il a été choisi de se focaliser sur les géotextiles **biodégradables**, limitant ainsi la **pollution des environnements de montagne** ou la **nécessité de revenir pour retirer le géotextile**. Ce type de géotextile présente l'avantage supplémentaire de réduire l'empreinte environnementale à long terme, car les géotextiles se décomposent naturellement avec le temps.

Le coût de mise en place d'un géotextile est généralement plus élevé que celui du paillage. Par conséquent, il est **essentiel d'identifier les situations où l'utilisation du géotextile est préférable**.

Le géotextile est particulièrement utile dans les conditions suivantes :

- > **Sur des pentes importantes**, notamment sur les talus, où il aide à prévenir les glissements de terrain.
- > **En cas d'érosion hydrique ou éolienne sévère**, surtout lorsque la matrice fine du sol est prédominante.

La mise en place d'un géotextile favorise la reprise de la végétation et permet d'éviter les tassements volontaires de la surface du sol en réalisant, par exemple, un chenillage de la surface.

CONTEXTE ET DESCRIPTION

Les géotextiles sont couramment employés pour la réhabilitation de certains sites, **notamment sur de fortes pentes (talus)**. Leur utilisation permet de limiter l'érosion du substrat le temps de la reprise du couvert végétal.

Les géotextiles sont **des produits tissés ou filés à partir de fibres en matière synthétique ou biodégradable**. Le caractère biodégradable semble très pertinent en milieu de montagne afin d'éviter d'impacter le paysage et d'incorporer à moyen terme des substances exogènes telles que des microplastiques. **Les géotextiles biodégradables sont principalement constitués de toile de jute ou de coco**.



Figure 43: Mise en place d'un géotextile en toile de jute au col Agnel (hautes-alpes.net).

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

L'intérêt des géotextiles biodégradables est multiple (l'ensemble de la fiche se focalisera sur l'usage de géotextiles biodégradables).

Ils permettent :

- > **D'améliorer les caractéristiques physico-chimique du sol : La proportion d'éléments fins est augmentée, réduisant ainsi la proportion de matériaux grossiers** (Crosaz, 1995). Ceci est d'autant plus marqué que la pente est importante, favorisant alors la croissance du système racinaire. La **dégradation du géotextile en toile de jute peut prendre quelques mois voire quelques années** contribuant à la formation de l'humus.

À savoir

Des tests ont été réalisés sur des marnes noires, un matériau fortement altérable et exposé à un climat montagnard et méditerranéen.

Sur leurs pentes très faibles, l'utilisation de géotextile a conduit à l'accumulation d'éléments en suspension venant recouvrir les plantules et influencer négativement le développement de celles-ci. Sur les pentes les plus importantes, le géotextile a fixé la couche superficielle permettant la mise en place du couvert végétal sur des pentes d'au moins 100% (Crosaz, 1995).

> **De lutter contre l'érosion** (Magnin, 2003). Les géotextiles visent à stabiliser le substrat notamment dans des **pentés importantes soumises à l'érosion**. Les géotextiles sont d'ailleurs couramment utilisés dans la confection des talus.

> **D'éviter la compaction des sols** : Sur les sols sensibles aux tassements, ils permettent également de limiter la compaction des horizons de surface, car il n'est plus nécessaire de réaliser un chenillage (FICHE 8).

"Nous utilisons la toile coco pour refaire les talus. Nous mettons en défens pour que ce ne soit pas impacté par les moutons les premières années. À combiner avec un hydroseeding et du mulch pour que les graines collent au substrat." SEM Valmeinier.

- > **De conserver l'humidité** (Magnin, 2003). Les géotextiles jouent **un rôle tampon en maintenant davantage le niveau d'humidité et la température du sol**. En cas de sécheresse, les 20 premiers centimètres du sol mettent plus de temps à s'assécher avec un géotextile. Dans un environnement climatique difficile, **la végétation s'installe significativement plus vite et plus densément avec un géotextile**.

Comparaison des géotextiles biodégradables et du paillage

Le Tableau 14 compare l'intérêt d'un géotextile par rapport au paillage (FICHE 16). **Le paillage est globalement plus pertinent sur pente faible à modérée. Son intégration paysagère est meilleure et son coût limité.**

En revanche, **sur des pentes fortes, le géotextile est préférable pour stabiliser le substrat**. Les géotextiles ayant une bonne résistance à la traction peuvent être utilisés sur des pentes inclinées de 15° à 34° (Magnin, 2003) et même jusqu'à 45° selon (Crosaz, 1995). Il convient alors de choisir le matériau et l'ouverture de maille, **en fonction des conseils des fabricants et de le fixer au sol à l'aide d'agrafes métalliques**.

Dans le cas où **la mise en place du géotextile n'est pas possible sur l'ensemble du site ou en raison du budget**, ceux-ci **peuvent être installés sur la partie haute de la pente** (notamment si la topographie est en forme d'épaule comme sur les talus ou les pistes de ski) **pour enrayer l'érosion régressive** (érosion qui se déplace de l'aval vers l'amont) **et limiter les ruissellements** (Magnin, 2003).

À noter que si la pose du géotextile n'est pas bien réalisée, un bourrelet peut entraîner une accumulation de matériaux fins et empêcher localement le développement du couvert végétal.

Tableau 14 : Comparaison des conditions de pose d'un géotextile ou du paillage en fonction des conditions du milieu

Critères	Le paillage	Le géotextile
Pente	Pente faible (<10°) ou modérée (entre 10 et 30°)	Pente modérée (entre 10 et 30°) et forte (> 30°)
Vent	Ne résiste pas au vent	Bonne résistance au vent
Ruissellement	Ne résiste pas au ruissellement important	Résiste au ruissellement important
Intégration paysagère	Bonne intégration paysagère	Reste très visible avant la dégradation du géotextile et le développement du couvert végétal
Disponibilité	Bottes carrées limitées dans certaines vallées	Toujours disponible
Coût	Très faible coût de revient	Coût élevé
Mise en place	Facile	Technique
Apport de matière organique	Dégradation de la paille, foin ou copeaux de bois	Dégradation du géotextile
Sècheresse	Bonne rétention de l'eau sous le paillis	Rétention efficace

Enfin, les coûts de la mise en place d'un géotextile biodégradable peuvent constituer une contrainte importante. Ils varient en fonction de différents facteurs **tels que la quantité, la qualité, la taille de la maille**. En général, **les prix moyens varient entre 1 et 3 euros le m² pour le géotextile en toile de jute, et entre 2 à 5 euros le m² pour le géotextile en toile de coco ; ce qui représente un coût bien plus élevé que la mise en place de paille ou de foin.**

E. Suivi des travaux de réhabilitation, travaux correctifs et usage du site

Outre les facteurs environnementaux évoqués tout au long de ce manuel et qui revêtent une importance cruciale dans le processus de réhabilitation, le temps constitue *in fine* un élément incontournable à considérer : l'évolution du milieu et le retour à un état « réhabilité » peuvent en effet prendre plusieurs années.

Avec le temps et si les conditions sont favorables, le milieu peut recouvrer des caractéristiques environnementales conformes aux exigences écologiques, paysagères et pastorales établies (stabilité du substrat, sol riche en nutriments, couvert homogène, productivité végétale, etc.).

Il s'avère cependant primordial de surveiller le site réhabilité à l'aide de divers indicateurs afin d'appréhender son évolution et d'évaluer la nécessité d'éventuels ajustements (travaux correctifs).

À noter enfin que l'usage du site post-réhabilitation peut exercer une influence majeure sur la réussite de la réhabilitation écologique.

FICHE 18 – LE SUIVI DES TRAVAUX DE RÉHABILITATION ET LES TRAVAUX CORRECTIFS



À retenir

Le suivi des travaux de réhabilitation revêt une importance cruciale à plusieurs égards.

Tout d'abord, il permet d'évaluer **le succès de la réhabilitation, contribuant ainsi à enrichir les retours d'expérience spécifiques à chaque site.**

La constitution d'**une base de données pour chaque domaine skiable** est précieuse et facilite la mise en place de bonnes pratiques. Par ailleurs, il permet d'appréhender l'évolution du site et évaluer la nécessité d'éventuels ajustements (travaux correctifs).

La personne responsable de l'organisation des étapes de réhabilitation doit veiller à ce que **le suivi soit effectué de manière régulière, et ce sur une période étendue, idéalement sur une durée d'au moins 10 ans.**

Pour évaluer la réussite de la réhabilitation, il est **nécessaire de comparer les différents indicateurs du site avec ceux mesurés à l'état initial ou sur un site témoin adjacent présentant des conditions environnementales similaires.**

En fonction des résultats de cette comparaison, **des travaux correctifs peuvent être envisagés afin de garantir l'efficacité et la durabilité des interventions.**

CONTEXTE ET DESCRIPTION

À la suite des travaux de réhabilitation, il est nécessaire de suivre **la germination, le développement des plantules ainsi que la refonctionnalisation des sols.**

Ces premiers éléments d'observation témoignent **du succès ou non de la réhabilitation au regard des différents enjeux (écologique, pastoral, paysager et du contrôle de l'érosion).**

Des mesures correctives peuvent être mises en place afin d'optimiser la réussite des travaux de réhabilitation.



Figure 44: Illustration d'une fosse pédologique pour la description du sol (Soltis environnement)

Les étapes du suivi post-réhabilitation et la mise en place de travaux correctifs sont les suivantes :

① Établissement du protocole de suivi

Comme défini lors de premières étapes (FICHE 1 et FICHE 2), le suivi et la mise en place des travaux correctifs doivent être encadrés par la personne référente du projet de réhabilitation.

Le protocole de suivi doit comprendre :

- > **L'évaluation de la réussite et la définition des travaux correctifs** : Cette étape doit permettre de prendre en compte de manière répétée **un ensemble d'indicateurs sélectionnés en fonction des objectifs et des enjeux spécifiques au site réhabilité**. Ce sont les mêmes indicateurs qui ont permis d'établir l'état initial du site (FICHE 1). La comparaison entre l'état initial du site et l'état post-réhabilitation (ou site de proximité aux conditions environnementales similaires) permettent de **définir les travaux correctifs à réaliser**.
- > **La temporalité du suivi** : il est essentiel que **ce suivi puisse être maintenu sur le long terme**, avec une fréquence annuelle les premières années, puis tous les 2 à 4 ans par la suite.

Les **observatoires de l'environnement et les bureaux d'étude sont des partenaires appropriés pour assurer ce suivi durable des sites réhabilités**.

② Évaluation de la réussite de la réhabilitation

- > **Comparaison avec le milieu initial ou avec un site témoin**

Pour évaluer la réussite de la réhabilitation plusieurs approches sont envisageables. Si un diagnostic complet a été réalisé en amont des travaux, fournissant ainsi tous les paramètres nécessaires à l'expertise (FICHE 1), il est idéal de comparer **alors l'état du milieu réhabilité avec celui de son état initial**. À défaut, il est **possible de sélectionner un site "témoin" situé à proximité**, dans la même zone biogéographique et exposé à des conditions environnementales similaires (telles que la géologie, l'exposition, la pente et l'altitude).

- > **Évaluation de la réussite de la réhabilitation**

Lors de chaque suivi, il est nécessaire de se rendre sur le site réhabilité et de **mesurer l'ensemble des indicateurs mesurés lors de l'état initial du site** (FICHE 1).

Dans le cadre de l'étude DSF (2024), les sites réhabilités ont été comparés à un site 'témoin' du fait de l'absence de diagnostic initial sur le site réhabilité. Des fiches comparatives ont été établies à partir d'un ensemble d'indicateurs relevés sur le site témoin et sur le site réhabilité. Cette fiche comprend :

- > Une description de l'ensemble des méthodes de réhabilitation mises en place.
- > Une description des sols.
- > Une comparaison de la richesse spécifique, de la biomasse végétale et du recouvrement.
- > Une comparaison de l'ensemble des paramètres physico-chimiques du sol.

Certains indicateurs ont été regroupés pour rendre compte des services écosystémiques rendus par le site réhabilité et par le site témoin (Figure 45). On note pour l'instant que le site réhabilité ne remplit pas encore les fonctions observées sur le site témoin.

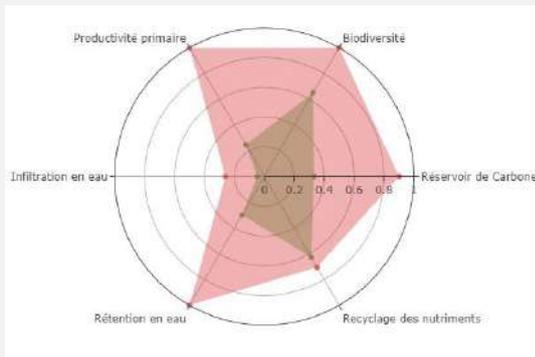


Figure 45 : Comparaison des fonctions écologiques du sol et des caractéristiques du couvert végétal pour le site témoin (rose) et le site réhabilité (marron) pour l'établissement d'un score écologique (DSF, 2024)

Enfin, des scores ont été établis en fonction des enjeux écologiques, pastoraux, paysagers ainsi qu'un score concernant la stabilisation du substrat (figure ci-dessous).

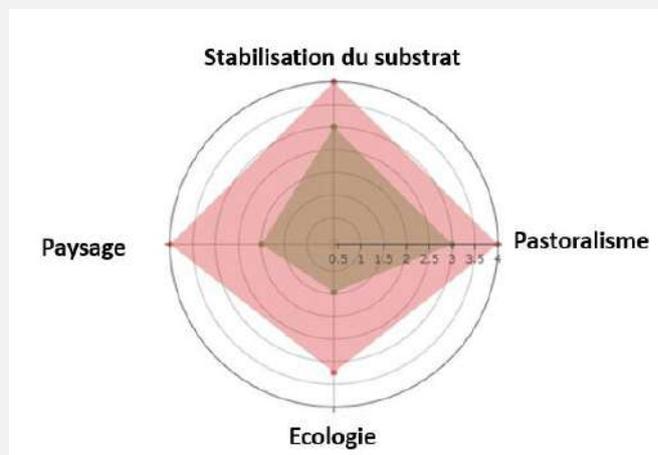


Figure 46 : Exemple des scores obtenus par le site témoin (rose) et le site réhabilité (marron) depuis 2017 (DSF, 2024)

Grâce à ces comparaisons, **il est possible d'identifier des axes d'amélioration et d'adopter un regard critique sur les travaux de réhabilitation réalisés.**

À noter que certaines mesures de suivi peuvent être mises en place directement depuis le bureau, telles que des outils satellites de suivi dans le temps (FICHE 1). L'utilisation de l'imagerie satellite permet en effet d'établir le NDVI maximal observé au droit de la zone réhabilitée depuis 1984. L'analyse de la dynamique temporelle de ce NDVI max permet de vérifier si le niveau de recouvrement végétal théorique a été restauré à un niveau similaire à celui observé avant les travaux de réhabilitation.

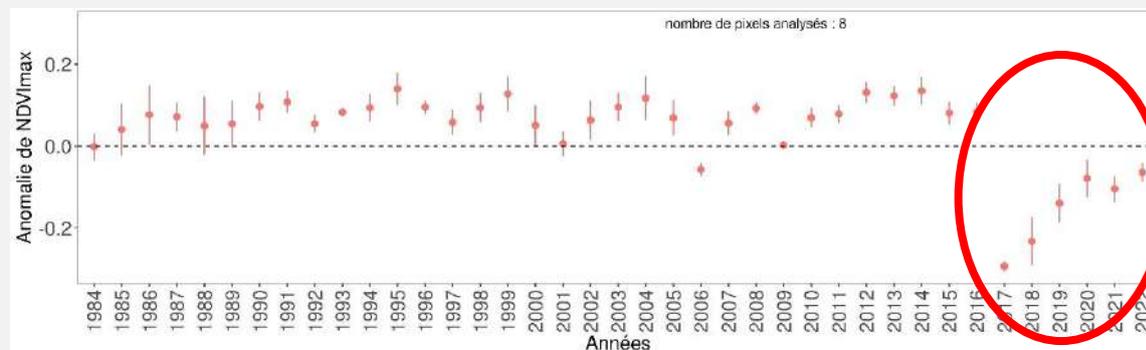


Figure 47 : NDVI_{max} mesuré sur le site réhabilité depuis 1984 (DSF, 2024). Grâce à l'imagerie satellite, il est ainsi possible de confirmer qu'aucune perturbation significative n'a été observée sur le milieu depuis 1984 hormis la réalisation des travaux en 2017. Depuis, le taux de recouvrement végétal semble augmenter chaque année, sans atteindre, en 2022, le

taux de recouvrement constaté à l'état initial. Ceci est conforté par les observations sur le terrain indiquant un taux de recouvrement d'environ 75 % (Figure 48).



Figure 48 : Prise de vue du dessus du site réhabilité avec un recouvrement végétal actuel de 75%.

③ Mise en place de travaux correctifs

Si la réhabilitation ne permet pas de retrouver les caractéristiques souhaitées, il est préférable de faire appel à **un organisme compétent pour identifier les paramètres contraignants et élaborer un plan d'action visant à appliquer des actions correctives.**

Cependant, **parfois, les délais d'action sont trop longs et la réalisation de mesures correctives en interne permet une action plus rapide.** Par exemple, si la germination n'a pas été bonne, les risques d'érosion du substrat sont accrus et nécessitent de réagir rapidement.

*“Si les résultats escomptés ne sont pas au rendez-vous au bout de deux ans, nous utilisons un semoir qui griffe le terrain et ressemons des graines”
Les alpagistes de Valcenis.*

Quelques solutions simples peuvent être envisagées en fonction des résultats escomptés :

- > Il est possible qu'une partie ou la totalité des semences n'ait pas germé, à cause du lessivage des graines ou parce que les plantules n'ont pas pu s'établir et perdurer. Il est important d'identifier les facteurs ayant conduit à cet échec pour avoir une action ciblée. **Un ensemenement ou un amendement supplémentaire pourra alors être envisagé.**
- > Si les cunettes de drainage sont endommagées, il peut être nécessaire (si la végétation ne permet pas une infiltration suffisante) de **les remanier ou de les curer pour améliorer leur fonctionnalité et limiter l'érosion** (Dupin et al., 2019).
- > Si le mélange effectué pour améliorer le substrat n'a pas permis d'atteindre une teneur en matière organique adéquate et à enclencher les processus de minéralisation, **il est alors essentiel d'élaborer un nouveau protocole d'amendement.**
- > **Si le substrat a été complètement érodé, il faudra envisager l'apport de matériaux** (exogènes ou endogène) pour permettre la reconstitution d'un sol. Une prise en charge des travaux par un bureau d'étude spécialisé en génie pédologique sera alors indispensable.
- > Si la compaction en surface est trop importante et entrave une bonne infiltration de l'eau, **il est peut-être envisagé de passer un aérateur à pointes**, fixé derrière un tracteur ou un quad, afin de créer de la porosité en surface et améliorer l'infiltration de l'eau.

Objectivement, il est important de rappeler que le **retour à l'état initial d'un site nécessite plusieurs années. Dans certains cas et même de manière relativement fréquente, le milieu d'origine n'est jamais restauré.**

“En altitude, la ressource en herbe d'origine met une à deux décennies à se construire.” les alpagistes de La Plagne

FICHE 19 – L'USAGE DU SITE



À retenir

Les activités menées sur un site récemment réhabilité (au cours des deux ou trois premières années) auront un effet significatif sur la pérennité de la remise en état. Cela inclut :

- > Le pastoralisme.
- > Les activités de VTT et de randonnée.
- > La circulation des engins.
- > Les dommages causés par les activités de sports d'hiver et la production de neige artificielle.

Il est donc essentiel de **limiter autant que possible ces activités** pendant cette période critique.

Pour le pastoralisme, il est nécessaire de **collaborer avec les alpagistes** pour planifier les travaux, déterminer les zones à mettre en défens, tout en cherchant des moyens de compenser la perte de fourrage afin de faciliter le respect des zones protégées.

L'année suivante ou l'année N+2, il est recommandé **d'intervenir pour broyer la végétation à l'automne lorsque la biomasse commence à devenir importante.**

Enfin, la clé du succès réside dans le fait de **ne pas venir perturber le milieu avec de nouveaux travaux.**

CONTEXTE ET DESCRIPTION

L'usage du site après la réhabilitation peut constituer une contrainte pour la reprise de la végétation.

Il est donc important de prendre en compte les paramètres pouvant retarder ou perturber la réhabilitation du milieu.



Figure 49: Pâturage d'un troupeau de brebis sur le domaine skiable de Aussois (R. MAGDINIER, 2022).

MODALITÉS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET RETOURS D'EXPÉRIENCES

Afin d'optimiser les chances de succès des travaux de réhabilitation, il est important de maîtriser l'usage du site réhabilité, **le temps que celui-ci atteigne un équilibre suffisant pour que des perturbations liées aux activités humaines ne conduisent pas à son déclin.**

La maîtrise des usages peut se faire à différents niveaux :

> **Pastoralisme**

- **Impact potentiel du pastoralisme**

À la suite des travaux de réhabilitation, **un retour prématuré des herbivores sur le site peut représenter une trop forte pression sur le milieu et limiter le retour pérenne de la végétation.**

En effet, **les jeunes pousses**, souvent très appétentes pour les troupeaux de bovins et d'ovins, **peuvent être endommagées par un pâturage trop précoce**. Les conséquences seront d'autant plus marquées lors du passage de troupeaux d'ovins, car là où une vache sectionne une tige d'herbe, la brebis l'arrache.

Le piétinement intense peut également endommager les tiges et les racines et contribuer au tassement du sol.

À noter toutefois que les pressions induites par les différents types d'herbivores ne sont pas les mêmes. **Les ovins exercent une pression élevée, notamment influencée par leur dynamique de groupe. Les bovins sont quant à eux beaucoup plus lourds, entraînant des empreintes plus profondes et des tassements plus intenses** notamment après de fortes pluies.

- **Influence de la gestion pastorale**

La gestion pastorale de la zone peut avoir une influence sur la qualité du couvert végétal.

Une conduite des troupeaux tardive (par exemple, en septembre) sur plusieurs années permettrait de laisser la végétation monter en graine, augmentant ainsi le recouvrement et la diversité du site.

Cependant, à moyen terme, dans le cas où la taille du troupeau est définie correctement en fonction des ressources sur la parcelle, on note peu de différences dans la composition floristique d'une prairie pâturée par des bovins par rapport à celle pâturée par des ovins (Meisser et al., 2013).

- **Mise en défens du site réhabilité**

La mise en défens des sites réhabilités, **idéalement sur une période de 3 ans** (à adapter selon la vitesse de retour de la végétation), permettrait au milieu de se stabiliser durablement avant le retour du pâturage et du piétinement (OFED & Bellini, 2015). Néanmoins, **la mise en défens de zone de faible emprise** (par exemple, la création d'un réseau de neige de culture) peut être complexe à mettre en place pour les alpagistes. **Le retour du pâturage doit donc être discuté entre les alpagistes et les domaines skiables ainsi qu'avec la personne référente des travaux de réhabilitation. À noter que si la zone n'est pas pâturée, il sera nécessaire de broyer la végétation à l'automne ce qui favorisera une pousse productive l'année suivante.**

À Aussois, les éleveurs essaient de ne pas pâturer les 2 premières années après les travaux.

"Mais ce n'est pas évident, car les zones reprises, lorsqu'elles sont petites et au milieu des zones pâturées, c'est très complexe à mettre en défens."

*Aux Saisies, le retour des animaux est discuté entre la SPL et les exploitants en direct.
« Le double regard est important. Il faut y aller tranquillement sur la reprise des pratiques les premières années, c'est un élément clé de la réussite. »*

"Un broyage à l'automne de l'année 2 peut avoir du sens si la végétation n'a pas été pâturée afin de densifier la végétation en favorisant le tallage des graminées" Les alpagistes de la Rosière.

- **Indemnisation de la perte fourragère**

Le versement d'indemnités des dommages causés dans le cadre de travaux d'aménagement (perte de ressource fourragère, sur la base de barèmes régionaux) peut permettre **une meilleure acceptation de la mise en défens par l'exploitant agricole locataire du site.**

"C'est une indemnité versée par la station au locataire du terrain agricole pour compenser les pertes subies par l'exploitation durant 2 à 3 ans. La méthode de calcul

et l'indemnité sont cadrées par un barème. Ça permet de compenser la perte par de l'achat de foin le temps de retrouver la ressource en herbe" Alpagistes des Saisies.

"Sur La Plagne, cette indemnisation n'est pas mise en place. Nous avons peu de marge de manœuvre sur la ressource en herbe avec nos gros troupeaux, et l'absence de cette aide ne nous conforte pas dans l'idée de laisser l'herbe s'implanter les 2 à 3 premières années après le semis. Nous avons besoin de cette ressource et revenons sûrement quelques fois trop tôt." issu de l'entretien avec les alpagistes de La Plagne.

Un **cahier des charges d'usage pastoral post-travaux pourrait être inclus dans les contrats de location de type Convention Pluri-annuelle de Pâturage** afin de cadrer au mieux les conditions favorables de reprise de la végétation. Cela nécessite un travail étroit de concertation entre domaine skiable, propriétaire et alpagiste locataire.

Sur le modèle des réunions multi-usages qui semblent se généraliser en domaine skiable (DS, alpagistes, collectivité et monde du tourisme estival), **une entrevue annuelle sur la gestion de la ressource en herbe pourrait permettre de planifier les interventions annuelles de chaque acteur** : séquence de travaux, plan de pâturage, travaux de broyage, amendement, retour du pâturage...

Focus sur la compensation de l'impact agro-pastoral en domaine skiable

Plusieurs outils peuvent être mis en œuvre pour accompagner au mieux l'impact de travaux sur les activités agro-pastorales :

- > **Compensation collective agricole** : dispositif réglementaire récent introduit dans la Loi d'Avenir pour l'Agriculture et la Forêt (LAAF) de 2014 en faveur de la prise en compte de l'économie agricole dans le développement de projets sur les terrains agricoles, naturels et forestiers. Le décret d'application n°2016-1190 précise le contenu de l'étude, et les projets soumis à étude préalable agricole : projet soumis à étude d'impact environnemental systématique, destruction définitive de plus d'un hectare de terres agricoles (seuil pour le département de la Savoie).
- > **Compensation agricole volontaire** : dans le cadre d'une étude d'impact environnemental ou non, le maître d'ouvrage peut volontairement quantifier l'impact sur l'activité agricole, mettre en œuvre la séquence ERC et travailler à des compensations travaillées avec les exploitants agricoles concernés. Les Organisations Professionnelles Agricoles peuvent accompagner ces réflexions. Cette démarche n'est pas réglementaire, mais garante de bonnes relations de travail avec le monde agricole local.
- > **Observatoires agro-pastoraux** : les domaines skiables se sont dotés d'Observatoire environnementaux pour mieux connaître les enjeux patrimoniaux de leur territoire et être plus efficace dans leurs démarches réglementaires au titre de l'environnement. Sur ce modèle, la Société d'Economie Alpestre de la Savoie a développé depuis 2020 une méthodologie pour proposer aux domaines skiables la construction d'observatoire agro-pastoraux. Comme pour la partie environnementale l'idée directrice est de mieux connaître les alpages pour mieux les protéger. Cette méthode a été développée en partenariat avec les domaines skiables des Saisies et de La Rosière.
- > **Indemnisations des dommages causés aux cultures et aux sols dans le cadre de travaux d'aménagement** : il s'agit d'une méthode permettant le calcul des dommages causés dans le cadre de travaux d'aménagement. Elle étudie notamment la perte de ressource fourragère pour ce qui nous concerne à l'alpage, le temps du retour à une production fourragère standard (2 à 3 ans). Une indemnisation est alors versée à l'exploitant agricole usager des terrains impactés. Cette indemnisation utilise des barèmes régionaux établis par la profession agricole (Chambre Régionale d'Agriculture). Cela permet une meilleure acceptation de la mise en défens par l'exploitant agricole locataire du site et de limiter la déstabilisation de l'entreprise agricole.

> **Circulation d'engins**

La **circulation de véhicules motorisés** sur un site réhabilité est à **éviter au maximum**. Une **concertation entre les différents usagers** (les alpagistes, les domaines skiabiles, etc.) est nécessaire pour permettre de **définir des zones où le passage d'engins est à éviter ou à proscrire** durant un certain temps.

Un **plan de circulation** peut être établi afin de **limiter le nombre de pistes utilisées** et ainsi **réduire l'impact sur la flore et les sols**.

> **Randonnée et pratique du VTT**

De la même manière, la proximité du site réhabilité avec des chemins de randonnée peut entraîner une fréquentation importante conduisant à un sur-piétinement.

Un sol récemment réhabilité est un sol sensible qui **doit être préservé de toute action érosive telle que le passage de VTT**.

Un **simple dispositif de communication (panneau de signalisation)** peut être mis en place afin d'éviter l'élargissement des sentiers à proximité des zones réhabilitées ou le passage de VTT.

> **Récurrence des travaux d'aménagement**

La **récurrence et l'intensité des travaux d'aménagement** sur un même secteur **limitent drastiquement le potentiel succès de la réhabilitation**.

"Remettre en état, c'est un investissement sur le long terme. C'est comme faire de l'enrobé ; on anticipe les travaux à venir et on n'y revient pas tous les 5 ans". Issu de l'entretien avec les alpagistes des Saisies.

Les alpagistes de La Plagne ont de grosses attentes sur le fait de ne pas retravailler les terrains régulièrement. "Beaucoup de terrains sont retravaillés tous les 5 ans (reprofilage, réseau neige, fibre, ...), c'est impossible de retrouver des surfaces en herbe productives et de qualité."

BIBLIOGRAPHIE

- Agranier M, Desbois G, Meillet-Lerat J, Pollet P, Postec C. 2010.** Le fromage de Beaufort.
- Amundson R, Jenny H. 1997.** On a State Factor Model of Ecosystems. *BioScience* **47**: 536–543.
- Aradottir AL. 2012.** Turf transplants for restoration of alpine vegetation: does size matter? *Journal of Applied Ecology* **49**: 439–446.
- Argenti G, Ferrari L. 2009.** Plant cover evolution and naturalisation of revegetated ski runs in an Apennine ski resort (Italy). *iForest - Biogeosciences and Forestry* **2**: 178.
- Baize D, Girard M-C. 2009.** *Référentiel pédologique 2008*. Editions Quae.
- Bajard M, Dorioz J-M, Sabatier P, Arnaud F, Giguët-Corvex C. 2019.** Evolution plurimillénaire des espaces pastoraux dans les Alpes Nord occidentales.
- Barberis D, Lombardi G, Ravetto Enri S, Pittarello M, Viglietti D, Freppaz M, Lonati M. 2023.** Nitrogen fertilizer enhances vegetation establishment of a high-altitude machine-graded ski slope. *Restoration ecology* **31**: n/a.
- Barni E, Freppaz M, Siniscalco C. 2007.** Interactions between Vegetation, Roots, and Soil Stability in Restored High-altitude Ski Runs in the Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **39**: 25–33.
- Bornard A, Bassignana M, Bernard-Brunet C, Labonne S, Cozic P. 2004.** La diversité végétale des alpages des Alpes internes françaises et italiennes. Influence du milieu et des pratiques.
- Breton S. 2016.** Impacts économiques et territoriaux des fromages AOP et IGP de Savoie.
- Casagrande Bacchiocchi S, Zerbe S, Cavieres LA, Wellstein C. 2019.** Impact of ski piste management on mountain grassland ecosystems in the Southern Alps. *Science of The Total Environment* **665**: 959–967.
- Collin J-F, Jourez B, Hébert J. 2006.** S'Y PRÉPARER ET GÉRER LA CRISE ! (1ÈRE PARTIE).
- Crosaz Y. 1995.** Lutte contre l'érosion des sols en montagne méditerranéenne : connaissance du matériel végétal et quantification de son impact sur l'érosion. : 243.
- Dinger F. 1997.** *Végétalisation des espaces dégradés en altitude*. Editions Quae.
- Dinger F. 2004.** De l'écologie théorique à l'ingénierie – Rôle de l'ingénieur écologue au Cemagref : l'exemple des domaines skiables.
- Direction paysage et biodiversité. 2021.** La charte de l'arbre.
- Dorioz J. 1998.** Alpages, prairies et pâturages d'altitude.
- Dorioz J-M, Poulenard J. 2017.** Alpages, prairies et pâturages d'altitude l'exemple du Beaufortain – La Grande Histoire des Alpages.
- DSF. 2020.** Eco-engagements collectifs des domaines skiables français.
- Dupin B, Malaval S, Coüeron G, Cambecèdes J, Largier G. 2019.** Restauration écologique des prairies et pelouses Pyrénéennes.
- Dupré La Tour A, Labatut J, Spiegelberger T. 2018.** Pratiques de revégétalisation de milieux ouverts et perspectives pour la constitution d'une filière de semences d'origine locale en montagne alpine. : 8.
- Efese. 2018.** efese_ecosystemes_rocheux_et_haute-montagne_cle0f3ab9.pdf.
- FCBA, ONF. 2009.** Guide pratique : Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt 'PROSOL'.
- Goutal N, Bottinelli N, Gelhaye D, Bonnaud P, Nourrisson G, Demaison J, Brêthes A, Capowiez Y, Lamy F, Johannes A, et al. 2013.** Le suivi de la restauration du fonctionnement de deux sols forestiers après tassement dans le Nord Est de la France. *Etude et Gestion des Sols*.

- Graf F, Bast A, Gärtner H, Yildiz A. 2019.** Effects of Mycorrhizal Fungi on Slope Stabilisation Functions of Plants. In: Wu W, ed. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Recent Advances in Geotechnical Research. Cham: Springer International Publishing, 57–77.
- Gros R, Jocteur Monrozier L, Bartoli F, Chotte JL, Faivre P. 2004.** Relationships between soil physico-chemical properties and microbial activity along a restoration chronosequence of alpine grasslands following ski run construction. *Applied Soil Ecology* **27**: 7–22.
- Hassid M-J, Arnould P, Wicherek S. 2006.** Évaluation du transfert des éléments traces métalliques vers les eaux superficielles – Application au terrassement et à la végétalisation des pistes de ski. : 14.
- Huc S, Arlandis J, Dupré Latour A, Rouillon A, Spiegelberger T. 2018.** SEM'LESALPES - Des semences d'origine locale pour la restauration de milieux ouverts en montagne alpine.
- Isselin-Nondedeu F, Rey F, Bédécarrats A. 2006.** Contributions of vegetation cover and cattle hoof prints towards seed runoff control on ski pistes. *Ecological Engineering* **27**: 193–201.
- Kangas K, Tolvanen A, Kälkäjä T, Siikamäki P. 2009.** Ecological Impacts of Revegetation and Management Practices of Ski Slopes in Northern Finland. *Environmental Management* **44**: 408–419.
- Khedim N. 2022.** Dynamiques de la matière organique des sols de montagne : analyse de chronoséquences et de climatoséquences.
- Koch E-M, Spiegelberger T, Barrel A, Bassignana M, Curtaz A. 2015.** Les semences locales dans la restauration écologique en montagne.
- Koscielny M. 2008.** Impacts des aménagements en montagne sur les processus hydrologiques et l'évolution géodynamique des versants (Les Arcs).
- Krautzer B, Uhlig C, Wittmann H. 2012.** Restoration of Arctic–Alpine Ecosystems. In: van Andel J, Aronson J, eds. Restoration Ecology. Wiley, 189–202.
- Krautzer B, Wittmann H. 2006.** Restoration of alpine ecosystems.
- Lignier C, Rosset O. 2012.** Le Guide européen de l'hydroseeding.
- Limpitlaw D, Briel A. 2014.** Post-mining land use opportunities in developing countries—a review. **114**.
- Magnin V. 2003.** Géotextiles et végétalisation: étude et modélisation des conditions microclimatiques au voisinage du sol et de leur influence sur les espèces semées. : 211.
- Malaval S, Dupin B, Dantin G. 2015.** Conservation et restauration de la flore dans un contexte anthropisé, quelles solutions ? : *Sciences Eaux & Territoires Numéro 16*: 70–75.
- Mazoyer P. 2022.** Caractérisation des mesures compensatoires: développement d'une grille de lecture pour rationaliser la prise en compte des incertitudes liées aux techniques d'ingénierie écologique et au délai de réalisation.
- Meisser M, Deléglise C, Frey C, Mosimann E. 2013.** Pâturage mixte bovins - ovins en moyenne montagne : trois années d'essai dans le Jura suisse. : 9.
- OFED, Bellini E. 2015.** Sols et constructions. État de la technique et des pratiques.
- Pintaldi E, Hudek C, Stanchi S, Spiegelberger T, Rivella E, Freppaz M. 2017.** Sustainable Soil Management in Ski Areas: Threats and Challenges. *Sustainability* **9**: 2150.
- Pohl M, Alig D, Körner C, Rixen C. 2009.** Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant and Soil* **324**: 91–102.
- Poncet A. 1978.** De l'ouverture des pistes à ski par défrichement dans les forêts de montagne. *Revue Forestière Française*: 392.
- Poulenard J, Podwojewski P. 2006.** Alpine soils.

- Rohand K, Molle MV, Herbauts J, Verbrugge J-C. 2000.** Effets du débardage sur les propriétés physiques et mécaniques d'un sol lessivé sur loess en Forêt de Soignes. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*
- Rul A. 2017.** Paysages et aménagements en montagne: domaines skiabiles, problématiques et préconisations. Cas de la vallée de Chamonix.
- Schmid T, Mueller U, Tognini F, Meyer J. 2007.** Comparaison of revegetation techniques on alpine slopes prone to avalanches and erosion.pdf.
- Scotton M. 2021.** Grassland Restoration at a Graded Ski Slope: Effects of Propagation Material and Fertilisation on Plant Cover and Vegetation. *Agriculture* **11**: 381.
- Svensk M, Mariotte P, Frund D, Probo M. 2022** Alpagnes embroussaillés et vaches Highland.
- Thomas S. 2012.** Méthodes de végétalisation dans la restauration écologique de sites miniers.
- Van der Heijden MGA, Klironomos JN, Ursic M, Moutoglis P, Streitwolf-Engel R, Boller T, Wiemken A, Sanders IR. 1998.** Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* **396**: 69–72.
- Wipf S, Rixen C, Fischer M, Schmid B, Stoeckli V. 2005.** Effects of ski piste preparation on alpine vegetation. *Journal of Applied Ecology* **42**: 306–316.