

Ecosystèmes terrestres

Auteurs

Christian Körner, présidence

Botanisches Institut, Université de Bâle

Nina Buchmann

Institut für Pflanzenwissenschaften, EPF de Zurich

Harald Bugmann

Departement für Umweltwissenschaften, EPF de Zurich

Peter Duelli

WSL Birmensdorf

Erika Hiltbrunner

Botanisches Institut, Université de Bâle

Gabriele Müller-Ferch

Rédaction, ProClim-, Académie suisse des sciences naturelles

Jürg Paul Müller

Naturmuseum, Coire

Otto Wildi

WSL Birmensdorf

Roman Zweifel

WSL Birmensdorf



1. Introduction

Situation

A quoi ressemblera le paysage dans lequel vivront nos enfants et petits-enfants en 2050? Quelles tendances discernons-nous aujourd'hui et comment notre paysage et ses prestations se modifieront-ils si l'évolution actuelle se poursuit, voire s'accélère? Le présent rapport est, comme toutes les projections dans le futur, une évaluation sur la base du savoir actuel, une tentative de fournir une image aussi plausible que possible.

Les aspects suivants comptent parmi les plus importants facteurs d'influence auxquels les écosystèmes sont soumis aujourd'hui:

- les changements dans l'utilisation du sol par l'être humain
- les modifications de la composition de l'atmosphère (CO₂, composés d'azote)
- les changements climatiques (réchauffement, changements du régime des précipitations, tempêtes)
- l'accumulation de substances actives dans l'environnement (pesticides, hormones, substances réactives générales).

Les conséquences possibles sont:

- la perte de diversité biologique et de biocénoses entières
- des modifications des formes de couverture du sol (forêt, champ, herbage, site construit etc.)
- la perte de substance et de qualité du sol
- des modifications de l'utilité écosystémique pour l'être humain.

Chaque évaluation de l'évolution future des ressources naturelles d'un pays commence nécessai-

rement par une considération de l'état actuel et de son développement historique. Dans le cas des écosystèmes terrestres (les systèmes aquatiques sont traités au chapitre Economie des eaux), le meilleur point de départ est la répartition des surfaces des différentes formes de couverture du sol au cours du temps. Chose étonnante, des données à ce sujet n'existent pas encore depuis très longtemps.

Les premières vagues évaluations de la surface de forêt en Suisse remontent à 1840. A l'époque, des flancs entiers de montagne étaient coupés à blanc. La première loi sur les forêts, qui date de 1876, a limité ces déboisements effrénés et suscité la réalisation des premiers inventaires des forêts. Plus tard, l'intérêt s'est porté avant tout sur les ressources dont on avait besoin dans l'immédiat. C'est ainsi que pendant les grandes guerres, on s'est préoccupé du potentiel de la production agricole indigène et des surfaces se prêtant à cet usage. Les méthodes utilisées à cet égard ne sont pas restées tout le temps les mêmes. Il est par exemple très difficile de définir ce qui est une forêt et ce qui ne l'est pas. Les bosquets, les zones de chablis ou les jeunes peuplements en train de pousser sur d'anciens pâturages en font-ils partie ou non? La figure 1 présente une estimation, à partir de sources historiques, de l'évolution dans le temps des différentes formes de couverture du sol depuis 1900.

La première statistique de la superficie de la Suisse, basée sur des vues aériennes et donc relativement précise, a été réalisée dans les années 1979-1985, une autre remonte à la période 1992-1997. Une troisième mise à jour est en travail depuis 2005 (elle sera terminée d'ici 2013). Le

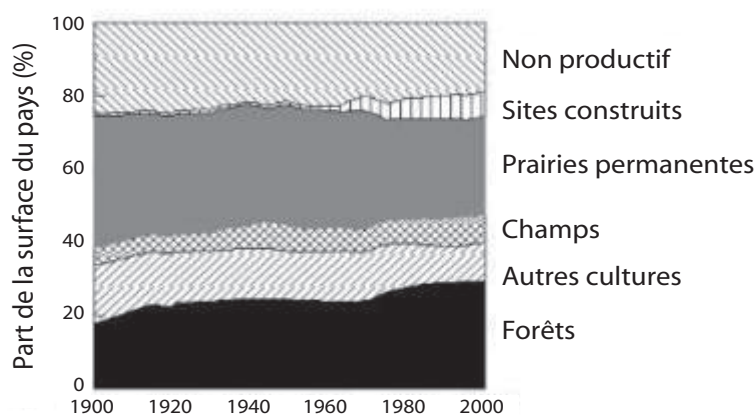


Figure 1:
Estimation de l'évolution des formes de couverture du sol en Suisse de 1900 à 2000.¹

Tableau 1: Formes de couverture du sol en Suisse. 74 catégories de base ont été regroupées en quatre catégories principales.

Catégories d'utilisation du sol et de structures	Surface en ha (% de la surface totale)		Changements entre les inventaires	
	1979–1985	1992–1997	Ha	% (100%=1979/85)
Surface urbanisée et de transport	246'098 (5.97%)	278'772 (6.76%)	32'674	+13.3
Surface agricole	1'572'091 (38.15%)	1'523'930 (36.98%)	-48'161	-3.1
Forêts et formations arbustives	1'252'815 (30.40%)	1'269'825 (30.81%)	17'010	+1.4
Surfaces non productive et végétation ^{a)}	1'050'044 (25.48%)	1'048'521 (25.45%)	-1'523	-0.1

^{a)} Les écosystèmes humides (surfaces selon inventaires) sont compris dans cette catégorie (données de surface selon les inventaires fédéraux pour la protection des hauts- et bas-marais).

tableau 1 montre les changements entre la première et la seconde statistique de la superficie.

Des quelque 41'290 km² que compte la surface de la Suisse, la plus grande part, soit 38.1%, revenait à l'agriculture à l'époque de la première enquête (1979–1985). Les forêts et autres surfaces boisées représentaient 30.4% de la superficie du pays. A peine 6% étaient occupés par l'habitat humain, l'industrie et les surfaces de transport, 25.5% étaient des surfaces dites 'non productives': rochers, glaciers, lacs, cours d'eau. On peut dire en gros qu'au cours de ces douze années (1992–1997), la surface de forêts et la surface urbanisée ont augmenté d'environ 1.2% au détriment de l'agriculture; cependant, cette tendance s'est considérablement renforcée dans la période la plus récente. Lors de la seconde enquête, les surfaces boisées couvraient en gros 31% de la superficie du pays. La plus forte augmentation est à relever dans la forêt buissonnante des Alpes. Le pourcentage apparemment faible de la perte en surfaces agricoles ne doit pas masquer le fait qu'il représente en réalité une disparition considérable de terres cultivées (3% correspondent à la „disparition“ du canton d'Obwald).

Les prairies et pâturages ont cédé la place à la forêt dans les terrains à productivité limitée et à l'urbanisation avant tout dans le secteur de l'agriculture à haut rendement; la surface occupée par l'urbanisation et dédiée aux transports a augmenté de 13.3% en seulement douze ans. Pendant cette période, l'urbanisation et les surfaces de transport ont absorbé 7.5 ha par jour de surface agricole.

Dans la suite de ce chapitre, tous les scénarios et réflexions sont à considérer sur cet arrière-plan. En termes de superficie, l'importance de la forêt augmente, celle des herbages diminue, tandis qu'en haute montagne, la glace libère de vastes surfaces. L'évolution de l'espace urbain et de l'agriculture est présentée dans des chapitres spécifiques. Le présent chapitre, consacré aux écosystèmes terrestres, traite:

- des écosystèmes forestiers
- des prairies et pâturages (herbages utilisés extensivement)
- des biotopes humides (marais, zones alluviales, rives).

Les influences sur la faune seront abordées comme thème commun à toutes les formes de couverture du sol.

Nous examinerons rapidement les développements historiques qui ont conduit à la situation actuelle, pour nous tourner ensuite vers l'avenir. Nous mettrons l'accent sur la température et les précipitations comme grandeurs climatiques et nous ferons chaque fois la distinction entre l'évolution continue et les événements extrêmes. Le texte est subdivisé en trois paragraphes:

- biodiversité (perte d'espèces, perte d'habitat, interactions biotiques)
- dangers naturels et sécurité des espaces vitaux (érosion, inondations, instabilité des pentes)
- utilité et produits des écosystèmes (bois, alimentation, puits de carbone)

Tour d'horizon

La composition des écosystèmes se modifiera à long terme en Suisse, car les espèces qui les constituent réagiront différemment aux changements climatiques. Beaucoup de ces modifications seront irréversibles. D'une part, des espèces qui existaient jusqu'ici disparaîtront, d'autre part, des espèces végétales et animales étrangères immigreront de régions plus chaudes. La flore et la faune de la Suisse se rapprocheront ainsi encore davantage de celles de régions de plus basse altitude et plus méridionales. Les espèces qui, dans les Alpes, sont adaptées à un climat frais devront se déplacer à plus haute altitude. Mais là, elles ne disposeront que d'une aire limitée en raison de la topographie; dans les cas extrêmes, leur biotope disparaîtra complètement. Les espèces ne disposant que de peu de possibilités de se propager seront particulièrement touchées par le réchauffement. Tant les changements climatiques que l'utilisation du sol auront des impacts sur la biodiversité durant les cinquante prochaines années.

La résistance de la végétation et, partant, la sécurité de nos espaces vitaux peuvent être renforcées par une grande diversité d'espèces et un souci de durabilité dans l'utilisation des écosystèmes naturels. Des événements extrêmes plus nombreux peuvent perturber gravement les écosystèmes à l'échelon local, au point de faire perdre à ces derniers, au moins temporairement, leur effet protecteur. Les changements moyens jusqu'en 2050, tels qu'ils ressortent des modélisations, ne mettront toutefois pas substantiellement en danger la sécurité des espaces vitaux en Suisse.

Les écosystèmes terrestres ne remplissent pas seulement d'importantes fonctions telles que la protection contre des dangers naturels, mais ils fournissent aussi des produits significatifs pour l'économie, comme du bois, des denrées alimentaires et de l'eau propre. A l'avenir, ces avantages pâtiront avant tout d'effets combinés, p.ex. du cumul de températures élevées et de faibles précipitations. La productivité des forêts et des prairies permanentes se modifiera sensiblement: à haute altitude, elle augmentera du fait du réchauffement, à basse altitude, elle souffrira de la sécheresse estivale. La pénurie d'eau en été en cas de températures élevées – comme par exemple en 2003 et, dans une plus faible mesure, en

juillet 2006 – limitera fortement la productivité. Pendant les années suffisamment humides, le réchauffement pourra conduire à un prolongement de la période de croissance, encore que le rythme de développement génétiquement défini de nombreux fruits de la terre de même que de la flore indigène ne laisse que peu de marge à cet égard (<2 semaines).

La disponibilité en eau prendra à l'avenir encore plus d'importance qu'aujourd'hui, ceci concernant avant tout les sites en vallées et le pays collinaire. L'exploitation des écosystèmes terrestres devra s'adapter aux nouvelles conditions environnementales. Les sites en altitude reprendront de l'importance comme surfaces de compensation pour la production animale.

Lien avec d'autres thèmes

Economie des eaux

- Niveau des eaux souterraines, besoins en eau d'irrigation pour les prairies permanentes.
- Pertes de production dues au manque d'eau.

Agriculture

- Conflits relatifs à l'utilisation de l'eau, procédés culturels hautement mécanisés et évent. recours accru aux engrais et pesticides.
- Redécouverte de l'espace alpin comme zone d'exploitation.

Energie

Qualité des bassins versants des centrales hydrauliques (stabilité des pentes, érosion).

Santé

- Immigration d'espèces étrangères (néophytes) (p.ex. *Ambrosia artemisiifolia*) qui peuvent provoquer des allergies et de l'asthme.
- Situations défavorables comme conséquence de l'augmentation des dangers naturels.

Tourisme

Détérioration des protections naturelles dans les Alpes.

Assurances

Mise en question de la couverture d'assurance en cas de disparition de l'effet protecteur d'écosystèmes terrestres à la suite de conditions météorologiques extrêmes (sécurité des espaces vitaux).

2. Biodiversité

La Suisse comme espace vital est fortement déterminée par sa structure étagée qui a conduit à la formation de ceintures de végétation. Un réchauffement climatique entraînera un déplacement de ces ceintures à plus haute altitude. Mais la composition en espèces à l'intérieur des ceintures se modifiera aussi. Ce qui ira de pair, avant tout en basse altitude, avec la disparition d'espèces qui s'y trouvaient jusqu'ici et l'immigration d'espèces végétales et animales étrangères à partir de régions plus chaudes.

Bien que la Suisse soit relativement petite avec une superficie de quelque 41'290 km² et qu'elle ne confine pas à la mer, raison pour laquelle elle ne possède pas la flore et la faune variées des régions côtières, elle atteint néanmoins un nombre d'espèces semblable à maints pays européens beaucoup plus grands. Elle doit cette relativement grande biodiversité à son gradient d'altitude élevé, à sa diversité géologique, à la riche structure de ses régions rurales cultivées longtemps de façon traditionnelle et à son grand nombre de biotopes naturels.

Les ceintures de végétation de la Suisse traduisent la réaction de la flore et de la faune aux différents niveaux d'altitude. Ces étages sont caractérisés chacun par des climats et formes de terrain spécifiques. Alors que la topographie ne se modifiera guère à court terme, les ceintures climatiques tendront à se déplacer à plus haute altitude sous l'effet d'un réchauffement. Il en résultera une

nouvelle combinaison de topographie et climat. La question du déplacement et de la transformation des ceintures de végétation est donc de première importance pour les autres changements. Ne serait-ce déjà que par leur taille relativement grande, les *vertébrés* sont fortement dépendants de l'utilisation et organisation des espaces vitaux ainsi que de leur exploitation directe (chasse, lutte contre les parasites, etc.) par l'être humain. Cette situation masquera dans une large mesure les effets des changements climatiques – il en sera de même pour les invertébrés. Il est probable, notamment en ce qui concerne les animaux mobiles (p.ex. les oiseaux), que la question des immigrations à partir de régions plus chaudes restera encore longtemps d'actualité. La tendance, déjà observée actuellement, selon laquelle des espèces connues autrefois comme oiseaux migrateurs passent l'hiver en Suisse du fait du climat favorable, devrait se poursuivre à l'avenir.

Evolution jusqu'à aujourd'hui

Depuis la dernière glaciation, des espèces n'ont cessé d'immigrer naturellement de régions plus chaudes vers la Suisse. Dans les régions urbanisées de basse altitude, cette immigration s'est accélérée en vertu d'influences anthropiques, tandis qu'en altitude, les écosystèmes ne se sont modifiés que lentement.

Une grande partie de la faune et de la flore des villes et des cours d'eau est constituée aujourd'hui déjà d'espèces étrangères. L'immigration d'espèces animales étrangères peut se faire très rapidement étant donné leur mobilité. Dans le cas des vertébrés, l'être humain a presque toujours joué un rôle central. La propagation d'espèces étrangères est le résultat de déplacements, intentionnels ou non, lors de transports de marchandises.

Que les ceintures de forêts, qui constituent l'étage dominant, se déplacent à plus haute altitude sous l'effet d'un réchauffement général est incontesté² et démontré pour l'évolution tardi- et postglaciaire³. On admet que ce déplacement peut durer très longtemps et la distribution actuelle des espèces d'arbres mettre des siècles à s'adapter à de nouvelles conditions. Les quelques déplacements

d'espèces observés dans le secteur de la limite des arbres indiquent par ailleurs que de telles réactions se déroulent particulièrement lentement en haute altitude.⁴

Le nombre d'espèces augmente en Suisse en raison de l'immigration permanente d'espèces étrangères depuis l'époque glaciaire. Du fait du réchauffement et de la mobilité croissante des êtres humains, cette tendance s'accélérera encore (fig. 2). Les nouvelles espèces pénètrent toutefois rarement ou avec un grand retard dans la végétation indigène existante et se trouvent principalement dans des biotopes perturbés.

Pour diverses raisons, davantage d'espèces indigènes disparaissent – soit qu'elles ne supportent pas le réchauffement, qu'elles soient supplantées par les nouvelles arrivées ou submergées par des espè-

ces indigènes plus dominantes. Ce dernier cas se présente p.ex. pour les forêts, où la plupart des espèces d'arbres ont vu leur croissance s'accélérer pendant les deux cents années passées en même temps que leur exploitation reculait (fig. 3). Ceci a conduit à des populations végétales plus denses

et, partant, à un recul des espèces recherchant la lumière. Une évolution similaire a été observée dans les zones humides d'altitude moyenne: elles n'ont guère changé du fait de la diminution des précipitations, mais ont réagi à un apport plus important de substances nutritives.

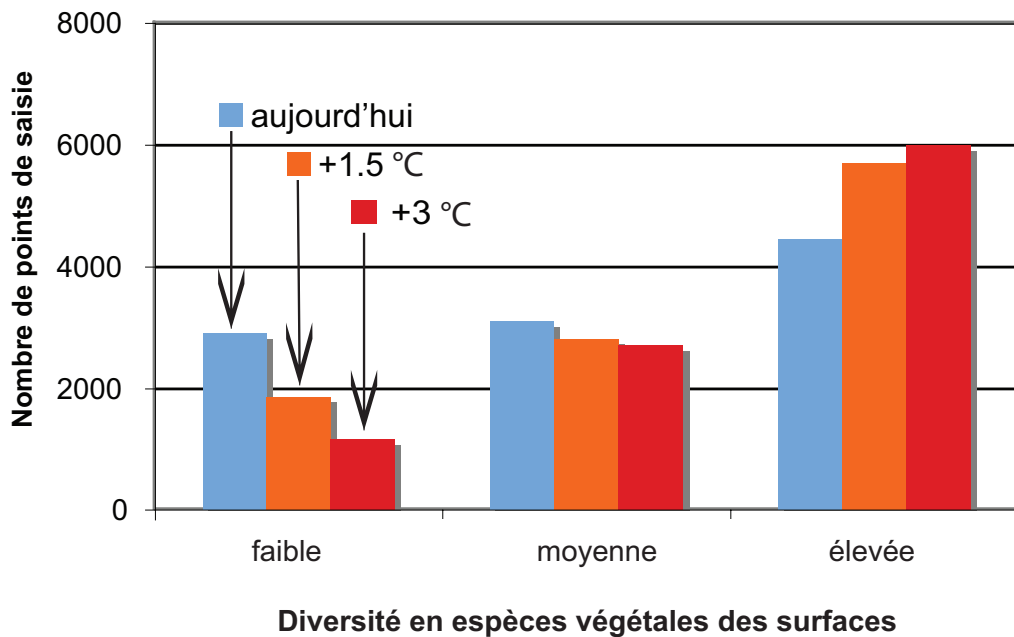


Figure 2: Changements pronostiqués du nombre d'espèces végétales dans les forêts de Suisse du fait des changements climatiques (étude de simulation, simplifiée)⁵. Une hausse de la température et une légère augmentation simultanée des précipitations (+15% dans le modèle; selon les prévisions actuelles de l'OcCC les précipitations diminueront) entraîne une réduction du nombre de surfaces pauvres en espèces et une augmentation de celles riches en espèces. Les points de saisie sont des échantillons aux intersections du réseau kilométrique de la Suisse à l'intérieur des aires de forêt. Le nombre d'espèces se réfère à des surfaces de 200 m².

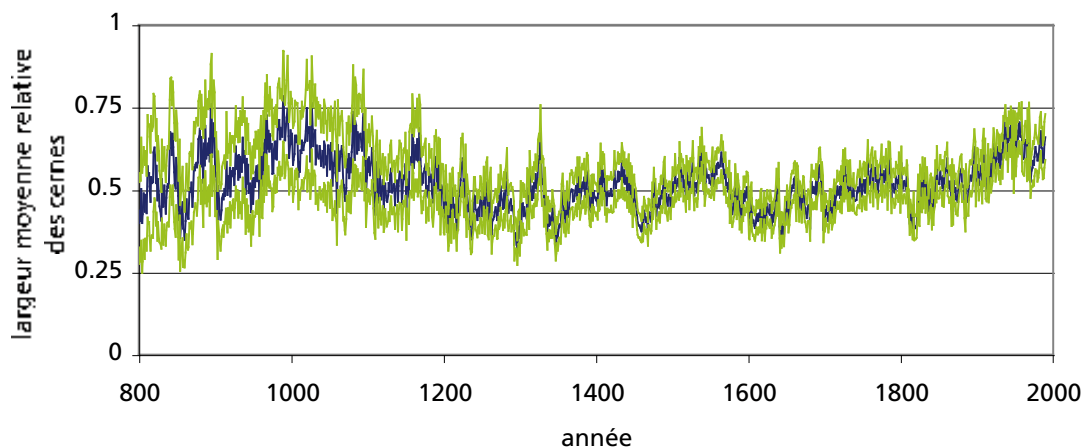


Figure 3: Accroissement radial moyen des espèces d'arbres poussant naturellement dans les Alpes jusqu'en 1993.⁶ Depuis 1816, la largeur des cernes augmente constamment. Les fortes fluctuations (incertitudes) avant 1200 sont attribuées au manque d'échantillons de bois aussi anciens (faible statistique). Ligne violette: moyennes. Lignes vertes: écarts types.

Avenir

Tant les changements climatiques que l'utilisation du sol auront des impacts sur la biodiversité durant les cinquante prochaines années. De façon générale, la flore et la faune se rapprocheront plus fortement de celles de régions plus méridionales et de plus haute altitude. Combien d'espèces disparaîtront ou immigreront est difficile à estimer.

L'immigration d'espèces étrangères en Suisse s'accéléra fortement pendant les cinquante prochaines années en raison de la montée rapide de la température. Suite aux changements climatiques, la flore et la faune se rapprocheront encore davantage de celles de régions plus méridionales et de plus basse altitude. Du fait du commerce (p.ex. plantes ornementales) et de la mobilité de la population, des espèces animales et végétales parviennent du monde entier en Suisse (on parle de néozoaires et de néophytes). Nombre d'espèces immigrées n'ont pas d'ennemis ou de maladies ici pour le moment et tendent à proliférer.

perceptibles qu'aujourd'hui quand bien même ils ont eu lieu il y a une centaine d'années (p.ex. la structure d'âges des forêts, l'abandon du pacage en forêt, l'augmentation des effectifs de gibier). Ainsi, suivant les connaissances actuelles, la biodiversité subira l'influence non seulement du climat, mais aussi avant tout de l'évolution de l'utilisation du sol. Du fait de la politique agricole et forestière libéralisée, l'exploitation du sol devrait se concentrer dans les zones favorables des vallées (agriculture) et les forêts aisément accessibles. Des prix de l'énergie en hausse pourraient inverser cette tendance à l'avenir, le bois devenant



Figure 4: Depuis les années 80, la mante religieuse immigre du sud-ouest (Jura) et de l'Alsace vers la Suisse septentrionale. En été 2006, des œufs de cet insecte ont été trouvés dans une clairière du Fricktal (AG).
(Source: Peter Duelli, WSL)

Pour la plupart des écosystèmes, la période jusqu'en 2050 est très courte, aussi la tendance générale au réchauffement induira-t-elle une disparité entre les besoins en matière de climat et le climat réel du site. Ceci entraînera un déplacement progressif dans l'inventaire de la végétation existante et de la faune. Certaines espèces seront stimulées, d'autres entravées. Les changements en cours de l'utilisation du sol, par exemple le recul de l'agriculture et de l'exploitation forestière en montagne, se superposeront à ces processus, qui auront à leur tour pour niveau sous-jacent les changements passés dans l'utilisation du sol – des changements, dont les conséquences ne sont

alors plus attractif comme source d'énergie. De nombreux vestiges de l'agriculture des siècles passés (p.ex. des éléments structurant le paysage) disparaîtront. Dans les Alpes et le Jura, les paiements directs devraient permettre à l'agriculture de se maintenir avant tout dans les régions touristiques importantes. Les forêts aussi feront l'objet d'une transition progressive de la multifonctionnalité des aires forestières, encouragée aujourd'hui, vers une subdivision de ces surfaces selon leurs fonctions prioritaires: forêts de protection et zones forestières protégées bénéficiant de subventions pour leur entretien, forêts sans exploitation commerciale du bois, forêts permettant une exploita-

tion rentable du bois. Il faut s'attendre à ce que la surface urbanisée poursuive son extension et à ce que les transports continuent de croître, ce qui ira de pair avec la disparition de surfaces proches de l'état naturel et avec la poursuite du morcellement du paysage. Les espaces vitaux des animaux et des plantes s'amenuiseront ou disparaîtront. Dans les Alpes, des espèces tributaires de la fraîcheur pour survivre seront contraintes de se retirer à plus haute altitude où, pour des raisons tenant à la topographie, elles ne disposeront que d'une surface réduite. Les ceintures de végétation ne se déplaceront donc pas seulement en hauteur, mais seront aussi limitées en surface²; à noter toutefois que la compétition entre espèces peut modifier (ralentir ou accélérer) cette tendance, avant tout pour les arbres. Les espèces végétales vivant au voisinage des cours d'eau seront les plus promptes à immigrer, ceci vers les régions les plus chaudes (cours d'eau et lacs du Tessin, le Rhin près de Bâle, le Rhône près de Genève). La propagation des espèces à plus haute altitude sera toutefois limitée par la lenteur de leur adaptation au climat. En montagne, ce seront avant tout les espèces pionnières sur sols bruts qui suivront rapidement cette tendance. Des néophytes recherchant la chaleur se propageront aussi dans les forêts, ce qui permettra à des plantes de jardin en vente dans le commerce de se diffuser dans de vastes régions du Tessin et du Plateau. Il faut s'attendre à un recul du nombre d'espèces en particulier dans les bas-marais de

Suisse – sauf en Suisse méridionale. Celui-ci se renforcera encore si les précipitations baissent et que l'étendue de ces biotopes diminue. Les hauts-marais de Suisse ont à cet égard une situation spécifique. Des températures plus élevées et des périodes sèches plus longues mettent en danger la couverture de mousse et permettent à des espèces non spécifiques des hauts-marais de pénétrer dans ces biotopes. Ceci est jugé non souhaitable, car équivalant à une restructuration de l'écosystème et du fait qu'une caractéristique des hauts-marais est précisément qu'ils sont pauvres en espèces. Les espèces concurrencées sont des spécialistes qui ne peuvent pas coloniser d'autres biotopes.

Le réchauffement portera atteinte avant tout aux espèces peu mobiles ou tributaires d'espèces peu mobiles comme ressource alimentaire ou comme hôtes. Les espèces mobiles peuvent se déplacer dans des habitats plus frais, ce qui est plus aisé en montagne qu'en plaine. Néanmoins, le réchauffement et l'évolution de l'utilisation du sol fera disparaître de nombreuses espèces avant tout dans les Alpes et le Jura. Les espèces très isolées (endémiques) et les espèces qui n'ont pas la possibilité de se déplacer à plus haute altitude sont particulièrement menacées.

Les espèces toundriques recherchant le froid (lièvre variable, lagopède) trouveront dans un premier temps davantage d'espace vital grâce à l'extension de la couverture de végétation dans les montagnes ayant un vaste étage alpin et



Figure 5: Des espèces toundriques recherchant le froid, telle que le lièvre variable, trouveront dans un premier temps davantage d'espace vital grâce à l'extension de la couverture de végétation dans les montagnes ayant un grand étage alpin et nival. Mais elles disparaîtront des crêtes de faible dimension situées à plus basse altitude. (Source: Martin Merker)
Des espèces rupestres d'origine méridionale, telles que le bouquetin, étendront leur territoire vers les hauteurs ou l'ont déjà fait, pour autant que les montagnes soient assez hautes. Dans le cas contraire, il est probable que les populations locales disparaîtront. (Source: Thomas Jucker)

nival, mais disparaîtront sur les crêtes de faible dimension situées à plus basse altitude. Les espèces rupestres d'origine méridionale (bouquetin, tichodromes) étendront leur territoire vers les hauteurs ou l'ont déjà fait (perdreix bartavelle) (cf. fig. 5). Parmi les vertébrés aussi, les formes mobiles (oiseaux, grands mammifères) réagiront plus vite aux changements climatiques. Mais chaque déplacement de territoire à plus haute altitude implique une diminution de la surface nette, vu que la superficie diminue avec l'altitude. Des données fiables existent à cet égard au sujet des modifications des effectifs d'oiseaux. Comme le montre la figure 6, les espèces ont reculé au cours des quinze années passées dans les terres cultivées, mais ont augmenté dans les forêts – une tendance qui va dans la même direction que l'évolution des formes de couverture du sol (fig. 1, tableau 1). Des changements spectaculaires sont peu probables à court terme pour les groupes d'organismes, et se limitent à des espèces isolées. C'est ce que montre p.ex. le „Swiss Bird Index“ de

toutes les espèces d'oiseaux, qui reste à un niveau pratiquement constant (fig. 6).

Le nombre d'espèces en Suisse augmente constamment selon le bilan, malgré la disparition croissante d'espèces, parce que le nombre de celles qui immigreront est nettement plus élevé que celui des espèces qui disparaissent. L'estimation globale doit toutefois faire plus grand cas des pertes, car nombre de ces espèces disparaîtront totalement, donc dans le monde entier, alors que celles qui immigreront ont leur principale aire de répartition souvent dans l'espace méditerranéen, parfois même sur d'autres continents.⁷

Tout aussi important pour l'évolution de la biodiversité en Suisse est la transition, qui se dessine au niveau politique, d'une utilisation intégrative du sol (un peu de tout partout) vers une répartition territoriale ségrégative (ici des espèces protégées, là une production intensive). Cette transition est controversée tant au niveau scientifique que politique et implique un changement d'optique dans la société au sujet de cette problématique.

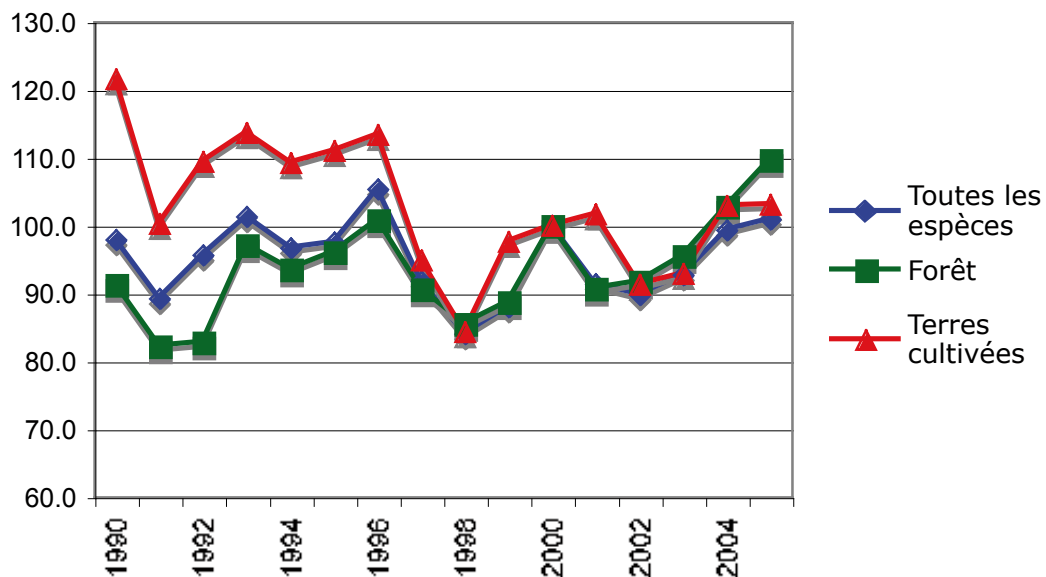


Figure 6: Evolution du „Swiss Bird Index“ (le SBI représente le nombre d'espèces d'oiseaux fidèles à leur habitat dans différents types de paysage) au cours des quinze années passées. La diversité diminue dans les terres cultivées, augmente en forêt et est constante pour la totalité des espèces d'oiseaux. (Source: © Station ornithologique suisse de Sempach)

Mesures

Il est difficile de réaliser des mesures directes de conservation des espèces menacées. La meilleure protection consiste à conserver l'espace vital, ce qui inclut aussi le maintien d'une utilisation du sol variée à petite échelle.

Les mesures traditionnelles de protection des espèces et des biotopes destinées à conserver la diversité biologique conviennent aussi pour faire face à des développements futurs. Il serait souhaitable de faire coexister à grande échelle différentes utilisations du sol et la mise en œuvre sur tout le territoire (en y incluant des réserves naturelles) d'une protection et promotion ciblées des espèces, en tenant compte des spécificités régionales et culturelles.

La forte intensification de l'utilisation du territoire (agriculture, habitat et activités commerciales) a entraîné la disparition de nombreuses espèces au cours du siècle passé, laquelle n'a pas été compensée

par une extensification partielle (le plus souvent par reforestation). Combattre de telles pertes est pertinent et prioritaire aussi en relation avec les changements climatiques. La situation est moins aisée pour les espèces récemment immigrées. Parmi ces dernières, il y en a qui sont inoffensives et dont la propagation est une conséquence logique des changements environnementaux. D'autres doivent être contrôlées, s'il s'agit notamment de néophytes, néozoaires et nouveaux pathogènes agressifs qui menacent la biodiversité. Identifier ces espèces à temps est difficile et fait l'objet d'une recherche écologique.

3. Dangers naturels et sécurité des espaces vitaux

Des événements extrêmes devenant plus fréquents et augmentant d'intensité peuvent perturber fortement les écosystèmes de la Suisse à l'échelon local et leur faire perdre de ce fait, au moins temporairement, leur effet protecteur. Les changements climatiques moyens à attendre d'ici 2050 selon les modèles du climat auront des effets comparativement moins prononcés sur les écosystèmes. Un danger pour la sécurité des espaces vitaux et l'intégrité des écosystèmes résulte principalement des événements extrêmes et d'une utilisation inappropriée de types sensibles de paysages (p.ex. forêts ayant une composition en espèces étrangère au site, changements dans l'exploitation de pâturages alpins, mais aussi apport de polluants dans des écosystèmes non utilisés).

Les différents types de paysages et d'espaces vitaux des montagnes suisses remplissent une multitude de fonctions importantes: toute végétation homogène protège le sol, stabilise les pentes et pare à l'érosion. Un rôle spécifique incombe à la forêt dans la protection contre les avalanches et les chutes de pierres et dans le stockage écosystémique de l'eau. La végétation fournit également des matières premières, fait partie des espaces de détente et des terrains de sport. Ces importantes fonctions sont indissolubles de la résistance, la stabilité et la faculté d'adaptation dynamique des écosystèmes, en particulier des forêts. De ce fait, des organismes apparemment sans importance ont de la valeur pour la sécurité des espaces vitaux. L'action conjointe de ces innombrables composants est en fin de compte déterminante pour la vulnérabilité

des systèmes à l'égard de leur exploitation ou des changements climatiques. L'exploitation agricole ou forestière, mais aussi touristique, des écosystèmes représente un potentiel de changements des fonctions de protection bien plus grand à l'échéance de quelques décennies que les changements moyens à venir de la température et des précipitations. Une accumulation d'événements climatiques extrêmes peut induire des changements rapides d'écosystèmes naturels et recèle ainsi le risque d'une perte au moins temporaire de fonctionnalité. En outre, du fait qu'il utilise le paysage de façon de plus en plus dense, l'être humain laisse toujours moins d'espace aux grands événements naturels (p.ex. crues); aussi ces derniers se font-ils sentir plus fortement et causent davantage de dommages.

Evolution jusqu'à aujourd'hui

Jusqu'ici, des atteintes temporaires à la sécurité des espaces vitaux se sont produites principalement du fait d'événements extrêmes et de l'urbanisation dans des zones à risque. Mais l'évolution continue des formes d'exploitation des terres et l'apport de substances nutritives et de polluants par l'air ont rendu quelques écosystèmes plus sensibles à d'autres „perturbations“ climatiques. Certains changements, p.ex. l'augmentation de la surface de forêt, ont toutefois aussi des effets positifs: les forêts stabilisent bien mieux les pentes raides que tous les autres types d'écosystèmes.

La forêt et les prairies extensives ont subi une grande transformation en Suisse durant les cent cinquante dernières années. Autrefois, chaque morceau de terrain était exploité dans l'optique de son utilité productive. C'est pourquoi les zones humides étaient asséchées, les forêts exploitées de manière à accroître la production de bois de haute qualité, les prés et pâturages forcés aussi sur des terrains impraticables. L'intégrité d'un écosystème de même que la sécurité y relative des espaces vitaux sont restées longtemps des aspects secondaires.

Aujourd'hui, nombre de ces régions ne sont plus intéressantes du point de vue économique; mais l'importance, pour la sécurité des espaces vitaux, d'une couverture de végétation intacte a augmenté en maints endroits, car ce sont aujourd'hui en partie précisément en ces lieux que les infrastructures touristiques et les zones urbanisées profitent de la protection de la forêt (toutes deux sont passées dans des zones potentiellement dangereuses). Les pâturages alpins sont laissés à l'abandon (et sont perdus comme espace vital spécifique et comme ressource) et les terrains impraticables ne sont plus utilisés, tandis que la société des loisirs exerce une pression croissante sur presque toutes les formes de végétation.

A part les changements climatiques, ces influences humaines aussi ont montré des effets sur la végétation et modifié la protection qu'elle offre contre les dangers naturels. La progression de la forêt va généralement de pair avec une augmentation de la capacité d'accumulation d'eau dans les sols, améliore la stabilité des pentes et protège contre l'érosion. Suivant la topographie, elle offre également une protection contre les avalanches ou les chutes de pierres. L'augmentation des événements extrêmes agit en sens opposé: ils ont provoqué en partie des inondations et des glissements de terrain qui n'ont pas pu être absorbés par l'effet amortisseur naturel de la végétation. L'accumulation des dommages causés par les tempêtes a temporairement réduit la sécurité des espaces vitaux dans les régions tou-

chées (p.ex. les tempêtes Vivian en 1990 et Lothar en 1999). Des atteintes importantes aux écosystèmes causées par des événements climatiques extrêmes ont eu lieu souvent là où les conditions topographiques avaient nécessité déjà des interventions humaines substantielles dans la végétation afin d'y rendre possible la vie humaine moderne, comme par exemple dans des vallées des Alpes ou à proximité de cours d'eau. Mais les fortes précipitations se combinant aux conditions géologiques ont dépassé en partie la capacité de rétention de toute forme de végétation. Des épisodes de précipitations extrêmes ont entraîné le glissement de pans entiers de forêt (p.ex. en Suisse centrale pendant l'été 2005).

Des pertes temporaires en termes de sécurité des espaces vitaux se sont produites aussi dans des forêts dans lesquelles la sécheresse s'ajoutant à des températures d'été élevées et à l'infestation par des insectes a entraîné un dépérissement étendu des arbres (p.ex. les épidémies de bostryches après Lothar et pendant l'été sec de 2003, forêts de pins en Valais;⁸ cf. fig. 7 et 8). Ici aussi, la manière d'utiliser



Figure 7: La combinaison d'arbres arrachés en plus grand nombre par le vent en hiver et d'étés plus chauds fait exploser les populations de bostryches. (Source: Christoph Ritz)

les forêts a probablement joué un rôle à côté des influences climatiques au cours des cent dernières années. Les feuillus, en premier lieu le chêne

pubescent, colonisent rapidement les surfaces libérées et ont ainsi remplacé jusqu'ici la fonction des pins (cf. fig. 8).



Figure 8: La combinaison de terrains laissés à l'abandon (pâturages boisés) et d'étés plus chauds et plus secs entraîne une transformation rapide des pinèdes valaisannes de basse altitude en chênaies pubescentes. (Source: Roman Zweifel)

Regard vers l'avenir

Du fait de l'accumulation pronostiquée d'événements extrêmes, il faut s'attendre à encore d'autres dégradations locales et limitées dans le temps des fonctions de protection des écosystèmes. Ce n'est pas un problème pour les parties du paysage proches de l'état naturel qui sont éloignées des agglomérations et non utilisées, vu que cette dynamique crée de nouvelles niches pour les animaux et les plantes. Mais si l'espace urbanisé ou les surfaces de transport sont touchés, ces changements ont des conséquences désastreuses.

Cinquante ans sont peu de chose pour la végétation, et surtout pour les forêts, car les changements n'apparaissent qu'avec une certaine inertie et tardivement. Jusqu'en 2050, les changements climatiques moyens (!) pronostiqués ne représenteront guère de danger substantiel pour la fonction de protection de la couverture de végétation et, partant, pour la sécurité des espaces vitaux en Suisse. Mais des événements extrêmes plus fréquents ou plus violents (canicule, sécheresse, incendies, fortes précipitations, tempêtes) pourront avoir localement des conséquences très lourdes et modifier brusquement l'intégrité des écosystèmes (par exemple après un incendie de forêt ou une grande invasion d'insectes). De tels processus seront d'autant plus probables que le climat changera plus vite et que la végétation sera davantage en restructuration sous l'action de l'évolution générale du climat.⁹

Toutefois, de tels scénarios impliquant l'apparition subite et paroxysmique d'effets nuisibles (p.ex. une invasion d'insectes catastrophique comme conséquence de la sécheresse) ne peuvent guère faire l'objet de prévisions.

Les impacts des changements climatiques (en combinaison avec les influences humaines), au sujet desquels il existe des données empiriques, peuvent être estimés de façon plus fiable. Selon le savoir actuel, il faut s'attendre jusqu'en 2050 à ce que les changements climatiques aient des impacts plus forts qu'en moyenne dans les écosystèmes suivants:¹⁰

- les écosystèmes qui, en raison d'interventions humaines, sont très éloignés de leur forme, composition et fonction naturelles, p.ex. les monocultures forestières d'espèces étrangère-

res au site ou les herbages surexploités (p.ex. qui ont reçu des quantités excessives d'engrais et sont de ce fait pauvres en espèces);

- les écosystèmes qui se trouvent dans des zones climatiques limites, p.ex. dans des régions de dégel du pergélisol, dans des sites en voie de désertification, en des lieux humides dont la teneur en eau du sol est néanmoins faible et à proximité de la limite supérieure des forêts;
- les écosystèmes dans lesquels la façon d'utiliser les terres est contraire à l'évolution naturelle induite par le climat au cours des dernière

res décennies (p.ex., là où le pacage a maintenu la limite supérieure des forêts artificiellement à un niveau bas, la forêt peut très rapidement regagner du terrain s'il y a recul de l'utilisation en même temps qu'une hausse des températures);

- les écosystèmes dans lesquels les changements climatiques déclenchent des effets en cascade, comme p.ex. une infestation massive par des insectes ou autres parasites du fait de températures élevées (p.ex. trois au lieu de deux générations de bostryches par saison).

Mesures, incertitudes, lacunes du savoir

Une grande diversité d'espèces et une utilisation en accord avec le développement durable augmentent la résistance et la stabilité des écosystèmes naturels. Ceux-ci sont le mieux à même d'assurer la sécurité de l'espace vital de l'être humain. On ne peut influencer les changements climatiques que lentement. Nous pouvons néanmoins modifier plus rapidement notre manière d'utiliser notre espace vital. Ce qui nous permet aussi beaucoup plus rapidement d'assurer durablement les fonctions protectrices des écosystèmes.

Pendant les cinquante dernières années surtout, l'urbanisation s'est effectuée en Suisse en partie dans des sites menacés du fait de leur topographie. On a bâti sur des pentes qui étaient boisées à l'origine, mais où l'exploitation forestière avait cessé. Des vallées que l'on avait évitées pendant des siècles sont aujourd'hui densément peuplées. C'est avant tout dans ces régions exposées que la végétation (modifiée par les interventions humaines) n'assume plus sa fonction de protection en cas d'événements extrêmes. L'évolution globale a conduit d'une part aux changements climatiques anthropiques, mais elle a aussi, notamment dans des pays de montagne comme la Suisse, rendu l'humanité plus dépendante de la sécurité des espaces vitaux qui résulte à son tour d'une couverture de végétation intacte. Les mesures techniques ne seront pas à même d'assurer la sécurité des espaces vitaux dans les vallées des montagnes suisses sans l'aide des écosystèmes naturels, en

particulier des forêts sur les pentes raides. Un aspect déterminant consistera donc à promouvoir des écosystèmes riches en espèces et adaptés au site et des forêts dont la structure d'âge et la composition soient proches de l'état naturel. Au vu de la lenteur du développement des écosystèmes, forestiers notamment, il est néanmoins douteux qu'une telle diversification puisse avoir lieu assez rapidement.

Le lien direct entre des écosystèmes résistants et proches de l'état naturel (donc bien adaptés et divers) et la sécurité des espaces vitaux dans les régions de montagne doit faire l'objet d'une prise de conscience (politique) accrue. A cet égard, il est particulièrement important, dans un pays densément peuplé comme la Suisse, de savoir que les écosystèmes comprennent toujours aussi les êtres humains qui y vivent et qu'un développement durable ne peut être réalisé qu'en tenant compte des activités humaines.

4. Utilité et produits des écosystèmes

Les écosystèmes terrestres ne remplissent pas seulement d'importantes fonctions, telles que la sécurité des espaces vitaux, mais ils fournissent aussi des produits importants pour l'économie, comme le bois, des denrées alimentaires et de l'eau propre.

Mis à part leur grande utilité pour la sécurité des espaces vitaux, déjà mentionnée au paragraphe 3 („Dangers naturels et sécurité des espaces vitaux“), les écosystèmes terrestres remplissent aussi d'importantes fonctions en dehors de l'agriculture intensive, telles que la protection de l'air et des eaux, le stockage de carbone et d'eau et le recyclage de substances nutritives. Ils fournissent des produits importants pour l'économie, tels que le bois, des denrées alimentaires et de l'eau.

En outre, les forêts présentent, de par la grande réserve de biomasse de leurs arbres, un potentiel particulièrement élevé comme puits de carbone, nettement plus considérable que les herbages et les champs (pour lesquels ce potentiel se limite à l'humus du sol). Tous ces produits et prestations sont certes influencés par les conditions physico-chimiques et climatiques, mais portent aussi l'empreinte de plusieurs millénaires d'utilisation des terres.

Evolution jusqu'à aujourd'hui

Pendant les cent dernières années, la plupart des écosystèmes terrestres ont subi davantage l'influence de l'évolution en matière d'utilisation des terres que des changements climatiques. Néanmoins, des impacts des changements climatiques sont déjà observés en Suisse en ce qui concerne la mise à disposition de ressources biologiques (p.ex. foin, réserve de bois, stockage de carbone).

L'utilisation des terres d'écosystèmes agraires et forestiers a beaucoup changé pendant les cent dernières années. L'intensification et mécanisation de l'agriculture ont surtout fortement accru la productivité, mais en même temps amoindri l'humus et réduit ainsi le stockage de carbone dans les sols agricoles.¹¹ La réserve de bois dans les forêts suisses a substantiellement augmenté pendant les dernières décennies et atteint aujourd'hui des maxima tant par unité de surface (faible utilisation) qu'en raison de l'agrandissement des surfaces de forêt. La quantité de bois abattu par année en Suisse se monte à quelque 5 millions de m³, quand bien même la croissance annuelle permettrait d'exploiter 7 million de m³ de bois sans effets négatifs pour les peuplements forestiers. Au cours des cinquante dernières années, les forêts ont poussé aussi sensiblement plus vite qu'autrefois en raison d'apports atmosphériques d'azote plus élevés et de conditions climatiques favorables. Aujourd'hui, 90% des forêts suisses sont surapprovisionnées en azote, ce qui entraîne, en plus de la croissance accélérée des arbres, une diminution de la saturation basique du sol, une acidification du sol et une pollution de l'eau d'infiltration qui alimente la nappe phréatique. Les effets des changements climatiques se manifestent déjà aujourd'hui dans le débourrement plus précoce et, partant, dans une prolongation de cinq à six jours de la période de végétation.¹² Dans le passé récent, les événements extrêmes (p.ex. les

tempêtes Vivian et Lothar, des étés caniculaires, de vastes feux de forêt en Valais) se sont multipliés et ont causé des dommages à la forêt. L'utilisation des terres évolue de façon très différente selon l'altitude. Dans les vallées, on constate qu'une certaine extensification a eu lieu à côté de l'intensification de l'agriculture pendant les dix à quinze dernières années, tandis que dans les régions subalpines et alpines, c'est l'extensification (transformation de prairies en pâturages), pouvant aller jusqu'à la cessation de toute exploitation, qui domine. La forêt s'établit sur ces aires qui étaient exploitées autrefois et sont laissées aujourd'hui à l'abandon. A défaut de pâture au-dessus de la forêt, davantage d'eau est cédée à l'atmosphère par évaporation et avant tout par transpiration de la végétation dont la taille a grandi. Moins d'eau s'écoule vers le bas (jusqu'à 10%), ce qui peut conduire à une production réduite d'énergie dans le bassin versant d'une centrale hydraulique.¹³

Des zones humides ont été fortement modifiées par l'être humain pendant les cent dernières années.¹⁴ Alors qu'elles étaient autrefois d'importants réservoirs d'eau et de carbone, nombre d'entre elles ont été utilisées comme tourbières ou asséchées pour la production agricole. C'est ainsi que la surface des zones humides a diminué en Suisse de presque 90% au cours des cent dernières années, ce qui a entraîné une perte importante en biodiversité et en zones-tampons hydriques.

Regard vers l'avenir

A l'avenir, les fonctions et l'utilité des écosystèmes terrestres seront entravées avant tout par des effets combinés, p.ex. le cumul de températures élevées et de précipitations plus faibles. La disponibilité en eau et l'espace alpin prendront une importance particulière.

Les scénarios climatiques pour la Suisse en 2050 se situent dans un domaine qui entraînera des changements perceptibles de la productivité de la forêt et des prairies permanentes. La tendance qui allait jusqu'ici dans le sens d'un accroissement de la productivité par l'intensification fléchira ou sera limitée par un manque d'eau prononcé en été en cas de températures élevées – comme en 2003 par exemple. Ciaï et al.¹⁵ ont montré que la séquestration du carbone s'est profondément modifiée en Europe en 2003 et que d'un puits de CO₂, la forêt européenne est devenue nettement une source de CO₂. Ceci peut conduire à une diminution du stockage de carbone dans le sol, renforcée par une décomposition éventuellement accrue de substances organiques dans l'humus¹⁶ et par des apports plus faibles de carbone par la végétation. Si – comme les modèles le prédisent – de tels étés secs deviennent plus fréquents, les réserves de carbone dans le bois et le sol diminueraient à long terme. Les effets locaux dépendent toutefois fortement de l'évolution de l'humidité du sol. Une augmentation du stockage de carbone continuera d'avoir lieu du fait de l'extension et de la sous-exploitation des forêts, pour autant que la hausse des coûts de l'énergie n'entraîne pas un retour au bois comme matière première. Une accélération de

la croissance des arbres du fait d'une plus haute concentration de CO₂ est plutôt improbable, étant donné que d'autres substances nutritives essentielles (à l'exception de l'azote) ne sont pas disponibles en plus grande quantité.¹⁷ La pénurie d'eau en été et en automne touchera à l'avenir avant tout les vallées et le pays collinaire. Le manque d'eau se fera moins sentir dans les forêts de haute montagne et sur les hauteurs alpines. L'on s'attend ici plutôt à une augmentation de la productivité. La disponibilité en eau prendra donc une plus grande importance à l'avenir.

L'exploitation des écosystèmes terrestres devra s'adapter aux nouvelles conditions environnementales (p.ex. en avançant la récolte des foin, en irrigant la prairie permanente, en adaptant les effectifs de bétail, en pratiquant davantage l'estivage d'altitude, en choisissant d'autres espèces d'arbres). L'utilisation de sites en altitude pour maintenir les effectifs de bétail devrait redevenir plus lucrative. Cela signifie que l'espace alpin pourrait regagner en importance à l'avenir comme zone d'exploitation, mais aussi comme refuge et espace vital de substitution. Ceci ne réussira toutefois que si ces surfaces sont maintenues ouvertes par une gestion active et que l'on empêche les prairies et pâturages montagnards et subalpins de s'embroussailler.

Incertitudes, mesures

Une adaptation de la gestion des forêts et des prairies permanentes est nécessaire pour atténuer ou éviter les conséquences négatives des changements climatiques affectant l'utilité et les produits de ces écosystèmes. Les pâturages alpins devraient être maintenus ouverts.

Il faudrait promouvoir la diversité naturelle des arbres comme assurance contre les changements climatiques ou les effets d'événements extrêmes. Le défrichement à grande échelle devrait être évité et les anciens peuplements forestiers (p.ex. la forêt jardinée¹⁸) être transformés en peuplements étagés, afin que la stabilité soit assurée et que le carbone stocké ne soit pas rejeté dans l'atmosphère sous forme de CO₂.

La gestion active du paysage, en particulier de l'espace alpin, devrait être mise en valeur. Cela permettrait une évaluation (aussi pécuniaire) en termes d'utilité pour l'ensemble de la société.

Il faudrait qu'un débat politique ait lieu sur la question de savoir comment une gestion adaptée et conforme au développement durable peut et doit être mise en œuvre et soutenue.

Bibliographie et notes

- 1 Sources: annuaires statistiques, statistique de la superficie, statistique forestière, banque de données de la FAO.
- 2 B. Brzeziecki, F. Kienast, O. Wildi. A simulated map of the potential natural forest vegetation of Switzerland. In: *Journal of Vegetation Science* 4, 1993, 499–508.
- 3 C. A. Burga, R. Perret. *Vegetation und Klima der Schweiz seit dem jüngeren Eiszeitalter*. Thun, Ott-Verlag: 1998.
- 4 P. Geissler, J. Hartmann. Vegetation dynamics in a mountain pine stand burnt down in 1951. *Succession research in the Swiss National Park* 89, 2000, 107–130.
- 5 F. Kienast, O. Wildi, B. Brzeziecki. Potential impact of climate change on species richness in mountain forests – an ecological risk assessment. In: *Biological Conservation* 83, 1998, 291–305.
- 6 J. Esper, E. R. Cook, F. H. Schweingruber. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. In: *Science*, 295, 2002, 2250–2253.
- 7 W. Thuiller, S. Lavorel, M. B. Araújo, M. T. Sykes, and C. Prentice. Climate change threats to plant diversity in Europe. In: *PNAS* 102, 2005, 8245–8250.
- 8 A. Rigling, M. Dobbertin, M. Bürgi, E. Feldmeier-Christe, U. Gimmi, C. Ginzler, U. Graf, P. Mayer, R. Zweifel und T. Wohlgemuth. Baumartenwechsel in den Walliser Waldföhrenwäldern – Wald und Klimawandel. In: T. Wohlgemuth (Hg.). *Forum für Wissen 2006 – Wald und Klimawandel*. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Zürich, 2006, 23–33.
R. Zweifel, L. Zimmermann, W. Tinner, P. Haldimann, F. Zeugin, S. Bangerter, S. Hofstetter, M. Conedera, T. Wohlgemuth, A. Gallé, U. Feller und D. M. Newbery. *Salgesch, Jeizinen, ihre Wälder und der globale Klimawandel*. Nationaler Forschungsschwerpunkt Klima (NFS Klima), Universität Bern. Bern, 2006.
- 9 S. Schumacher, H. Bugmann. The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. In: *Global Change Biology* 12, 2006, 1435–1451.
- 10 H. Bugmann, C. Pfister. Impacts of interannual climate variability on past and future forest composition. *Regional Environmental Change* 1(3), 2000, 112–125.
H. Bugmann. Anthropogene Klimaveränderung, Sukzessionsprozesse und forstwirtschaftliche Optionen. In: *Schweiz. Z. Forstwesen* 150, 1999, 275–287.
- 11 J. Leifeld, S. Bassin, J. Fuhrer. Carbon stocks and carbon sequestration potentials in agricultural soils in Switzerland. *Schriftenreihe der FAL* 44, 2003.
B. Zierl, H. Bugmann. Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. In: *Water Resources Research* 41(W02028): 2005, 1–13.
- 12 A. Menzel et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. In: *Global Change Biology* 12, 2006, 1–8.
- 13 C. Körner. Mountain biodiversity, its causes and function. In: *Ambio, Special Report* 13, 2004, 11–17.
- 14 A. Grünig. Surveying and monitoring of mires in Switzerland. In: L. Parkyn, R. E. Stoneman, H. A. P. Ingram (Hg.). *Conserving peatlands*, Oxon, UK, CAB International, 1997, 217–227.
- 15 P. H. Cias et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by heat and drought in 2003. In: *Nature* 437, 2005, 529–533.
- 16 P. H. Bellamy, P. J. Loveland, R. I. Bradley, R. M. Murray, and G. J. Kirk. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. In: *Nature* 437/8, 2005, 245–248.
- 17 Ch. Körner, R. Asshoff, O. Bignucolo, S. Hättenschwiler, S. G. Keel, S. Pelaez-Riedl, S. Pepin, R. T. W. Siegwolf, and G. Zotz. Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. In: *Science* 309, 2005, 1360–1362.
- 18 Forme d'exploitation à la suite de laquelle des arbres de toutes dimensions et de tous âges poussent les uns à côté des autres et peuvent être utilisés isolément sans dommages pour la structure de la forêt.