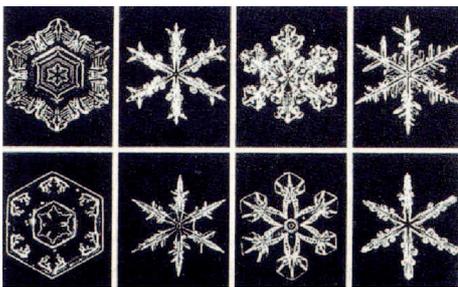


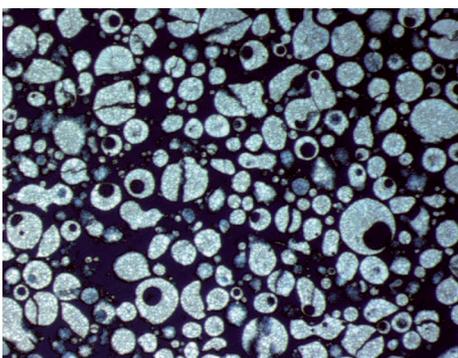


Val Thorens, avec production de neige artificielle en octobre 2007

La neige artificielle est produite en gelant rapidement de l'eau sous haute pression, ce qui forme des cristaux. Sa production a deux utilités : premièrement, la neige artificielle est nécessaire pour les expériences en laboratoire pour simuler les processus de formation de la neige et des avalanches ; deuxièmement, elle est produite commercialement comme substitut à la neige naturelle pour couvrir les pistes de ski. Elle est aussi produite dans des structures couvertes pour skier ou dans des villes pour des événements. On la produit dans presque toutes les zones climatiques, même dans des pays chauds et arides comme Israël ou Dubaï qui héberge l'un des plus grands centres de ski "intérieur" du monde. La neige artificielle est aujourd'hui produite dans presque toutes les stations de ski du monde qui sont sujettes aux variations d'enneigement. C'est le cas dans les Alpes, les Pyrénées, les Rocheuses, les Andes, les Carpates et presque dans tous les massifs montagneux méditerranéens skiables (Mont Hébron par exemple) et plus récemment dans les montagnes de Yabuli en Chine. Certaines pistes sont couvertes par 100% de neige artificielle (en couche avec la neige naturelle), notamment aux Etats-Unis. Néanmoins, les pistes de ski, en particulier dans les Alpes et les montagnes méditerranéennes sont dépendantes, une partie de la saison, de la neige artificielle.



Comparaison entre cristaux de glace artificiels (en bas) et naturels (en haut)



## une brève histoire de la neige artificielle

La neige artificielle fut produite pour la première fois en 1950 aux Etats-Unis. En Europe, la production de neige artificielle ne fut introduite

## La production de neige artificielle

Les conditions optimales de production de neige artificielle nécessitent une humidité relative basse, des vents faibles et des températures inférieures à  $-3^{\circ}\text{C}$ . En cas de vent fort, la neige artificielle est dispersée dans l'atmosphère et peut être emportée sur de longues distances. Des températures supérieures à  $-3^{\circ}\text{C}$  sont sub-optimales pour la production de neige puisque les gouttelettes d'eau ne gèlent pas assez rapidement et tombent au sol comme de la pluie froide.

Par ailleurs, si les gouttelettes d'eau gèlent mais que le sol est chaud, les cristaux de glace fondent dès qu'ils le touchent ; sauf s'il y a suffisamment de neige produite pour refroidir le sol ! A Zermatt en Suisse et sur le glacier de Pitztal en Autriche, un enneigeur pouvait produire de la neige à des températures ambiantes supérieures à  $20^{\circ}\text{C}$  (IDE snowmakers). Cette technique peut être utilisée pour améliorer les pistes de descente à des températures assez basses même sous des conditions météorologiques défavorablement chaudes.

Quelques pays autorisent l'addition de nucléés de condensation, comme l'iodure d'argent, le kaolin, les savons et détergents, les champignons ou les lichens pour produire de la neige artificielle à des températures supérieures à  $-3^{\circ}\text{C}$ . Les additifs les plus souvent utilisés sont le "Snomax", une poudre de protéines issue de la bactérie, *Pseudomonas syringae* morte. Elle permet d'augmenter le point de congélation de l'eau. Le Snomax est autorisé en Suisse et aux Etats-Unis. En France, bien que la production soit interdite, l'importation est autorisée, et à ce jour, il n'y a pas de contrôle de la qualité de l'eau dans les torrents et les nappes phréatiques concernés par la fonte de la neige artificielle.

Les canons à neige modernes peuvent produire jusqu'à  $96 \text{ m}^3/\text{h}$  de neige avec une consommation d'eau allant jusqu'à  $638 \text{ l}/\text{min}$ .



Une retenue collinaire en construction

qu'en 1970. Depuis, la neige artificielle est utilisée commercialement. Sa production a augmenté exponentiellement et se fait aujourd'hui à grande échelle, sur une large zone altitudinale. Dans les Alpes, elle couvre, dans certaines stations, jusqu'à 70% des pistes (par exemple en Italie), jusqu'à une altitude de  $3\,200 \text{ m}$ . À partir de la moitié des années 80, on observe une industrialisation et un accroissement important des infrastructures de neige artificielle en réponse à l'accélération du réchauffement climatique marqué par un enneigement plus erratique et une augmentation des pluies. Aujourd'hui, on produit systématiquement de la neige artificielle pour toutes les compétitions de championnat du monde pour assurer l'homogénéité des pistes. Dans les Alpes,  $250 \text{ km}^2$  de pistes de ski sont préparées avec de la neige artificielle, pour un coût global annuel de 3 milliards d'euros (construction et maintenance) et une consommation de 600 gigawatts par an. A présent,  $1 \text{ m}^3$  de neige artificielle coûte entre 2,50 et 5 euros.

## caractéristiques de la neige artificielle

La taille d'un cristal de neige artificielle est comprise entre  $0,05$  et  $2 \text{ mm}$ . Comparé à la neige naturelle dont la taille des cristaux varie entre  $0,2$  à quelques millimètres, les cristaux de neige artificielle sont plus petits. Alors que la neige naturelle a une forme dendritique (hexagonale), la neige

artificielle est sphérique, constituée de petites particules arrondies. Etant produite très rapidement, les cristaux de glace peuvent encore contenir des poches d'air, un renflement, ou peuvent même être cassés (Fauve and Ryner, 2004). Aux étapes finales, elle ressemble à de la neige naturelle après quelques semaines de métamorphose dues à la sublimation, à la fonte et au regel. A cause de la petite taille de ses cristaux et de sa haute densité ( $300\text{--}500 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), très supérieure à celle de la neige naturelle fraîche, elle est très compacte et elle est en moyenne quatre fois plus dense (Rixen et al., 2003 ; Jones et Devarenes, 1995).

La conductibilité de la neige artificielle est dix fois plus grande que celle de la neige naturelle, due à sa forte densité et à sa haute teneur ionique. Selon les conditions géologiques du bassin versant, la neige artificielle contient plus de minéraux. Ainsi, le magnésium et le calcium peuvent être respectivement 40 et 10 fois plus concentrés. Enfin, sa forte densité et sa structure globulaire, la rendent jusqu'à 60 fois plus dure que la neige naturelle.

Les propriétés thermiques de la neige artificielle diffèrent aussi de la neige naturelle. Des mesures montrent que les températures de la neige artificielle restent homogènes, et avoisine  $0^{\circ}\text{C}$  durant la saison d'hiver (décembre à avril) (Rixen et al., 2003). En revanche, la température de la neige naturelle compactée varie entre  $-3^{\circ}\text{C}$  et  $-5^{\circ}\text{C}$  sous les mêmes conditions

atmosphériques. Ces conditions isothermales rendent donc la neige artificielle plus apte à fondre et à regeler durant la journée.

## propriétés chimiques et minérales

La salinité de l'eau de fonte de la neige artificielle est extrêmement forte comparée à celle de la neige naturelle. (Jones et Devarenes, 1995). Ainsi, la concentration ionique et minérale est 4 fois plus forte dans les eaux de fonte de neige artificielle que dans les torrents environnants, ce qui provoque un "pic" local d'ions (Rixen et al., 2003). En effet, l'eau utilisée pour la fabrication de la neige artificielle provient des nappes phréatiques souterraines et des rivières qui ont, sans exception, une concentration en minéraux plus élevée que l'eau des précipitations. Ces phénomènes sont accentués quand le transfert de l'eau s'effectue entre différents bassins versants de natures géologiques différentes. En effet, les transferts entre bassins sont devenus très fréquents car la disponibilité des ressources en eau est limitée. Le milieu écologique peut être perturbé par l'introduction de ces éléments minéraux et ces microorganismes étrangers. L'accroissement en minéraux s'explique aussi par la sublimation et l'évaporation de la neige artificielle qui stagne davantage.

## le changement climatique et la neige artificielle

Depuis le début des années 1980, les changements climatiques accélérés ont des impacts visibles sur la fréquence des précipitations, la hauteur de neige et la durée d'enneigement. La plupart des massifs montagneux de l'hémisphère nord, montrent une diminution de la quantité totale de neige et de la durée de la saison hivernale. Au Col de Porte (Massif de la Chartreuse, altitude 1 505 m), la hauteur moyenne de la neige a diminué de plus de 50 cm sur les derniers 50 ans et la saison d'enneigement a diminué de quelques semaines sur la même période (Météo France). Dans des sites de haute altitude, par exemple au-dessus de Bourg Saint-Maurice, la hauteur de neige a diminué de plus de 4 m (Barth 2007). La "matière première" pour le ski étant la neige, les aléas des précipitations et la diminution de la durée d'enneigement dus aux changements climatiques ont amené de plus en plus de stations à se tourner vers la production artificielle de

neige, afin de garantir une pratique des sports de glisse tout au long de l'hiver. L'augmentation exponentielle des infrastructures pour la production de neige artificielle est parallèle à la tendance actuelle d'augmentation des températures globales. Dans le monde entier, les stations s'équipent d'enneigeurs artificiels pour assurer une couverture neigeuse pendant toute la saison et sur toutes les pistes. Néanmoins, le réchauffement global impose des limites à la production de neige artificielle. Certaines stations sont déjà incapables de produire de la neige artificielle car, lors d'hivers doux, les températures sont au-dessus du seuil maximal de  $-3^{\circ}\text{C}$  (Steiger and Mayer, 2008). La production de neige artificielle sous des températures en augmentation sera donc de moins en moins efficace, chère, voir impossible (Elssasser et Abegg 2003). Avec l'augmentation des coûts de l'enneigement artificiel, les stations de basse altitude ne peuvent plus vraiment rentabiliser leurs investissements. L'expérience des hivers doux en Suisse montre, au regard des conditions climatiques futures entre 1 500 et 1 700 m d'altitude, qu'il ne faut plus investir dans les téléskis, mais uniquement dans les télécabines utilisables en été, car l'enneigement, naturel et artificiel, ne pourra plus être garanti.

Les conditions locales jouent un rôle majeur (orientation des pentes, altitude, inversions de température, exposition au foehn...). Avec l'augmentation attendue des températures, comprise entre 1,3 et  $6^{\circ}\text{C}$  vers la fin du siècle, la limite de l'enneigement artificiel pourrait remonter de 250 à 1 000 m et les périodes de températures en dessous de  $0^{\circ}\text{C}$  seront plus courtes, donc la préparation pré-saisonnière de neige artificielle deviendra moins fiable et plus difficile.

L'autre contrainte majeure est la disponibilité de l'eau car il faut de grandes quantités d'eau pour fabriquer de la neige artificielle : à peu près  $3\,300\text{ m}^3/\text{hectare}/\text{an}$  et jusqu'à  $200\text{ l/s/canon à neige}$ . Or, en haute altitude, la pluviométrie est limitée et les bassins versants sont de petite taille, tout comme les nappes phréatiques, comparés aux plaines. De même, les changements climatiques actuels perturbent la distribution de l'eau au cours de l'année. D'après les travaux de C. de Jong au sein de l'Institut de la Montagne, le Ministère de l'environnement et du développement durable (2009) déclare "la mission invite les services de l'État, avec



*Piste de ski en été subissant une forte érosion, et ne remplissant plus son rôle de fixateur de  $\text{CO}_2$*



*Production de neige artificielle à des températures supérieures à  $-3^{\circ}\text{C}$*



Skieur sur de la neige artificielle à Zermatt



Perte d'eau pendant la production de neige artificielle

*l'appui des agences de l'eau concernées, à engager une étude, avec campagne de mesures ad hoc, d'évaluation de la part de l'eau sublimée en fonction des conditions météorologiques et des caractéristiques de l'enneigement artificiel (localisation, période, conditions de mise en oeuvre)".*

L'enneigement artificiel est donc une forme "d'adaptation" au réchauffement climatique, plus marquée dans les Alpes. Mais cette "adaptation" est une vision à court terme et elle est perçue comme une "mal adaptation" par plusieurs organisations européennes (Agence européenne pour l'environnement 2009, Commission internationale pour la protection des Alpes 2009, OCDE 2008).

### impacts environnementaux de la neige artificielle

#### ■ météorologiques

La neige artificielle est normalement produite en grand quantité durant une semaine entière en automne, parfois dès le mois d'octobre afin de préparer la saison d'hiver. Elle est donc rarement produite pendant la saison d'hiver. La quantité de neige artificielle produite équivaut, en général, à l'enneigement naturel de toute la saison. Elle est ensuite stockée pour être redistribuée sur les pistes, juste avant leur ouverture. Lors de sa production, les très petites particules dues à l'évaporation des gouttelettes de glace sont émises dans l'atmosphère. La concentration locale de ces particules ultrafines peut atteindre 20 000 par  $\text{cm}^3$ , comparable aux atmosphères très polluées, alors qu'en condition normale la concentration est de 500 à 800 particules par  $\text{cm}^3$  (Junkermann, communication personnelle). En effet, les premiers résultats montrent que 90% des cristaux de neige artificielle ont une taille inférieure à 50 nanomètres (nm). Ces cristaux,

trop petits, ne peuvent servir de noyaux de condensation des nuages (CCN). Ils devraient dépasser les 50 nm pour permettre la condensation de l'eau et la formation de pluie ou de neige. Potentiellement, cela peut conduire à un assèchement des nuages et donc un déficit en neige naturelle.

#### ■ hydrologiques

La neige artificielle perturbe le cycle de l'eau au cours de deux étapes. Lorsque l'eau est prélevée (dans les sources, les torrents, les nappes phréatiques, les bassins) pour être stockée en prévision de la production de neige artificielle, cela provoque un déficit local temporaire en eau. Ce déficit s'accroît par l'évaporation et les fuites lors des trois étapes de la production : lors du stockage dans les retenues collinaires, pendant la production, puis lors de la redistribution sur les pistes. Il est probable que près de 30 % de l'eau soit perdue par évaporation et qu'elle ne reprécipite pas sur le bassin versant (Wempelet al., 2007).

L'eau doit être stockée dans des retenues appropriées car la production de neige artificielle demande de grandes quantités d'eau. Les volumes peuvent dépasser 400 000  $\text{m}^3$  comme un petit barrage. La disponibilité de l'eau devient de plus en plus limitée, ce qui implique donc de construire davantage de retenues collinaires. Malheureusement, les retenues collinaires ont un impact majeur sur le paysage et l'hydrologie avec un risque non négligeable de rupture lorsqu'elles sont implantées sur de fortes pentes. Par ailleurs, les retenues collinaires sont souvent construites dans des dépressions abritant des zones humides et des milieux sensibles où la biodiversité est forte.

Ce cycle est encore perturbé lorsque l'eau réémise dans l'environnement (lors de la fonte) provient de bassins



Nouvelle retenue collinaire aux Saisies, avec un transfert de l'eau depuis le fond de la vallée

versants locaux. Il en résulte un surplus local d'eau. La fonte de neige artificielle, parvenant des pistes de ski, produit en moyenne deux fois plus d'eau liquide que la neige naturelle à cause de la densité de la neige artificielle. Des modélisations (de Jong et Barth 2007) ont ainsi permis de mettre en évidence une augmentation des débits de crues (jusqu'à +30%) et une accentuation de l'érosion.

#### ■ biologique

Diverses études concernent les effets de l'additif "Snomax", issu de la bactérie *Pseudomonas syringae*. En France, bien que la production soit interdite, l'importation est autorisée et à ce jour il n'y a pas de contrôle sur la qualité de l'eau des torrents et nappes phréatiques concernés par la fonte de la neige artificielle. Bien que la bactérie soit stérilisée avant son utilisation et qu'il n'y ait pas de traces de son utilisation, pas plus dans l'air, dans l'eau que dans la neige, cette mixture est favorable à la prolifération d'autres bactéries potentiellement pathogènes se nourrissant de cellules mortes (Dinger, 2006). La membrane externe de la bactérie *Pseudomonas syringae* contient des lipopolysaccharides qui correspondent à des endotoxines. A proximité des canons à neige, la concentration d'endotoxines (> 90 unités d'endotoxines par m<sup>3</sup>) est très élevée par rapport au taux conventionnellement acceptable, ce qui peut provoquer des maladies inflammatoires et hémodynamiques ainsi que de la fièvre, de la dyspnée, de la toux, des dysfonctionnements respiratoires et pulmonaires et des déficits immunologiques (HHE 1993, Lagriffoul et al 2010). Il existe aussi certains risques sanitaires pour les professionnels travaillant avec le

"Snomax" et pouvant être en contact avec des réservoirs de dilution. Le risque peut être diminué en prenant des précautions lors de son utilisation : porter des protections respiratoires pendant l'opération et limiter le temps d'exposition directe avec les canons à neige durant leur fonctionnement. L'eau utilisée pour la fabrication de la neige artificielle est souvent issue du milieu naturel sans être filtrée. Elle peut donc contenir des microorganismes pathogènes pour l'homme. Une étude menée en Haute-Savoie par la DDASS en 2006 et 2007 a constaté la présence de virus, de coliformes fécaux, *E. coli*, *enterococci*, *staphylococci* et de spores de bactéries anaérobies, dans les retenues collinaires à ciel ouvert stockant l'eau pour l'enneigement, même en absence d'utilisation de "Snomax" (Lagriffoul et al 2010).

Aussi, des biofilms peuvent se développer à l'intérieur des tuyaux du système d'enneigement, surtout hors période d'utilisation ou dans des situations où l'eau est stagnante. Le risque d'exposition des skieurs et des professionnels, à des microorganismes issus de la neige artificielle fabriquée avec de l'eau de qualité microbiologique faible, est réel, car ces microorganismes peuvent survivre à des températures très basses. La production de neige artificielle, dérivée de l'eau usée, peut aussi avoir des effets accrus sur la santé humaine (AFSSET, 2008).

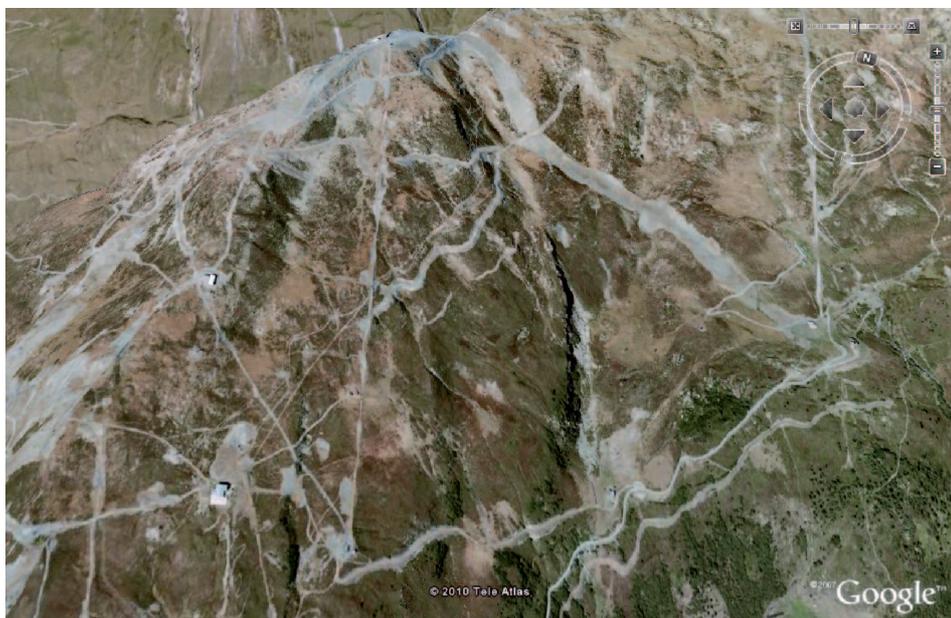
La fonte de neige artificielle contenant des microorganismes pathogènes pourrait ainsi contaminer de nombreux bassins versants servant à l'alimentation en eau potable. Dans les massifs alpins étudiés par la DDASS, les bassins versants contaminés sont



Construction d'une retenue collinaire au Mont Lachat (Crest-Voland) avec signes d'érosion dangereuse et rapide du site d'excavation en 2006



Des nouvelles routes construites pour relier les retenues collinaires qui causent de l'érosion et du déclenchement de CO2.



Pistes de ski et routes à La Rosière, en Savoie, qui accélèrent l'érosion et la libération du CO2.



Approximativement 4 200 tonnes de CO<sub>2</sub> sont émises par la construction d'une retenue collinaire de 400 000 m<sup>3</sup>, l'équivalent des émissions de 500 européens, en une année



Emission de CO<sub>2</sub> due aux glissements de terrain sur les pistes de ski

### Bibliographie

CONSEIL GENERAL DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. N. 006332-01. Neige de culture : états des lieux et impacts environnementaux. Note socio-économique. MEEDDAT. Badré, M., Prime, J.L. et Ribière, G. 2009.

DE JONG, C., et BARTH, T. Challenges in Hydrology of Mountain Ski Resorts under Changing Climate and Human Pressures. ESA, 2nd Space for Hydrology Workshop, Water Storage and Runoff: Modeling, In-Situ data and Remote Sensing, Geneva, (Suisse). 2007

EEA Changement climatique régional et adaptation — Les Alpes face au changement des ressources en eau. Rapport, N. 8. Résumé en français, 128 pages.

LAGRIFFOUL, A., BOUDENNE, J.L., ABSI, R., BALLE, J.J., BERJEAUD, J.M., CHEVALIER, S., CREPPY, E.E., GILLI, E., GADONNNA, J.P., GADONNA-WIDEHERN, P., MORRIS, C.E., ZINI, S. Bacterial-based additives for the production of artificial snow: what are the risks to human health? Science of the Total Environment, 408, p. 1659-1666. 2010.

localisés dans les sites équipés avec des enneigeurs artificiels, ou dans leur proximité immédiate. Les régions montagnardes karstiques sont particulièrement touchées par cette situation, car l'eau d'infiltration peut atteindre des aquifères assez profondes, en seulement quelques heures, du fait de l'absence de sols ne permettant pas la filtration de l'eau. Pendant les périodes de fonte de la neige artificielle, les sols saturés en eau peuvent contaminer les aquifères et les bassins versants par des microorganismes pathogènes (Lagriffoul et al 2010).

A ce jour, il n'existe pas de régulation spécifique pour la qualité de l'eau utilisée pour la fabrication de la neige artificielle. C'est pourquoi il est recommandé de n'utiliser que de l'eau potable pour la production de neige artificielle (Lagriffoul et al 2010). Concernant les bassins versants d'eau potable, des périmètres de protection devraient être fixés par l'administration française.

### ■ écologiques

La variation de la densité de la neige peut provoquer des changements significatifs dans les processus biologiques du sol et de la végétation (Rixen et al. 2008 ; Wipf et al. 2005). La couverture de neige artificielle, dense et fine, apporte aussi des changements dans la salinité du sol et accroît sa température, ce qui augmente la minéralisation et la concentration en nitrogène. Une couverture de neige plus dense provoque un retard dans la phénologie des plantes, pouvant engendrer un retard de 5 semaines par rapport à une fonte de neige naturelle.

En effet le sol et son écologie sont influencés par la nature et la durée de la couverture neigeuse. Souvent très compacte et comprimée par la préparation des pistes avec les dameuses, la neige artificielle reste sur les pistes 3 à 4 semaines plus longtemps que la neige naturelle (Keller et al. 2004 ; Teich et al. 2007). Cela retarde le développement de la végétation, réduit sa période végétative et favorise l'installation des espèces ligneuses (Wipf et al. 2005). En outre, la compression de la neige et du sol crée une couche imperméable, retardant l'infiltration de l'eau et augmentant ainsi l'écoulement de surface. Cela entraîne souvent de l'érosion. Dans des zones de forte pente, il peut y avoir une accumulation et une stagnation d'eau en bas de ces dernières, entraînant un changement

dans la composition floristique (Pröbstl et al. 2006).

Par ailleurs, la pollution sonore des canons à neige perturbe la vie sauvage. On observe ainsi, dans les Alpes occidentales et en Italie, une diversité faunistique plus faible dans les forêts de conifères proches des pistes de ski enneigées artificiellement (Laiolo and Rolando, 2005).

### ■ le bilan carbone

Les infrastructures nécessaires à la production de neige artificielle ont un impact sur le bilan carbone. En effet, l'excavation pour les retenues collinaires, les nouvelles routes construites pour les relier, les canalisations pour l'enneigement artificiel et l'érosion des pistes, libèrent du CO<sub>2</sub>. Les sols et les zones humides montagnardes se sont développés pendant des millénaires en fixant et stockant des quantités importantes de CO<sub>2</sub>. Dès qu'une zone humide est drainée, souvent pour construire une retenue collinaire, elle émet du CO<sub>2</sub> et du méthane, et ne les fixe plus. Concernant les pistes de ski couvertes longtemps par la neige artificielle, elles doivent souvent faire face à une érosion plus forte et des glissements de terrains profonds qui déchirent la couverture du sol et libèrent du CO<sub>2</sub>.

Les nouvelles routes construites pour la construction des retenues collinaires déclenchent souvent une nouvelle érosion des pentes. Bref, ces phénomènes entament la capacité des montagnes à fixer et stocker le CO<sub>2</sub>, alors qu'ils demandent des centaines d'années pour rétablir le sol.

### conclusion

Même si la neige artificielle est produite sur les pistes de ski depuis plus de 50 ans, la littérature scientifique sur le sujet reste limitée à part quelques détails techniques sur sa production. La base scientifique pour une climatologie de la neige artificielle est en développement. Les impacts environnementaux sont variés et nécessitent une analyse interdisciplinaire ainsi qu'une réglementation plus stricte. Les réflexions menées pour rendre les Alpes "climatiquement neutre" en 2050 sont incompatibles avec le développement de la neige artificielle.

■ Carmen De Jong  
Hydrologue à l'Université de Savoie