

Les représentations de la nature et la gestion de la diversité végétale sur les grands ouvrages d'infrastructure

Alain Bédécarrats

La construction des ouvrages des infrastructures de communication (routes, voies de chemin de fer, fleuves canalisés) et industrielles (stations de ski) génère des destructions dans les espaces naturels. La nature se recrée cependant sur les ouvrages terrassés (bord des routes, talus ferroviaires, pistes de ski, systèmes de digues) grâce notamment à des repeuplements végétaux réalisés par les ingénieurs.

Les gestionnaires de ces espaces considèrent ces communautés végétales comme des constructions techniques qui assurent des fonctions bien identifiées comme la protection des sols contre l'érosion et l'insertion paysagère des sites.

Une stratégie nationale qui vise à limiter l'érosion de la biodiversité (encadré 1) liée au changement climatique et à la surexploitation des milieux a été arrêtée récemment (ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2004). Elle inclut un plan d'action pour la gestion de la biodiversité sur les grands aménagements linéaires et industriels.

La prise en compte de la biodiversité – c'est-à-dire la variété des espèces et de leurs agencements – pose des problèmes de gestion tout à fait nouveaux. Elle implique en effet que les espaces végétalisés soient considérés non seulement pour leurs fonctions techniques mais comme des entités de la nature.

Encadré 1

Qu'est-ce que la biodiversité ?

Extrait du document « Stratégie nationale pour la biodiversité : enjeux, finalités, orientations ».

La biodiversité est une dimension essentielle du vivant. Elle s'exprime par la diversité génétique, la diversité des espèces et la diversité des écosystèmes. Elle est porteuse du potentiel évolutif qui garantit les capacités d'adaptation des espèces et des écosystèmes face notamment au changement global.

La biodiversité est un enjeu vital pour les sociétés humaines par les biens et les services qu'elle procure.

La biodiversité est aussi investie de valeurs symboliques, culturelles et identitaires.

Or, la nature est complexe. Elle est constituée d'ensembles d'écosystèmes localisés dans l'espace et interconnectés (Blandin et Bergandi, 2000). Ces écosystèmes sont des agencements d'espèces végétales, d'espèces animales et de micro-organismes qui cohabitent sur un site et qui interagissent entre eux et avec le milieu physique. Ils constituent de ce fait des unités fonctionnelles complexes. La composition de ces agencements change constamment dans le temps sous l'effet déterministe des interactions

Les contacts

Cemagref,
UR Écosystèmes
montagnards, 2 rue
de la Papeterie, BP 76,
38402 Saint-Martin-
d'Hères Cedex

biotiques (compétition, prédation, symbioses, etc.), d'événements imprévisibles (comme par exemple les épisodes climatiques extrêmes) et contextuels (la colonisation végétale dépend par exemple de la présence de semenciers dans le voisinage plus ou moins proche du site colonisé). De ce fait, l'histoire et la composition de chaque agencement d'espèces est unique.

La complexité intrinsèque de ces écosystèmes, qui est liée à leurs dimensions systémique, historique et contextuelle est un obstacle dont le gestionnaire doit s'affranchir. Une des stratégies qui permet de composer avec cette difficulté consiste à construire une représentation de la nature adaptée au problème traité à partir des connaissances scientifiques et empiriques disponibles.

En effet, d'après H. Simon (Demailly, 2004), il faut simplifier le réel pour agir. Cette simplification passe par l'adoption d'un système de représentation du réel qui permet d'établir une frontière entre ce qui est pertinent et ce qui ne l'est pas pour la résolution du problème qui justifie l'action. Pour faire cela, un être cognitif rassemble des informations et construit un modèle mental. Ce processus analytique précède la phase d'action.

Or, l'écologie scientifique donne une vision de la nature « pour ce qu'elle est » sous la forme de modèles théoriques non utilisables pour l'action, alors que les gestionnaires n'ont pas encore une conception opérationnelle de la nature. L'écart entre les finalités de l'activité scientifique et l'activité de gestion pose le problème des liens qu'il faut établir entre ces deux mondes.

Cet article vise à montrer que de tels liens sont possibles. On se propose pour cela d'extraire de la théorie de la complexité de la nature les éléments utilisables pour construire des représentations et des méthodes pertinentes pour la gestion.

La végétation terrestre produit la biomasse qui est utilisée et transformée par les autres organismes dans les chaînes trophiques puis intégrée dans le sol sous forme d'humus. Par son fonctionnement, elle intervient sur la constitution des sols et sur les cycles du carbone, de l'azote, de l'eau. De plus, les végétaux sont des organismes sessiles, dénombrables et visibles.

Pour ces raisons, la diversité végétale, qui prend en compte la variété des organismes végétaux et qui est corrélée au fonctionnement de l'écosystème, constitue une représentation gérable de la biodiversité.

Selon la théorie de la hiérarchie (Allen et Hoekstra, 1992 ; Ahl et Allen, 1996), la complexité de cette diversité végétale est sous-tendue par une structure d'organisation hiérarchique. On identifiera certaines propriétés simples de cette structure applicables à la gestion. On en déduira une représentation applicable à la restauration de la biodiversité à l'échelle locale. On évaluera sa pertinence en interprétant les effets des engazonnements réalisés de façon empirique sur la restauration écologique des pistes de ski.

On montrera ensuite qu'une conception hiérarchique simple du paysage (c'est un ensemble constitué par des formations végétales organisées sur un espace), appliquée à l'analyse comparative de photographies aériennes, permet de reconstituer l'histoire du paysage d'un domaine skiable et la dynamique de sa diversité.

Propriétés de l'organisation hiérarchique de la végétation

Le réseau constitué par les communautés végétales qui se déploient dans l'espace possède une structure hiérarchique. Il existe en effet une relation entre l'échelle spatiale, le niveau d'organisation de la végétation et la vitesse des processus structurants.

En effet, les niveaux d'organisation tels que l'individu, la communauté, le paysage, les complexes paysagers sont associés à des étendues spatiales croissantes. Il en découle une chaîne d'inclusions fonctionnelles et spatiales. L'individu est contenu dans la communauté, qui est contenue dans le paysage, etc. De plus, la vitesse des processus qui structurent ces entités décroît le long de l'échelle hiérarchique. Ainsi, les interactions compétitives inter-individuelles qui structurent en partie la communauté sont des mécanismes beaucoup plus rapides que les mouvements d'expansion et de disparition des populations végétales qui règlent la composition en espèces de l'ensemble des communautés dans le paysage.

Il découle de ces propriétés que les structures d'un niveau d'organisation (la communauté par exemple) résultent du fonctionnement des entités du niveau inférieur (les espèces) qui le composent, et des influences exercées par l'entité du niveau supérieur (le paysage).

L'utilisation de ces notions permet de construire des représentations. En effet, l'organisation hiérarchique de la végétation permet d'isoler des

entités en fonction de l'échelle spatiale considérée (niveau local, paysager et régional) et de les concevoir en terme d'éléments composants, de structure, de processus et de contexte (Kolasa, 1989 ; Parker et Pickett, 1998 ; Wu, 1999 ; Alard, 2002 ; Baudry, 2002 ; Adler et Lauenroth, 2003).

La représentation de la nature et la restauration de la diversité végétale

Un objectif majeur de la restauration écologique est de recréer une communauté qui, par sa structure et sa composition, s'intégrera dans son contexte paysager. Le paysage contient notamment les constituants de la restauration, c'est-à-dire le pool d'espèces mobilisables pour repeupler le site en voie de restauration. Restaurer consiste alors à faciliter le repeuplement du site par un sous-ensemble de ce pool (figure 1).

Les techniques de la restauration écologique visent alors à construire des assemblages d'espèces qui cohabitent, puis à piloter les dynamiques des systèmes qui sont générés par ces assemblages (Odum, 1989 ; Levin, 1989).

Les structures temporelles, spatiales et fonctionnelles qui apparaissent dans ces assemblages (figure 2) sont des propriétés qui émergent d'un système défini par :

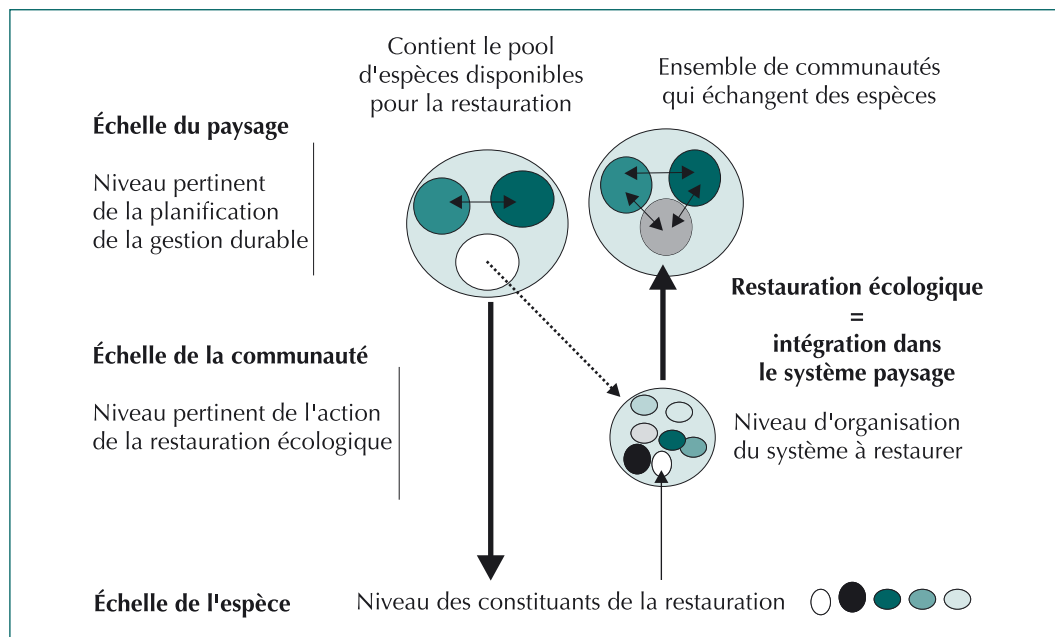
– ses composantes, c'est-à-dire des populations d'espèces ;

– les mécanismes interactifs comme la compétition, la symbiose, etc. et non interactifs comme la dissémination, la constitution des banques de graines (Bakker *et al.*, 1996) et la germination qui régissent le comportement des populations végétales dans le système ;

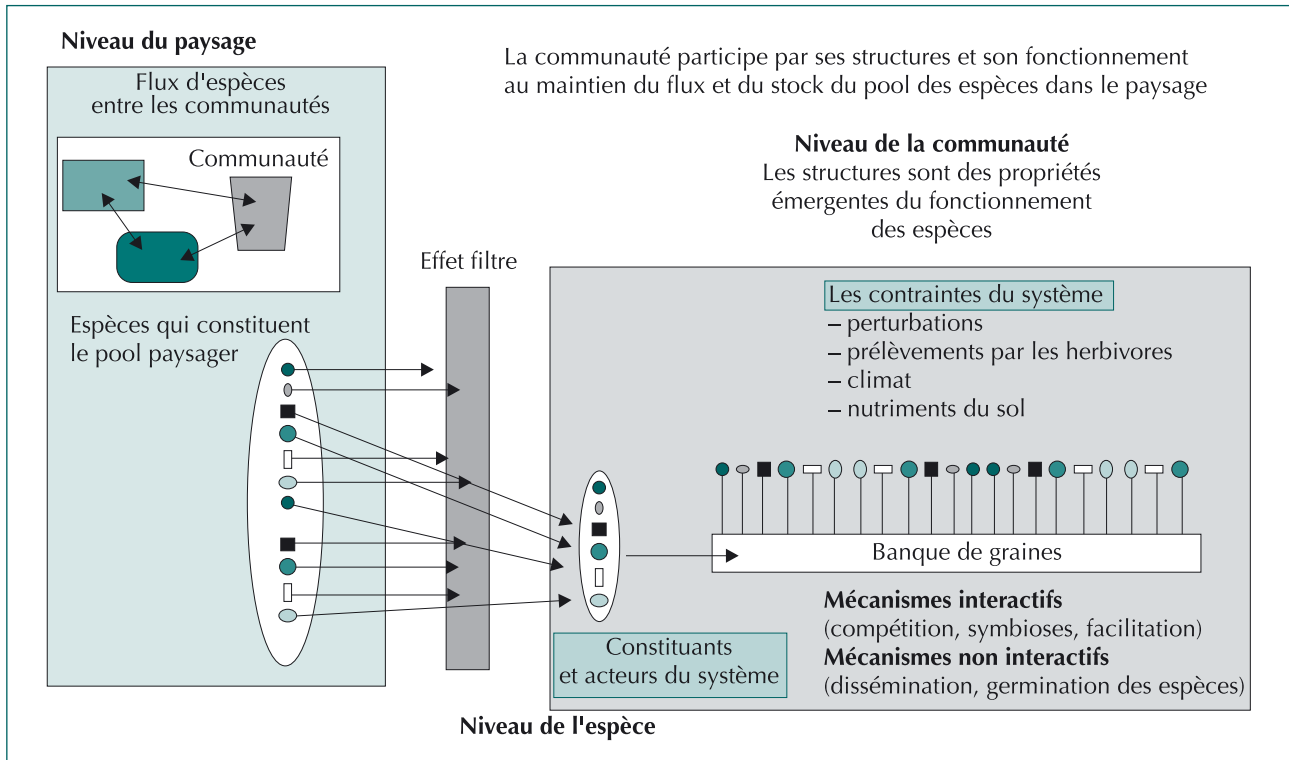
– les mécanismes endogènes qui régissent l'action des espèces sur le compartiment – sol du système (captation des éléments minéraux et de l'eau du sol et restitution de la matière organique) ;

– des facteurs de contraintes externes (perturbations, disponibilité des ressources) qui affectent les capacités d'immigration et de maintien des végétaux dans la communauté. Par exemple le niveau de fertilité des sols influe sur la survie et la croissance des végétaux en place, alors que le régime des perturbations influe sur le recrutement de nouveaux végétaux qui colonisent les sites libérés.

Le niveau global du paysage et le système local sont reliés par un effet de filtre et un effet de contexte. La communauté filtre en effet les espèces à partir des propagules disséminées dans le paysage pour retenir celles dont les caractéristiques physiologiques, anatomiques et écologiques sont compatibles avec les conditions locales de l'environnement (Keddy, 1992).



◀ Figure 1 – La restauration de la diversité végétale met en jeu deux échelles : l'échelle du paysage et l'échelle de la communauté.



▲ Figure 2 – Les populations végétales issues du pool paysager cohabitent localement sous l'effet des mécanismes et des contraintes. Les modalités de cette cohabitation font émerger les structures de la communauté végétale.

Le contexte des structures orographiques, des processus hydrauliques, des variations climatiques ou des déplacements des grands herbivores qui se manifestent à l'échelle des paysages influe sur le régime de certaines perturbations, sur l'intensité des prélèvements liés à l'herbivorie (Oksanen, 1990), et sur les conditions micro-climatiques ou édaphiques locales.

Les indicateurs pour le pilotage de la restauration

Le pilotage de la communauté implique d'acquies informations sur son état, d'évaluer cette information au regard des finalités recherchées, puis d'agir si besoin sur les facteurs qui contraignent la dynamique. Ces informations sont acquises au moyen d'indicateurs (Aronson et Le Floc'h, 1996 ; Bazin et Barnaud, 2002).

La construction d'un système d'indicateurs dépend du problème posé. Ainsi, la typologie suivante correspond bien au cas de la restauration des communautés herbacées, en distinguant :

- les divers indicateurs de la similarité de composition (spécifique, structurale) entre les communautés végétales d'un paysage et la communauté

restaurée qui informent sur la qualité de la restauration, c'est-à-dire sur le niveau de l'intégration de la communauté à son ensemble paysager ;

- les indicateurs structuraux qui informent sur les constituants du système, l'importance de leur participation à son fonctionnement, leur mode d'organisation spatiale. Ils permettent d'inférer les processus sous-jacents qui génèrent les structures ;

- les indicateurs relatifs au fonctionnement des espèces qui permettent de prédire, à partir de la mesure de certaines des caractéristiques des plantes, les conditions des contraintes du milieu qui permettent leur recrutement et leur maintien (Lavorel *et al.*, 1997 ; Piwell *et al.*, 2003) ;

- les indicateurs des banques de graines qui renseignent sur les potentiels des recrutements futurs dans la communauté et sur les vecteurs de la dissémination des graines (Bakker *et al.*, 1996) ;

- les indicateurs du sol qui donnent des informations relatives à la disponibilité des ressources du sol (eau nutriments minéraux). C'est un élément déterminant de la survie, de la croissance et de la capacité compétitive des végétaux (Grime, 1991) ;

– les indicateurs des régimes de perturbations. Par exemple, les régimes des perturbations liées au déplacement des grands herbivores jouent un rôle primordial dans la dynamique des communautés herbacées ;

– les indicateurs de l'intensité des prélèvements de la biomasse par les herbivores. Il est important de disposer de cette information car l'herbivorie est un facteur déterminant de la régulation de la composition des communautés herbacées.

Les techniques de mise en oeuvre de la restauration de la diversité végétale herbacée

Il existe plusieurs méthodes pour constituer les assemblages végétaux qui vont initier la dynamique spontanée. Le choix dépend du type de formation végétale qu'on se propose de restaurer (végétaux ligneux ou herbacés) et des usages techniques qui sont assignés à la végétation.

Dans le cas où des risques d'érosion pèsent sur les sites, des méthodes qui visent à favoriser l'installation rapide des plantes sont utilisées. Dans le cas de l'utilisation d'une végétation herbacée, il s'agit de reconstituer les conditions favorables à la germination des graines et à la croissance végétale par des apports de nutriments ou par l'épandage de terre végétale ou de composts, puis à semer des mélanges d'espèces végétales commerciales ou issues de productions spécifiques (Dinger, 1997). Des communautés se constituent à partir de ces mélanges.

La reconstitution de la diversité végétale est un processus qui dure quelques décennies. Le pilotage de la dynamique des communautés s'effectue en contrôlant les facteurs de contrainte. On peut jouer sur chaque facteur séparément (apports d'engrais, sur semis, fauchages) ou mettre en oeuvre des pratiques qui vont agir sur l'ensemble des facteurs. Ainsi, dans le cas de l'utilisation du pastoralisme, le mode de conduite des troupeaux permet de moduler en même temps l'intensité des prélèvements de la biomasse végétale, le régime des perturbations constituées par les empreintes des sabots, et l'intensité de la dissémination des graines transportées dans le tube digestif, les sabots et le pelage des animaux.

La reconstitution de la diversité végétale sur les pistes de ski

Les travaux de terrassement entrepris pour modeler les reliefs lors de la construction des pistes de ski produisent des destructions plus ou

moins concentrées de la végétation et des sols. Ces destructions, commencées il y a une quarantaine d'années, se poursuivent actuellement en plus haute altitude car les stations reconfigurent les domaines skiables pour anticiper les effets du changement climatique sur la couverture neigeuse. Ces destructions concernent 3 à 5 % de la superficie totale des domaines skiables. Des travaux d'engazonnement des pistes avec des espèces herbacées commerciales sont mis en oeuvre pour protéger les sols dénudés contre l'érosion hydrique et pour atténuer l'effet de mitage des paysages lié à ces terrassements.

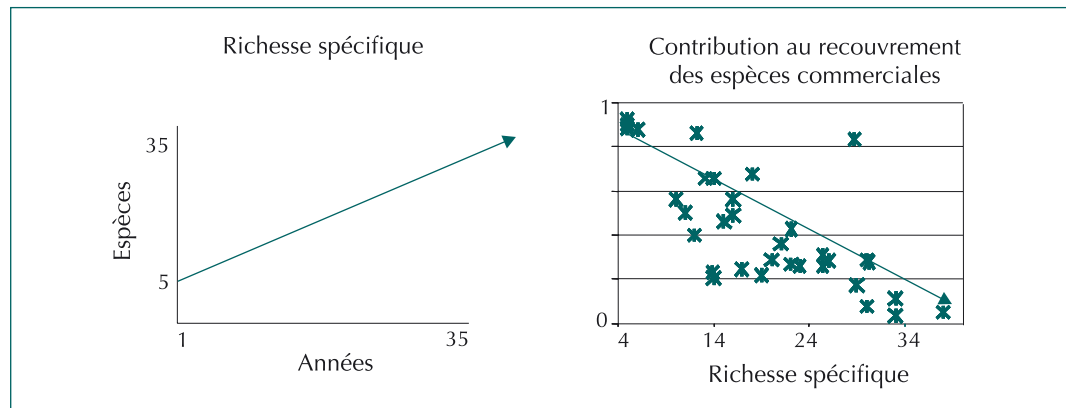
La question de la gestion durable des domaines skiables émerge depuis quelques années. C'est la raison pour laquelle l'efficacité des engazonnements pour reconstituer la diversité végétale a été évaluée sur les pistes de la station de La Plagne (Dinger et Bédécarrats, 2000). Les impacts des techniques de construction des pistes (terrassements, apports de matières organiques et végétalisation), et de gestion de la neige (damage de la neige, utilisation de la neige artificielle) sur la biodiversité locale ont été analysés.

On a pu ainsi établir que la pratique de l'engazonnement avec des espèces du commerce est inefficace sur les sites les plus difficiles à l'étage alpin. À cet étage, on peut constituer les assemblages végétaux en piégeant les graines qui sont disséminées dans les paysages au moyen de structures et de tapis posés sur le sol, ou par des plantations d'espèces autochtones (Urbanska, 1995). Ces techniques, qui sont chères, restent encore à un stade expérimental. Cependant, dans les étages du montagnard et du subalpin, l'engazonnement permet d'installer un système-communauté à partir de mélanges de graminées et de légumineuses (tableau 1).

▼ Tableau 1 – Composition pondérale des mélanges de graines utilisés pour l'engazonnement des pistes de ski de La Plagne en Savoie.

	Avant 1982	1983- 1990	Après 1991
Graminées			
Avoine élevée	15		
Fétuque élevée	18		40
Fétuque rouge		50	15
Fétuque ovine			20
Phléole des prés	14	30	
Dactyle aggloméré	14		10
Ray-grass			85
Total	61	80	
Légumineuses			
Trèfle rampant	13	10	10
Lotier corniculé	12	10	5
Luzerne des prés	14		
Total	39	20	15

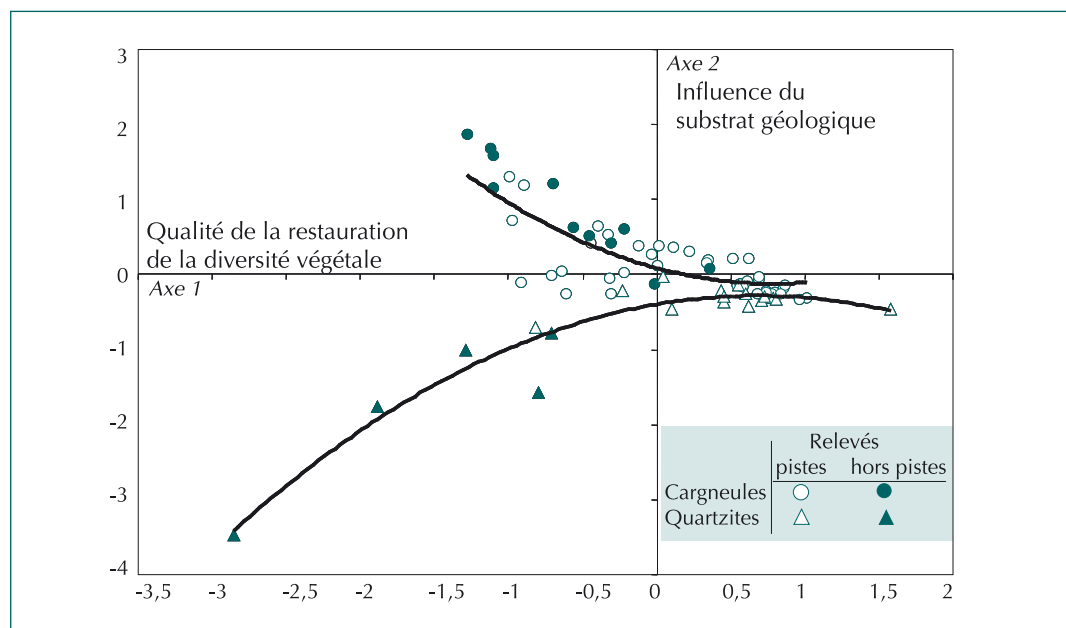
► Figure 3 – La richesse spécifique des communautés issues des engazonnements croît avec le temps et la contribution des espèces semées diminue en raison inverse de la richesse spécifique des communautés.



La dynamique spontanée conduit à plus ou moins long terme à la restauration de la diversité végétale. En effet, la composition des communautés issues des engazonnements (composition spécifique et contribution des espèces au recouvrement) évolue et se rapproche avec le temps de celle des communautés des pelouses et des landes d'altitude (figure 3). Il faut une trentaine d'années environ pour que l'intégration soit satisfaisante. Cette évolution dépend cependant

du contexte mésologique (figure 4). En effet, on a constaté que le processus de restauration se déroule convenablement sur des cargneules, des gypses et des schistes alors que des blocages se produisent lorsque le substrat géologique est très acide (quartzites).

Lorsque le processus suit son cours normal, la richesse spécifique des communautés augmente avec le temps et la contribution des espèces du commerce diminue.



▲ Figure 4 – Carte factorielle sur laquelle se positionnent les relevés de végétation réalisés sur des pistes de ski et dans les communautés environnantes de l'étage subalpin de La Plagne (voir la légende sur la carte). L'axe 1 représente la qualité de la reconstitution de la diversité végétale sur pistes de ski, l'axe 2 discrimine le cas des cargneules (cercles verts en haut) et des quartzites (triangles verts en bas). La qualité de cette intégration dépend du substratum géologique. Elle est satisfaisante sur les cargneules. Elle est plus problématique sur des substrats acides comme les quartzites.

L'utilisation d'indicateurs fonctionnels a permis d'expliquer les raisons de l'évolution de la composition spécifique. Les espèces du commerce sont en effet des végétaux compétitifs à forte croissance, ce qui explique le fait qu'ils permettent l'installation rapide d'une communauté. Cependant, ces espèces sont intolérantes aux stress liés au climat et à la pauvreté des sols, de sorte qu'elles périssent au bout de cinq à six périodes de végétation. En outre, comme leur cycle de floraison n'est pas adapté aux conditions de l'altitude, elles ne se reproduisent pas par la voie sexuée et leur capacité de reproduction

végétative reste limitée. Les espaces découverts sont alors colonisés par les propagules des végétaux autochtones. Ces espèces ont une croissance lente, mais elles sont adaptées aux conditions de stress climatique et édaphique qui prévalent dans les milieux d'altitude. La présence de ces espèces améliore la résistance de la communauté à des événements climatiques extrêmes. L'engazonnement est donc une technique de compromis qui permet de concilier une protection rapide des sols sur le court terme avec la restauration de la biodiversité locale sur le long terme (encadré 2).

Encadré 2

Le système CRS de Grime pour la représentation des communautés d'engazonnement des pistes de ski

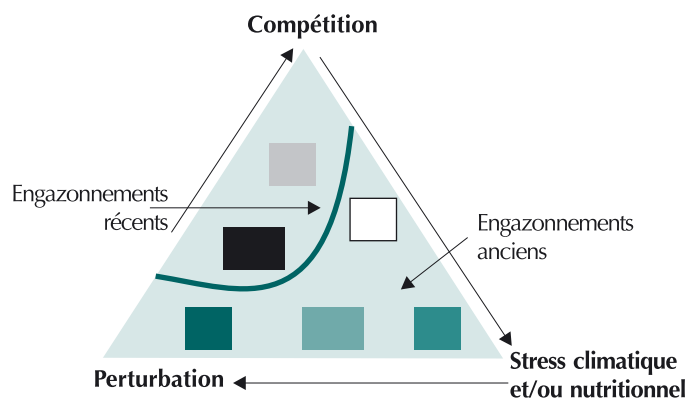
Grime considère que les espèces végétales se sont différenciées en réponse à trois contraintes principales :

- le stress (S), c'est-à-dire les facteurs qui limitent la croissance comme la fertilité des sols, l'eau et le climat ;
- la compétition (C), c'est-à-dire l'intensité de la lutte pour l'accès aux ressources ;
- le régime des perturbations (R) qui détruisent totalement ou partiellement la végétation.

En réponse à ces perturbations et sous l'effet des compromis d'allocation des ressources internes dans les organismes végétaux, trois grands types végétaux se sont constitués. Les rudérales, qui sont des annuelles à forte capacité de production grainière, les compétitrices qui sont des espèces pérennes à grande vitesse de croissance, à forte capacité de captation des ressources, qui ne survivent pas lorsque les stress sont importants et les stress-tolérantes à vitesse de croissance lente, à faible capacité de captation des ressources mais qui survivent lorsque les ressources sont peu disponibles.

Des types intermédiaires SC, SR, CR, CS et CSR ont pu être aussi identifiés.

On voit sur le triangle (figure 5) que les espèces du commerce sont de type CR et SCR. Ces espèces sont compétitives, elles supportent une faible intensité de perturbations, mais elles ne sont pas adaptées au stress. Elles sont remplacées au fil du temps par les espèces autochtones qui sont de type SR, SC et S. Ces espèces sont adaptées aux conditions de stress et de faibles intensités de perturbations. Des espèces de type R qui apparaissent avec le temps mettent en évidence que les perturbations liées à l'activité des herbivores s'intensifient dans la communauté.



▲ Figure 5 – Représentation des types fonctionnels qui composent les communautés d'engazonnement des pistes de ski dans le système CRS de Grime.

Nos connaissances sur ces dynamiques sont actuellement trop générales pour envisager des techniques de pilotage ciblées qui permettraient d'accélérer la restauration. C'est pourquoi des travaux de recherche qui relèvent de l'écologie fonctionnelle sont actuellement en cours pour identifier de façon fine les mécanismes en jeu.

L'impact d'une station de ski sur la dynamique du paysage

La gestion durable doit prendre en compte la biodiversité que les ouvrages d'infrastructure modèlent sur différentes échelles spatiales (du local au paysage). Le paysage constitue notamment l'échelle pertinente à laquelle la station doit définir les options stratégiques de gestion de la biodiversité.

La station des Arcs en Savoie a engagé une réflexion stratégique sur son développement durable. La première phase d'une démarche stratégique consiste à acquérir les informations nécessaires à l'établissement de l'état des lieux. C'est la raison pour laquelle on a reconstitué l'histoire des paysages de son domaine skiable afin d'évaluer l'impact des aménagements de la station sur la structure et la dynamique de la diversité paysagère. On a considéré que le paysage est le niveau d'organisation de la diversité végétale constitué par des formations forestières, des landes, des formations herbacées denses et des pelouses.

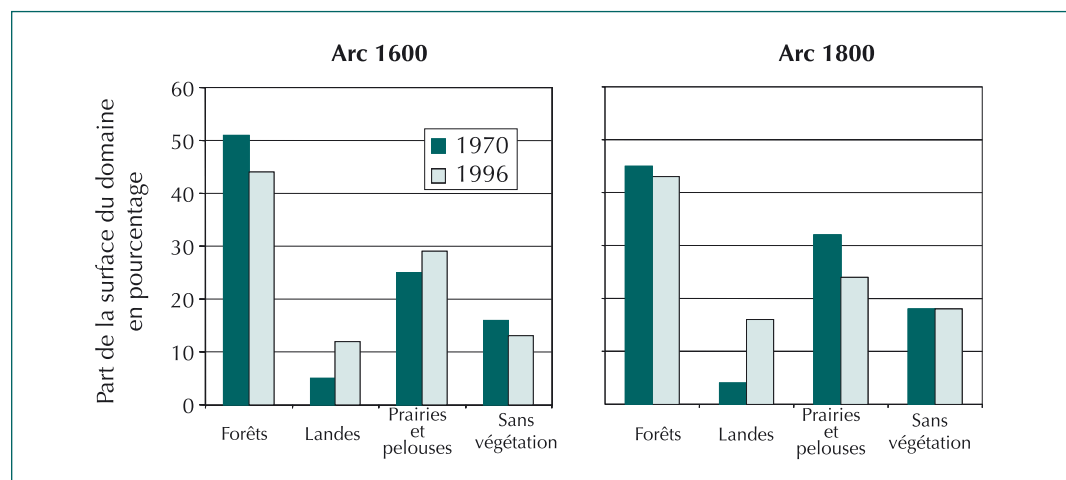
Nous avons appliqué des techniques de la géomatique et du traitement des images à haute définition (taille du pixel = 40 x 40 cm) pour construire

et analyser des orthophotoplans géoréférencés de la station des Arcs en 1970 et 1996. Sur chacune des deux images, la formation végétale correspondant à chaque pixel a été identifiée et la dynamique de la végétation a été reconstruite en comparant pixel à pixel les deux images.

L'analyse de ces différentes cartes a montré que la biodiversité paysagère est modifiée par les usages liés au ski de façon différente en fonction de l'étage bioclimatique. En effet, la biodiversité des montagnes européennes est structurée en grandes ceintures bioclimatiques qui se succèdent sur un gradient altitudinal (Ozenda, 2002) et la station des Arcs est implantée dans un paysage qui recoupe plusieurs étages de végétation. Dans la partie basse du domaine qui se situe à l'étage montagnard, les pistes de ski traversent une végétation composée de forêts naturelles montagnardes et de prairies de fauche. Dans la partie supérieure qui se situe à l'étage subalpin, le réseau des pistes se déploie dans un paysage composé de forêts de conifères d'altitude, de landes, de prairies et de pelouses pâturées. Enfin, à l'étage alpin, les pelouses, les landines et des formations particulières d'éboulis et des trous à neige sont composées en majorité par des espèces orophiles¹ adaptées au climat rigoureux de la haute altitude.

Nos investigations ont mis en évidence que la biodiversité paysagère de l'étage alpin est fortement déstructurée par les implantations industrielles. Les terrassements génèrent des destructions de sols et des communautés fragiles dont la restauration est difficile et mal maîtrisée. De plus, dans le contexte du réchauffement du climat,

1. Qualifie une espèce (ou végétation) que l'on ne trouve que dans les montagnes.



► Figure 6 – L'équilibre entre les principales formations végétales des paysages des domaines skiables des Arcs 1600 et des Arcs 1800 a peu varié entre 1970 et 1996.

ces milieux fortement perturbés risquent de constituer des sites privilégiés de colonisation par des espèces rudérales qui migreront depuis les basses altitudes (Körner, 1999).

Par contre, dans les domaines du subalpin et du montagnard, où la diversité des paysages a été largement structurée par les usages agro-sylvo-pastoraux, les usages industriels conduisent à une restructuration paysagère. En effet, les domaines skiables se sont implantés dans un contexte de déprise agricole forte qui génère une dynamique marquée par la fermeture des paysages liée à l'enrichissement et au reboisement spontané des anciens champs et des prairies. La nécessité de disposer d'espaces ouverts pour la pratique du ski contribue au maintien des communautés de plantes herbacées qui disparaissent en d'autres endroits.

Ainsi, la structure globale des paysages des domaines des Arcs 1600 et Arcs 1800, qui se situent dans l'étage montagnard et subalpin de la Savoie, a peu changé entre 1970, année de la création de la station et 1996 (figure 6). Cependant, au cours de cette période, la déprise agricole a généré une extension des forêts et des landes (21 % de la surface pour Les Arcs 1600 et 16 % pour Les Arcs 1800) (tableau 2). Dans le même temps, les travaux d'aménagement des stations ont entraîné l'apparition de landes et de communautés herbacées qui couvrent 22 % de la surface des Arcs 1600 et 18 % des Arcs 1800.

L'évaluation de l'effet global de la station sur l'histoire du paysage contribue aux réflexions en cours pour l'élaboration d'une stratégie de la gestion de la biodiversité des stations de ski.

D'autres éléments doivent être pris en compte, comme la protection de certaines espèces végétales et animales sur le site ainsi que les effets du réchauffement du climat (EUR 18178 EN, 1998).

Conclusion

La construction d'une ingénierie écologique pour la gestion de la biodiversité à l'échelle des écosystèmes et des paysages correspond à une demande sociétale.

D'une part, la connaissance de la nature s'est accrue significativement grâce à l'activité scientifique qui a bénéficié des apports de la technologie pour développer de nouvelles approches comme la modélisation et les techniques d'imagerie. D'autre part, les gestionnaires prennent de plus en plus conscience qu'il faut gérer la nature pour préserver la biodiversité et les services qu'elle rend

Raison supposée	Phénomène dynamique	ARC	ARC
		1600	1800
Déprise agricole et forestière	Progression vers une formation forestière	17 %	12 %
	Progression vers une formation de lande	4 %	4 %
Implantation de la station	Régression de forêt vers pelouse	9 %	9 %
	Régression de forêt vers lande	6 %	5 %
	Progression de sol nu vers pelouses	7 %	4 %
	Disparition du couvert végétal	6 %	8 %

% : pourcentage de la surface couverte par la végétation

à la société. Ils sont encore relativement démunis pour agir à bon escient. C'est pourquoi l'établissement de liens pertinents entre les modèles de connaissance scientifiques et les représentations nécessaires à l'action constitue un des enjeux majeurs de l'ingénierie écologique.

À cet égard, la représentation de la nature que nous proposons est appliquée à la gestion de la diversité végétale et nous avons considéré que celle-ci pouvait dans une première approche intégrer la biodiversité. Or, il s'agit d'une approximation. Pour mieux représenter la dynamique de la biodiversité dans un écosystème terrestre en voie de restauration, il est nécessaire de construire un modèle spécifique pour le compartiment du sol.

La conception hiérarchique de la nature constitue un cadre général de réflexion. Comme nous l'avons vu, elle permet l'élaboration d'une stratégie de gestion de la biodiversité centrée sur l'écosystème. Cette conception est aussi pertinente dans le cas où la gestion vise la conservation des espèces et des milieux.

Les éléments abordés dans cet article font référence à des problèmes scientifiques et techniques. Or, la restauration et la gestion de la biodiversité sont aussi des pratiques sociales qui s'appuient sur une éthique. Le sens de ces actions s'inscrit en effet dans une nouvelle conception des relations des sociétés à la nature (Higgs, 1995). Ainsi, la *Society of Ecological Restoration* qui a été créée en 1987 pour promouvoir le développement de la restauration écologique au niveau mondial définit actuellement ces objectifs de la façon suivante « *The SER is aimed to promote ecological restoration as a means of sustaining the diversity of life on Earth and reestablishing an ecologically healthy relationship between nature and culture* ». □

▲ **Tableau 2** – L'évolution des paysages entre 1970 et 1980 aux Arcs 1600 et aux Arcs 1800 est sous-tendue à la fois par la déprise agricole et forestière et par les aménagements des milieux pour la pratique du ski.

 Remerciements

Je remercie Thierry Dutoit, Grégory Loucougaray et Sophie Labonne qui ont participé à l'amélioration de ce texte.

Résumé

La végétation des ouvrages terrassés des infrastructures de communication et industrielles participe à l'expression de la biodiversité. Elle doit être gérée en conséquence. C'est pourquoi les gestionnaires doivent disposer de représentations opérationnelles de la nature.

Or, les modèles scientifiques permettent d'inférer des modèles pragmatiques pour l'action. Ainsi, selon la théorie de la hiérarchie, la complexité de la nature est sous-tendue par une structure d'organisation dont on peut identifier des propriétés simples. On les utilise pour construire une représentation dont on déduit des méthodes pour la reconstruction de la biodiversité à l'échelle locale et pour l'évaluation des techniques de restauration écologique des pistes de ski.

On les utilise aussi pour analyser la dynamique du paysage d'un domaine skiable.

Abstract

Managers need pragmatic representation of nature suited to the restoration of the biodiversity on side roads, river embankments or on ski trails. In this article, simple representations are drawn up from the ecological theory of hierarchy. A simple model aimed to the ecological restoration of the vegetal diversity at the local scale is deduced from some properties of that structure. This model is used for the valuation of the vegetal diversity reconstitution on ski trails.

At the landscape level, this hierarchical viewpoint allows to assess the impacts of a ski resort on landscape vegetal diversity from aerial photography analysis.

Bibliographie

ADLER, P.-B. ; LAUENROTH, W.-K., 2003, The power of time: spatiotemporal scaling of species diversity, *Ecology Letters*, n° 6, p. 749-756.

ALARD, D., 2002, La restauration des écosystèmes calcicoles de la basse vallée de la Seine : l'importance des échelles spatio-temporelles pour définir un écosystème de référence, *Revue d'Écologie*, supplément n° 9, p. 159-173.

AHL, V. ; ALLEN, T.-F.-H., 1996, *Hierarchy Theory: A Vision, Vocabulary, and Epistemology*, Columbia University Press, New York, 206 p.

ALLEN, T.-F.-H. ; HOEKSTRA, T.-W., 1992, *Toward a unified ecology*, Columbia University Press, New York, 384 p.

ARONSON, J. ; LE FLOC'H, E., 1996, Vital landscape attributes: missing tools for restoration ecology, *Restoration ecology*, n° 4, p. 377-387.

BAKKER, J.-P. *et al.*, 1996, Seeds banks and seed dispersal: important topics in restoration ecology, *Acta Bot. Neerl.*, n° 45 (4), p. 461-490.

BAUDRY, J., 2002, Les échelles d'espace et de temps en écologie de la restauration, *Revue d'Écologie*, supplément n° 9, p. 149-158.

BAZIN, P. ; BARNAUD, G., 2002, Du suivi à l'évaluation : à la recherche d'indicateurs opérationnels en écologie de la restauration, *Revue d'Écologie*, supplément n° 9, p. 201-221.

BLANDIN, P. ; BERGANDI, D., 2000, À l'aube d'une nouvelle écologie ?, *La Recherche*, n° 332, p. 56-59.

DEMAILLY, A., 2004, *Herbert Simon et les sciences de conception*, L'Harmattan, coll. Ingenium Sciences et techniques, 243 p.

DINGER, F., 1997, *Végétalisation des espaces dégradés en altitude*, Cemagref Éditions, 144 p.

DINGER, F. ; BÉDÉCARRATS, A., 2000, *Étude de l'évolution du fonctionnement des sols reconstitués en altitude au niveau des pistes de ski ainsi que de la dynamique de reconquête de ces espaces par les espèces natives*, Programme « Recréer la nature », MATE/MNHN, Cemagref, 40 p.

EUR 18178 EN, 1998, *Global change in Europe's cold regions Ecosystems research Report*, Ed. HEAL, O.-W. ; CALLAGHAN, T.-V. ; CORNELISSEN, J.-H.-C. ; KÖRNER, C. ; LEE, S.-E., rapport, 157 p.

GRIME, J.-Ph., 1991, Nutrition, environment and plant ecology: an overview, *Plant growth ; interactions with nutrition and environment*, Eds J.-R. POORTER et D.-W. LAWLOR, Cambridge University Press, p. 249-267.

HIGGS, E.-S., 1995, What is Good Ecological Restoration ?, *Conservation biology*, vol. 11, n° 2, p. 338- 348.

KEDDY, P.-A., 1992, Assembly and response rules. Goals for predictive community ecology, *Journal of Vegetation Science*, n° 3, p. 157-164.

KOLASA, J., 1989, Ecological systems in hierarchical perspective: breaks in community structure and others consequences, *Ecology*, n° 70, p. 36-47.

KÖRNER, Ch., 1999, Global change at high elevation, *Christian Körner Alpine plant life Springer*, p. 291-298.

LAVOREL, S. *et al.*, 1997, Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance, *Tree*, vol. 12, n° 12.

LEVIN, S.-A., 1989, Challenges in the development of a theory community and ecosystem structure and function, *Perspectives in ecological theory*, ROUGHGARDEN, J. ; MAY, R.-M.; LEVIN, R.-M., editors, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, p. 242-255.

Ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2004, *Stratégie nationale pour la biodiversité ; enjeux, finalités, orientations*.

ODUM, H.-T., 1989, Ecological engineering and self-organization, *Ecological Engineering, an introduction to Ecotechnology*, Ed. by WILLIAM, J. ; SMITCH ; JORGENSEN, S.-E.; Wiley, New York, p. 79-101.

OZENDA, P., 2002, *Perspectives pour une géobiologie des montagnes*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 195 p.

PARKER, V.-T. ; PICKETT, S.-T.-A., 1998, Historical contingency and multiple scales within plant communities, *Ecological scale: theory and applications*, PETERSON, D. ; PARKER, V.-T., editors, Columbia University Press, New York, 608 p.

PYWELL, R.-F. *et al.*, 2003, Plant traits as predictors of performance in ecological restoration, *Journal of Applied Ecology*, n° 40, p. 65-77.

URBANSKA, K.-M., 1995, Ecological Restoration above the timberline and its Demographic Assessment, *Restoration Ecology in Europe*, URBANSKA, K.-M.; GRADZINSKA, K. (eds), Geobotanical Institute SFIT, Zurich, p. 15-36.

WU JIANGUO, 1999, Hierarchy and Scaling: Extrapolating information along a scaling ladder, *Canadian Journal of remote sensing*, vol. 25, n° 4, p. 367-380.