

Concilier le pâturage avec la restauration écologique des prairies d'altitude

F. Isselin-Nondedeu, A. Bédécarrats

Les stations de sports d'hiver illustrent bien la notion de multifonctionnalité des prairies car elles partagent leur domaine avec des activités agropastorales. Cependant, une grande partie de ces prairies sont dégradées, notamment par la construction des pistes de ski. Le pâturage peut-il être inclus dans le processus de restauration écologique des pistes de ski ?

RÉSUMÉ

Une revue bibliographique rappelle les effets du pâturage sur le sol et la végétation des prairies. Les résultats de plusieurs études menées sur des pistes de ski de La Plagne en Savoie montrent que le pâturage bovin peut agir positivement sur la dynamique de restauration. Les effets négatifs du piétinement sur le sol peuvent être compensés par le piégeage de sédiments et de graines dans les empreintes de sabots. Une grande part de ces graines est directement liée à un transport par les animaux. Le pâturage contribue ainsi à la diversification de la végétation, au niveau spécifique et fonctionnel. Le potentiel fourrager est maximal sur les pistes restaurées depuis 4 à 8 ans. Ces résultats soulignent l'importance d'inclure la gestion pastorale dans le processus de restauration écologique.

MOTS CLÉS

Alpes, évolution, multifonctionnalité, pâturage, pâturage de montagne, pâturage extensif, prairie de montagne, semis, végétation.

KEY-WORDS

Alps, evolution, extensive grazing, grazing, multi-functionality, seeding, upland grazing, upland pasture, vegetation.

AUTEURS

Cemagref, Unité de Recherche Ecosystèmes Montagnards, Campus Universitaire Grenoble 1 ; 2, rue de la Papeterie, BP 76, F-38402 Saint Martin d'Hères cedex ; francis.isselin@libertysurf.fr

Présentation

■ Les alpages, des espaces en mutation

Les alpages sont des systèmes herbacés complexes qui conjuguent une grande richesse biologique avec une diversité des pratiques pastorales (BORNARD *et al.*, 2004 ; JOUGLET *et al.*, 1992). Dans un monde de plus en plus urbanisé, les montagnes avec leurs alpages constituent des centres d'attraction majeurs pour le tourisme et les loisirs. En conséquence, de nombreuses prairies de montagne subissent de profondes modifications au niveau des usages et des pratiques (ANTHELME *et al.*, 2001 ; AUSTRHEIM *et al.*, 1999). Ces changements dans l'utilisation des territoires sont inclus dans la définition même du changement global (*global change*) et en sont l'une des composantes majeures (VITOUSEK *et al.*, 1997).

Ainsi, depuis la fin des années 1960, on assiste à deux phénomènes conjoints : d'une part, le recul des pratiques pastorales de montagne, consécutif à la déprise agricole amorcée dès la seconde guerre mondiale, d'autre part, l'accentuation de la pression anthropique (BÄTZING *et al.*, 1996).

Les grands aménagements de montagne comme les stations de sports d'hiver affectent considérablement le fonctionnement des alpages. Le réseau des pistes de ski, qui couvrent plusieurs centaines de kilomètres, et ses infrastructures modifient le paysage, le fonctionnement écologique des alpages et leur mode de gestion agropastorale. La végétation des alpages est détruite ou profondément perturbée lors de la construction des pistes de ski. De plus, les horizons superficiels du sol sont décapés et les processus d'érosion se développent rapidement en raison des fortes pentes.

■ La restauration des alpages dégradés

La **restauration écologique** est définie comme toute activité intentionnelle qui initie ou accélère la reconstitution d'un écosystème ayant été dégradé, gravement endommagé ou détruit (définition de la société internationale d'écologie de la restauration ; S.E.R., 2004). L'objectif est de stopper la dégradation et de remettre l'écosystème dégradé sur une trajectoire le conduisant vers un état proche de son état initial.

Parce que les stations de sports d'hiver partagent le plus souvent le domaine skiable avec les exploitations agropastorales, **l'enjeu** de la restauration écologique des pistes de ski est de **restituer la multifonctionnalité des prairies d'altitude**. Il s'agit en effet de rétablir une fonction de lutte contre l'érosion et de stabilisation du sol, une fonction de cicatrization au niveau du paysage, et une fonction pastorale.

Le but des opérations de revégétalisation est de reconstituer un couvert herbacé sur ces terrains dégradés. Les opérations doivent comporter plusieurs étapes successives afin de garantir le succès de la restauration (DINGER, 1997) :

- terrassements pour la lutte contre le ruissellement de surface ;

- travail du sol (avec apports d'amendements organiques ou chimiques) ;
- semis (à la volée ou par hydro-seeding) ;
- entretien des parcelles restaurées.

Les semences utilisées pour la restauration sont composées d'espèces et de variétés allochtones plus ou moins bien adaptées aux conditions de la montagne. Dans tous les cas, la grande majorité de ces espèces présente une bonne valeur fourragère. On retrouve parmi les mélanges actuels différentes variétés de fétuque rouge (*Festuca rubra* L.), de fléole des près (*Phleum pratense* L.), de dactyle (*Dactylis glomerata* L), de ray-grass anglais (*Lolium perenne* L.), de trèfle blanc et de trèfle violet (*Trifolium repens* L., *T. pratense* L.), de lotier (*Lotus corniculatus* L.) et de sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.). Ces espèces constituent le mélange de base d'une prairie artificielle et temporaire qui, tout en assurant ses fonctions, doit peu à peu céder la place à la végétation spontanée.

Cependant, la **restauration effective** de la structure et du fonctionnement des alpages est **difficile** (FORBES et JEFFERIES, 1999 ; URBANSKA, 1997). Les dynamiques de reconstitution de la végétation sont lentes ; le taux de couverture végétale ainsi que les niveaux de diversité sont souvent faibles, même après de nombreuses années. Il faut par exemple une trentaine d'année après le semis pour retrouver une prairie comportant 50-60% des espèces présentes dans les prairies pâturées adjacentes (ISSELIN-NONDEDEU et BÉDÉCARRATS, 2002). Les causes sont multiples : contraintes climatiques, sols facilement érodables sur les fortes pentes, déficit de la banque de graines.

■ Des interactions avec le pâturage

Le pâturage est généralement exclu des opérations de restauration et durant les deux à trois années qui suivent la mise en place de la prairie temporaire. Par la suite, le pâturage ou la fauche est reconduit sur ces prairies restaurées. De plus, ces prairies à forte valeur fourragère vont être pâturées par des herbivores domestiques ou sauvages. Dans une optique de gestion de ces milieux, il est nécessaire de connaître les contributions du pâturage au processus de restauration écologique, et de **déterminer si le pâturage peut représenter une entrave à la restauration de la végétation des pistes de ski**.

La question prend toute son importance si l'on considère les surfaces communes aux activités pastorales et touristiques. En Haute-Savoie, par exemple, près d'un tiers des surfaces en alpage se fondent avec les domaines skiables (enquête pastorale Rhône-Alpes 1996 ; Cemagref). Il apparaît donc important de comprendre les interactions entre le pâturage et les processus de restauration des prairies d'altitude.

Nous présentons dans une première partie une analyse des effets du pâturage sur le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes prairiaux. Les recherches en bio-géomorphologie permettent de préciser les conséquences du pâturage sur le fonctionnement des sols. De

plus, la compréhension des interactions entre le pâturage et les modes de régénération des plantes doit permettre de comprendre les phases clés dans la dynamique de reconstitution des prairies dégradées. La deuxième partie de cet article présente les résultats de plusieurs travaux menés dans le domaine skiable de La Plagne en Savoie.

Effets du pâturage sur le fonctionnement et la dynamique des prairies. Synthèse bibliographique

1. Les effets du pâturage sur le sol

Le piétinement par les troupeaux modifie la structure et le fonctionnement du sol. Tout d'abord, la pression exercée par les sabots lors du déplacement des troupeaux laisse des microdépressions sur le sol qui modifient ainsi sa morphologie (HALL *et al.*, 1999). L'ampleur de ces modifications dépend naturellement de la charge animale sur les parcelles, mais les effets sont très variables autant pour les herbivores domestiques que pour les herbivores sauvages. Le piétinement entraîne sur les pentes une déstabilisation du sol et une augmentation de **l'érosion** (GOVERS et POESEN, 1998 ; HALL et LAMONT, 2003 ; TASSER et TAPPEINER, 2002 ; TRIMBLE et MENDEL, 1995). La plupart des études montrent une augmentation de la production de sédiments en aval des systèmes pâturés (ROATH et KRUEGER, 1982 ; WOOD et BLACKBURN, 1991). Lorsque le sol comprend une grande part d'argile, c'est le glissement des sabots qui altère la surface du sol (SERRATE, 1978). Avec des effets variables sur les processus érosifs, le piétinement entraîne également **une compaction** du sol (HALL et LAMONT, 2003). Celle-ci diminue le taux d'infiltration de l'eau dans le sol ainsi que la prospection racinaire des plantes. Cependant, **le piétinement par le bétail peut aussi contribuer à diminuer l'érosion hydrique**. Ainsi, le piétinement des touffes de graminées peut favoriser le tallage et l'enracinement des stolons, et donc améliorer le recouvrement par la végétation. En climat semi-aride, une diminution du ruissellement de surface a pu être observée en comparaison des zones non perturbées par les activités des herbivores (GUTTERMAN, 2003). Le pâturage modifie également **la fertilité** et la nature chimique du sol. En effet, au travers des processus de l'herbivorie, de la digestion et de l'excrétion, les taux de décomposition de la matière organique et la disponibilité des nutriments du sol sont globalement augmentés. Cependant, les résultats sont contradictoires et très dépendants de l'environnement. La fertilité azotée peut être moindre dans les zones pâturées que dans des systèmes non pâturés, notamment à cause des pertes dues à l'érosion et au lessivage (FRANK *et al.*, 1995).

2. Les effets du pâturage sur la végétation

Le pâturage affecte la végétation de manière directe de par les effets de l'herbivorie et de manière indirecte de par ses effets sur le sol.

Les herbivores jouent un rôle important dans la **dissémination des semences et la régénération de certaines espèces** de plantes. GUTTERMAN (2003) a ainsi montré en zone semi-aride que la surface du sol perturbée par le piétinement des herbivores pouvait retenir des graines et régénérer certaines espèces. HARPER (1977) a décrit une étude dans laquelle l'établissement des plantules de certaines espèces était favorisé dans les zones piétinées par le bétail. En revanche, cet effet positif sur la régénération n'a pas été retrouvé dans les milieux d'altitude (STAMMEL et KIEHL, 2004). Les herbivores participent également à la dispersion des plantes. Par exemple, les fruits, les épis et les graines ingérés sont excrétés *via* les fèces et sont ainsi disséminés (FISCHER *et al.*, 1996 ; STILES, 2000). Le passage au travers du tractus intestinal favorise également le pouvoir germinatif de certaines espèces, notamment les légumineuses. Le transport des graines peut aussi être assuré sur de plus ou moins grandes distances par la fourrure des bovins ou des ovins (COUVREUR *et al.*, 2004 ; FISCHER *et al.*, 1996). Ces processus de colonisation favorisent **l'accroissement de la diversité biologique des prairies** (TRABA *et al.*, 2003).

Par ailleurs, la consommation des plantes et l'impact du piétinement ouvrent la strate herbacée favorisant la colonisation par d'autres espèces (BULLOCK *et al.*, 1995) et la germination des graines. Dans ces conditions, **certains types fonctionnels de plantes sont favorisés** par rapport à d'autres (LAVOREL *et al.*, 2004). La diversité spécifique des prairies pâturées est généralement plus grande que dans les milieux non pâturés (CRAWLEY, 1997 ; HOWE, 1994 ; NOY-MEIR *et al.*, 1989), mais parfois inférieure (OLFF et RITCHIE, 1998).

Effets du pâturage sur la dynamique de restauration des pistes de ski

1. Le site d'étude

Les parcelles étudiées se situent sur le domaine skiable de La Plagne en Savoie, dans les Alpes du Nord, en bordure du massif de la Vanoise. Les alpages sont dans la zone de production protégée par l'A.O.C. du Beaufort en vallée de la Tarentaise. Les races utilisées sont uniquement la Tarine et l'Abondance. La période en alpage s'étale de début juin à la mi-octobre. Plusieurs troupeaux se partagent ainsi le domaine, pâturant sur les alpages "naturels" et les prairies reconstituées sur les pistes de ski. Le niveau de **chargement moyen** sur les différentes parcelles depuis une quinzaine d'année varie en moyenne **de 0,6 à 0,9 UGB/ha. Le pâturage a été mis en place 2 à 3 ans après les opérations de restauration.**

L'ensemble des parcelles retenues pour les études sont réparties dans l'étage bioclimatique du subalpin moyen à supérieur, entre 1 900 m et 2 400 m d'altitude. Les expositions sont globalement de nord, nord-est, à est. Les précipitations moyennes sur le site d'étude sont de 1 165 mm avec une température moyenne annuelle de 2,7°C. Trois principaux substrats géologiques sont présents sur l'ensemble du domaine : des quartzites, compactes, acidifiantes ; des gypses, friables, alcalinisants ; et des serpentinites aux propriétés intermédiaires.

Dans cet article, nous présentons la synthèse de résultats d'études expérimentales dans lesquelles nous avons analysé les conséquences du pâturage sur des prairies subalpines en cours de restauration, dans le but d'**examiner les effets i) sur le sol, ii) au niveau de la colonisation par les plantes, iii) sur la végétation en place.**

2. Résultats et discussion

■ L'impact du piétinement diminue l'érosion en retenant l'eau et les sédiments au long de la pente

Nous avons mesuré l'accumulation de sédiments et de matériaux à l'intérieur des empreintes de sabots laissées par les vaches sur le sol de plusieurs pistes de ski. Ces pistes sont caractérisées par de fortes pentes de l'ordre de 30 à 35° sur un substrat très friable (gypse, cargneule).

Les résultats ont mis en évidence que **les empreintes de sabots se comportaient comme des pièges à sédiments** (figure 1), et ceci quel que soit le recouvrement de la végétation et le cumul des précipitations.

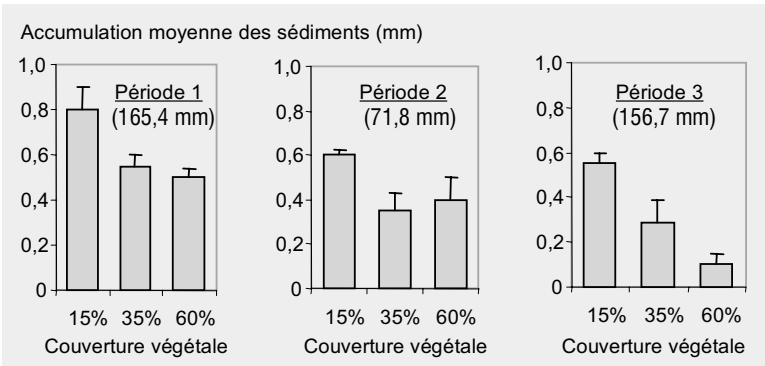


FIGURE 1 : Accumulation de sédiments dans les empreintes de sabots de vaches (n=25 ; moyenne et écart-type) après 3 périodes de précipitations (automne 2002).

FIGURE 1 : Sediment deposits in cow hoof prints (n=25 ; means and standard deviations) after 3 periods of precipitation (autumn 2002).

Si le piétinement augmente l'érosion en déstabilisant le sol, les résultats montrent que ce phénomène peut être contrebalancé par l'effet de piégeage des empreintes. Ce résultat est en accord avec les résultats trouvés par GUTTERMAN (2003). Par ailleurs, le moteur du mouvement des sédiments sur les pentes est l'eau qui ruisselle en surface. Celle-ci peut être piégée plus ou moins longtemps par les empreintes de sabots pour former des micro "retenues d'eau" (observations personnelles). Cette situation est une conséquence directe d'une augmentation de la compaction du sol et d'une diminution localisée de sa perméabilité. Dans ces conditions, la quantité d'eau de ruissellement de surface et, en conséquence, l'érosion à l'échelle de la parcelle sont réduites (GUTTERMAN, 2003). Ce qui peut expliquer que certaines zones pâturées pouvaient fournir moins de sédiments que les prairies abandonnées (TASSER *et al.*, 2003).

■ Le pâturage favorise la formation de banques de graines dans les prairies en voie de restauration

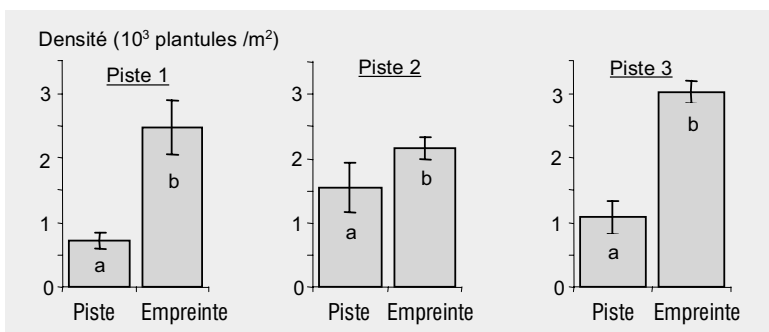
La formation des banques de graines se réalise de deux façons : par piégeage de graines dans les empreintes de sabots ou par importation de graines.

- Le piégeage de graines

Après avoir prélevé du sol dans des empreintes de sabots laissées par les vaches et du sol en périphérie sur différentes pistes de ski, les échantillons ont été placés en chambre de germination. Nous avons donc pu dénombrer et identifier les plantules. La comparaison entre les échantillons est représentée dans la figure 2 (Piste 1 : 15% de recouvrement de la végétation ; Piste 2 : 35% ; Piste 3 : 60%). Les empreintes ont agi comme des pièges à graines. A l'intérieur des empreintes, le sol contenait en moyenne 2 à 4 fois plus de graines que le sol en périphérie. Les graines proviennent d'espèces du couvert végétal en place sur les pistes de ski ou des prairies adjacentes.

FIGURE 2 : Densité moyenne de plantules de la banque de graines ayant germé dans le sol recueilli dans les empreintes de sabots en comparaison avec le sol nu (n=25 ; les lettres indiquent les différences significatives au seuil de 5%, T test).

FIGURE 2 : *Mean seedling densities from soil seed banks in cow hoof prints and in bare soil (n=25 ; letters indicate significant difference at $p=0.05$).*



Les résultats obtenus sur ce site d'étude montrent ainsi que les empreintes de sabots jouent un rôle : 1) dans les modèles de dispersion des graines, comme cela a été montré en milieu semi-aride (GUTTERMAN, 1997), 2) dans la régénération de certaines espèces, en permettant par la suite aux graines piégées de germer. L'analyse des banques de graines viables ainsi que les observations de nombreuses germinations *in situ* dans les empreintes de sabots contredisent les observations faites dans les prairies d'altitude. Notamment STAMMEL et KIEHL (2004) ont montré que les empreintes de sabots laissées par le bétail dans des pelouses calcaires n'avaient pas d'effets significatifs sur la régénération des plantes.

- L'importation de graines

Nous avons identifié par la suite les principaux vecteurs de dispersion des graines retrouvées dans ces banques de semences. Les critères retenus pour les analyses étaient les traits de dispersion tels que : l'anémochorie, la zoochorie, et la barochorie.

La proportion moyenne des espèces zoochores dans les banques de graines du sol est largement prépondérante par rapport

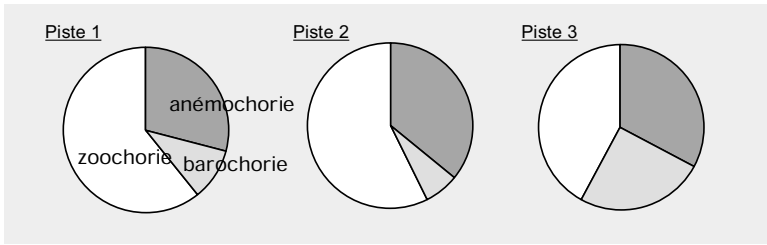


FIGURE 3 : Proportions des différents types de dissémination des graines ayant germé de la banque de graines du sol de 3 pistes de ski (n=25 ; moyennes).

FIGURE 3 : Proportions of the various types of seed dispersal from the soil seed banks of 3 ski trails (n=25 ; means).

aux autres types (figure 3). Même si la nature des vecteurs animaux est difficilement attribuable, ces résultats mettent en avant la contribution des grands herbivores dans l'importation de graines sur les pistes de ski en cours de restauration. De nombreuses études ont montré que la colonisation de différents habitats peut être assurée par le bétail, par exemple par le transport des graines via le pelage (épizoochorie) des moutons (COUVREUR *et al.*, 2004 ; FISCHER *et al.*, 1996 ; POSCHOLD et WILLERDING, 2002 ; SHMIDA et ELLNER, 1983). Cependant, dans le cas présent, la plupart des espèces concernées sont des légumineuses provenant des prairies adjacentes soutenant davantage une hypothèse d'endozoochorie.

■ Le pâturage contribue à la diversification spécifique et fonctionnelle des prairies en voie de restauration

- Contributions des types fonctionnels liés au pâturage

D'après des bases de données (DIAZ *et al.*, 2001 ; GRIME *et al.*, 1988 ; JOUGLET *et al.*, 1992), nous avons construit des groupes d'espèces à partir de traits biologiques jouant sur le mode de dissémination et le comportement vis-à-vis du pâturage (capacité de repousse après coupes, palatabilité).

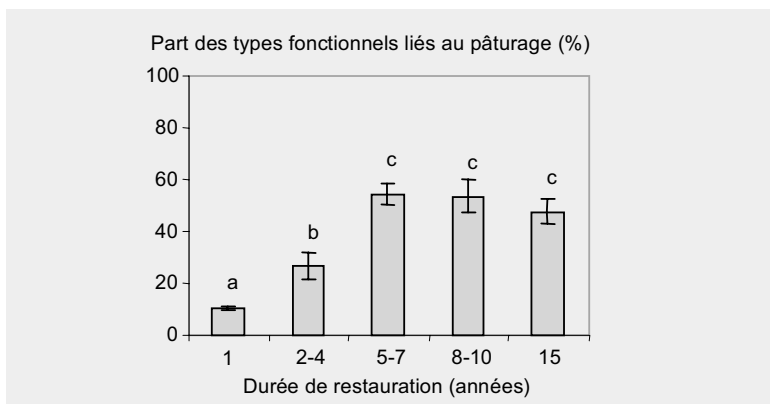
Les espèces ont été identifiées et inventoriées par la méthode du relevé linéaire dans la végétation de pistes de ski. Les pistes retenues pour l'analyse sont réparties sur différents substrats et ont été restaurées à diverses dates. Les classes d'âge depuis les opérations de restauration sont les suivantes : A : 1 an (n = 8), B : de 2 à 4 ans (n = 12), C : de 5 à 7 ans (n = 9), D : de 8 à 10 ans (n = 10), E : 15 ans (n = 13). Les pistes de la classe A n'ont subi qu'un pâturage ponctuel lors du transit des troupeaux d'une parcelle à une autre. Au niveau des variables environnementales, les pentes sont régulières, de l'ordre de 25° à 30°, et les épaisseurs de sol de 10 à 25 cm maximum.

L'analyse de la variance ne montre pas d'effet du substrat géologique sur la part des types fonctionnels de plantes liés au pâturage (ddl : 2, F = 2,39, p = 0,111). En revanche, l'âge des pistes restaurées affecte cette proportion (ddl : 4, F = 27,87, p = 0 ; figure 4).

La proportion des types fonctionnels de plantes spécifiquement liés au pâturage va en augmentant au cours des années qui suivent les opérations de restauration. Les valeurs sont assez importantes puisque, après 5 ans, environ la moitié des espèces de

FIGURE 4 : Evolution de la proportion des types fonctionnels de plantes en relation avec le pâturage selon la durée de restauration des pistes de ski (moyennes et erreurs standards ; les lettres indiquent les différences significatives au seuil de 5%, test LSD)

FIGURE 4 : **Proportions of plant functional types related to grazing according to age of restoration of ski trails** (means and standard deviations ; letters indicate significant difference at $p=0.05$; least significant differences).



la végétation en place appartient à ces types de plantes. Comme cela a été trouvé pour d'autres types de prairies, les effets du pâturage et du piétinement tendent ainsi à favoriser la diversité fonctionnelle à l'échelle de la prairie (BULLOCK *et al.*, 1995 ; GIGON et LEUTERT, 1996 ; LAVOREL *et al.*, 2004).

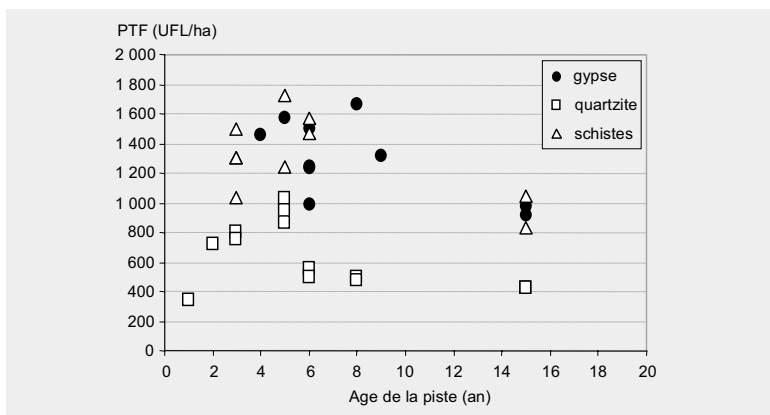
- Evolution du potentiel fourrager des pistes de ski restaurées

Une analyse factorielle des correspondances a été conduite entre les facteurs caractérisant la structure de la végétation : richesse spécifique, indice de Shannon, indice d'équitabilité (*eveness* = équilibre de la distribution des espèces), ainsi que l'âge depuis les dernières opérations de revégétalisation et le type de substrat. La méthode de dénombrement des espèces est celle du relevé linéaire, qui a également permis d'évaluer le **potentiel théorique fourrager (PTF) des pistes restaurées** (COZIC, 1987 ; DAGET et POISSONET, 1969). Les résultats de l'analyse mettent en évidence les relations significatives entre le PTF, l'âge des pistes restaurées ($n = 33$; $r = -0,39$; $p = 0,046$), l'indice d'équitabilité ($r = 0,51$; $p = 0,04$), la richesse spécifique ($r = 0,42$; $p = 0,015$) et la nature du substrat ($r = -0,71$; $p = 0,001$). Ce dernier facteur discrimine fortement les différentes pistes de ski.

Une analyse détaillée de l'évolution du PTF en fonction des années de restauration et de la nature géologique du substrat (figure 5) montre que **les valeurs maximales sont atteintes sur les pistes de 4 à 8 ans**.

FIGURE 5 : Evolution du potentiel théorique fourrager sur les pistes de ski restaurées.

FIGURE 5 : **Evolution of the theoretical forage potential on the restored ski trails.**



Les valeurs minimales de PTF sont observées pour les pistes restaurées sur quartzites.

Ces valeurs sont proches des valeurs déterminées pour les types de végétation du massif de la Vanoise (BORNARD *et al.*, 2004). On retrouve, selon cette typologie, des plus faibles aux plus fortes valeurs fourragères : les pelouses subalpines à nard raide (sur quartzite), à sainfoin (utilisé pour la restauration), à fétuque rouge et à dactyle aggloméré. Les valeurs de biodiversité des prairies restaurées (richesse spécifique et équitabilité) expliquent une part importante du potentiel fourrager. De nombreuses études (LAVOREL *et al.*, 2004 ; McNAUGHTON, 1993 ; TILMAN, 1999) montrent ainsi **une relation positive entre diversité et productivité**. La relation avec l'indice d'équitabilité souligne spécifiquement le rôle notable de répartition des taxons dans les communautés végétales plus que celui du nombre d'espèces (HOOPER, 1998).

Conclusion

Les résultats de nos études confirment le rôle positif du pâturage vis-à-vis du maintien de la diversité végétale ou dans son augmentation (CRAWLEY, 1997 ; HOWE, 1994 ; NOY-MEIR *et al.*, 1989). **Le pâturage favorise la coexistence entre les types fonctionnels de plantes et en conséquence entre les diverses espèces**. Le pâturage pourrait donc **être préconisé pour** la plupart des **domaines skiables**. Quelle que soit la situation, **la charge animale doit être respectée** en fonction du potentiel théorique fourrager afin de ne pas déséquilibrer ces relations de coexistence ni augmenter les phénomènes d'érosion. De plus, les résultats des différentes études illustrent **le rôle positif** que peut jouer le pâturage **au tout début du processus de la restauration** écologique. Un pâturage extensif peut donc être envisagé les premières années après les opérations de restauration. Il peut également être préconisé avant même les opérations de semis, permettant i) aux empreintes de sabots de jouer leur rôle de pièges à graines, ii) également un premier apport de matières organiques par les fèces et iii) un apport de graines par endo ou épizoochorie. Il faut remarquer que très peu d'études pastorales se focalisent sur les relations étroites entre les pistes de ski restaurées et le pâturage, au niveau de la charge animale à préconiser et de son optimisation, au niveau du taux de production végétale et de l'évolution de la composition spécifique et fonctionnelle. Pourtant, en plus d'être des milieux originaux en termes de structure et de fonctionnement, les pistes de ski restaurées occupent des surfaces pâturées conséquentes selon les domaines skiables. Ces milieux représentent **un des challenges majeurs pour la gestion durable des territoires de montagne**. La gestion doit maintenir la multifonctionnalité de ces milieux qui sont au carrefour des préoccupations écologiques, agricoles, pastorales et socio-économiques.

Accepté pour publication,
le 24 avril 2006.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANTHELME F., GROSSI J.L., BRUN J.J., DIDIER L. (2001) : "Consequences of green alder expansion on vegetation changes and arthropod communities removal in the northern French Alps", *Forest. Ecol. and Manag.*, 145, 57-65.
- AUSTRHEIM G., GUNILLA E., GRONTVEDT E. (1999) : "Land-use impact on plant communities in semi-natural subalpine grassland of Budalen, central Norway", *Biol. Conserv.*, 87.
- BÄTZING W., PERLIK M., DEKLEVA M. (1996) : "Urbanization and depopulation in the Alps", *Mt. Res. Dev.*, 16, 335-350.
- 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", *Fourrages*, 178, 153-170.
- BULLOCK J.M., CLEAR HILL B., SILVERTOWN J., SUTTON M. (1995) : "Gap colonization as a source of grassland community change : effects of gap size and grazing on the rate and mode of colonization by different species". *Oikos*, 72, 273-282.
- COUVREUR, M., CHRISTIAEN, B., VERHEYEN, K., HERMY, M. (2004) : "Large herbivores as mobile links between isolated nature reserves through adhesive seed dispersal", *App. Veg. Sci.*, 7, 229-236.
- COZIC P. (1987) : "Une méthode de diagnostic pastoral : de la composition de la végétation à la charge animale à préconiser", *Exploitation de pelouses et landes subalpines par des bovins et des ovins*, Rep. n°. 211, Cemagref, Grenoble.
- CRAWLEY M.J. (1997) : "Plant-herbivore dynamics", *Plant ecology* (ed M.J. Crawley), pp. 401-474, Blackwell Science, London.
- DAGET P. POISSONET J. (1969) : "Analyse phytologique des prairies. Applications agronomiques", Rep. n° 48, CNRS-CEPE, Montpellier.
- DIAZ S., NOY-MEIR I., CABIDO M. (2001) : "Can grazing response of herbaceous plants be predicted from simple vegetative traits ?", *J. Ecol.*, 38, 497-508.
- DINGER F. (1997) : *Végétalisation des espaces dégradés en altitude*, Cemagref éditions, Grenoble.
- FISCHER S.F., POSCHLOD P., BEINLICH B. (1996) : "Experimental studies on the dispersal of plants and animals on sheep in calcareous grasslands", *J. Appl. Ecol.*, 33, 1206-1222.
- FORBES B.C., JEFFERIES R.L. (1999) : "Revegetation of disturbed arctic sites : constraints and applications", *Biol. Conserv.*, 88, 15-24.
- FRANK A.B., TANAKA D.L., HOFMANN L., FOLLETT R.F. (1995) : "Soil carbon and nitrogen of Northern Great-Plains grasslands as influenced by long-term grazing", *J. Range. Manage.*, 48, 470-474.
- GIGON A. LEUTERT A. (1996) : "The dynamic keyhole-key model of coexistence to explain diversity of plants in limestone and other grasslands", *J. Veg. Sci.*, 7, 29-40.
- GOVERS G., POESEN J. (1998) : "Field experiments on the transport of rock fragments by animal trampling on scree slopes", *Geomorphology*, 23, 193-203.
- GRIME J.P., HODGSON J.G., HUNT R. (1988) : *Comparative Plant Ecology : a functional approach to common British species*, Unwin Hyman, London.
- GUTTERMAN Y. (1997) : "Ibex diggings in the Negev Desert highlands of Israel as microhabitats for annual plant. Soil salinity, location and digging depth affecting variety and density of plant species", *J. Arid. Environ.*, 37, 665-681.
- GUTTERMAN Y. (2003) : "The influences of animal diggings and runoff water on the vegetation in the Negev Desert of Israel", *Isr. J. Plant Sci.*, 51, 161-171.
- HALL K., BOELHOUWERS J., DRISCOLL K. (1999) : "Animals as erosion agents in the alpine zone : some data and observations from Canada, Lesotho, and Tibet", *Arct. Ant. Alp. Res.*, 31, 436-446.
- HALL K. LAMONT N. (2003) : "Zoogeomorphology in the Alpine : some observations on abiotic-biotic interactions", *Geomorphology*, 55, 219-234.
- HARPER J.L. (1977) : *Population biology of plants*, Academic Press, London.

- HOOPER D.U. (1998) : "The role of complementarity and competition in ecosystem responses to variation in plant diversity", *Ecology*, 79, 704-719.
- HOWE H.F. (1994) : "Managing species diversity in tallgrass prairie : assumptions and implications", *Conserv. Biol.*, 8, 691-704.
- ISSELIN-NONDEDEU F. BÉDÉCARRATS A. (2002) : "De la restauration des écosystèmes perturbés à la restauration de la biodiversité : l'exemple des pistes de ski, la Plagne, Savoie", *Proc. french-speaking meetings of biodiversity conservation (JFCB)*, Villeurbanne (France), pp 50-52.
- JOUGLET J.P., BORNARD A., DUBOST M. (1992) : *Eléments de pastoralisme montagnard, rapport Cemagref*, Grenoble.
- LAVOREL S., QUÉTIÉ F., GAUCHERAND S., CHOLER P. (2004) : "Apports des traits fonctionnels végétaux pour l'évaluation écologique des trajectoires de gestion en milieux prairiaux", *Fourrages*, 178, 179-191.
- MCCAUGHTON S.J. (1993) : "Biodiversity and function of grazing ecosystems", *Biodiversity and ecosystem function.*, vol. 99.
- NOY-MEIR I., GUTMAN M., KAPLAN Y. (1989) : "Responses of Mediterranean grassland plants to grazing and protection". *J. Ecol.*, 77, 290-310.
- OLFF H., RITCHIE M.E. (1998) : "Effects of herbivores on grassland plant diversity", *Trends Ecol. Evol.*, 13, 261-265.
- POSCHOLD P., WILLERDING C. (2002) : "Does seed dispersal by sheeep affect the the population genetic structure of the calcareous grassland species *Bromus erectus* ?", *Biol. Conserv.*, 104, 329-337.
- ROATH L.R., KRUEGER W.C. (1982) : "Cattle grazing influence on a mountain riparian zone", *J. Range. Manage.*, 35, 100-103.
- S.E.R. (2004) : *The SER International primer on ecological restoration* (http://www.ser.org/content/ecological_restoration_primer.asp), Society for ecological restoration international science and policy group.
- SERRATE C. (1978) : *Dynamique des versants de haute montagne : Andes centrales péruviennes, Alpes Briançonnaise*, thèse de Doctorat, Paris VII, Paris.
- SHMIDA A. ELLNER S. (1983) : "Seed dispersal on pastoral grazers in open Mediterranean chaparral", *Isr. J. Bot.*, 32, 147-159.
- STAMMEL B., KIEHL K. (2004) : "Do hoof prints actually serve as a regeneration niche for plant species in fens?", *Phytocoenologia*, 34, 271-286.
- STILES E.W. (2000) : "Animals as seed dispersers", *Seeds : the ecology of regeneration in plant communities*, ed. M. Fenner, ABI Publishing, New York, pp. 111-124.
- TASSER E., MADER M., TAPPEINER U. (2003) : "Effects of land use in alpine grasslands on the probability of landslides", *Basic Appl. Ecol.*, 4, 271-280.
- TASSER E., TAPPEINER U. (2002) : "Impact of land use changes on mountain vegetation", *App. Veg. Sci.*, 5, 173-184.
- TILMAN D. (1999) : "The ecological consequences of changes in biodiversity : A search for general principles", *Ecology*, 80, 1455-1474.
- TRABA J., LEVASSOR C., PECO B. (2003) : "Restoration of Species Richness in Abandoned Mediterranean Grasslands : Seeds in Cattle Dung", *Restor. Ecol.*, 11, 378-384.
- TRIMBLE S.W., MENDEL A.C. (1995) : "The cow as a geomorphic agent - A critical review", *Geomorphology*, 13, 233-253.
- URBANSKA K.M. (1997) : "Restoration ecology research above the timberline : colonization of safety islands on a machine-graded alpine ski run", *Biodivers. Conserv.*, 6, 1655-1670.
- VITOUSEK P.M., MOONEY H.A., LUBCHENKO J., MELILLO J. (1997) : "Human domination on earth's ecosystems", *Science*, 227, 1296-1299.
- WOOD M.K., BLACKBURN W.H. (1991) : "Sediment production as influenced by livestock grazing in the Texas rolling plains", *J. Range. Manage.*, 34, 228-231.

SUMMARY

How to conciliate grazing with the ecological restoration of mountain grasslands

The development of areas devoted to skiing in the French Northern Alps disturbs or destroys the vegetation locally. A number of operations have been carried out for the restoration of these degraded slopes. Because of detrimental effects of grazing on vegetation structure and on plant diversity, cattle are often excluded from the affected areas. We investigated in this paper the effects of grazing on areas in the course of restoration ; the results observed after the grazing by dairy cows of ski trails being restored in the winter sports area of La Plagne (Savoy, French Alps) were analyzed. Different studies have shown that grazing can be beneficial in the restoration process. The detrimental effects of trampling on soils, such as an increase in bulk density, can be counterbalanced by sediment tracking in the hoof prints. The accumulation of sediments was measured in hoof prints after three periods of precipitations and on steep ski slopes (25%). Hoof prints do also act seed traps : there were three times more seeds in the soil affected by hooves than in the surrounding soil. The identification of the factors responsible for the dispersal of seeds shows that more than half of the seeds were dispersed by animals. The grazing of the ski trails by dairy cows have contributed to a greater specific biodiversity and a greater functional diversity. The mean proportion of functional types of plants related to grazing increased with the age of restoration of the ski trails. Our observations support the fact that the practice of restoration can include grazing in order to improve the ecological state of the alpine pastures.