

Évaluation du transfert des éléments traces métalliques vers les eaux superficielles – Application au terrassement et à la végétalisation des pistes de ski

Marc-Jérôme Hassid, Paul Arnould et Stanislas Wicherek

Le développement des stations de sports d'hiver a entraîné la création de nombreuses pistes de ski dont la réalisation nécessite des opérations de terrassement lourdes sur des surfaces importantes, perturbant l'écoulement des eaux, la végétation et les sols. Afin de réhabiliter ces milieux dégradés, des travaux de végétalisation utilisant des composts de boues et différents déchets organiques ont été mis en œuvre dans certaines stations de ski alpines.

Dans cet article, les auteurs nous présentent les résultats d'une étude destinée à évaluer les transferts des éléments traces métalliques apportés par ces « produits » issus des stations d'épuration et nous proposons des solutions pour réduire les risques de transfert de ces éléments dans les eaux de surface.

Depuis les années 1960, le terrassement des pistes de ski s'est généralisé avec la création et l'extension des domaines skiables. Ces travaux génèrent des dommages importants sur l'environnement tant d'un point de vue taxonomique (destruction des biocénoses et des biotopes) que d'un point de vue fonctionnel (modification du régime hydrique). Des semis manuels ont rapidement été engagés pour favoriser le reverdissement de ces espaces de montagne. L'hydroseigneur¹, qui permet la projection hydraulique d'un mélange d'engrais et de semences, s'est progressivement imposé dans les stations de montagne.

Cependant, devant les difficultés rencontrées pour « cicatrifier » les étendues les plus dénudées, il a été envisagé, dès les années 1970, d'apporter de la matière organique en forte dose. Les essais mis en place par le Cemagref de Grenoble en 1987, au col de Forclé (La Plagne), ainsi que la formation des pisteurs de stations aux techniques de végétalisation, ont permis le développement des pratiques de reconstitution des sols avant végétalisation.

Dans les stations des Alpes, les composts à base de boue d'épuration sont principalement employés. Cette technique permet d'envisager une filière d'élimination pour ce déchet et de proposer une solution innovante pour la végétalisation des pistes de ski. Elle connaît un essor lors des Jeux Olympiques d'Albertville de 1992, lié notamment à la nécessité de trouver un débouché pour les boues d'épuration des stations d'épura-

tion nouvellement construites. La technique s'est depuis largement répandue dans d'autres stations comme Samoëns, La Clusaz, l'Alpe d'Huez...

Cet article présente les résultats d'une étude destinée à évaluer les transferts des éléments traces métalliques (ETM) apportés par les produits issus des stations d'épuration lors des opérations de végétalisation des pistes de ski. Après un rappel du contexte, nous présentons succinctement les techniques de génie civil et de génie écologique mises en œuvre, puis nous décrivons la méthodologie de notre étude. Après la présentation de nos résultats, nous proposons des suggestions susceptibles de réduire les risques de transferts des ETM vers les eaux de surface.

Le contexte de l'étude

Le manque de cadre réglementaire et de références scientifiques, évoqué dans l'encadré 1, nous a conduits à orienter notre étude sur le transfert d'éléments indésirables vers les eaux superficielles, principalement les éléments traces métalliques.

Ce choix est justifié notamment par une première campagne de terrain, menée en 2003, qui montre :

- que le ruissellement est le phénomène dominant sur les pistes de ski ;
- que les services des MISE² éprouvent les plus grandes difficultés à encadrer les opérations avec

1. Machine utilisant l'énergie hydraulique pour projeter des matières fertilisantes, des semences ou des composants de substrat, vers les surfaces à restaurer.

2. Missions inter-services de l'eau.

Les contacts

Laboratoire Biogéo,
CNRS, ENS/LSH, 15
parvis René Descartes,
69366 Lyon

3. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

4. Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement.

Encadré 1

Une situation marquée par un manque de cadre réglementaire et de références scientifiques.

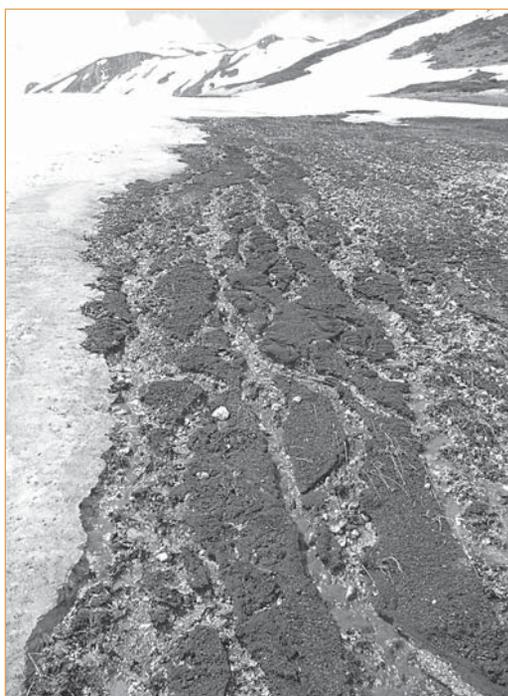
Si l'épandage des boues d'épuration sur les terres agricoles est encadré par une réglementation (décret de 1997 et arrêté de 1998) reposant sur de nombreux travaux scientifiques, il n'en est pas de même pour les opérations de reconstitution de sols des stations de montagne. Certes, le décret du 8 décembre 1997 annonçait des arrêtés spécifiques pour l'utilisation des boues d'épuration en végétalisation, mais ces textes n'ont pas été encore édictés à ce jour. Depuis 2004, l'ADEME³, aidée par des bureaux d'étude, travaille à la réalisation d'un rapport sur les « Impacts et pratiques des opérations de reconstitution de sols », qui met en évidence un manque de données scientifiques. Dans le contexte des pistes de ski, deux équipes françaises (le Cemagref de Grenoble et le Laboratoire des sciences du sol de l'université de Savoie) ont développé des recherches pour mener à bien la réhabilitation des domaines skiables et notamment la reconstitution de la diversité végétale (Dinger, 2004) et pédologique (Gros *et al.*, 2004). Parallèlement, l'ASTEE⁴ conduit plusieurs études. Les objectifs consistent à rédiger un guide pour le suivi expérimental d'opérations de reconstitution de sols et à élaborer un projet de circulaire afin que les services des MISE puissent encadrer ce type d'opérations.

des composts de boue du fait des spécificités de la montagne (pente systématiquement supérieure à 7 %, cours d'eau omniprésents...).

Par ailleurs, un examen attentif de la littérature montre que les transferts par ruissellement et érosion d'ETM, suite à l'utilisation de déchets organiques en forte dose ou d'engrais, sont très

peu étudiés en végétalisation. Une seule étude (États-Unis, talus autoroutiers) montre que les pertes en éléments indésirables dans les eaux superficielles sont réduites pour des composts par rapport aux traitements conventionnels (*hydroseeding*) (Glanville *et al.*, 2003). Dans le cas des pistes de ski, un travail a porté sur l'évaluation du transfert d'éléments biogènes dans les eaux de lessivage (Le Hy *et al.*, 1991). Les auteurs montrent que les boues liquides et les engrais libèrent davantage d'éléments que les boues physico-chimiques chaulées et les composts. Les pertes en ETM (cuivre, zinc) dans les percolats sont modestes. Il est intéressant de noter que le transfert d'ETM vers les eaux superficielles, suite à l'application de boue d'épuration, a été peu étudié en contexte agricole et pourrait expliquer des défauts de bilan en ETM sur des parcelles expérimentales (Quilbé, 2002).

► Photo 1 – Ruissellement et décapage des composts à la fonte des neiges.



Les techniques de génie civil et de génie écologique appliquées aux pistes de ski

Les travaux de terrassement menés pour la construction des pistes de ski (perturbation physique) sont à l'origine des phénomènes de ruissellement et d'érosion (photo 1). En ce qui concerne l'érosion, Mosimann (1985) définit trois seuils d'altitude. Au-delà de 2 200 mètres, la couverture végétale diminue avec l'augmentation de l'intensité de l'érosion (Mosimann, 1985). La dissolution du gypse est particulièrement active sur les pistes où se concentrent les eaux de fonte

(Rovera, 1990). Des techniques issues du génie civil et du génie écologique permettent de réduire ruissellement et érosion.

Le drainage

Les techniques du génie civil consistent à la mise en place de drains superficiels pour évacuer les excès d'eau de ruissellement. Ces drains sont positionnés perpendiculairement à la piste, surtout dans les secteurs à forte pente et pour les pistes de largeurs importantes. Ils rejoignent un drain superficiel de plus grande taille, très souvent empierré, voire bétonné, qui recueille les eaux d'une grande partie de la piste. Les eaux des drains sont dirigées soit vers une prairie naturelle ou une forêt pouvant servir de zone tampon, soit directement vers un cours d'eau.

La lutte contre l'érosion et l'implantation d'un couvert végétal

L'implantation d'un couvert végétal ressort comme le meilleur outil de lutte contre l'érosion. Pour l'ensemencement par projection hydraulique (photo 2), les doses moyennes d'amendements organiques utilisées se situent autour de 900 kg/ha et celles des engrais minéraux autour de 400 kg/ha (Hassid, 2006). La fertilisation est généralement fractionnée (deux passages).

En attente d'une protection végétale, l'utilisation de composts, de fumiers en forte dose, ou encore de paille sur la surface du sol, permet de contrôler temporairement l'érosion. À ce jour, les doses moyennes de composts de boue d'épuration se situent autour de 110 t/ha de matière brute, soit environ 55 t/ha de matière sèche (Hassid, 2006). L'épandage des composts de boue en surface est la pratique dominante, mais de plus forts tonnages (environ 300 t/ha de matière brute) sont employés lorsqu'ils sont mélangés avec un substrat. Généralement, une première projection de compost (90 t/ha) a lieu après terrassement de la piste, d'août à octobre. Elle est souvent complétée par une deuxième projection lors de l'été suivant.

Les opérations de végétalisation avec des fumiers ne sont généralement pas renseignées par des plans d'épandage ; les doses d'utilisation se situent autour de 30 à 80 t/ha de matière sèche.

Une enquête a permis d'établir un bilan des teneurs en ETM des composts de boue d'épuration et des engrais utilisés actuellement sur les pistes de ski (Hassid, 2006). Les moyennes sont calculées à partir de plans d'épandage



correspondant à 30 lots de composts de boue. Les teneurs en ETM des engrais minéraux, non renseignées par les producteurs, portent sur seulement deux analyses réalisées par nos soins à l'ENS⁵ de Lyon.

▲ Photo 2 – Chantier de projection hydraulique.

5. École normale supérieure.

Les composts de boue d'épuration de montagne (tableau 1) sont très peu chargés en ETM du fait de l'origine des eaux usées (absence d'usines...). On note que les engrais minéraux utilisés au cours de notre étude sont peu chargés en ETM. Des valeurs plus élevées en cadmium (Cd) sont recensées dans la littérature.

Du fait des quantités de produits employés en végétalisation, il est indispensable de tenir compte des flux (tableau 2). Rappelons que le législateur, dans le cas de l'épandage des boues d'épuration en contexte agricole, a fixé un flux limite en ETM à ne pas dépasser, calculé sur une période de 10 ans (arrêté de 1998). Cet arrêté ne s'applique pas au contexte de la végétalisation, mais nous le prenons comme référence. Ainsi, sur cette base, pour un apport de 55 t/ha de matière sèche (MS) de compost de boue (valeurs moyennes sur les pistes de ski), les flux en ETM sont respectés. En revanche, pour des valeurs de 150 t/ha de MS, les limites sont dépassées. Pour les engrais minéraux, en prenant une teneur en Cd de 30 mg/kg (valeur haute), ces derniers peuvent apporter une quantité non négligeable de Cd à l'hectare.

▼ Tableau 1 – Teneurs en ETM des composts de boue et engrais utilisés en végétalisation et limites réglementaires (les teneurs en ETM des engrais minéraux citées entre parenthèses sont d'après Robert *et al.*, 1997).

ETM mg/kg	Teneur moyenne dans les composts de boues de montagne	Teneurs limites fixées par l'arrêté de 1998	ETM dans les engrais minéraux
Cd (cadmium)	0,73	10	3,1 (30)
Cu (cuivre)	168,8	1 000	9,6 (30)
Zn (zinc)	307	3 000	55 (50)

▼ Tableau 2 – Flux en ETM sur les pistes de ski et limites de l'arrêté de 1998.

	Dose d'apport	Compost		Engrais		Flux limites en ETM (g/ha/10 ans) (arrêté de 1998)	
		55 t/ha	150 t/ha	400 kg/ha	900 kg/ha	Cas général	Pâturage
Flux en ETM en g/ha sur une année	Cd	40,15	109,5	12	27	150	150
	Cu	9 284	25 320	12	27	15 000	12 000
	Zn	16 885	46 050	18	40	45 000	30 000

Outils et méthodes

L'analyse de la littérature et les premiers relevés de terrain laissent envisager deux phases critiques quant au risque de transfert d'éléments vers les eaux superficielles. La phase critique estivale correspond à la période durant laquelle les produits (engrais, composts) sont soumis à des pluies érosives en absence de couverture végétale. La phase critique hivernale est observée à la fonte des neiges. L'essentiel du ruissellement, peu érosif, se concentre à la fonte des neiges dans les milieux à fort enneigement : le suivi des phases dissoutes est prioritaire.

L'objectif principal de notre étude vise à évaluer les transferts d'ETM suite à l'apport de différents « produits » utilisés en végétalisation : les composts de boue d'épuration pour la reconstitution de sol et les engrais pour la projection hydraulique. Plusieurs méthodologies ont été couplées pour atteindre cet objectif. Les expérimentations ont été menées dans deux stations pilotes, La Clusaz et le Grand-Bornand, avec une autorisation de prélèvements d'eau accordée pour l'ensemble de la période 2003-2006. Dans les autres stations, une demande d'autorisation de prélèvements n'étant pas formulée auprès des directeurs des pistes pour les campagnes fonte des neiges, les stations sont maintenues anonymes.

Méthode des transects

Lorsque le compost (de couleur sombre) est érodé, l'horizon sous-jacent, de couleur claire, apparaît nettement. Il est dès lors possible de mesurer la surface sur laquelle le compost est absent. Il s'agit d'une perte minimale car on ne mesure que les zones sur lesquelles le compost est décapé sur la totalité de son épaisseur. Concrètement, nous tendons un mètre entre les deux extrémités de la piste et mesurons la largeur de compost érodée sur un premier transect. Notre transect est décalé de 10 mètres afin de reproduire la même mesure (etc.). La méthode des transects pose deux problèmes : elle n'est applicable qu'aux composts et elle ne permet pas de connaître la nature des transferts (forme dissoute ou forme particulaire). La méthode des transects a porté sur 27 tronçons de piste principalement dans 5 stations : La Clusaz, Les Arcs, La Plagne, Samoëns et L'Alpe d'Huez.

Glissement gravitaire des composts sur les talus de fortes pentes

Pour chaque talus, nous relevons la pente ainsi que le degré de stabilité des composts. Nous avons retenu trois types de situation allant de « stable » (pas de glissement de compost) à « très instable » (forte accumulation de compost en

bas de pente) et une situation intermédiaire dite « instable ».

La stabilité des composts a été évaluée par 65 relevés sur 8 talus de type déblais.

Suivi des eaux de deux pistes de ski élémentaire

Nous définissons la piste de ski élémentaire (PSE) comme un espace terrassé qui est drainé de manière à concentrer les eaux de ruissellement vers un exutoire unique. Les drains principaux de deux PSE ont été équipés d'un déversoir triangulaire et d'une sonde à pression (détermination de la hauteur d'eau) ainsi que d'un préleveur automatique afin d'échantillonner les eaux de ruissellement. L'objectif était de comparer les deux techniques de végétalisation : une projection de déchets organiques à La Clusaz (environ 80 t/ha sur 5 000 m²) et une projection hydraulique d'engrais au Grand-Bornand (450 kg/ha sur 5 500 m²).

Tests de simulation de pluie

Des tests de simulation de pluie (simulateur de pluie de type Tossell) ont été réalisés sur des plaquettes expérimentales de 1 m² à la Clusaz pour comparer quatre traitements : un engrais minéral, deux types de compost de boue d'épuration et un témoin.

Suivi des eaux de ruissellement à la fonte des neiges

Pour étudier le ruissellement au printemps, il est intéressant de profiter de l'étalement de la fonte des neiges qui dépend de l'altitude et de l'orientation. Nous réalisons des prélèvements manuels d'eau dans les drains empierrés. Il s'agit de mesures ponctuelles (1 jour) qui ne sont qu'un instantané d'un ruissellement qui s'étale sur plusieurs semaines. Dans chacune des stations, nous avons retenu, si possible, une zone non terrassée (faux témoin), une zone terrassée sans opération de végétalisation (témoin), une piste végétalisée avec des composts et une piste végétalisée avec des engrais. Le faux témoin permet de connaître l'impact du terrassement et de la végétalisation sur la qualité des eaux superficielles, le vrai témoin de déterminer si une éventuelle détérioration de l'eau est liée au terrassement ou aux produits utilisés pour la végétalisation.

Les mesures des teneurs en ETM (Cd, Cu, Zn) des eaux de ruissellement sont réalisées à l'INRA⁶ de

Thonon-les-bains par spectrophotométrie d'absorption atomique après filtration à 0,45 µm.

Résultats

Méthode des transects : des pertes variables en compost

Sur un échantillon de 27 tronçons de plusieurs pistes (environ 6 hectares de mesures), les pertes moyennes en compost sont de 11,8 %, ce qui représente une perte en compost de 12 t/ha. Cela signifie, qu'en moyenne, 11,8 % des composts épandus ne se retrouvent pas sur la piste suite au ruissellement. On note un fort étalement des valeurs, avec des sites où les pertes sont nulles et des sites sur lesquels le décapage des composts est marqué (maximum : 39 %). Ceci laisse envisager des mesures correctives.

PSE de La Clusaz : des transferts d'ETM essentiellement sous la forme dissoute

Les concentrations et les flux en Zn dans les eaux de ruissellement de la PSE de La Clusaz (5 000 m²) sont reportés dans la figure 1.

La concentration en Zn (23 juin), suite à l'épandage de fumier, reste faible (30 µg/l) (à nuancer car il s'agit d'un prélèvement manuel, le préleveur automatique n'étant pas en état de fonctionnement). Suite à l'épandage des composts, les concentrations en Zn augmentent sensiblement durant les événements pluvieux du mois d'août 2004, pour atteindre un pic au cours du ruissellement du 20 août 2004 (970 µg/l).

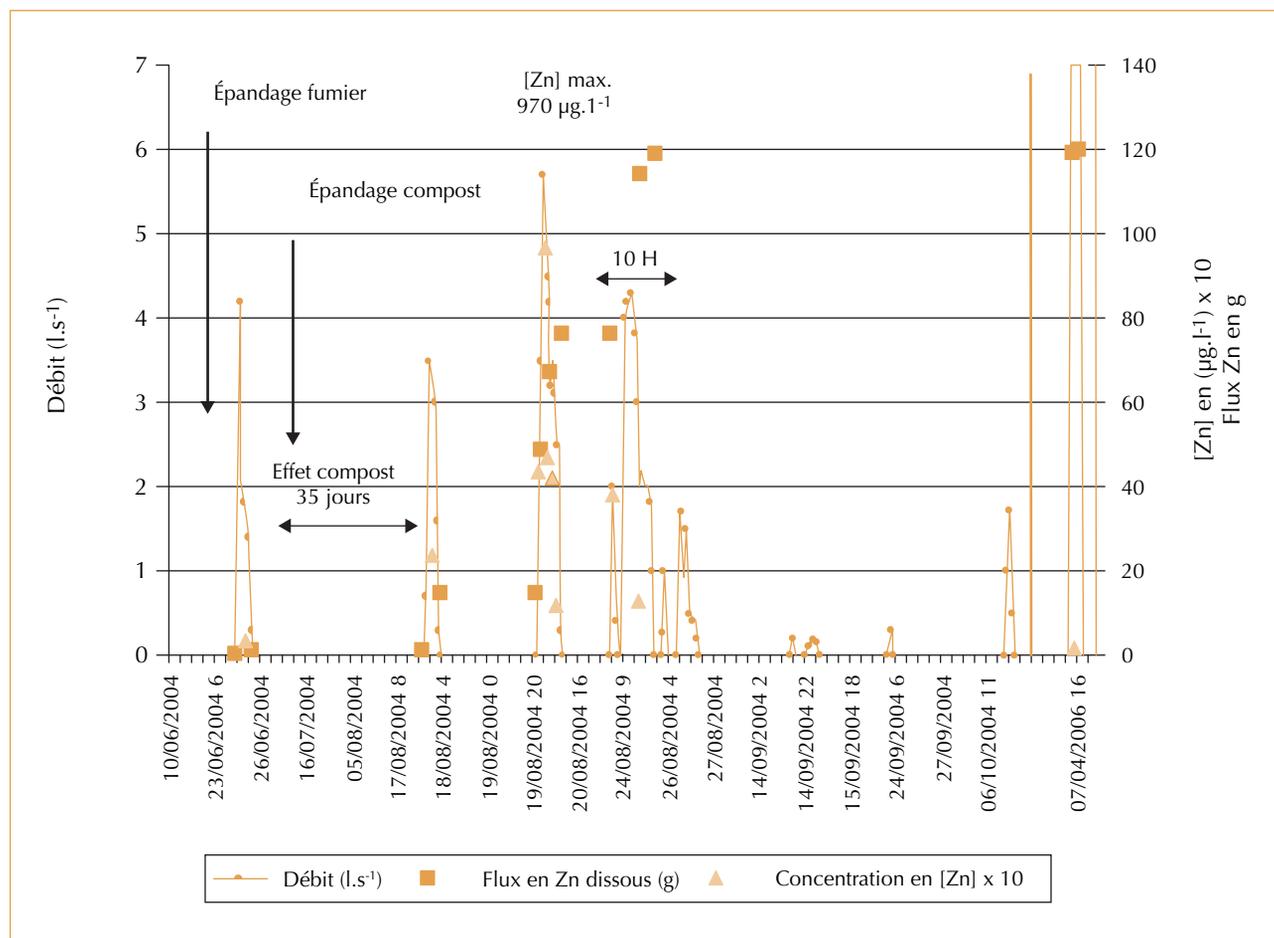
En tenant compte des débits, les flux en Zn sous la forme dissoute sont d'environ 120 grammes⁷, ce qui représente au minimum 2 % des quantités apportées par le compost et le fumier.

PSE du Grand-Bornand : des transferts d'ETM au cours de la période témoin

Le suivi de la qualité des eaux superficielles sur la piste du Grand-Bornand a rapidement mis en évidence des transferts importants d'ETM sous la forme dissoute (figure 2). Ainsi, au cours du ruissellement du 22 août (période témoin), les concentrations moyennes en Zn sont de 1 130 µg/l, soit un flux de plus de 160 g au cours de ce seul ruissellement. Les concentrations en Zn les plus élevées sont relevées lorsque la quantité de matériaux érodés est maximale. L'essentiel des matériaux mis en suspension proviennent de l'in-

6. Institut national de la recherche agronomique.

7. Valeur minimale. Tous les ruissellements n'ont pas été échantillonnés, la mesure est imparfaite pour les ruissellements des 23 juin et 18 août.



▲ Figure 1 – Concentration et flux en Zn dissous suite à l'épandage de compost de boue de La Clusaz et de fumier ovin, piste Périllat, La Clusaz⁸.

8. Pour les figures 1 et 2, 1 unité équivaut à un jour en période de ruissellement et 1 unité équivaut à une heure durant les ruissellements.

cision du drain principal au niveau de l'horizon Bh du sol ocre podzolique.

Ces concentrations élevées masquent le comportement de l'amendement (*hydroseeding*) épandu le 17 octobre 2005. On note cependant que l'apport d'amendement en faible dose ne joue aucun rôle dans le contrôle du ruissellement et de l'érosion.

Résultats lors de la fonte des neiges

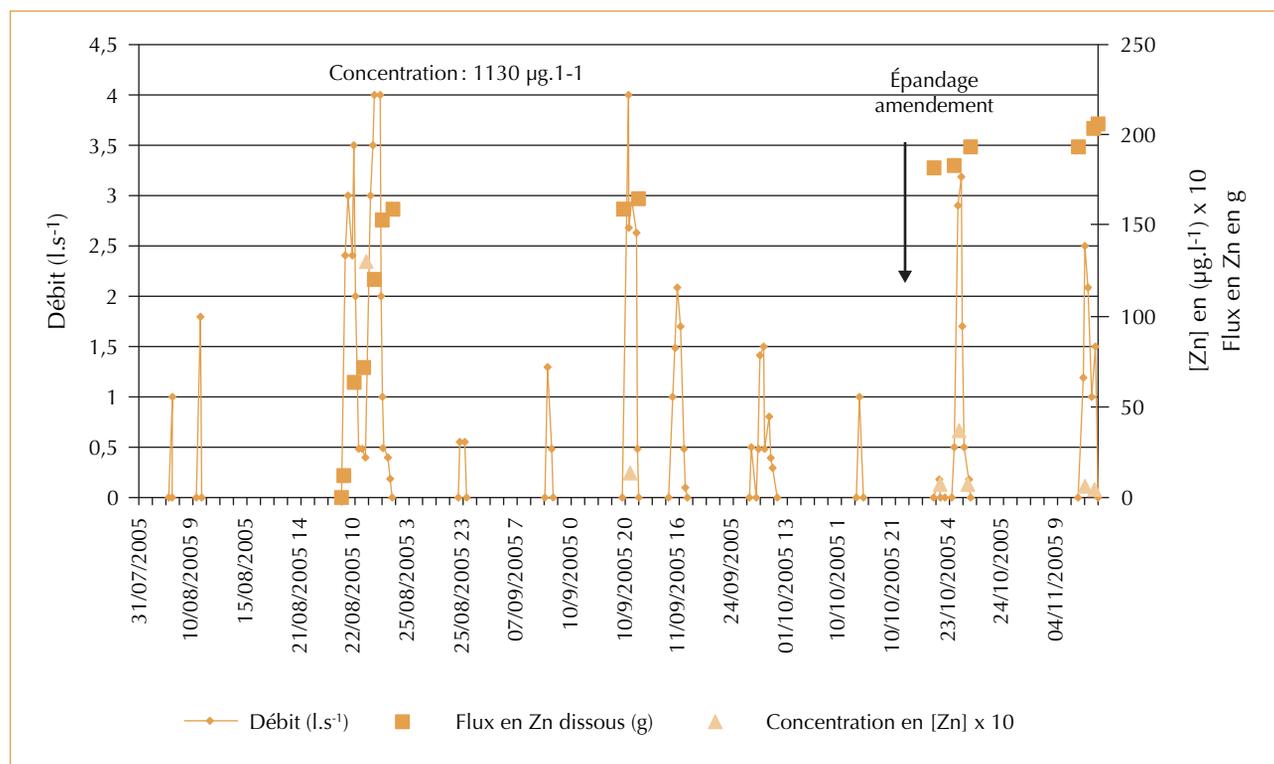
À la fonte des neiges, les concentrations en Zn des eaux de ruissellement se situent pour la plupart des sites entre 9 et 30 µg/l (tableau 3). On relève des concentrations en Zn très élevées pour les sites des stations A et D ainsi que certains échantillons de neige, ce qui nécessite d'approfondir ces cas d'étude.

Station D : de fortes valeurs en Zn suite à l'apport de compost de boue

Le site de la station D a été végétalisé en octobre 2003 suite à un apport de sable quartzéux et de compost de boue en forte dose (300 t/ha). Le compost apporte l'essentiel des ETM, les flux sont calés sur la réglementation de 1998. Le prélèvement d'eau réalisé en mai 2005 montre de fortes concentrations en Zn (524 µg/l). Dans un deuxième temps (octobre 2005), du compost a été déposé en surface (environ 60 t/ha brute). Un prélèvement d'eau a été réalisé en mai 2006 : la valeur de 1 300 µg/l et un débit moyen assez important (3 l/s) montrent une forte contamination en Zn des eaux superficielles.

On a pu constater sur ce site que le compost a été mélangé avec la neige suite à son glissement

▼ Figure 2 – Concentrations et flux en Zn dissous sur la PSE du Grand-Bornand.



▼ Tableau 3 – Concentrations en Zn (en µg/l) dans les eaux de ruissellement à la fonte des neiges (entre parenthèse le débit moyen en litre/s au cours des trois heures de prélèvement).

Zn en µg/l	Grand-Bornand	La Clusaz	Station A		Station B	Station C	Station D	
	2006	2005	2005	2006	2005	2005	2005	2006
Zone naturelle			10 (5)	< 10 (> 50)	13 (> 50) (amont)	10/15 (> 10)		
Zone terrassée					16 (2)			
Compost		12 (8)	23 (5)		21 (> 50) (aval)	9,5 ; 12,5 ; 11 ; 17 (> 15)	524 (2)	1 300 (3)
Engrais	20 (2)		575 (> 10)	290 (> 15)		14/14,5/16,5 (3)		30 (3)
Profil de neige	10							
Neige artificielle		10	24					
Compost + neige		1 220		2 600				

depuis le talus ; la neige prend une coloration brune au contact du compost, phénomène relevé dans d'autres stations. Des analyses ont été réali-

sées sur ce mélange neige/compost après l'avoir laissé fondre. À La Clusaz, on trouve une valeur de 1 220 µg/l (végétalisation 2001, prélèvement

2005) ; pour la station A, cette valeur est de 2 600 $\mu\text{g/l}$ (végétalisation 2005, prélèvement 2006).

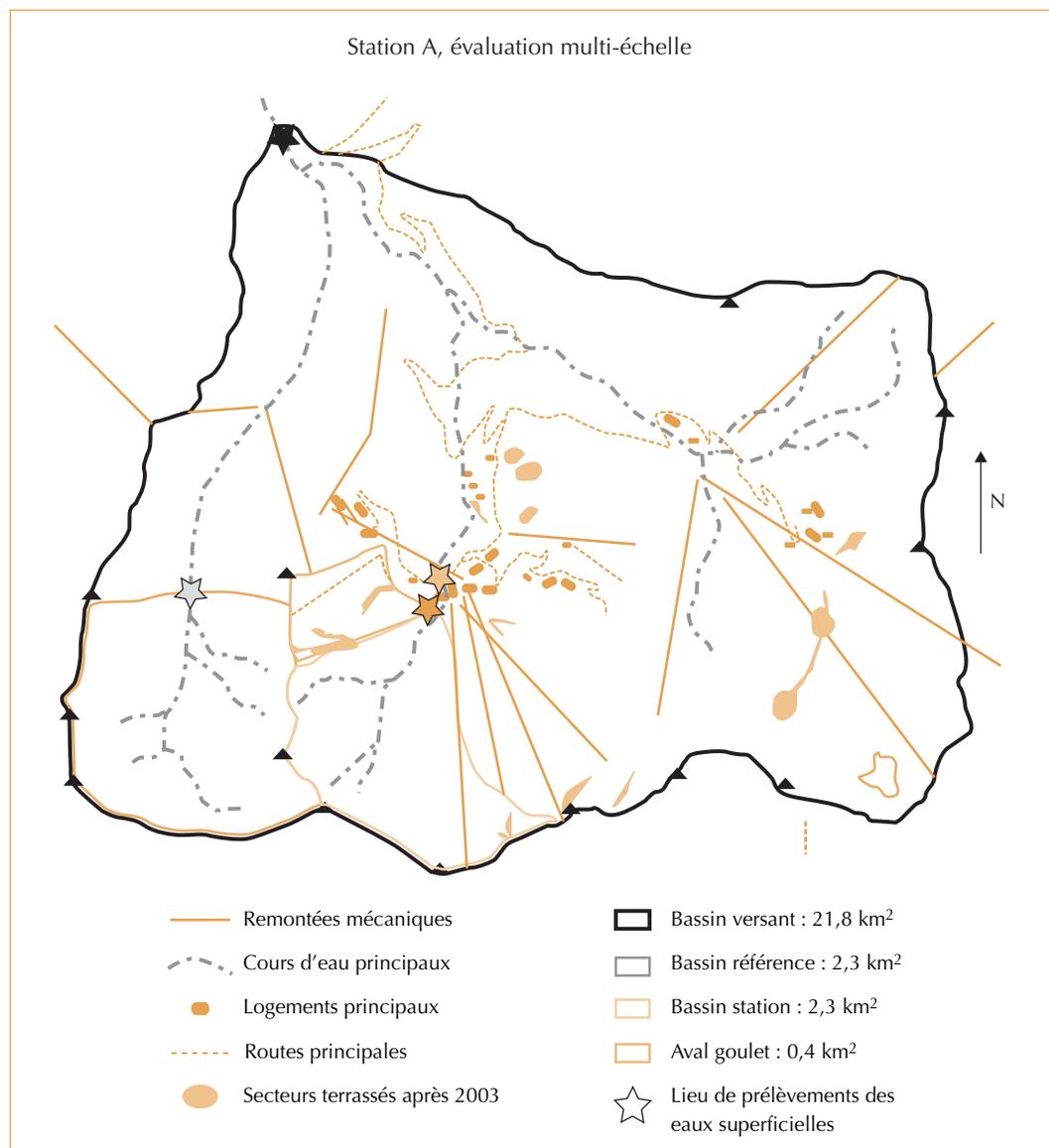
Station A, évaluation multi-échelle (figure 3)

L'opération de végétalisation a été réalisée avec des engrais en 2003, sur un site d'environ un hectare, qui canalise les eaux de ruissellement d'un bassin de 0,4 km², nommé aval goulet. Les concentrations en Zn (aval goulet) mesurées dans les eaux de ruissellement en 2005 et 2006 sont très élevées (575 et 290 $\mu\text{g/l}$) en comparaison

avec les concentrations relevées au niveau du bassin de référence (valeur inférieure à 10 $\mu\text{g/l}$), non équipé d'infrastructures touristiques. Au niveau du bassin versant de 21 km², après la jonction des deux cours d'eau (aval goulet et bassin référence), les débits sont supérieurs au m³/s, la concentration en Zn est de 50 $\mu\text{g/l}$. On note donc une dilution des concentrations en Zn dans l'eau du torrent ; néanmoins, cette valeur reste largement supérieure à la valeur enregistrée au niveau du bassin de référence.

On note que ces transferts en ETM s'accompagnent de processus érosifs marqués. Ces derniers

► Figure 3 – Évaluation de l'impact des terrassements et des opérations de végétalisation sur la qualité des eaux superficielles à l'échelle du bassin versant.



affectent essentiellement le drain principal (photo 3) qui draine les eaux de ruissellement d'une superficie d'environ 0,4 km². Ces transferts en ETM semblent s'expliquer par le remaniement des terrains (voir ci-après au paragraphe « Discussion »).

Discussion : une esquisse des flux en ETM dans les hauts bassins versants

Le bilan que nous dressons pour le Zn repose sur l'ensemble des mesures réalisées au cours de l'étude.

Teneurs et introduction du Zn dans les sols de montagne dans le contexte de la végétalisation des pistes de ski

La teneur en Zn du sol remanié de La Clusaz se situe au-dessus de la teneur en Zn médiane des sols français, tandis que celle du sol remanié du Grand-Bornand se situe en dessous de la médiane française (tableau 4). Nous avons calculé le stock de Zn contenu dans les deux premiers centimètres de sol ; on peut considérer que l'essentiel des échanges sol, eaux superficielles se font au niveau de cet horizon.



◀ Photo 3 – Vue d'un drain principal incisé à la fonte des neiges.

L'épandage des déjections animales (375 millions de tonnes brutes) est la principale source d'apport en Zn des sols agricoles français. Les boues d'épuration (9 millions de tonnes brutes) apportent des quantités importantes de Zn uniquement si l'on considère les sols récepteurs de boues (2 % de la SAU⁹). Dans le contexte de la végétalisation des pistes de ski, les apports de Zn sont très élevés (tableau 5), notamment pour les composts de boue d'épuration : 16 885 g/ha/an (valeur moyenne).

9. Surface agricole utile.

▼ Tableau 4 – Comparaison des teneurs en Zn de deux sols remaniés avec les teneurs totales en Zn des sols français (moyenne et médiane, Baize, 2000).

	Teneurs totales en Zn (mg/kg)	Stock dans les 2 premiers centimètres de sol (g/ha)
Sol remanié de La Clusaz	98,9	19 780
Sol remanié du Grand-Bornand	42,1	8 420
Moyenne pour les sols français	149	
Médiane pour les sols français	80	

▼ Tableau 5 – Apports de Zn aux sols de montagne dans le contexte de la végétalisation des pistes de ski et comparaison avec les apports de Zn aux sols agricoles français (Robert *et al.*, 1997).

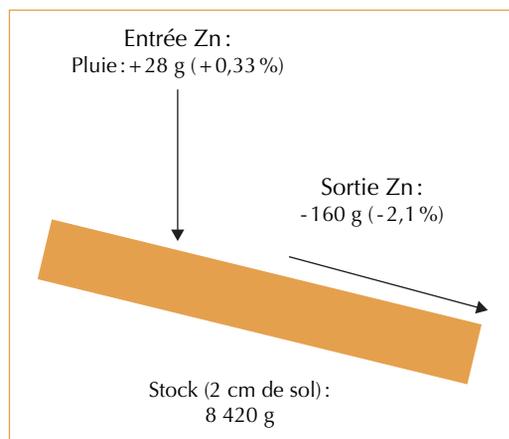
	Apports en Zn dans le contexte de la végétalisation des pistes de ski (en g/ha/an)	Apports en Zn dans les sols agricoles français (en g/ha/an)
Retombées atmosphériques	378	30-813
Engrais et amendements	40	-
Déjections animales	7 000	1 300-1 500
Boues d'épuration	16 885	1 444

10. Le débit moyen est de 5 l/s durant 10 heures : la quantité de zinc libérée quotidiennement est de 103,5 g. En comparant cette valeur avec la quantité de zinc introduite (45 g), les engrais utilisés deux ans plus tôt ne peuvent expliquer ces fortes valeurs dans les eaux de ruissellement.

Aptitude des terrains remaniés au transfert d'ETM vers les eaux superficielles

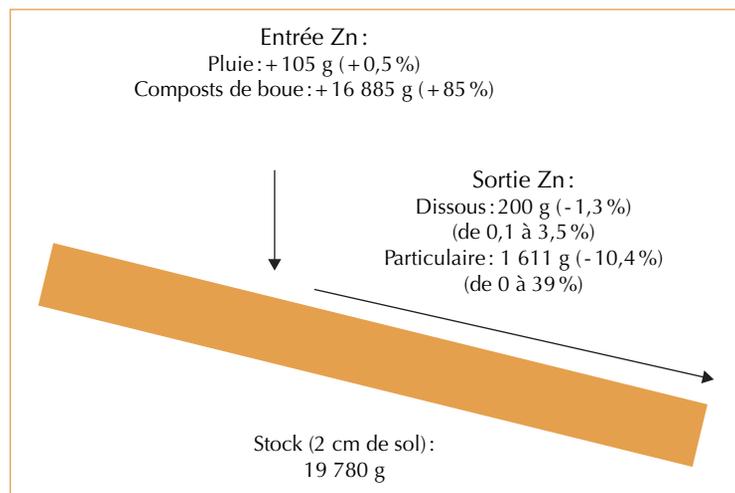
Les fortes concentrations en Zn mesurées au niveau de la station du Grand-Bornand (1 130 µg/l) et de la station A¹⁰, et les flux importants calculés (figure 4) ne peuvent être expliqués par l'apport de contaminants au cours de l'opération de végétalisation. Ces transferts sont relevés aussi bien en été (Grand-Bornand) qu'en hiver (station A). Dans les deux cas étudiés, le drain principal est affecté par d'intenses processus érosifs.

▼ Figure 4 – Flux en Zn dissous par hectare au cours de l'événement du 22 août 2005 au Grand-Bornand : le sol ocre podzolique remanié se comporte comme une source d'ETM.



11. Signalons le cas très particulier d'une concentration en Zn de 2 640 µg/l mesurée dans un drain superficiel suite à l'épandage d'un compost de déchet vert non mûr.

▼ Figure 5 – Bilan des pertes en Zn sous la forme particulaire et dissoute suite à l'apport de déchets organiques en prenant le sol de La Clusaz comme référence.



Plusieurs hypothèses ont été avancées (contamination par des hydrocarbures, lessivage de pylônes...). L'hypothèse retenue pour expliquer ces transferts est la suivante. Dans le cas du Grand-Bornand, le sol ocre podzolique se caractérise par un pH bas, la présence d'horizons d'accumulation des argiles, du fer... et aussi des ETM. Le passage de ces horizons en surface, suite au remaniement des terrains, conduit à l'exposer à de nouvelles conditions d'oxygénation, des cycles de dessiccation, l'alternance de période de gel et de dégel... Les sols remaniés semblent donc avoir un comportement différent en ce qui concerne les transferts d'ETM dans les eaux superficielles.

Pour les déchets organiques, des résultats sans surprise à la phase critique estivale

Durant la phase critique estivale, les concentrations en Zn, suite à l'apport de déchets organiques, s'étalent de 90 à 970 µg/l en considérant l'ensemble des techniques mobilisées¹¹. Ces valeurs sont élevées en comparaison avec une étude réalisée sur des talus routiers (Glanville *et al.*, 2003) et une étude menée en contexte agricole avec de faible dose de boue (Quilbé, 2002). En revanche, des concentrations similaires sont relevées pour des tests de percolation menés en laboratoire avec de fortes doses de compost chargé en ETM (Greter-Domergue et Vedy, 1989). En termes de flux (figure 5), les pertes en Zn restent relativement limitées et ne semblent pas dépasser 3,5 % des quantités apportées.

En revanche, les pertes en Zn sous la forme particulaire, évaluées par la méthode des transects, sont importantes. En moyenne, 1 611 grammes de Zn (en soustrayant les pertes sous la forme dissoute), soit 10,4 % des quantités introduites ne se retrouvent pas sur la piste de ski. Précisons que les composts les moins mûrs (plus riches en hémicellulose...) ont un comportement proche de celui des fumiers : ils protègent les sols de l'érosion, mais libèrent une quantité plus importante d'éléments sous la forme dissoute. À l'inverse, les composts très mûrs, souvent pulvérulents, libèrent peu d'éléments sous la phase dissoute, mais sont davantage concernés par l'érosion.

Comportement réversible des composts durant la phase critique hivernale

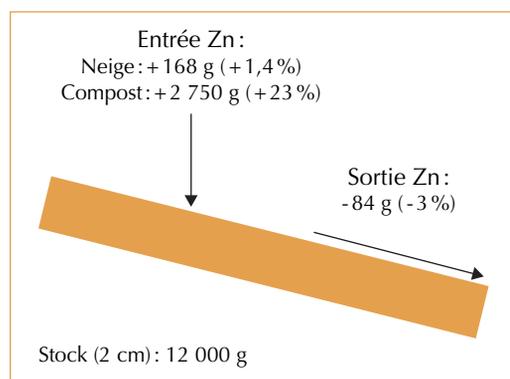
Les études, prises comme références dans le chapitre précédent, montrent une diminution

rapide des concentrations dans les percolats. Si notre étude confirme le faible passage des ETM en solution lors de la phase critique estivale, il n'en est pas de même lors de la phase critique hivernale.

Dans les milieux « naturels », à la fonte des neiges, les valeurs en Zn dans les eaux de ruissellement se situent entre 9 et 30 µg/l.

Nous avons mis en évidence, dans certaines situations, des transferts d'ETM, sous la forme dissoute, qui se prolongent dans le temps. Les concentrations relevées en mai 2005, près de 17 mois après un épandage de compost de boue, restent très élevées (524 µg/l). En termes de flux (figure 6), les quantités exportées vers les eaux de ruissellement sont très supérieures à celles enregistrées durant la phase critique estivale.

Plusieurs mécanismes pourraient expliquer ce passage des ETM vers la phase dissoute : mélange de la neige avec le compost, alternance de cycle gel/dégel (à 2 000 mètres d'altitude, 104 jours d'alternance de gel et de dégel sont mesurés, Rovera 1990).



▲ Figure 6 – Flux en Zn dissous rapporté à l'hectare durant l'événement du 15 mai 2006 dans la station D. Les sorties en Zn sont déterminées pour seulement trois heures de ruissellement.

Un manque de données pour les engrais minéraux

Aucun suivi réalisé suite à l'utilisation d'engrais minéraux n'a pu mettre en évidence de transferts d'ETM, notamment de Cd sous la forme dissoute, pour plusieurs raisons :

– la quantité d'ETM apportée par les engrais minéraux est faible en comparaison avec les quantités introduites par les composts ou les fumiers ;

– lors des simulations de pluie, les engrais minéraux sont entraînés sous la forme particulaire. Ceci est dû à notre protocole expérimental : la pluie est simulée immédiatement après l'épandage des engrais qui n'ont pas le temps de se dissoudre ;

– l'absence de transfert à la fonte des neiges peut s'expliquer du fait de notre méthodologie. Il s'agit d'un prélèvement ponctuel : une partie des ETM a pu être entraînée avant notre prélèvement.

Malgré ces difficultés techniques, on retient que les engrais minéraux et autres produits utilisés dans la technique de l'*hydroséeding* jouent un rôle très limité dans le contrôle du ruissellement et de l'érosion. Ils sont facilement entraînés au cours du ruissellement.

Suggestions

À l'issue de cette recherche, quatre suggestions peuvent être adressées aux gestionnaires en charge de la végétalisation des pistes de ski.

Appliquer la végétalisation en priorité aux sols les plus exposés à l'érosion

Suite aux remaniements des terrains, certains sols semblent libérer une quantité importante d'ETM dans les eaux superficielles. En attendant d'une typologie de ces sols, il semble raisonnable de conseiller de végétaliser les sites soumis à d'importants processus érosifs. Par ailleurs, il peut être intéressant de gérer des nappes ruisselantes en les dispersant tout au long de la surface du versant, comme cela est pratiqué dans la station du Grand-Bornand et également dans les stations suisses, plutôt que de concentrer les eaux dans des drains. Le contrôle de l'érosion permettra de mettre fin au décapage d'horizons dont les ETM sont mobiles.

Pour le traitement de ces sites, l'emploi de déchet organique peut s'avérer intéressant. En effet, il est confirmé que la couverture d'un sol permet de réduire le ruissellement et l'érosion. Des études montrent également que les composts, riches en acides humiques, sont susceptibles de complexer les ETM (Sauvesty *et al.*, 1998).

Néanmoins, la prudence est de rigueur lors de l'utilisation des déchets organiques en forte dose. Notre étude a mis en évidence un certain nombre de processus qui tendent à augmenter la mobilité des ETM, notamment pour les boues compostées :

l'alternance de cycle gel-dégel, des mélanges de compost avec la neige devrait retenir l'attention comme processus décisif. Des recommandations peuvent réduire ces risques.

Le calendrier d'épandage

La végétalisation dépend bien sûr du calendrier des travaux de terrassement et des contraintes touristiques (problème d'odeurs). Néanmoins, il est conseillé d'épandre les composts suffisamment tôt (juin-juillet) pour favoriser leurs fixations par les végétaux. Le ruissellement à la fonte des neiges est certes souvent généralisé mais l'érosion reste globalement limitée, sauf au niveau des drains. Un report de l'opération au printemps suivant est envisageable lors de travaux de terrassements tardifs (septembre-octobre). De même, l'utilisation d'engrais minéraux lors d'opérations de végétalisation tardives est à proscrire ; une partie des éléments sont entraînés dans les eaux à la fonte des neiges.

L'hydroseeding doit être privilégié sur les talus à forte pente.

En effet, au-delà de 35 à 40°, les composts glissent par gravité. Ils peuvent être entraînés dans les eaux de ruissellement lorsqu'un drain se situe en bas de pente et se mélanger avec la neige. Pour les talus routiers, les composts sont préconisés pour des pentes inférieures à 2/1 (27°) (Glanville, 2003). D'autre part, les composts, qui favorisent l'infiltration, accentuent le risque de décrochement en masse des talus. On pourra éventuellement utiliser les composts pour une fertilisation, une fois les talus parfaitement végétalisés par *hydroseeding*.

Ne pas négliger les zones de replats ainsi que les pistes de faible largeur

Nous avons mis en évidence ces zones stratégiques où les engins de terrassement passent de

façon répétée, ce qui entraîne une forte compaction. Ces zones sont peu sensibles à l'érosion mais sont génératrices de ruissellement. Il semble donc nécessaire de réaliser une décompaction de ces terrains et éventuellement de placer des drains superficiels au niveau de la zone de rupture de pente pour éviter l'érosion lorsque les eaux de ruissellement arrivent sur des terrains plus perméables.

Conclusion

L'étude menée dans le contexte de la végétalisation des pistes de ski (milieu montagnard, fortes doses d'intrants, sols très dégradés...) a mis en évidence des transferts d'ETM vers les eaux superficielles qu'à notre connaissance, l'examen de la littérature ne laisse pas envisager. La nature des transferts, qui se font sous la forme dissoute, incite à mener des études complémentaires. Deux axes de recherche ressortent :

- d'une part, la libération d'ETM vers les eaux superficielles suite au remaniement de certains sols ;

- d'autre part, la libération d'ETM lors de la fonte des neiges suite à l'utilisation de compost de boue.

L'alternance de cycles gel-dégel, qui ne sont pas spécifiques au milieu montagnard, devrait retenir l'attention.

La préservation de la qualité de l'eau fait donc partie des objectifs, déjà nombreux, à intégrer par les gestionnaires en charge de la végétalisation des pistes de ski. En fonction de l'intensité de l'érosion, de la sensibilité des milieux, suivant les lieux et les saisons, il sera possible de privilégier l'*hydroseeding* ou l'utilisation de compost en tenant compte des processus complexes agissant en milieu montagnard et en répondant aux nouvelles exigences de qualité environnementale. □

Remerciements

Nos remerciements s'adressent à Pierre Faivre (université de Savoie), Jean Marcel Dorioz et Jérôme Lazzarotto (INRA), Fabrice Grégoire (Biogéo) et Laëtitia Blanchard.

Lexique

Boue d'épuration : résidu issu d'un processus industriel visant à la dépollution des eaux usées. Au titre du décret 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées, les boues d'épuration ont le statut de déchet.

Compost : « résidu » ou « sous-produit » solide stabilisé, hygiénisé, semblable à un terreau, obtenu par mélange et compostage de résidus organiques d'origine agricole ou urbain.

Compost de boue d'épuration : « résidu » ou « sous-produit » solide obtenu suite au mélange et au compostage de boue d'épuration et généralement de déchets verts. D'un point de vue réglementaire, un compost de boue d'épuration conserve le statut de déchet selon le décret de 1997. Néanmoins, son homologation ou sa normalisation peut lui conférer un statut de produit.

Résumé

La végétalisation des pistes de ski est l'opération qui vise à introduire une strate herbacée et/ou arborée dans un site, afin de l'insérer dans le paysage, de limiter l'érosion et les impacts négatifs sur l'environnement (pollution de l'air, de l'eau...). Classiquement, il s'agit de projeter dans un flux hydraulique un mélange de semences et de fertilisants, à l'aide d'un appareil appelé hydroseeder. Depuis quelques années, la reconstitution de sol, qui précède la projection hydraulique, se développe dans les stations d'altitude. Il s'agit d'apporter des produits organiques (composts, fumiers) en forte dose. Dans un contexte d'incertitude réglementaire, nous avons mis en place des dispositifs de suivi de la qualité de l'eau dans plusieurs stations alpines. Les résultats montrent que les travaux de terrassement, ainsi que certaines pratiques de végétalisation (épandage de compost en automne) peuvent entraîner des transferts importants d'éléments traces métalliques (ETM) dans les eaux superficielles, notamment à la période critique de la fonte des neiges. Ce travail met en évidence la nécessité de conduire des recherches complémentaires.

Abstract

Vegetalisation aims to insert harmoniously derelict land into landscape and to reduce erosion with establishment of plant cover. Classically, method consists to hydroseed fertilizer and seed. Soil reconstitution, a preliminary condition for hydroseeding, develops in mountain resorts for few years. Typically, the application of sewage sludge compost on ski tracks has a application of about 55 tons per hectare. There are currently no soil restoration regulations in France. In this context, we examin transfer elements in the superficial hydrosphere. The results show that terracing as well as certain revegetation practices (autumn fertiliser spreading) can lead to significant transfers of heavy metals to surface waters, particularly during critical snow melt periods. This work can be perceived as an initial study who must have a continuation.

Bibliographie

- Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles, *JO du 10 janvier 1998*, p. 1563-1571.
- Arrêté du 9 mai 2001 portant homologation du règlement d'application de l'appellation d'origine contrôlée « Beaufort », *JO du 26 mai 2001*, p. 8432.
- BAIZE, D., 2000, Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français. Résultats généraux du programme ASPITET, *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n° 39, p. 39-54.
- Décret du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. *JO du 10 décembre 1997*, p. 17822-17825.
- DINGER, F., 2004, De l'écologie théorique à l'ingénierie – Rôle de l'ingénieur écologue au Cemagref : l'exemple des domaines skiables, *Ingénieries-EAT numéro spécial 2004*, p. 9-16.
- GLANVILLE, T.-D., RICHARD, T.-L., PERSYN, R.-A., 2003, Evaluating performance of compost blankets, *Biocycle*, p. 48-54.
- GRETER-DOMERGUE, F.-L., VEDY, J.-C., 1989, Entraînement gravitaire de Cd, Cu, Zn dans des sols reconstitués avec des boues compostées, *Science du sol*, vol. 27, n° 3, p. 227-242.
- GROS, R., JOCTEUR MONROZIER, L., BARTOLI, F., CHOTTE, J.-L., FAIVRE, P., 2004, Relationships between soil physico-chemical properties and microbial activity along a chronosequence of restored ski runs, *Applied Soil Ecology*, vol. 27, p. 7-22.
- HASSID, M.-J., 2006, *Alpage, boue et eau en montagne : les enjeux de la végétalisation des pistes de ski dans les stations alpines*, thèse de doctorat de l'ENS-LSH, 348 p.
- LE HY, J.-B., LE PIMPEC, P., NAVARRO, A., REQUILLART, J.-P., GORINI, D., 1991, Valorisation des boues de station d'épuration de montagne en révégétalisation des pistes de ski. Évaluation des risques de transfert par lessivage des principaux éléments biogènes, *T.S.M. L'eau*, vol. 7, n° 8, p. 371-379.
- MOSIMANN, T., 1985, Geo-ecological impacts of ski piste construction in the Swiss Alps, *Applied Geography*, vol. 5, n° 1, p. 29-37.
- QUILBE, R., 2002, *Transferts de polluants inorganiques par ruissellement en terre de grande culture. Approche interdisciplinaire et multi-échelle*, thèse de doctorat de l'ENS-LSH, 275 p.
- ROBERT, M., JUSTE, C., 1997, Stocks et flux d'éléments traces dans les sols du territoire, in *Aspects sanitaires et environnementaux de l'épandage agricole des boues d'épuration urbaines*, Journées techniques des 5 et 6 juin 1997, édition ADEME, p. 192-205.
- ROVERA, G., 1990, *Géomorphologie dynamique et aménagement des versants en moyenne Tarentaise (Savoie, communes de Granier, Aime, Mâcot-La-Plagne et Champagny). Une contribution à l'étude de l'érosion naturelle et anthropique des Alpes*, université Joseph Fourier-Grenoble I., 465 p.
- SAUVESTY, A., KARAM, A., 1998, Utilisation de composts à des fins de réhabilitation de terrains dégradés, *Agrosol X*, 1, p. 66-73.