



Défis concourants pour la Suisse : les interfaces dans l'action climatique, la conservation de la biodiversité, la sécurité énergétique et la préservation du paysage

Livre blanc

Cyril Brunner, Rebecca Lordan-Perret, Elisa Cadelli,
Nadine Salzmänn, Dirk Nikolaus Karger, Niklaus E. Zimmermann
17 mai 2024

Résumé

Les mesures d'atténuation du changement climatique posent plusieurs défis : comment préserver la biodiversité, entretenir le paysage et garantir l'approvisionnement en énergie ? Un exemple de ces compromis peut être illustré par le vote à venir sur la loi fédérale sur la sécurité de l'approvisionnement en électricité produite à partir d'énergies renouvelables. Afin d'évaluer scientifiquement les questions en jeu, un groupe de scientifiques a analysé dans le cadre du projet interdisciplinaire SPEED2ZERO, qui regroupe six institutions du domaine des EPF, les défis, les opportunités et les objectifs contradictoires entre la protection du climat, la conservation de la biodiversité, la sécurité énergétique et la préservation du paysage. Voici un résumé des résultats de cette analyse, destiné à faciliter la prise de décision.

Messages clés

- La Suisse doit décarboniser plus rapidement son secteur énergétique pour atteindre ses objectifs climatiques et protéger la biodiversité.
- L'état de la biodiversité est préoccupant. En Suisse, les causes de l'appauvrissement de la biodiversité ne sont jusqu'à présent guère liées à l'énergie. Toutefois, si le changement climatique n'est pas abordé, on s'attend à ce qu'il devienne l'un des principaux facteurs de perte de biodiversité. Le changement climatique menace également de plus en plus de dégrader les paysages. L'une des principales motivations pour atténuer le changement climatique est donc de remédier à la perte de biodiversité et à son impact sur le paysage.
- La Suisse prévoit de réduire son utilisation des combustibles fossiles principalement par l'électrification, par exemple, du chauffage et de la mobilité. La Suisse entend répondre à cette demande accrue d'électricité en développant la production d'électricité renouvelable, en investissant principalement dans l'énergie solaire photovoltaïque et en augmentant la capacité hydroélectrique. Ces sources dominantes seront complétées par d'autres technologies telles que l'éolien, la valorisation énergétique des déchets (avec capture et stockage du carbone), de la biomasse, des gaz synthétiques et de l'hydrogène vert.
- Toute nouvelle infrastructure, y compris une infrastructure d'énergie renouvelable, n'est pas sans effets négatifs, et des compromis sont inévitables. Le choix des technologies renouvelables et - peut-être plus important encore - leurs emplacements ont des conséquences directes sur la biodiversité et le paysage, mais celles-ci peuvent être minimisées.
- Des changements sont inévitables : ne rien faire ne signifie pas que rien ne changera. Au contraire, ne rien faire signifie que les changements inévitables seront moins prévisibles et probablement moins désirables. C'est pourquoi la Suisse doit procéder à des changements conscients dès aujourd'hui, alors qu'elle dispose encore de certains leviers pour orienter le changement dans une direction souhaitable.
- Les impacts négatifs sur la biodiversité peuvent être minimisés en suivant quatre principes directeurs : le principe de l'étendue minimale, la connectivité, la complémentarité et la durabilité.
- Les discussions actuelles sur l'impact des nouvelles infrastructures énergétiques sur la biodiversité sont importantes. Toutefois, il convient de souligner que ces installations ne sont pas, et ne seront probablement jamais, la principale cause de la perte de biodiversité. Pour s'attaquer à la perte de biodiversité en général, la Suisse devrait également discuter et s'attaquer à ses autres facteurs.

Introduction

Au cours des prochaines années, la population suisse devra prendre plusieurs décisions importantes pour relever le défi multidimensionnel de l'atténuation du changement climatique : comment conserver la biodiversité, préserver le paysage et assurer l'approvisionnement en énergie ? Dans ce bref livre blanc, nous examinons certains des compromis implicites et nécessaires auxquels la Suisse doit faire face et comment aborder cette urgente transition énergétique pour affronter le changement climatique et minimiser les impacts sur la biodiversité et le paysage.

Une vitesse insuffisante pour les objectifs fixés

Alors que les objectifs nationaux fixés démocratiquement en Suisse se situent dans la portée des objectifs climatiques internationaux ratifiés, les mesures prises jusqu'à présent par la Suisse pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre sont insuffisantes (1). Un moyen important pour réduire ces émissions consiste notamment à abandonner les combustibles fossiles en électrifiant, par exemple, les transports ou le chauffage, et en utilisant de l'électricité provenant de sources à faible taux d'émission (2). En Suisse, la production d'électricité domestique est déjà presque entièrement décarbonée depuis plusieurs décennies. Cependant, le reste du système énergétique reste fortement dépendant des combustibles fossiles (par exemple, le chauffage et les transports).

Le passage des combustibles fossiles à l'électricité, ajouté à l'accroissement de la population, augmentera la demande d'électricité en Suisse d'environ un tiers, passant de 58,5 TWh/an aujourd'hui à 70-90 TWh/an en 2050, selon le plan d'action sélectionné (3, 4). La Suisse veut répondre à cette augmentation de la demande en utilisant des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire photovoltaïque (PV), l'énergie hydraulique et l'énergie éolienne. Ces sources devront être associées à des technologies plus faciles à distribuer, comme les déchets et la biomasse (avec capture du carbone), les gaz synthétiques ou l'hydrogène vert. En raison de la situation juridique et financière actuelle ainsi que du temps requis pour leurs constructions, on ne s'attend pas à ce que de nouvelles centrales nucléaires participent à la transition énergétique d'ici à 2050 (5).

La création d'un nouveau système énergétique basé sur les énergies renouvelables nécessite des investissements continus et importants qui prendront des décennies. En d'autres termes, pour décarboniser d'ici à 2050, la Suisse doit prendre les devants dès maintenant. Jusqu'en 2022, l'augmentation annuelle de la capacité des énergies renouvelables était faible, parfois même bien trop faible, pour atteindre ses objectifs de décarbonisation. Cependant, l'année dernière, pour la première fois, la Suisse a installé des panneaux solaires photovoltaïques à un taux supérieur au taux requis (c'est-à-dire 1100 MWp/an, y compris le remplacement) (6) pour atteindre les 34 TWh visés par la stratégie énergétique d'ici à 2050 (7). Ce développement rapide a été en partie motivé par les prix élevés du gaz naturel et de l'électricité, par les incertitudes liées à la situation géopolitique internationale et par la baisse constante des coûts de l'énergie photovoltaïque. Les prix du gaz et de l'électricité se sont maintenant relâchés (8), et il n'est pas certain que le rythme de 2023 puisse être maintenu. Plusieurs raisons expliquent la réticence observée à l'égard des énergies renouvelables, notamment la dynamique du système actuel, les coûts initiaux élevés, le manque d'incitations et la complexité de l'acceptation sociale (9). Une autre partie de cette réticence découle des préoccupations concernant l'expansion de la production d'énergie au détriment de la biodiversité et du paysage (10, 11).

Dans le monde entier, mais également en Suisse, la perte de biodiversité se produit à un rythme alarmant. La Suisse doit agir davantage pour prévenir les pertes de biodiversité, aussi car ces efforts vont souvent de pair avec l'atténuation du changement climatique. Selon des évaluations récentes, la moitié des habitats et un tiers des espèces sont menacés en Suisse (12). Le déclin des populations d'espèces s'accompagne d'une perte de diversité génétique. Les pertes se poursuivent à d'autres

niveaux de la biodiversité (espèces, écosystèmes) (12). L'une des mesures de conservation les plus efficaces consiste à laisser plus d'espace à la biodiversité (p. ex. 13). Jusqu'à présent, seuls 13,4 % du territoire suisse sont protégés et les plans visent 17 %, ce qui est inférieur à l'objectif de 30 % d'ici 2030 convenu lors de la COP15 et recommandé par les scientifiques¹. Les développements du secteur non énergétique, tels que l'urbanisation (16) et l'agriculture (17), sont les principaux moteurs de la perte de biodiversité. Dans le secteur de l'énergie, l'influence négative principale, mais pas unique, réside dans le réchauffement rapide induit par les émissions de gaz à effet de serre (18-20).

L'inaction a un prix

Avec un réchauffement de 2,8°C, la Suisse s'est réchauffée plus de deux fois plus que la moyenne mondiale depuis la période 1871-1900 (21). Le réchauffement rapide actuel et futur, ainsi que la modification d'autres variables climatiques clés telles que les précipitations, endommageront les écosystèmes naturels et réduiront directement la biodiversité. Alors que les espèces indigènes disparaîtront, des espèces non indigènes prendront leur place, et certaines d'entre elles pourraient devenir envahissantes, ce qui aura un impact encore plus important sur les écosystèmes. L'augmentation de la température a modifié et modifiera également le paysage, par exemple par la disparition des glaciers, la déstabilisation des pentes due au dégel du permafrost ou la mort et l'assèchement des forêts (22, 23).

L'une des principales justifications pour limiter le réchauffement climatique à 1,5°C est d'éviter des dommages irréversibles à la biodiversité de la planète (par exemple, les récifs coralliens, les espèces végétales et animales sur terre). Avec un réchauffement de 2°C, le réchauffement climatique deviendrait le principal facteur de perte de biodiversité (24). Par conséquent, toutes les stratégies d'émissions nettes nulles réalisables (des configurations technologiques différentes sont possibles) contribueront à la protection de la biodiversité en atténuant le changement climatique. Même si la perte de biodiversité est difficile à quantifier et rarement prise en compte dans la prise de décision (25), il s'agit souvent de dommages irréversibles qui continueront d'augmenter le coût de notre inaction.

D'autre part, les mesures d'action climatique, même si elles préservent la biodiversité et le paysage à grande échelle, ne sont pas exemptes d'impacts négatifs au niveau local ou régional. Dans la plupart des cas, la meilleure façon de minimiser l'impact des nouvelles infrastructures renouvelables sur la biodiversité est de les placer sur des infrastructures existantes telles que des bâtiments, des routes, des protections contre les avalanches, ou là où la biodiversité est déjà fortement affectée, comme sur des terres gérées. Ces zones bénéficient également d'une plus grande acceptation sociale (26). Mais cela n'est pas possible - ni nécessairement optimal - dans tous les cas. Une étude menée par Salak et al. (26) a révélé que l'implantation de nouvelles infrastructures d'énergie renouvelable nécessite une plus grande superficie lorsque leur emplacement est optimisé pour protéger les écosystèmes plutôt que pour la seule production d'énergie. L'augmentation de la superficie nécessaire s'explique par le fait que les emplacements idéaux du point de vue de l'acceptation sociale et de l'écologie ne sont pas nécessairement les meilleurs pour produire de l'énergie (26). Il existe donc une tension entre la minimisation de l'espace global dédié et l'évitement des zones sensibles (26). Des compromis complexes comme celui-ci illustrent les coûts de nos actions urgentes.

Les coûts de l'action et de l'inaction ne sont pas seulement financiers. Mais sans marché ou équivalent monétaire, il est difficile de choisir entre des options concurrentes ou d'élaborer des

¹ Le statut de protection actuel de la Suisse est de 13,4 %, et l'objectif actuel est de 17 % (14). La CDB (Convention sur la diversité biologique) demande 30 % d'ici 2030, comme convenu en 2022 à Montréal (15). Le déficit de la Suisse est donc d'au moins 13 %, soit autant que l'ensemble de la zone protégée aujourd'hui.

politiques en toute connaissance de cause. En fin de compte, l'attribution d'une valeur de coût unique aux options est très incertaine². C'est pourquoi il n'est pas possible de quantifier de manière crédible des estimations globales de coûts et de bénéfices (27). Néanmoins, de plus en plus de littérature tente de quantifier les dommages spécifiques associés au changement climatique (28), y compris les dommages indirects tels que le ralentissement de la croissance économique (29, 30). Malgré des estimations imparfaites et incomplètes de ces dommages, lorsqu'on les compare aux coûts de l'atténuation du changement climatique, on peut démontrer de manière convaincante qu'au niveau mondial, les avantages de l'atténuation du changement climatique seront probablement plus importants que le coût de la décarbonisation. Cet argument est encore renforcé si l'on prend en compte les cobénéfices de la décarbonisation, tels que l'amélioration de la santé grâce à la réduction de la pollution de l'air, la réduction des impacts sur la biodiversité et l'amélioration de la qualité des sols et de l'eau (par exemple, 31).

Cela peut sembler paradoxal, mais ne rien faire ne signifie pas que rien ne changera. Au contraire, ne rien faire signifie que les changements inévitables seront moins prévisibles et probablement moins désirables. C'est pourquoi la Suisse doit procéder à des changements conscients dès aujourd'hui, alors qu'elle dispose encore de certains leviers pour orienter le changement dans une direction souhaitable.

Maximiser les bénéfices, minimiser les impacts

Une Suisse climatiquement neutre d'ici à 2050 est techniquement et économiquement possible. Les connaissances, les technologies et les mécanismes financiers sont disponibles (32). Des études ont montré que la place financière suisse peut couvrir les besoins d'investissement nécessaires à un objectif de zéro net (33). Cependant, la volonté politique de la Suisse est fluctuante. Pourtant, et peut-être heureusement, il existe de nombreuses voies possibles pour atteindre nos objectifs climatiques. Idéalement, la tâche de la Suisse est de choisir une voie énergétique qui protège à la fois sa biodiversité et son paysage.

La biodiversité n'est pas uniformément répartie dans le paysage et, par conséquent, une voie rationnelle évitant les impacts négatifs les plus importants sur la biodiversité - et les services que la biodiversité ou les écosystèmes fonctionnels offrent à la société - ne se contente pas d'éviter de construire des énergies renouvelables dans les endroits où la biodiversité est la plus riche. Une telle voie nécessite plutôt des procédures d'optimisation minutieuses basées sur quelques principes qui peuvent aider à la prise de décision.

- 1) Le principe de l'étendue minimale : une protection efficace de la biodiversité nécessite une étendue minimale. La règle "30 by 30", qui prévoit la protection de 30 % du territoire national d'ici à 2030, est un bon compromis pour atteindre une superficie suffisante afin de protéger la biodiversité très complexe de la Suisse (34).

Les espèces abondantes de Suisse vivent dans des habitats très différents, humides ou secs, chauds ou froids, dans des prairies ou des forêts. De plus, des habitats similaires dans deux régions différentes présentent des différences dans la composition des espèces. On ne peut donc pas se contenter de protéger une petite surface, car elle ne laisse pas suffisamment de place à de nombreuses espèces pour survivre et ne contient pas beaucoup d'habitats différents (35). En outre, il

² Alors que les coûts d'investissement ou d'adaptation peuvent être estimés dans une certaine mesure, les coûts de la biodiversité, des services écosystémiques et des changements de qualité de vie sont difficiles, voire impossibles à quantifier ou à comparer de manière fiable. Ces coûts doivent également être traités différemment en raison de leur grande incertitude et de leurs conséquences potentiellement catastrophiques et irréversibles. Ces coûts varient également en fonction du temps (par exemple, les décès dans 1 000 ans par rapport à aujourd'hui) et du lieu (par exemple, quelque part sur le globe par rapport à une ville suisse).

n'est pas conseillé de protéger une zone plus vaste dans une seule région, même si elle contient de nombreux habitats. Cette approche laisserait de nombreuses espèces d'autres régions sans protection.

- 2) Principe de complémentarité : Les zones habitées par des espèces qui ne sont pas suffisamment protégées par les zones protégées existantes doivent être évitées pour les nouvelles constructions.

La Suisse doit éviter les nouvelles constructions dans les zones qui sont optimales pour compléter la protection de la biodiversité. En d'autres termes, il faut évaluer dans quelle mesure la biodiversité de la Suisse est préservée par les zones protégées existantes, puis sélectionner avec soin les zones supplémentaires à protéger afin de créer un réseau maximisant le nombre d'espèces protégées. Les zones qui abritent principalement des espèces déjà bien protégées sont moins néfastes si elles sont perdues au profit de nouvelles constructions.

- 3) Principe de connectivité : Les zones qui relient idéalement les zones protégées existantes à une distance de migration pour la majorité des espèces devraient être évitées pour les nouvelles constructions.

Le changement climatique en cours oblige de nombreuses espèces à migrer pour survivre (36, 37). Le réchauffement continu (et l'assèchement qui lui est souvent associé) oblige les espèces à trouver de nouveaux endroits qui correspondent à leurs besoins en matière de température et d'humidité. Par conséquent, les espèces se déplacent, souvent vers des altitudes plus élevées ou vers des sites qui étaient trop humides ou trop secs auparavant (38). La migration en tant qu'élément naturel de la vie d'une espèce et la migration résultant des changements climatiques requièrent toutes deux un espace suffisant. La plupart des espèces ne peuvent pas simplement migrer à travers le paysage. Elles ont tendance à migrer le long de parcelles de leur habitat préféré (39). Bien que cela semble complexe, l'approche nationale de « l'infrastructure écologique » (40), qui est actuellement en phase de planification dans les cantons suisses, est un excellent outil pour soutenir le principe de connectivité.

- 4) Principe de durabilité : la protection de la biodiversité et le maintien d'écosystèmes fonctionnels contribuent fortement à l'atténuation du changement climatique.

La couverture végétale de la Suisse fixe de grandes quantités de carbone ; la masse sèche de la végétation est composée d'environ 50 % de carbone (41). Les plantes meurent et se régénèrent en permanence. En mourant, elles émettent du carbone dans l'atmosphère. Lorsqu'elles poussent, elles extraient du carbone de l'atmosphère. À l'échelle mondiale, la végétation a absorbé environ 30 % des émissions humaines de CO₂ par le biais de l'effet de fertilisation du CO₂, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique (42). Le changement climatique en cours provoque des symptômes de stress évidents dans les écosystèmes. Les forêts de pins du Valais et les forêts de hêtres des basses terres du Plateau suisse montrent un dépérissement croissant des espèces d'arbres dominantes en réponse à des épisodes de sécheresse de plus en plus sévères (43). Les dépérissements massifs et le potentiel de croissance plus lent dans des conditions plus sèches auront un effet négatif sur le potentiel d'extraction du carbone de l'atmosphère (44). Les écosystèmes végétaux plus riches en biodiversité sont plus résistants face aux influences négatives du changement climatique que les écosystèmes moins riches en biodiversité (45, 46) et peuvent, par exemple, contribuer à stabiliser les pentes abruptes et, par conséquent, à atténuer les risques naturels.

En gardant ces lignes directrices à l'esprit, la Suisse doit choisir les technologies et les ressources qu'elle utilisera pour son approvisionnement en électricité et, surtout, leur emplacement. La plupart des scientifiques s'accordent à dire que la Suisse s'appuiera principalement sur l'hydroélectricité, le photovoltaïque et, dans une moindre mesure, sur les importations afin de réaliser la transition énergétique décidée démocratiquement. La Suisse s'appuiera également sur une combinaison d'énergie éolienne et de générateurs thermiques (c'est-à-dire fonctionnant au bois, aux déchets, au biogaz ou à l'hydrogène vert) ; toutefois, la part de ces technologies sera faible par rapport à l'hydroélectricité ou au photovoltaïque (4). La plupart des résultats des scénarios envisagés suggèrent

que d'ici à 2050, la Suisse produira environ 50 % de son électricité grâce à l'hydroélectricité (y compris l'extension prévue par le gouvernement suisse), alors que la part de l'énergie solaire dans la future demande d'électricité sera d'environ 40 % (4).³

En règle générale, c'est au printemps et en été que l'hydroélectricité produit le plus d'électricité, grâce à la fonte des neiges et des glaciers. C'est en été, lorsque les journées sont longues, que l'énergie solaire produit le plus d'électricité. Même si toutes ces sources d'électricité produisent également en hiver, en particulier dans les régions montagneuses, la demande d'électricité en Europe est plus élevée en hiver et par conséquent, cette offre d'électricité devra être complétée. Elle pourra être complétée par des échanges d'électricité, des technologies produisant davantage en hiver (par exemple l'énergie éolienne et l'énergie solaire à haute altitude) et/ou par une production d'appoint (par exemple des centrales hydroélectriques de stockage ou thermiques existantes ou modernisées utilisant du gaz naturel avec captage et séquestration du carbone, du biogaz ou de l'hydrogène) (47). La configuration physique de ces technologies aura un impact sur la biodiversité et le paysage. Néanmoins, il existe des options pour réduire cet impact tout en atteignant nos objectifs énergétiques, en particulier dans les régions de haute montagne, où la biodiversité est particulièrement vulnérable au changement climatique, aux extrêmes et à d'autres perturbations.

Les enquêtes scientifiques sur l'acceptation des nouvelles infrastructures d'énergie renouvelable montrent les deux points principaux suivants. Premièrement, les installations d'énergie renouvelable en Suisse sont mieux acceptées dans les zones déjà construites, par exemple sur le Plateau à forte densité de population, ou dans les régions dotées d'une infrastructure touristique existante (p. ex. 48). En outre, un scénario paysager est jugé plus favorablement si le paysage et les installations énergétiques sont perçus comme compatibles avec le paysage naturel. Deuxièmement, si les centrales énergétiques sont construites de manière condensée au lieu d'être réparties dans les paysages, l'acceptation sociopolitique est plus élevée (49). Ces deux points sont conformes aux principes directeurs de la protection de la biodiversité. En outre, des ateliers de parties prenantes ont permis d'évaluer un ensemble de critères pertinents pour la planification de nouvelles énergies renouvelables dans le respect de la biodiversité et des paysages (50).

Les énergies renouvelables et leurs effets

Compte tenu des différentes options en matière de sources d'énergie renouvelables, il est opportun d'analyser leur potentiel énergétique et leurs effets sur le paysage et la biodiversité en Suisse.

L'hydroélectricité fournit environ deux tiers du mix électrique suisse actuel mais a un impact significatif sur la biodiversité et le paysage. De plus il n'y a pas beaucoup de flexibilité dans le choix de l'emplacement de ces infrastructures. Ces impacts varient en fonction du type d'installation hydroélectrique : au fil de l'eau, à accumulation ou à pompage-turbinage. Par exemple, la [loi suisse sur la protection des eaux](#) (51) exige le rétablissement de la franchissabilité des cours d'eau par les poissons, ce qui serait affecté négativement par de nouvelles centrales au fil de l'eau. En général, les centrales hydroélectriques au fil de l'eau sont nuisibles aux poissons qui frayent et ont un impact considérable sur le mouvement des sédiments riches en nutriments. Les lacs d'accumulation et les installations de pompage-turbinage portent atteinte à la biodiversité, principalement en inondant ou en drainant/lavant les habitats où les espèces se reproduisent (ou se développent dans le cas de la flore). L'hydroélectricité est également un facteur d'érosion et d'instabilité du littoral, ce qui peut

³ À cet égard, la Suisse fait figure d'exception en Europe : dans le reste du continent, c'est l'énergie éolienne qui produit actuellement le plus d'électricité renouvelable et, selon les plans de développement nationaux, elle continuera à se développer (5).

également contribuer à la perte de biodiversité et potentiellement déclencher des glissements de terrain ou des éboulements.

Selon l'Office fédéral de l'énergie, la Suisse a déjà exploité la majeure partie de son potentiel hydroélectrique avec près de 700 centrales d'une puissance supérieure à 300 MW réparties sur l'ensemble du territoire. Ces centrales peuvent produire environ 37 TWh par an, soit 60 % de la demande totale d'électricité (3). Dans sa stratégie énergétique, la Suisse s'est engagée à produire davantage d'électricité à partir de l'énergie hydraulique. Après avoir consulté les parties prenantes concernées, le gouvernement suisse a sélectionné 15 investissements hydroélectriques en fonction de l'impact prévu sur la biodiversité et le paysage, ainsi que de la capacité supplémentaire que les projets permettraient d'obtenir. Les projets sélectionnés augmenteront la production hivernale de 2 TWh (52). La majorité de ces projets sont des mises à niveau d'installations existantes (c'est-à-dire le rehaussement de barrages existants pour augmenter la capacité de stockage) ; cependant, deux nouvelles installations sont également en cours de planification sur les glaciers Gorner et Trift (53). Ces nouvelles installations seront également importantes pour gérer l'excès d'eau provenant de la fonte des glaciers.

En termes d'acceptation sociale, les centrales hydroélectriques existantes sont largement incontestées, en partie parce que la population s'y est habituée et que les municipalités en tirent souvent des avantages financiers. En fait, certains barrages suisses sont même considérés comme emblématiques et importants pour le tourisme. Cependant, les nouvelles centrales ne bénéficient pas du même niveau d'acceptation (54). Certaines études suggèrent que la compensation écologique, telle que la renaturation des cours d'eau de la région, a une influence favorable sur l'acceptation (55), ce qui soutiendrait également la préservation de la biodiversité locale. Par ailleurs, l'utilisation polyvalente des centrales hydroélectriques peut renforcer l'acceptation au niveau régional et national (56). En effet, outre la production d'électricité, les centrales peuvent également être utilisées pour l'irrigation agricole ou l'approvisionnement en eau potable, la protection contre les inondations ou la création d'attractions touristiques.

L'important potentiel **solaire** de la Suisse commence tout juste à être exploité. En 2023, la Suisse a installé 1500 MW de nouvelles capacités solaires photovoltaïques et la capacité totale installée a atteint 6200 MW, produisant 6,4 TWh (6). Le taux d'installation de l'année dernière serait suffisant pour atteindre les objectifs du scénario de 34 TWh en 2050 (57). Il reste cependant un long chemin à parcourir. D'autant plus qu'il est probable que le taux d'installation de l'année dernière, en partie motivé par la pénurie de gaz naturel en Europe et les incertitudes quant à la capacité de la France à exporter de l'électricité, ne pourra probablement pas être maintenu sans mesures supplémentaires. Presque tous les scénarios actuels supposent que la majorité de cette nouvelle capacité proviendra d'installations solaires sur les toits et les façades, car le risque d'investissement est faible, l'acceptation sociale est élevée (58) et les particuliers peuvent bénéficier de l'autoconsommation (54). En effet, la grande majorité des installations photovoltaïques existantes se trouvent sur des bâtiments (59). Pourtant, le potentiel photovoltaïque d'un toit n'est souvent que partiellement exploité, reflétant des avantages financiers privés plutôt que des besoins sociétaux. Si tous les investissements privés n'exploitent qu'une partie du potentiel solaire de leurs toits, la capacité installée sur les toits ne sera pas suffisante pour atteindre les objectifs de la Suisse. D'autres emplacements et types de PV devront être exploités dans une plus large mesure.

Le photovoltaïque est également très bien accepté pour d'autres installations telles que les murs antibruit le long des autoroutes ou d'autres structures fonctionnelles telles que les barrières anti-avalanches. Des synergies par le biais d'une utilisation multifonctionnelle des terres sont également envisageables, par exemple si les terres agricoles ou les pâturages restent utilisables malgré les panneaux photovoltaïques. La Suisse est très restrictive en ce qui concerne les installations photovoltaïques au sol, alors que dans l'Union européenne, les trois quarts de l'énergie solaire produite proviennent de systèmes au sol. Les systèmes solaires au sol peuvent être construits plus rapidement et sont généralement moins coûteux, tandis que le terrain peut encore, dans de nombreux

cas, être utilisé pour sa fonction d'origine (par exemple, le pâturage des animaux). Des études récentes suggèrent que les systèmes au sol joueront un rôle important dans la réalisation des objectifs nationaux (26). D'autres emplacements proposés comprennent des sites industriels et agricoles et, ce qui est le plus controversé, des sites alpins.

Les panneaux photovoltaïques situés sur les toits ou dans des zones déjà construites sont conformes aux principes directeurs de la protection de la biodiversité, car ils ont un effet négatif minime, voire nul, sur la biodiversité (60). Il n'existe actuellement qu'un petit nombre de publications sur ce sujet, mais rien ne prouve que les infrastructures solaires, lorsqu'elles sont construites sur des terres qui ont été (ou continuent d'être) consacrées à l'agriculture, ont des effets négatifs sur la biodiversité (p. ex., 61-63). Le photovoltaïque alpin présente l'avantage de produire plus d'électricité en hiver, lorsque la production future d'électricité en Suisse aura probablement une valeur plus élevée (47). Cependant, la situation alpine est délicate en ce qui concerne la biodiversité et le paysage. D'un point de vue énergétique, les panneaux solaires photovoltaïques seraient très probablement placés sur des pentes orientées vers le sud, où le potentiel solaire est le plus élevé. À cet endroit, les panneaux bloqueraient la lumière du soleil depuis le sol et modifieraient l'abondance des plantes et/ou la composition des espèces. En fonction de la taille et de l'emplacement des panneaux, la migration des animaux ou l'espace de pâturage pourraient également être réduits (60). Si l'énergie photovoltaïque peut affecter la répartition des espèces, il est important de noter que de nombreux sites alpins prévus pour l'énergie photovoltaïque ne se trouvent pas dans des habitats naturels vierges, mais sur des terres gérées, où la biodiversité est déjà fortement affectée, par exemple par le pâturage du bétail ou le tourisme.

Du point de vue du paysage, l'acceptation sociale des panneaux photovoltaïques en montagne est considérée comme plus faible que sur les bâtiments, mais une enquête récente suggère que cette situation est en train de changer, avec environ 60% de la population suisse et 56% de la population locale qui y sont favorables (64). Environ deux tiers des projets photovoltaïques alpins proposés ont fait l'objet d'un vote local favorable. Une proposition consiste à installer des panneaux photovoltaïques sur les paravalanches afin de réduire l'impact visuel de ces infrastructures (65). Toutefois, cette solution est également associée à des problèmes techniques (et aux coûts financiers élevés de construction et d'entretien qui en découlent) et à une réduction potentielle de la fonction de protection primaire des paravalanches (66). Quoiqu'il en soit, la plupart des chercheurs ne prévoient pas d'investissements photovoltaïques alpins sans un soutien important des autorités publiques (67).

Même si dans tous les scénarios envisagés par la communauté des chercheurs suisses, le photovoltaïque solaire et l'hydroélectricité fourniront la majeure partie de l'électricité, la Suisse s'appuiera également sur des technologies telles que l'énergie éolienne, les gaz synthétiques et l'incinération des déchets. L'**énergie éolienne** produit actuellement environ 0.14 TWh/an à partir de 40 sites éoliens (68). Selon la dernière étude de l'Office fédéral de l'énergie, le potentiel technique total de l'éolien est de 29,5 TWh/an en Suisse (69). Le vent produit la majorité de son électricité annuelle pendant l'hiver ; il s'agit donc d'une technologie privilégiée pour aider à compenser la production réduite du solaire et de l'hydroélectricité pendant ces mois.

Du point de vue de la biodiversité, l'énergie éolienne a généralement un impact limité. Cependant, elle a un effet prononcé sur certaines espèces - en Suisse, principalement les oiseaux et les chauves-souris. Cet impact peut être réduit par une planification minutieuse de l'emplacement des centrales éoliennes à des distances sûres des sites de reproduction des oiseaux ou des voies de migration des espèces menacées, ainsi que par des mesures actives, telles que la détection automatique de l'approche des oiseaux pour éteindre temporairement la centrale éolienne afin d'éviter les collisions (70). L'acceptation des éoliennes est limitée, notamment en raison de leur grande visibilité (71), en particulier dans les plaines proches des agglomérations. Des avantages financiers, distribués proportionnellement à la quantité d'électricité produite, peuvent également améliorer l'acceptation des éoliennes et créer des incitations pour la population locale, comme le montrent les approches réussies des « Bürgerwindparks » en Allemagne. Des synergies par le biais d'une utilisation multifonctionnelle des terres sont également envisageables, par exemple lorsque des terres agricoles demeurent

cultivables en présence de turbines éoliennes. Certaines études montrent également que lorsque l'énergie éolienne est combinée à l'énergie photovoltaïque, elle est mieux acceptée dans une certaine mesure (54).

Les centrales de valorisation énergétique des déchets et des gaz synthétiques, y compris le biogaz et l'hydrogène, peuvent être des énergies d'appoints. En d'autres termes, l'électricité peut être produite à tout moment, indépendamment des conditions météorologiques ou de la saison. Les avis divergent quant au rôle que joueront les carburants synthétiques et l'hydrogène et quant à leur source d'approvisionnement. Non seulement les importations d'électricité peuvent se substituer à la combustion de gaz synthétique au niveau national, mais les importations de carburants synthétiques eux-mêmes peuvent permettre à la Suisse de consommer plutôt que de produire. Une grande partie du désaccord provient des incertitudes concernant les coûts futurs de l'hydrogène et des carburants synthétiques, qui sont fortement déterminés par les décisions et les investissements à l'étranger.

La Suisse utilise l'incinération des déchets pour produire à la fois de la chaleur et de l'électricité. En 2019, ces installations ont produit environ 4 TWh de chaleur et 1,8 TWh d'électricité (72). Ces installations ont également contribué à hauteur de 5 % aux émissions de gaz à effet de serre de la Suisse en 2022 (73). Cependant, selon les plans du Conseil fédéral, les technologies de captage et de séquestration du carbone seront déployées dans les 29 sites d'incinération des déchets en Suisse (74). Si l'expérience de ces installations se confirme, la production d'énergie à partir de déchets pourrait augmenter au cours du siècle en raison de l'augmentation des modes de consommation (75), bien que des mesures d'efficacité et de circularité puissent modérer cette augmentation.

Si leurs émissions de CO₂ sont réduites, il est peu probable que ces infrastructures aient un impact important sur la biodiversité et le paysage. Ces centrales thermiques sont grandes et centralisées, et généralement proches de l'endroit où se trouve la demande d'énergie (à savoir la population humaine). On peut donc s'attendre à ce que les lieux susceptibles d'accueillir de grandes installations à proximité des centres de population soient déjà densément peuplés ou accueillent déjà une installation de production d'énergie.

Les installations existantes de valorisation énergétique des déchets sont largement acceptées en Suisse, mais l'utilisation de centrales au biogaz n'est pas encore très répandue. Des études menées par le WSL ont montré que les agriculteurs seraient plus enclins à investir dans des installations de biogaz s'ils recevaient une rémunération plus élevée pour l'énergie produite. Ils préfèrent également posséder leurs propres installations plutôt que d'en construire de plus grandes en collaboration avec d'autres exploitations (54). Du point de vue de la politique énergétique, cependant, les installations centralisées sont intéressantes car elles peuvent fonctionner plus efficacement et simplifier l'alimentation en biogaz, étant donné que la plupart des exploitations agricoles ne disposent pas d'un gazoduc à proximité. En conséquence, la production agricole de biogaz pourrait être développée si les municipalités, les coopératives agricoles et/ou les compagnies d'énergie encourageaient et coordonnaient une telle expansion. Cela réduirait les efforts de coordination pour les exploitations agricoles et rendrait les installations communautaires plus attrayantes pour elles (54).

Indépendamment des discussions sur l'énergie, la Suisse doit activement protéger et préserver la biodiversité

Le débat actuel sur l'impact des nouvelles installations d'énergie renouvelable sur la biodiversité et le paysage est important. Il convient toutefois de souligner que ces installations ne sont pas, et ne seront probablement jamais, la principale cause de la perte de biodiversité. Parmi de nombreux autres

services écosystémiques essentiels, les écosystèmes dotés d'une biodiversité intacte offrent une résistance aux effets du réchauffement climatique et constituent donc un aspect important de l'atténuation du changement climatique (2). La poursuite de la perte de biodiversité observée au cours des dernières décennies constitue une menace majeure pour notre société, tant au niveau local que mondial. Pour éviter que cette perte ne s'aggrave, nous devons élargir nos discussions politiques et examiner d'un œil critique l'utilisation de pratiques courantes (76) qui exercent actuellement une forte pression sur la biodiversité.

Auteurs :

Cyril Brunner, Rebecca Lordan-Perret, Elisa Cadelli, Nadine Salzmann, Dirk Nikolaus Karger, Niklaus E. Zimmermann

Le contenu de ce livre blanc reflète uniquement l'expertise des auteurs et leur synthèse des données scientifiques, et non le point de vue des institutions affiliées.

Proposition de citation :

Brunner, C., Lordan-Perret, R., Cadelli, E., Salzmann, N., Karger, D.N., Zimmermann, N.E. Gekoppelte Herausforderungen für die Schweiz: Schnittstellen im Klimaschutz, Biodiversitätsschutz, Energiesicherheit und Landschaftsschutz (ETH Zurich, white paper, 2024).
<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000673411>

Processus de revue :

Nous remercions tous nos collègues de l'EPF Zürich, de l'Empa, de la FHNW, et du WSL pour leurs commentaires et contributions utiles.

Nous tenons en particulier à remercier les personnes suivantes, classées par ordre alphabétique : Luna Bloin-Wibe, Adrienne Grêt-Regamey, Gianfranco Guidati, Yasser Haddad, Gabriela Hug, Anna Knörr, Reto Knutti, Tom Kober, Christian Moretti, Björn Niesen, Anthony Patt, Sarah Richman, Jonas Savelsberg, Christian Schaffner, Sonia Seneviratne, et Petra Sieber.

Ce livre blanc a été créé dans le cadre de [SPEED2ZERO](#). SPEED2ZERO est une [initiative conjointe](#) menée par les institutions du domaine des EPF. Dans le cadre de SPEED2ZERO, des outils, des plans d'action et des technologies sont développés pour soutenir une transformation durable en Suisse. Une transformation qui répond aux objectifs climatiques internationaux et nationaux, garantit un approvisionnement énergétique résilient et permet à la biodiversité de retrouver sa richesse. SPEED2ZERO a reçu le soutien du Conseil des EPF dans le cadre du programme d'initiatives conjointes.

Il s'agit d'une traduction de la version allemande. En cas d'interprétations différentes dans les différents rapports linguistiques, c'est le texte de la version allemande qui s'applique.

Références

1. Climate Action Tracker. <https://climateactiontracker.org/countries/switzerland/>. Zuletzt abgerufen 30. April, 2024.
2. IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. (2022) doi: 10.1017/9781009157926
3. Bundesamt für Energie, Hydropower (2024); <https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/versorgung/erneuerbare-energien/wasserkraft.html>.
4. A. Marcucci, J. Dujardin, V. Heinisch, E. Panos, S. Yilmaz, CROSS Scenarios and Drivers Definition. *Scenario version: CROSS-v2022-09*. (2022).
5. Energy Science Center, “The role of synthetic fuels in a net-zero emission electricity system in Switzerland” (2024); https://nexus-e.org/wp-content/uploads/2024/03/Report_Syngas_240327.pdf.
6. Swisssolar, Faktenblatt Photovoltaik (2024); https://www.swissolar.ch/01_wissen/swissolar-publikationen/branchen-faktenblatt_pv_ch_d.pdf
7. IEA-PVPS International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, “National Survey Report of PV Power Applications in Switzerland” (2021); <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/02/IEA-PVPS-National-Survey-Report-Switzerland-2021.pdf>
8. Good News: Deine Stromrechnung wird bald günstiger, *watson.ch* (2024); <https://www.watson.ch/!388822726>.
9. S. Batel, Research on the social acceptance of renewable energy technologies: Past, present and future. *Energy Research & Social Science* **68**, 101544 (2020).
10. T. Egli, J. Bolliger, F. Kienast, Evaluating ecosystem service trade-offs with wind electricity production in Switzerland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **67**, 863–875 (2017).
11. F. Kienast, N. Huber, R. Hergert, J. Bolliger, L. S. Moran, A. M. Hersperger, Conflicts between decentralized renewable electricity production and landscape services – A spatially-explicit quantitative assessment for Switzerland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **67**, 397–407 (2017).
12. Bundesamt für Umwelt, “Zustand der Biodiversität in der Schweiz” (UZ-2306-D, 2023); <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/zustand-der-biodiversitaet-in-der-schweiz.html>.
13. S. L. Maxwell, V. Cazalis, N. Dudley, M. Hoffmann, A. S. L. Rodrigues, S. Stolton, P. Visconti, S. Woodley, N. Kingston, E. Lewis, M. Maron, B. B. N. Strassburg, A. Wenger, H. D. Jonas, O. Venter, J. E. M. Watson, Area-based conservation in the twenty-first century. *Nature* **586**, 217–227 (2020).
14. Fedlex, Bundesgesetz Über Den Natur- Und Heimatschutz (NHG) (2022); <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/70478.pdf>
15. Convention on Biological Diversity, “Nations Adopt Four Goals, 23 Targets for 2030 In Landmark UN Biodiversity Agreement” (Convention on Biological Diversity), (2022); https://prod.drupal.www.infra.cbd.int/sites/default/files/2022-12/221219-CBD-PressRelease-COP15-Final_0.pdf?_gl=1*1u4yprz*_ga*MTAyNDEzMDQ1OC4xNzEzNDQ1Mjg1*_ga_7S1TPRE7F5*MTcxMzQ0NTI4NS4xLjAuMTcxMzQ0NTI5MS41NC4wLjA.
16. E. Piano, C. Souffreau, T. Merckx, L. F. Baardsen, T. Backeljau, D. Bonte, K. I. Brans, M. Cours, M. Dahirel, N. Debortoli, E. Decaestecker, K. De Wolf, J. M. T. Engelen, D. Fontaneto, A. T.

- Gianuca, L. Govaert, F. T. T. Hanashiro, J. Higuti, L. Lens, K. Martens, H. Matheve, E. Matthysen, E. Pinseel, R. Sablon, I. Schön, R. Stoks, K. Van Doninck, H. Van Dyck, P. Vanormelingen, J. Van Wichelen, W. Vyverman, L. De Meester, F. Hendrickx, Urbanization drives cross-taxon declines in abundance and diversity at multiple spatial scales. *Global Change Biology* **26**, 1196–1211 (2020).
17. S. L. Maxwell, R. A. Fuller, T. M. Brooks, J. E. M. Watson, Biodiversity: The ravages of guns, nets and bulldozers. *Nature* **536**, 143–145 (2016).
 18. H. M. Pereira, I. S. Martins, I. M. D. Rosa, H. Kim, P. Leadley, A. Popp, D. P. van Vuuren, G. Hurtt, L. Quoss, A. Arneth, D. Baisero, M. Bakkenes, R. Chaplin-Kramer, L. Chini, M. Di Marco, S. Ferrier, S. Fujimori, C. A. Guerra, M. Harfoot, T. D. Harwood, T. Hasegawa, V. Haverd, P. Havlík, S. Hellweg, J. P. Hilbers, S. L. L. Hill, A. Hirata, A. J. Hoskins, F. Humpenöder, J. H. Janse, W. Jetz, J. A. Johnson, A. Krause, D. Leclère, T. Matsui, J. R. Meijer, C. Merow, M. Obersteiner, H. Ohashi, A. De Palma, B. Poulter, A. Purvis, B. Quesada, C. Rondinini, A. M. Schipper, J. Settele, R. Sharp, E. Stehfest, B. B. N. Strassburg, K. Takahashi, M. V. Talluto, W. Thuiller, N. Titeux, P. Visconti, C. Ware, F. Wolf, R. Alkemade, Global trends and scenarios for terrestrial biodiversity and ecosystem services from 1900 to 2050. *Science* **384**, 458–465 (2024).
 19. C. D. Thomas, A. Cameron, R. E. Green, M. Bakkenes, L. J. Beaumont, Y. C. Collingham, B. F. N. Erasmus, M. F. de Siqueira, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Huntley, A. S. van Jaarsveld, G. F. Midgley, L. Miles, M. A. Ortega-Huerta, A. Townsend Peterson, O. L. Phillips, S. E. Williams, Extinction risk from climate change. *Nature* **427**, 145–148 (2004).
 20. O. E. Sala, F. Stuart Chapin, III, J. J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L. F. Huenneke, R. B. Jackson, A. Kinzig, R. Leemans, D. M. Lodge, H. A. Mooney, M. Oesterheld, N. L. Poff, M. T. Sykes, B. H. Walker, M. Walker, D. H. Wall, Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science* **287**, 1770–1774 (2000).
 21. MeteoSchweiz, Klimawandel (2024); <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klimawandel.html>.
 22. I. M. Bollati, C. Viani, A. Masseroli, G. Mortara, B. Testa, G. Tronti, M. Pelfini, E. Reynard, Geodiversity of proglacial areas and implications for geosystem services: A review. *Geomorphology* **421**, 108517 (2023).
 23. J. Bussard, E. Reynard, Conservation of World Heritage glacial landscapes in a changing climate: The Swiss Alps Jungfrau-Aletsch case. *International Journal of Geoheritage and Parks* **11**, 535–552 (2023).
 24. IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., (2022) doi:10.1017/9781009325844.
 25. B. A. Bastien-Olvera, F. C. Moore, Use and non-use value of nature and the social cost of carbon. *Nat Sustain* **4**, 101–108 (2021).
 26. B. Salak, M. Hunziker, A. Grêt-Regamey, R. Spielhofer, U. W. Hayek, F. Kienast, Shifting from techno-economic to socio-ecological priorities: Incorporating landscape preferences and ecosystem services into the siting of renewable energy infrastructure. *PLOS ONE* **19**, e0298430 (2024).
 27. L. A. Smith, N. Stern, Uncertainty in science and its role in climate policy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **369**, 4818–4841 (2011).

28. S. Hsiang, R. Kopp, A. Jina, J. Rising, M. Delgado, S. Mohan, D. J. Rasmussen, R. Muir-Wood, P. Wilson, M. Oppenheimer, K. Larsen, T. Houser, Estimating economic damage from climate change in the United States. *Science* **356**, 1362–1369 (2017).
29. M. Dell, B. F. Jones, B. A. Olken, Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century. *American Economic Journal: Macroeconomics* **4**, 66–95 (2012).
30. M. Kotz, A. Levermann, L. Wenz, The economic commitment of climate change. *Nature* **628**, 551–557 (2024).
31. M. Karlsson, E. Alfredsson, N. Westling, Climate policy co-benefits: a review. *Climate Policy* (2020).
32. M. Krishnan, T. Naucler, D. Pachtod, D. Pinner, H. Samandari, S. Smit, T. Humayun, “A framework for leaders to solve the net-zero equation” (2020); <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/solving-the-net-zero-equation-nine-requirements-for-a-more-orderly-transition#/>.
33. Die Schweizerische Bankiervereinigung, Boston Consulting Group, “Netto-Null bis 2050: Klima-Ziel erfordert jährliche Investitionen von CHF 12.9 Mrd.” (2021). <https://www.swissbanking.ch/de/medien/statements-und-medienmitteilungen/netto-null-bis-2050-klima-ziel-erfordert-jaehrliche-investitionen-von-chf-12-9-mrd>.
34. Forum Biodiversität Schweiz (SCNAT), Interface Politikstudien, Was die Schweiz für die Biodiversität tun kann - Handlungsoptionen für ausgewählte Sektoren. **Swiss Academies Factsheet 17** (2022).
35. V. Devictor, D. Mouillot, C. Meynard, F. Jiguet, W. Thuiller, N. Mouquet, Spatial mismatch and congruence between taxonomic, phylogenetic and functional diversity: the need for integrative conservation strategies in a changing world. *Ecology Letters* **13**, 1030–1040 (2010).
36. R. T. Corlett, D. A. Westcott, Will plant movements keep up with climate change? *Trends in Ecology & Evolution* **28**, 482–488 (2013).
37. M. A. Tucker, K. Böhning-Gaese, W. F. Fagan, et al., Moving in the Anthropocene: Global reductions in terrestrial mammalian movements. *Science* **359**, 466–469 (2018).
38. J. Lenoir, J.-C. Svenning, Climate-related range shifts – a global multidimensional synthesis and new research directions. *Ecography*, doi: 10.1111/ecog.00967 (2014).
39. M. Strnad, T. Mináriková, A. Dostálová, J. Plesnik, M. Hošek, S. Condé, “Report on methodological evaluation of approaches to migration corridors” (2013).
40. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Ökologische Infrastruktur, *SwissFungi*. <https://swissfungi.wsl.ch/en/species-promotion/oekologische-infrastruktur/>.
41. ECN, Phyllis2 - Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar (2024); <https://phyllis.nl/>.
42. P. Friedlingstein, M. O’Sullivan, M. W. Jones, et al., Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data* **15**, 5301–5369 (2023).
43. P. Brun, A. Psomas, C. Ginzler, W. Thuiller, M. Zappa, N. E. Zimmermann, Large-scale early-wilting response of Central European forests to the 2018 extreme drought. *Global Change Biology* **26**, 7021–7035 (2020).
44. S. Wolf, E. Paul-Limoges, Drought and heat reduce forest carbon uptake. *Nat Commun* **14**, 6217 (2023).
45. T. H. Oliver, M. S. Heard, N. J. B. Isaac, D. B. Roy, D. Procter, F. Eigenbrod, R. Freckleton, A. Hector, C. D. L. Orme, O. L. Petchey, V. Proença, D. Raffaelli, K. B. Suttle, G. M. Mace, B. Martín-López, B. A. Woodcock, J. M. Bullock, Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions. *Trends in Ecology & Evolution* **30**, 673–684 (2015).

46. G. Peterson, C. R. Allen, C. S. Holling, Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale. *Ecosystems* **1**, 6–18 (1998).
47. A. Mellot, C. Moretti, T. Tröndle, A. Patt, Mitigating future winter electricity deficits: A case study from Switzerland. *Energy Conversion and Management* **309**, 118426 (2024).
48. R. Spielhofer, T. Thrash, U. W. Hayek, A. Grêt-Regamey, B. Salak, J. Grübel, V. R. Schinazi, Physiological and behavioral reactions to renewable energy systems in various landscape types. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **135**, 110410 (2021).
49. B. Salak, F. Kienast, R. Olschewski, R. Spielhofer, U. Wissen Hayek, A. Grêt-Regamey, M. Hunziker, Impact on the perceived landscape quality through renewable energy infrastructure. A discrete choice experiment in the context of the Swiss energy transition. *Renewable Energy* **193**, 299–308 (2022).
50. U. Neu, S. Ismail, L. Reusser, “Ausbau erneuerbarer Energien biodiversitäts- und landschaftsverträglich planen - Kommentierter Kriterienkatalog mit Vorschlägen für die konkrete Umsetzung für Photovoltaik-Freiflächenanlagen” (Vol. 19, No. 1, Swiss Academies Communications, 2024); <https://sap.scnat.ch/en/id/Su6sK?embed=Pxpel>.
51. Fedlex, Bundesgesetz Über Den Schutz Der Gewässer (2023); https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/de.
52. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Gemeinsame Erklärung des Runden Tisches Wasserkraft (2021); <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/69601.pdf>.
53. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Runder Tisch Wasserkraft Beschrieb der in Anhang 1 der gemeinsamen Erklärung aufgelisteten Projekte (2022). https://www.swv.ch/fileadmin/user_upload/site/PDF/2022.02.24-Runder-Tisch_Projektbeschriebe.pdf.
54. L. Gisler, A. Björnsen, G. Bowman, M. Buchecker, V. Burg, A. Hersperger, M. Hunziker, B. Salak, T. Schulz, I. Seidl, Energiewende: kommunale und regionale Handlungsmöglichkeiten. doi: 10.55419/wsl:35816 (2024).
55. K. Brugger, Energiestrategie 2050: Ohne Akzeptanz keine Umsetzung. Stakeholdermanagement als Erfolgsfaktor für die Umsetzung von Projekten im Bereich erneuerbarer Energien. Empfehlung für die Praxis am Beispiel Wasserkraft. (2013).
56. M. Brunner, A. B. Gurung, J. Speerli, S. Kytzia, S. Bieler, D. Schwere, M. Stähli, Beitrag von Wasserspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? *Wasser Energie Luft* (2019).
57. Bundesamt für Energie, Energieperspektiven 2050+: Entwicklung der Stromproduktion, *Energieperspektiven 2050+: Entwicklung der Stromproduktion* (2020). https://www.uveg-gis.admin.ch/BFE/storymaps/AP_Energieperspektiven/index2.html.
58. E. Trutnevyte, J.-P. Sasse, V. Heinisch, M. Đukan, P. Gabrielli, J. Garrison, P. Jain, S. Renggli, G. Sansavini, C. Schaffner, M. Schwarz, B. Steffen, J. Dujardin, M. Lehning, P. Ripoll, P. Thalmann, M. Vielle, I. Stadelmann-Steffen, “Renewable Energy Outlook for Switzerland” (Université de Genève, 2024); <https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:172640>.
59. Swissolar, “Statistik Sonnenenergie - Referenzjahr 2022” (2023).
60. A. Lafitte, R. Sordello, D.-Y. Ouédraogo, C. Thierry, G. Marx, J. Froidevaux, B. Schatz, C. Kerbiriou, P. Gourdain, Y. Reyjol, Existing evidence on the effects of photovoltaic panels on biodiversity: a systematic map with critical appraisal of study validity. *Environmental Evidence* **12**, 25 (2023).
61. C. Guiller, L. Affre, M. Deschamps-Cottin, B. Geslin, N. Kaldonski, T. Tatoni, Impacts of solar energy on butterfly communities in mediterranean agro-ecosystems. *Environmental Progress & Sustainable Energy* **36**, 1817–1823 (2017).

62. E. Tinsley, J. S. P. Froidevaux, S. Zsebők, K. L. Szabadi, G. Jones, Renewable energies and biodiversity: Impact of ground-mounted solar photovoltaic sites on bat activity. *Journal of Applied Ecology* **60**, 1752–1762 (2023).
63. H. Blaydes, S. G. Potts, J. D. Whyatt, A. Armstrong, Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **145**, 111065 (2021).
64. R. Decurtins, S. Lanz, Alpiner Lebensraum. *BWK, Sotomo* (2024).
65. PV Magazine, Technische Herausforderungen bei der Umsetzung von alpinen Photovoltaik-Anlagen in der Schweiz, pv magazine Deutschland (2024); <https://www.pv-magazine.de/2024/03/01/technische-herausforderungen-bei-der-umsetzung-von-alpinen-photovoltaik-anlagen-in-der-schweiz/>.
66. S. Margreth, C. Wilhelm, R. Baumann, Solaranlagen und Lawinenverbauungen. *Bündnerwald*, 28–35 (2013).
67. Berner Fachhochschule, Drei gute Gründe für Alpine Solaranlagen – und vier dagegen, Berner Fachhochschule (2024); <https://www.bfh.ch/de/aktuell/stories/2024/alpine-solaranlagen-pro-kontra/>.
68. Bundesamt für Energie, Windenergie (2023); <https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/versorgung/erneuerbare-energien/windenergie.html>.
69. Bundesamt für Energie, “Windpotenzial Schweiz 2022 - Schlussbericht zum Windpotenzial Schweiz 2022” (2022); <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/72771.pdf>.
70. B. Vogel, Weniger Kollisionen mit Windturbinen (2015). <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8012> .
71. U. W. Hayek, R. Spielhofer, B. Salak, T. Luthe, U. Steiger, M. Hunziker, F. Kienast, T. Thrash, V. Schinazi, A. Grêt-Regamey, “NFP 70 Projekt «ENERGYSCAPE», Empfehlungen für eine Landschaftsentwicklung durch Anlagen erneuerbarer Energien in der Schweiz” 2019); https://energyscape.ethz.ch/downloads/ENERGYSCAPE_Broschüre_Empfehlungen_191213_FI_N_WEB.pdf.
72. Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen, Abfallverwertung - Energieproduktion der Schweizer KVA (MWh). <https://vbsa.ch/fakten/abfallverwertung/>. Zuletzt abgerufen: 10. März 2024.
73. Bundesamt für Umwelt, Entwicklung THG Emissionen seit 1990, (2024); https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/THG_Inventar_Daten.xlsx.download.xlsx/Entwicklung_THG_Emissionen_seit_1990_2024-04.xlsx.
74. Der Bundesrat, “CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) und Negativemissionstechnologien (NET) - Wie sie schrittweise zum langfristigen Klimaziel beitragen können” (2022); <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/71551.pdf>.
75. Bundesamt für Energie, Waste incineration plants (2019). <https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/versorgung/statistik-und-geodaten/geoinformation/geodaten/thermische-netze/kehrichtverbrennungsanlagen.html>.
76. C. Adler, S. Bacher, S. Battiston, T. Bernauer, S. Boch, S. Boillat, T. Brooks, G. Cissé, E. Fischer, M. Fischer, A. Fischlin, T. Fröhlicher, A. Guisan, C. Huggel, S. Jaccard, C. Krug, V. Muccione, R. Mukerji, U. Neu, A. Patt, G.-K. Plattner, M. Schläpfer, S. Seneviratne, E. Spehn, J. Steinberger, M. Wild, N. Zimmermann, “Trendwende Klima und Biodiversität: Parlament trifft Wissenschaft” (2022); <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6452016>.

<https://speed2zero.ethz.ch/de/>

Éditeur: SPEED2ZERO
Photos: Cyril Brunner

© ETH Zürich, mai 2024