

**Zeitschrift:** bulletin.ch / Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse  
**Band:** 112 (2021)  
**Heft:** 10

**Artikel:** 100% erneuerbar : und zwar mit Köpfchen = 100% erneuerbar : et de manière intelligente  
**Autor:** Kahl, Annelen / Dujardin, Jérôme / Lehning, Michael  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-977608>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

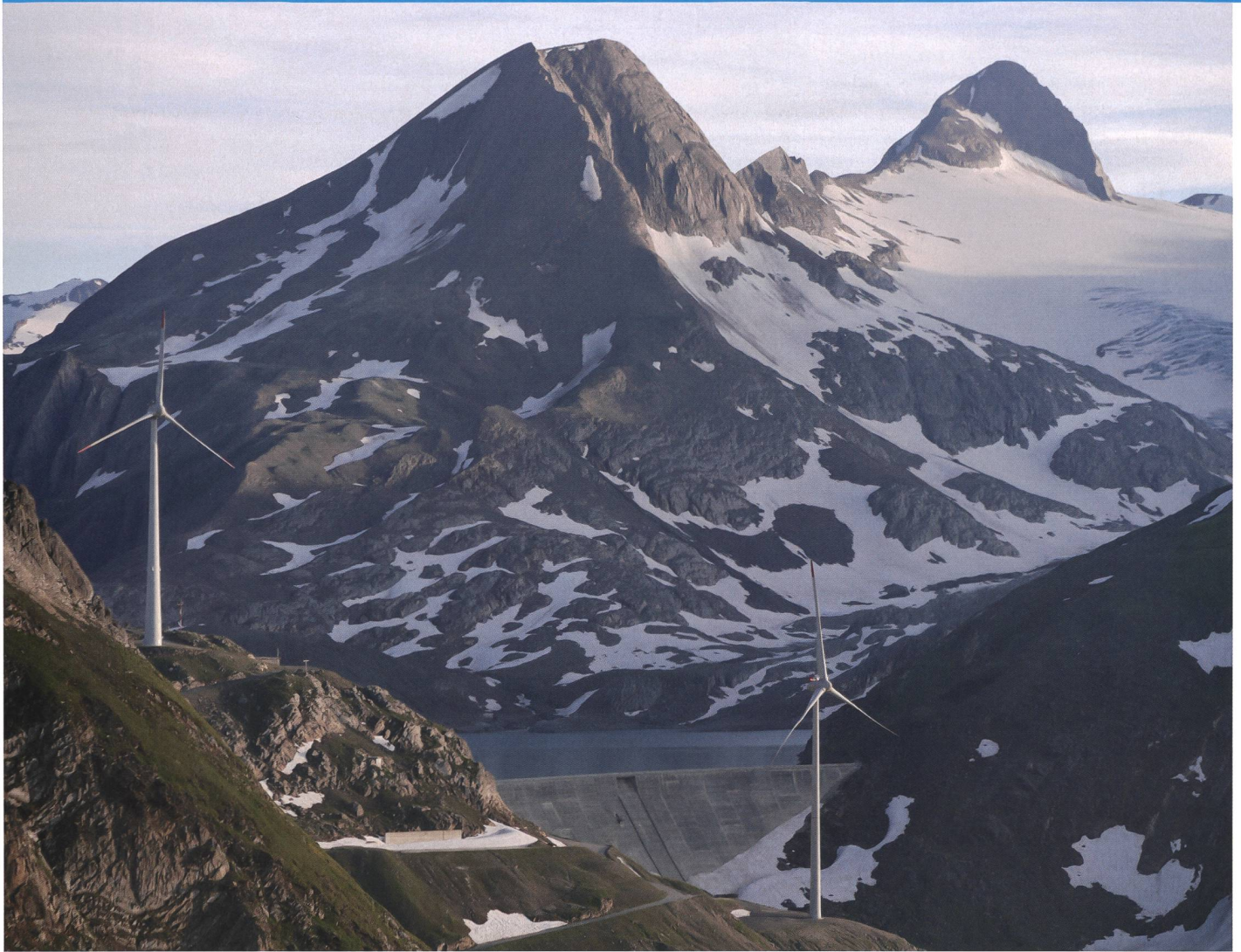
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 25.11.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



# 100% erneuerbar - und zwar mit Köpfchen

**Dank genetischer Algorithmen zum Optimum?** | Hört man den Ausdruck Evolution, denkt man an Darwin und das Überleben der Stärksten. Dass sich diese Strategie auch auf erneuerbare Energie anwenden lässt, mag überraschen. Doch was Fauna und Flora geholfen hat, sich an die Umwelt anzupassen, ist auch geeignet, um unsere eigene Zukunft zu optimieren.

ANNELEN KAHL, JÉRÔME DUJARDIN, MICHAEL LEHNING

**I**n einer kürzlich veröffentlichten Studie hat sich ein Forscherteam der EPFL nun diese Technik zu Nutzen gemacht, um ein optimales Szenario für die Installation erneuerbarer Energieträger in der Schweiz zu entwickeln.[1] Die besondere Stärke dieser Technik ist es, dass mehrere Kriterien gleichzeitig optimiert werden

können und dass die schier unendliche Anzahl aller theoretisch möglichen Lösungen auf intelligente Weise getestet wird.

Die Schweiz will sich von der Atomenergie und den fossilen Brennstoffen verabschieden. Bis 2050 soll eine Netto-Null erreicht werden. Aber wie? Ohne die Bandenergie der Atomkraft-

werke wird gerade im Winter eine Versorgungslücke entstehen, die nur schwerlich mit vernebelten PV-Modulen in den Niederungen gestopft werden kann. Können wir uns auf Stromimporte aus dem Ausland verlassen, wenn unsere Nachbarländer selbst den Übergang zu erneuerbaren Energien anstreben? Zusätzlich erfordert das

Bilder: Jérôme Dujardin

gescheiterte Rahmenabkommen mit der EU eine stärkere Energieautonomie. Wir benötigen also ein Produktionsportfolio, das den Strombedarf so zeitnah und so komplett wie möglich deckt – auch im Winter. Obwohl kleine Beiträge diverser Energiequellen denkbar sind, so wird der Grossteil dieses Portfolios aus Sonnen- und Windkraftanlagen bestehen, die sich mit der existierenden Wasserkraft zusammenschließen. Gleichzeitig sollte der dabei nötige Stromtransport auch noch mit dem aktuellen Stromnetz zu schaffen sein. Das sind also viele Bedingungen, die gleichzeitig erfüllt werden müssen.

### Gleichzeitige Optimierung mehrerer Parameter

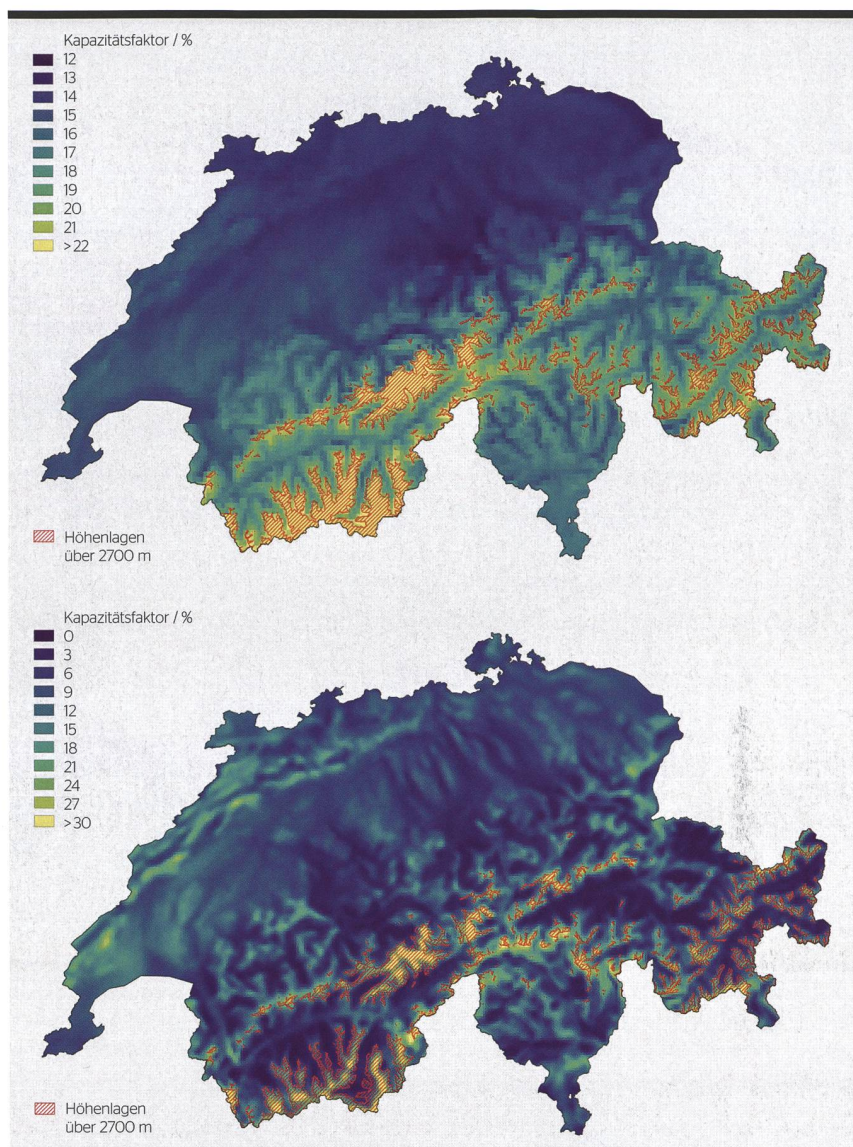
Wie machen wir das am besten? In ihrem Projekt drehen die Forscher an mehreren Schrauben gleichzeitig, um unter Berücksichtigung der genannten Rahmenbedingungen durch ein Labyrinth von Möglichkeiten zu manövrieren und eine gute Lösung zu finden. Diese Schrauben sind:

- Standortwahl für PV und Windkraft
- Mischungsverhältnis der beiden
- Installationsgeometrie der PV-Module (Anstellwinkel, Ausrichtung)

Der Ergebnisraum aller möglichen Kombinationen lässt sich etwa mit der Anzahl der Atome in unserem Universum vergleichen. Es ist also unmöglich, alle Lösungen konkret auszuprobieren. Daher der Trick des oben erwähnten evolutionären Algorithmus. Diese Optimierungsmethode wurde von der Evolution natürlicher Lebewesen inspiriert und verwendet Prozesse wie Selektion, Rekombination und Mutation. Sie zeichnet sich durch eine besonders zielstrebige und erfolgreiche Suche nach einer guten Lösung aus und erlaubt gleichzeitig einen grossen Spielraum bei der Definition der Zielfunktion und der Randbedingungen.

### Produktionspotenzial der Standorte

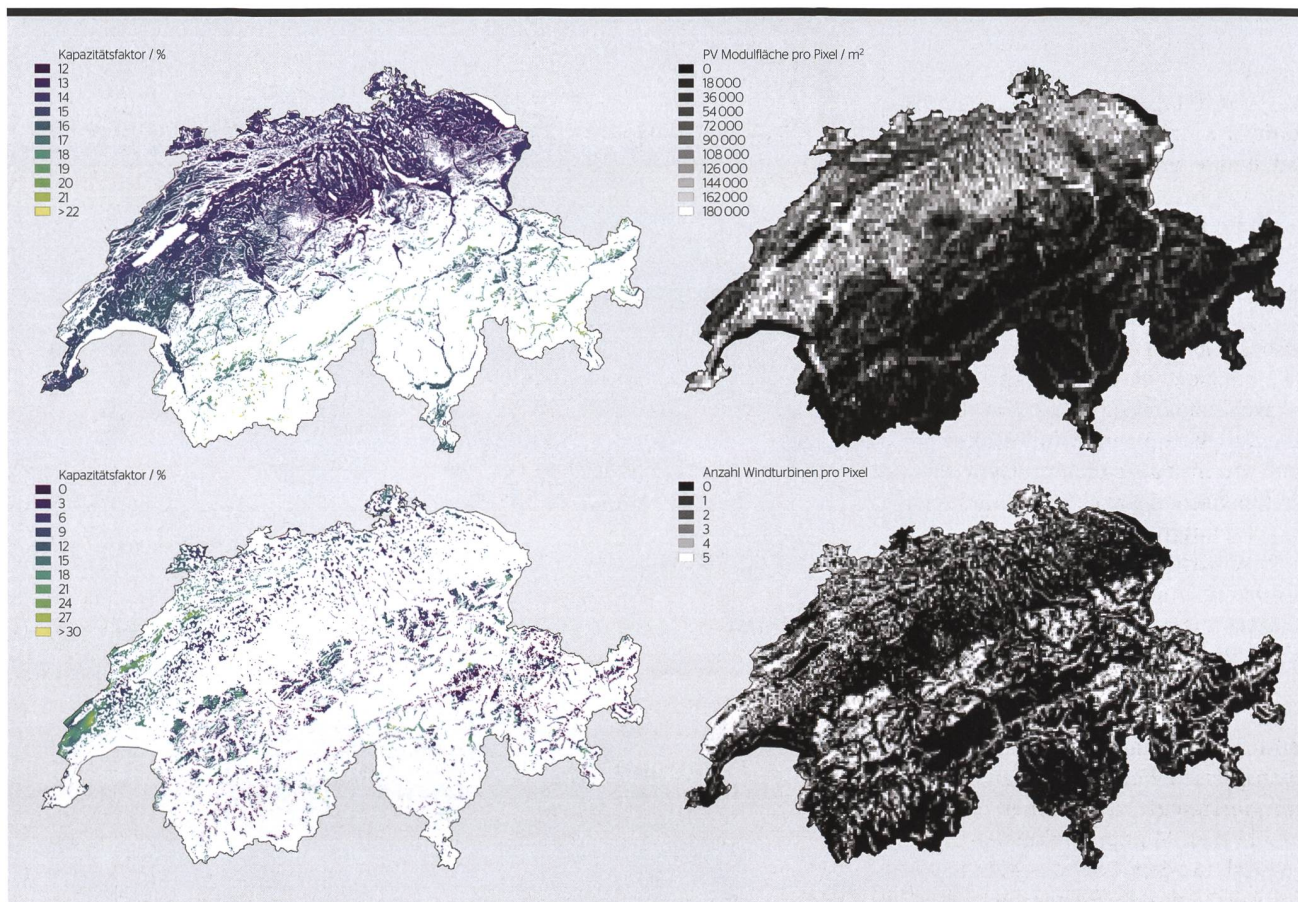
Wie die Optimierung ausfällt, hängt von der Produktivität der jeweiligen Standorte ab. Nicht nur von der jährlichen Summe, sondern auch von der zeitlichen Verteilung über das Jahr hinweg. Das lässt sich zwar schwer in zwei Dimensionen repräsentieren, der Kapazitätsfaktor (**Bild 1**) ist aber eine



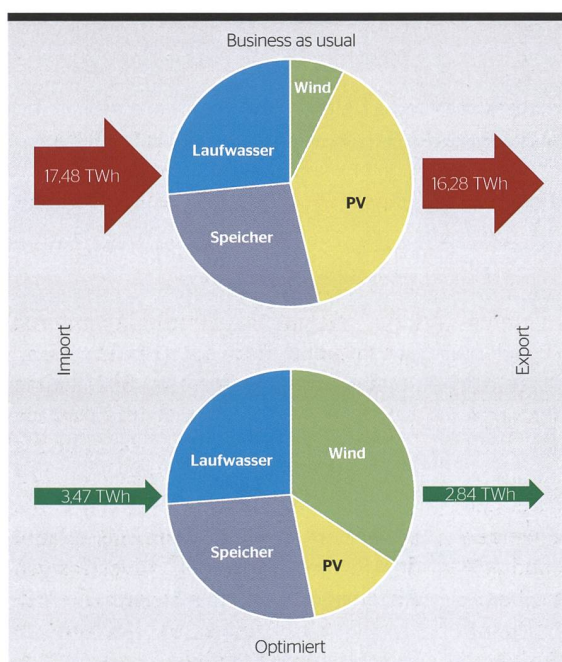
**Bild 1** Räumliche Verteilung der Kapazitätsfaktoren für PV (oben) und Windkraft (unten). Die räumliche Auflösung basiert auf den respektiven Modellen, die zur Berechnung benutzt wurden: 1,6 km x 2,3 km für Solarenergie und 1,1 km x 1,1 km für Windkraft. Höhenlagen oberhalb 2700 m wurden ausgeschlossen.

sinnvolle Annäherung. Er gibt an, wie viel der möglichen Leistung einer Solar- bzw. Windkraftanlage tatsächlich erbracht wird. Die Werte zur Solarenergie wurden mit dem Sunwell-Modell berechnet und sind Ergebnis einer mehrjährigen Forschungsarbeit zur Frage des Produktionspotenzials von PV in der Schweiz.[2] Das Modell berechnet nicht nur die Transposition der verschiedenen Strahlungskomponenten (direkt und diffus) auf die Moduloberfläche, sondern auch die Verschattung durch umgebende Berge sowie die vom Boden reflektierte Rückstrahlung. Letztere ist besonders in Bergregionen

wichtig, wo der hochreflektive Schnee den Ertrag zeitweise um bis zu 30 % steigern kann. Bei vertikal installierten Modulen können im Jahresmittel durch die Schneerückstrahlung etwa 10 % mehr Energie produziert werden. Die Windenergie an den verschiedenen Standorten wurde basierend auf dem von Meteoswiss entwickelten Wettermodell Cosmo-1 für eine typische 3-MW-Turbine berechnet. Die verfügbare Schweizer Wasserkraft wird ebenfalls modelliert und so eingesetzt, dass temporäre Produktionsdefizite, Überproduktionen und mögliche Engpässe im Netz so weit wie möglich gemildert werden. Ein opti-



**Bild 2** Mögliche Standorte für Solar- (oben) und Windkraftanlagen (unten) nach Anwendung aller Ausschlusskriterien. Die weissen Gebiete sind ungeeignet. **Links:** Kapazitätsfaktoren der geeigneten Gebiete, 50 m räumliche Auflösung. **Rechts:** Aufsummierte Installationskapazitäten für PV-Module und Windturbinen. Auflösung basiert auf den respektiven Modellen, die zur Berechnung benutzt wurden: 1,6 km x 2,3 km für Solarenergie und 1,1 km x 1,1 km für Windkraft.



**Bild 3** Vergleich von Import und Export für zwei Produktionsportfolios. **Oben:** Business as usual, 15% Windkraft und 85% PV, installiert auf Hausdächern in urbanen Gebieten. **Unten:** Ergebnis der Optimierung, 75% Windkraft und 25% PV an Standorten, die mit Hilfe der Evolutionsstrategie ausgewählt wurden.

males Leistungsflussmodell berechnet dann die Übereinstimmung von Produktion und Nachfrage: Wie viel Strom muss importiert oder exportiert werden und wie stark ist das Schweizer Stromnetz dadurch belastet?

**GIS ermöglicht die Suche**

Nun kann man allerdings nicht überall dort eine Solar- oder Windkraftanlage bauen, wo es in **Bild 1** gelb-grün ist, denn es gibt diverse Gründe, die lokal dagegensprechen. In einer sogenannten Geographic Information System (GIS) Analyse wurden mit Hilfe räumlich spezifischer Datensätze diejenigen Gebiete ausgeschlossen, die nicht für die Installation von PV und Windkraftanlagen geeignet sind. Und zwar nach den folgenden Kriterien:

- Hänge steiler als 30° (inkl. 150 m Pufferzone)
- Höhenlagen über 2700 m
- Gebiete weiter als 500 m von einer für geländegängige Fahrzeuge zugänglichen Strasse entfernt

- Schweizer Nationalpark
- Gletscher und permanente Schneefelder

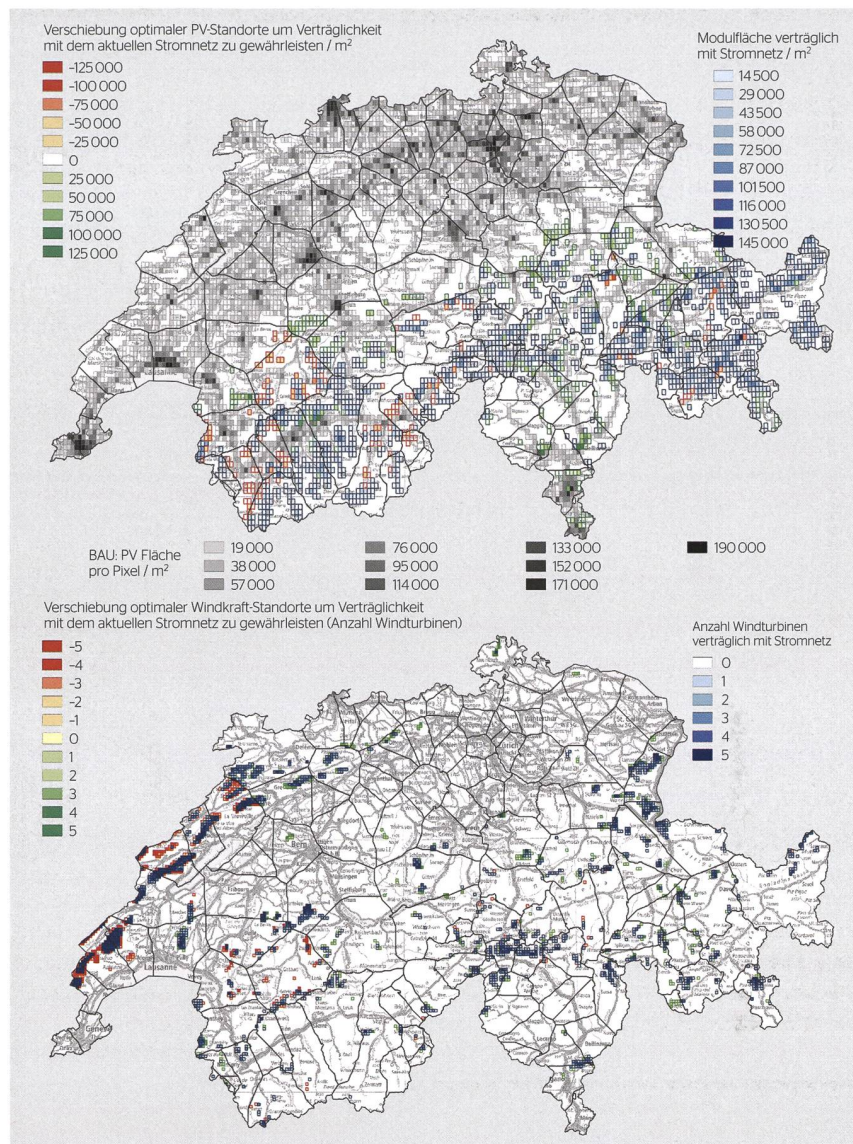
Für Solaranlagen wurden ausserdem nordwärts orientierte Hänge, Moore und einige andere ungeeignete Flächen ausgeschlossen. Die verbleibenden Gebiete dürfen maximal zu 5% mit PV-Anlagen bedeckt werden. In bebauten Gebieten summiert sich dies auf etwa 150 km<sup>2</sup> und entspricht der sonnenbeschienenen Schweizer Dachfläche, wie sie auch in früheren Studien abgeschätzt wurde.[3] Für Windkraftanlagen wurde ein Mindestabstand von 500 m zu jeglichen Gebäuden sowie zwischen einzelnen Windrädern berücksichtigt.

Diese Kriterien wurden mit einer Auflösung von 50 m auf die ganze Schweiz angewandt und ergaben eine mögliche Installationsfläche für PV-Anlagen von 606 km<sup>2</sup> sowie ausreichend Platz für 50400 Windräder (Bild 2). Diese Karte an sich hat bereits einen grossen Wert für die Planung der Energiestrategie 2050. Aber es geht noch besser. Mit der Evolutionsstrategie wird aus dem Pool des Möglichen die Auswahl des Besten getroffen. Dabei ergab sich eine ganze Reihe neuer Erkenntnisse, die unsere – möglicherweise etwas vorbelasteten – Gehirnwindungen so weder erdacht noch erwartet hätten.

### Mehr Strom in den Bergen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Optimierung eine Halbierung des Imports bei gleichzeitiger Steigerung der Produktivität erreicht; und zwar im Vergleich zu landesweit gleichmässig verteilten Installationen von PV und Windkraft. Wenn wir stattdessen mit einem «Business as usual Szenario» (BAU) vergleichen, in dem weiterhin auf Dächern in den Niederungen installiert wird und in dem Windkraft lediglich 15% der aktuellen Kernenergie ersetzt, dann kann der Import sogar um 80% gesenkt werden (Bild 3).

Dies ist von zentraler Bedeutung, weil es zeigt, dass sich hohe Produktivität und optimales Timing nicht gegenseitig ausschliessen. Es ist möglich, PV- und Windkraftanlagen an Standorten zu platzieren, die extrem profitabel sind und gleichzeitig Strom dann zu produzieren, wenn er am meisten gebraucht wird. Es ist sogar möglich, dies zu tun, ohne das Strom-



**Bild 4** Als Ergebnis der Optimierungsstudie ausgewählte Standorte. **Oben:** Fläche PV-Module (m<sup>2</sup>). **Unten:** Anzahl Windturbinen. **Blau:** optimale Produktion und Verträglichkeit mit dem Stromnetz. **Rot:** optimale Produktion, aber keine ausreichenden Netzkapazitäten. **Grün:** Alternative Standorte, die mit dem bestehenden Stromnetz bedient werden können.

netz zu überlasten. Trotz der eher restriktiven Vorgaben an die möglichen Installationsorte für PV- und Windkraftanlagen ist der Optimierungsalgorithmus in der Lage, geeignete Standorte zu finden, ohne grosse Kompromisse bei der Produktivität einzugehen. Die besten Ergebnisse werden mit einem Mix aus 75% Wind und 25% PV erzielt, und die optimalen Standorte sind der Jura für Windkraftanlagen und die Alpen für PV-Anlagen. Bild 4 zeigt die Standorte, die sich als Ergebnis der Optimierung für Solar- und Windkraftanlagen ergeben haben. Die verschiedenen Farben zeigen uns

dabei, welche Beschränkungen durch das aktuelle Transportstromnetz entstehen. Die Standorte in Blau haben ein optimales Potenzial und können gleichzeitig über das bestehende Stromnetz bedient werden. In den roten Gebieten könnte zwar viel Strom produziert werden, allerdings erlaubt das Stromnetz keinen zuverlässigen Abtransport. Daher springen die grünen Gebiete dann als nächste beste Lösung ein und ermöglichen hohe Produktivität bei gesicherter Netzanbindung. In der oberen Karte sieht man zusätzlich in Grau die PV-Standorte eines BAU-Szenarios, das Solarmodule

auf Hausdächern in den Ballungszentren platziert. Dass diese nicht viel mit optimaler Produktion zu tun haben, lässt sich leicht erkennen.

### Die Voraussetzungen sind da

Die wissenschaftliche Studie der EPFL zeigt das physikalisch vorhandene Potenzial auf, welches technisch für uns zugänglich ist und der Schweiz unter den Zielsetzungen der Energiestrategie 2050 ein hohes Niveau an Energieautonomie bietet. Gleichzeitig handelt es sich natürlich nur um ein theoretisch optimales Szenario. Es ist klar, dass es neben den berücksichtigten Einschränkungen noch weitere gibt, die für Installationen in Berggebieten relevant sind. Zu solchen Einschränkungen gehören die lokale

Akzeptanz und wirtschaftliche Rahmenbedingungen. An beiden Punkten muss gearbeitet werden (und wird gearbeitet, z. B. im Rahmen der neuen BFE-Grossprojekte «Sweet» [4]). Die Ergebnisse zeigen aber klar auf, dass die naturräumlichen Voraussetzungen im Alpenraum eine sehr weitgehende autonome, nachhaltige und stabile Energieversorgung mit Wasserkraft, Sonne und Wind allein erlauben würde. Es ist an der Gesellschaft und ihrer politischen Repräsentation, darüber zu entscheiden, inwieweit das verwirklicht werden soll.

### Referenzen

- [1] Jérôme Dujardin et al., «Synergistic optimization of renewable energy installations through evolution strategy», Environmental Research Letters, 2021, doi.org/10.1088/1748-9326/abfc75.

- [2] Annelen Kahl et al., «The bright side of PV production in snow-covered mountains», PNAS, 2019, doi.org/10.1073/pnas.1720808116.
- [3] Alina Walch et al., «Big data mining for the estimation of hourly rooftop photovoltaic potential and its uncertainty», Applied Energy, 2020, doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114404.
- [4] www.bfe.admin.ch/sweet.

### Autoren

Dr. **Annelen Kahl** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der EPFL und am SLF sowie CEO von Sunwell Sàrl.  
→ Sunwell Sàrl, 1015 Lausanne  
→ annelen.kahl@sunwell.tech

**Jérôme Dujardin** ist Doktorand an der EPFL.  
→ EPFL, 1015 Lausanne  
→ jerome.dujardin@epfl.ch

Prof. Dr. **Michael Lehning** ist joint Professor für Schnee- und Kryosphärenwissenschaften am WSL und an der EPFL.  
→ WSL, 7260 Davos  
→ lehning@epfl.ch



VSAS  
USAT  
USAQ

## Interessen verbinden

### Das Qualitäts-Label des VSAS



### VSAS-certified

Das VSAS-Qualitäts-Label fördert und stärkt die Qualität im Schaltanlagenbau und verschafft entscheidende Marktvorteile.

Um das VSAS-Qualitätslabel zu erhalten werden folgende Kriterien durch eine unabhängige Zertifizierungsstelle überprüft:

- ▼ Unternehmen
- ▼ Produkt
- ▼ Produktion
- ▼ Infrastruktur / Arbeitsmittel
- ▼ Personal
- ▼ Marketing

### Wir setzen auf Swissness!

Swissness hat beim VSAS-Qualitätslabel einen grossen Stellenwert. Die nachhaltige Entwicklung unserer Mitglieder ist uns ein grosses Anliegen.

Die Mitgliedsfirmen verbessern sich laufend und auch das Label wird kontinuierlich den Anforderungen angepasst. Der VSAS hat ein starkes Interesse, qualitativ hochstehende Firmen im Verbandsgefüge zu verbinden. Dem VSAS sind die Vernetzung Schweizer Unternehmen und die Förderung qualitativ hochwertiger Produkte aus der Schweiz zentrales Anliegen.



VSAS – Verband Schaltanlagen und Automatik Schweiz  
USAT – Union Suisse Automation et Tableaux électriques  
USAQ – Unione Svizzera Automazione e Quadri elettrici

Werkhofstrasse 9  
CH-2503 Biel

Tel. +41 32 322 85 78  
Fax +41 32 322 83 60

www.vsas.ch  
info@vsas.ch



# Efficacité. Maîtrise.

La meilleure prestation globale.

Tout d'un seul fournisseur et toujours proche de vous avec 9 succursales.  
Le meilleur paquet de prestations global de la branche de l'électricité.

En savoir plus maintenant: [e-m.info/937](http://e-m.info/937)



Efficacité.Maîtrise.



# 100 % renouvelable - et de manière intelligente

**Tendre à l'optimum grâce aux algorithmes génétiques ?** | Lorsque l'on entend le terme « évolution », on pense à Darwin et à la survie du plus apte. Que cette stratégie puisse également être appliquée aux énergies renouvelables peut surprendre. Mais ce qui a permis à la faune et à la flore de s'adapter à l'environnement peut également servir à optimiser notre propre avenir.

ANNELEN KAHL, JÉRÔME DUJARDIN, MICHAEL LEHNING

**D**ans une étude publiée récemment, une équipe de chercheurs de l'EPFL a utilisé une stratégie évolutive pour développer un scénario optimal pour l'exploitation des sources d'énergie renouvelables en Suisse.<sup>[1]</sup> Cette technique a notamment pour avantages que plusieurs critères peuvent être optimisés en même temps

et que le nombre presque infini de solutions théoriquement possibles peuvent être testées de manière intelligente.

La Suisse veut dire adieu à l'énergie nucléaire et aux combustibles fossiles. Un zéro net doit être atteint d'ici 2050. Mais comment? Sans l'énergie en ruban des centrales nucléaires, il y aura un déficit d'approvisionnement, surtout en

hiver, qui pourra difficilement être comblé par les modules photovoltaïques (PV) embrumés des plaines. Pouvons-nous nous permettre de dépendre des importations d'électricité de l'étranger alors que nos pays voisins s'efforcent eux-mêmes de passer aux énergies renouvelables? De plus, l'échec de l'accord-cadre avec l'UE requiert une plus

Figures: Jérôme Dujardin



grande autonomie énergétique. Nous avons donc besoin d'un portefeuille de production qui couvre la demande d'électricité aussi rapidement et aussi complètement que possible, et ce, même en hiver. Bien que de petites contributions de diverses sources d'énergie soient envisageables, la majeure partie de ce portefeuille sera constituée d'installations photovoltaïques et éoliennes qui seront combinées avec les centrales hydroélectriques existantes. En même temps, il faudra encore réussir à transporter l'électricité nécessaire avec le réseau électrique actuel. De nombreuses conditions devront donc être remplies simultanément.

### Optimisation simultanée de plusieurs paramètres

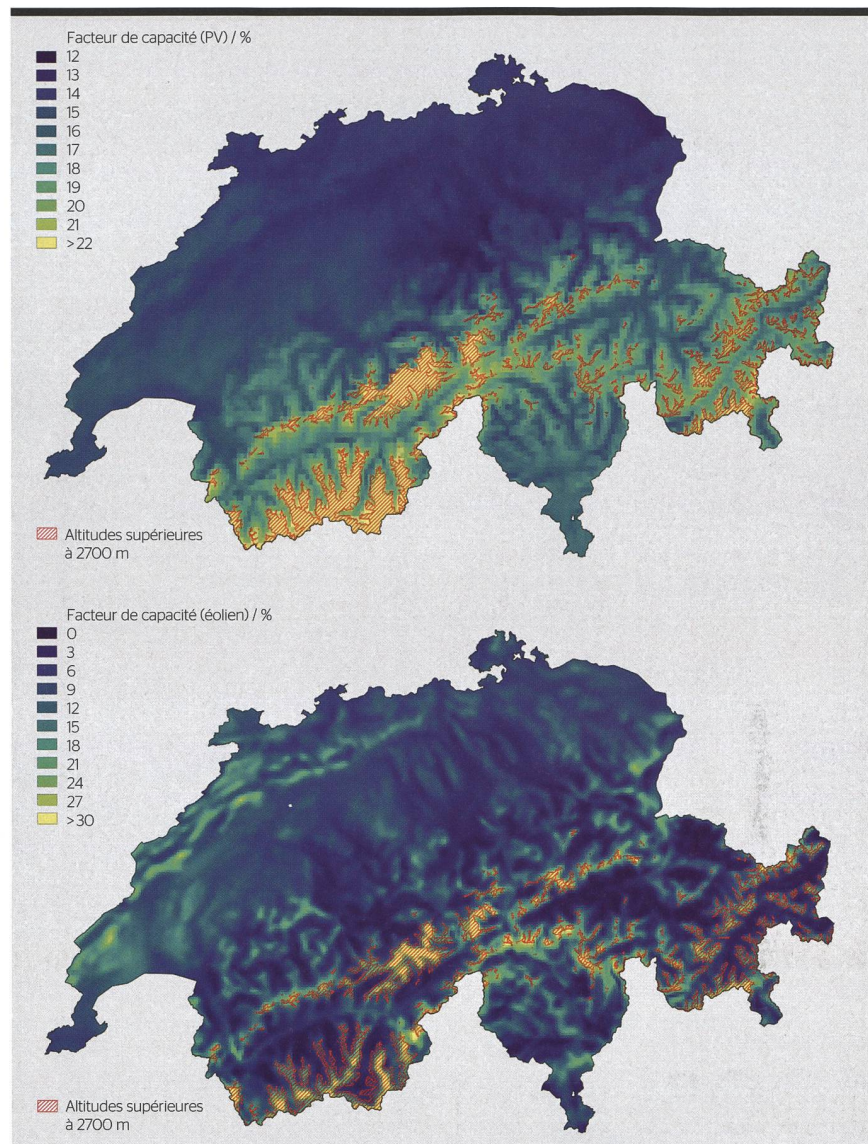
Quelle est la meilleure façon de procéder? Dans leur projet, les chercheurs ajustent divers paramètres simultanément de manière à pouvoir manœuvrer dans ce labyrinthe de possibilités et trouver une solution adéquate, tout en tenant compte des conditions-cadres mentionnées ci-dessus. Ces paramètres sont les suivants:

- le choix des sites pour le photovoltaïque et l'éolien;
- leur part dans le mix énergétique;
- et la géométrie de l'installation des modules PV (angle d'inclinaison et orientation).

L'espace de toutes les combinaisons possibles est à peu près comparable au nombre d'atomes présents dans notre univers. Il est donc impossible d'essayer concrètement toutes les solutions. D'où l'astuce de l'algorithme évolutionnaire mentionné ci-dessus. Cette méthode d'optimisation s'inspire de l'évolution des organismes vivants naturels et utilise des processus tels que la sélection, la recombinaison et la mutation. Elle se caractérise par une recherche particulièrement ciblée et performante d'une bonne solution, tout en laissant une grande marge de manœuvre dans la définition de la fonction objectif et des conditions aux limites.

### Potentiel de production des sites

Le résultat de l'optimisation dépend de la productivité des sites respectifs. Non seulement de la somme annuelle, mais aussi de la répartition temporelle au cours de l'année. Bien que cela soit difficile à représenter en deux dimensions, le facteur de capacité (figure 1)

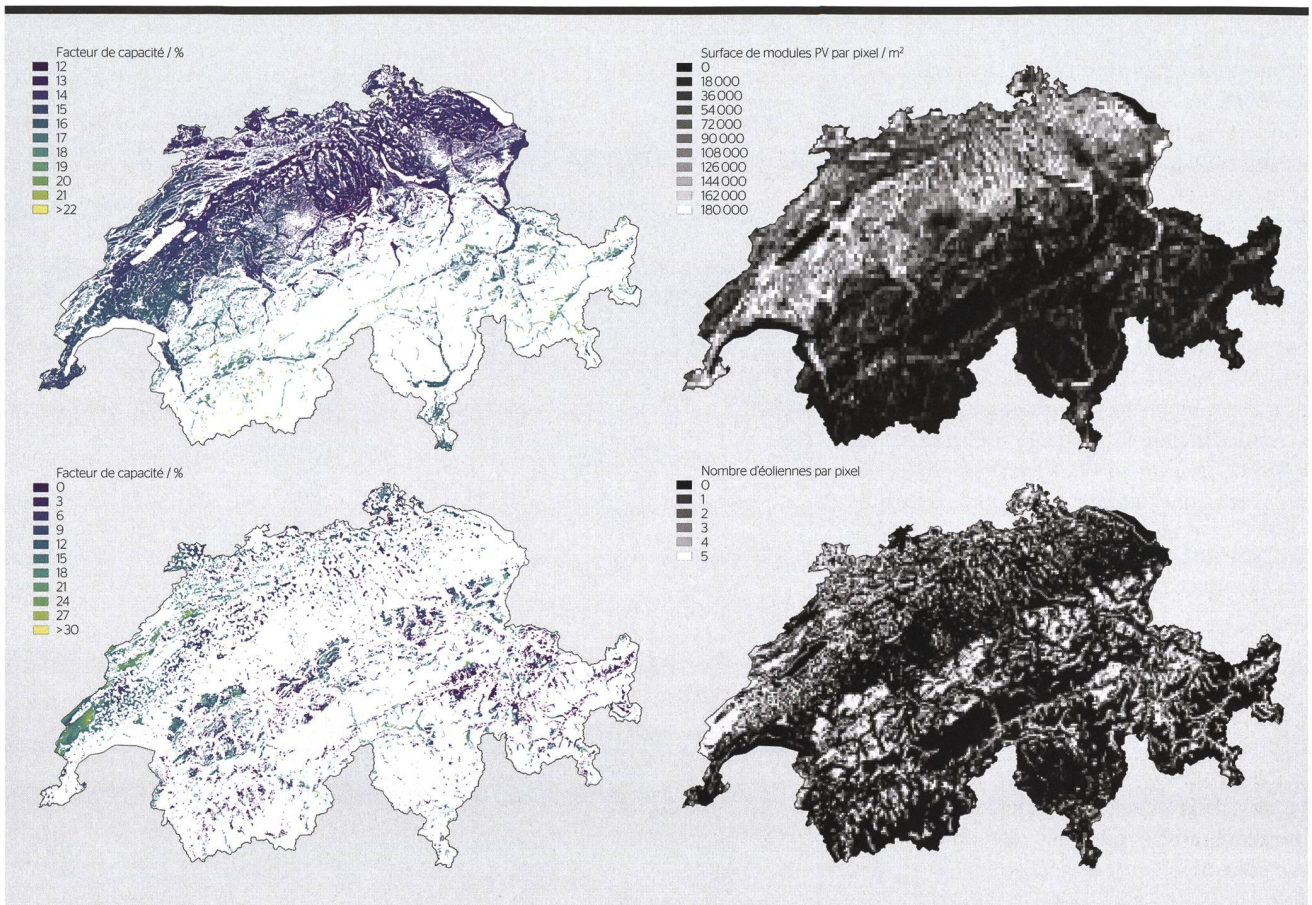


**Figure 1** Distribution spatiale des facteurs de capacité pour le photovoltaïque (en haut) et l'éolien (en bas). La résolution spatiale est basée sur les modèles utilisés respectivement pour les calculs : 1,6 km x 2,3 km pour l'énergie solaire et 1,1 km x 1,1 km pour l'énergie éolienne. Les altitudes supérieures à 2700 m ont été exclues.

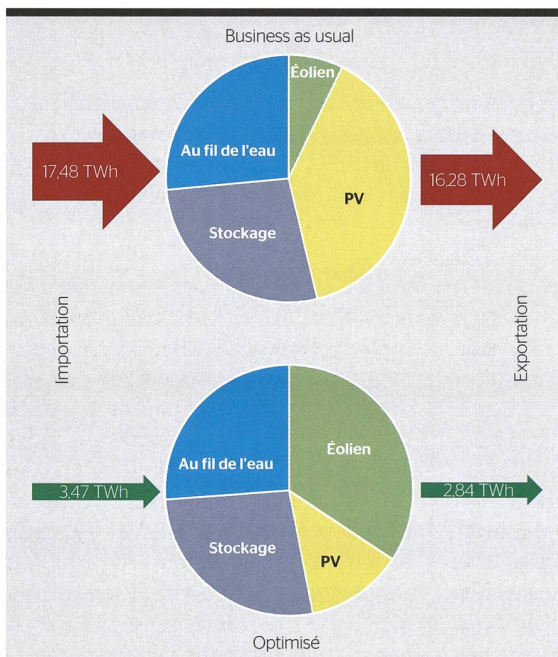
constitue une approximation utile. Il indique le rapport entre la production possible et effectivement fournie d'une centrale photovoltaïque ou éolienne.

Les valeurs relatives à l'énergie solaire ont été calculées à l'aide du modèle Sunwell et sont le résultat de plusieurs années de recherche sur le potentiel de production du photovoltaïque en Suisse.[2] Le modèle calcule non seulement la transposition des différentes composantes du rayonnement (direct et diffus) sur la surface du module, mais aussi l'ombrage causé par les montagnes environnantes et le rayonnement réfléchi par le sol. Ce dernier point est particulièrement impor-

tant dans les régions montagneuses, où la haute réflectivité de la neige peut augmenter temporairement la production de jusqu'à 30%. Les modules installés verticalement permettent de produire environ 10% d'énergie supplémentaire en moyenne annuelle grâce à la réflexion de la neige. L'énergie éolienne aux différents endroits a été calculée pour une turbine typique de 3 MW en se basant sur le modèle météorologique Cosmo-1 développé par Meteoswiss. L'énergie hydraulique suisse disponible est également modélisée et utilisée de manière à atténuer autant que possible les déficits temporaires de production, les surproductions et les éventuels goulets



**Figure 2** Emplacements possibles pour des installations photovoltaïques (en haut) et des éoliennes (en bas) après application de tous les critères d'exclusion. Les zones indiquées en blanc ne conviennent pas. **À gauche** : facteurs de capacité des zones appropriées, avec une résolution spatiale de 50 m. **À droite** : capacités d'installation totales pour les modules PV et les éoliennes. Les résolutions sont basées sur les modèles utilisés respectivement pour les calculs : 1,6 km x 2,3 km pour l'énergie solaire et 1,1 km x 1,1 km pour l'énergie éolienne.



**Figure 3** Comparaison des importations et des exportations pour deux portefeuilles de production. **En haut** : Business as usual, soit 15 % d'éolien et 85 % de PV installé sur les toits des zones urbaines. **En bas** : résultat de l'optimisation, soit 75 % d'éolien et 25 % de PV, installés sur les sites sélectionnés à l'aide de la stratégie évolutionnaire.

d'étranglement dans le réseau. Un modèle de flux d'énergie optimal calcule ensuite comment atteindre la correspondance entre la production et la demande : quelle quantité d'électricité doit être importée ou exportée, et quelle charge cela représente pour le réseau électrique suisse.

### Rechercher les sites appropriés à l'aide d'une analyse SIG

Il n'est toutefois pas possible de construire une installation photovoltaïque ou des éoliennes à tous les endroits indiqués en jaune-vert dans la **figure 1** : certains sites ne sont pas appropriés pour diverses raisons. Lors d'une analyse SIG, c'est-à-dire réalisée à l'aide d'un système d'information géographique, des ensembles spécifiques de données spatiales ont été utilisés pour exclure les zones qui ne conviennent pas à l'installation de centrales photovoltaïques et de parcs éoliens, et ce, selon les critères suivants :

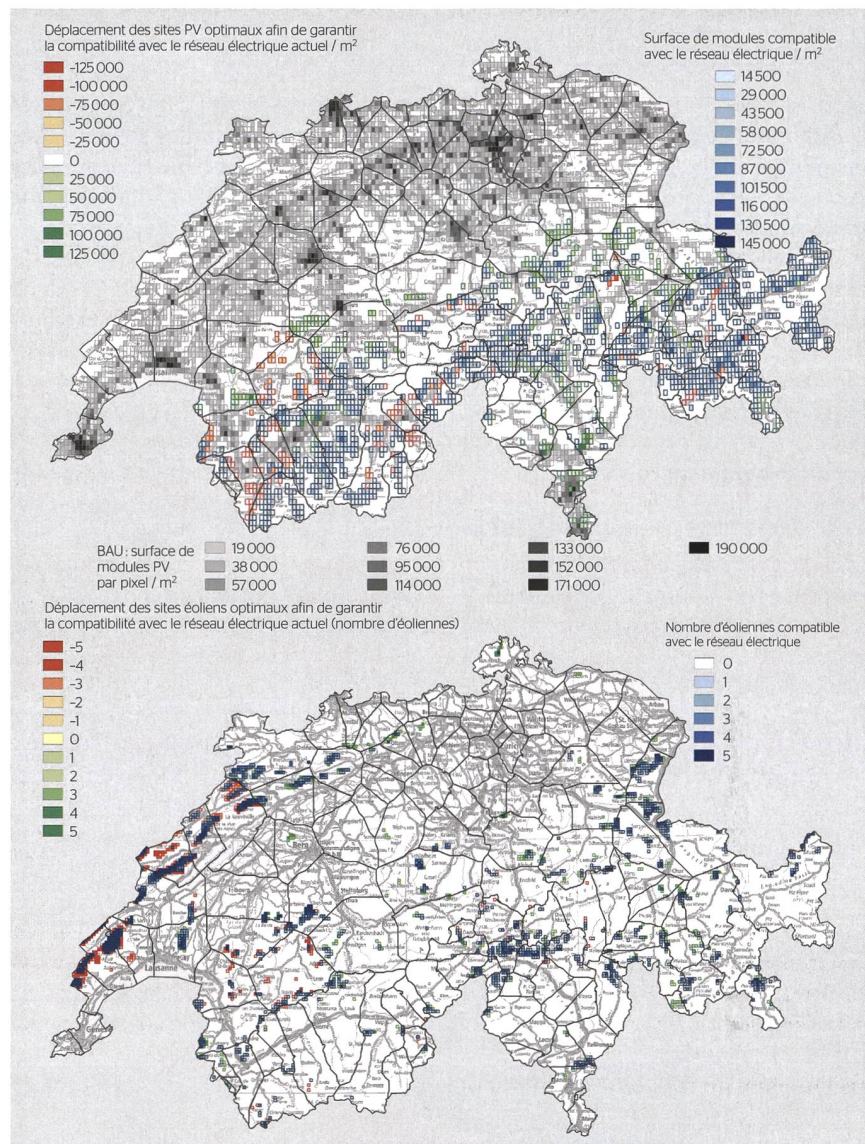
- les pentes de plus de 30° (y compris une zone tampon de 150 m);
- les altitudes supérieures à 2700 m;
- les zones situées à plus de 500 m d'une route accessible aux véhicules tout-terrain;
- le parc national suisse;
- les glaciers et les névés (zones où la neige persiste en été).

En outre, les pentes orientées au nord, les tourbières et marécages ainsi que certains autres terrains inappropriés ont été exclus pour les installations photovoltaïques. Les zones restantes peuvent finalement être recouvertes au maximum à 5% par des systèmes PV. Dans les zones bâties, cela représente environ 150 km<sup>2</sup> et correspond à la surface des toits suisses ensoleillés, comme également estimé dans des études antérieures.[3] En ce qui concerne les parcs éoliens, une distance minimale de 500 m a été considérée avec tout bâtiment, ainsi qu'entre les éoliennes.

Ces critères ont été appliqués à l'ensemble de la Suisse avec une résolution de 50 m et ont permis d'obtenir une surface d'installation possible pour les systèmes photovoltaïques de 606 km<sup>2</sup> ainsi que suffisamment de place pour 50 400 éoliennes (figure 2). Cette carte représente déjà en soi une grande valeur pour la planification de la Stratégie énergétique 2050, mais elle va encore plus loin. Avec la stratégie évolutionnaire, il est possible de sélectionner le meilleur dans l'ensemble des possibilités. Ce faisant, toute une série de nouveaux constats sont apparus, que nos cerveaux – peut-être quelque peu préinfluencés – n'auraient ni conçus ni attendus.

### Plus d'électricité dans les montagnes

Les résultats montrent que l'optimisation permet de réduire de moitié les importations tout en augmentant la productivité, et ce, par rapport à des installations photovoltaïques et éoliennes uniformément réparties dans tout le pays. Et les importations peuvent même être réduites de 80% si l'on compare ces résultats avec un scénario « Business as usual » (BAU), dans lequel les installations continuent d'être réalisées sur les toits des plaines et l'énergie éolienne ne remplace que 15% de l'énergie nucléaire actuelle (figure 3).



**Figure 4** Sites sélectionnés suite à l'étude d'optimisation.

**En haut :** surface des modules PV (m<sup>2</sup>). **En bas :** nombre d'éoliennes. **En bleu :** production optimale et compatibilité avec le réseau électrique. **En rouge :** production optimale, mais pas de capacité de réseau suffisante. **En vert :** sites alternatifs qui peuvent être desservis par le réseau électrique existant.

Ce résultat est d'une importance capitale, car il montre qu'une productivité élevée et un timing optimal ne s'excluent pas mutuellement. Il est possible de placer des centrales photovoltaïques et des parcs éoliens à des endroits extrêmement rentables tout en produisant de l'électricité au moment où elle est le plus nécessaire. Il est même possible de le faire sans surcharger le réseau électrique. Malgré les directives plutôt restrictives relatives aux emplacements possibles pour l'installation de centrales photovoltaïques et de parcs éoliens, l'algorithme d'optimisation est capable de trouver des sites appropriés

sans faire de grands compromis en matière de productivité. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une combinaison de 75% d'énergie éolienne et de 25% d'énergie photovoltaïque, et les régions optimales sont le Jura pour les éoliennes et les Alpes pour les installations photovoltaïques. La figure 4 montre les emplacements adaptés pour les centrales photovoltaïques et les parcs éoliens résultant de l'optimisation. Les différentes couleurs illustrent les contraintes imposées par le réseau de transport d'électricité actuel. Les sites en bleu ont un potentiel optimal et peuvent aussi être desservis par le

réseau électrique existant. Dans les zones rouges, on pourrait produire beaucoup d'électricité, mais le réseau électrique ne permet pas d'assurer le transport de l'électricité ainsi produite de manière fiable. Les sites indiqués en vert constituent donc la deuxième meilleure solution et permettent une productivité élevée avec une connexion assurée au réseau. La carte du haut indique également en gris les sites PV d'un scénario BAU qui place les modules solaires sur les toitures dans les centres urbains. Il est facile de voir que ceux-ci n'ont pas grand-chose à voir avec une production optimale.

### Les conditions préalables sont là

L'étude scientifique de l'EPFL met en évidence le potentiel physiquement disponible qui nous est techniquement accessible et qui offre à la Suisse un haut niveau d'autonomie énergétique

dans le cadre des objectifs de la Stratégie énergétique 2050. Il ne s'agit bien sûr toutefois que d'un scénario optimal en théorie. Il est clair qu'en plus des contraintes considérées, il en existe d'autres qui sont pertinentes pour les installations en montagne, telles que l'acceptation locale et les conditions-cadres économiques, par exemple. Il est nécessaire de travailler à ces deux points (et c'est déjà le cas, par exemple dans le cadre des nouveaux grands projets «Sweet» de l'OFEN [4]). Toutefois, les résultats montrent clairement que les conditions naturelles de la région alpine permettraient un approvisionnement énergétique autonome, durable et stable très étendu, et ce, uniquement grâce aux énergies hydraulique, solaire et éolienne. C'est à la société et à sa représentation politique de décider dans quelle mesure cela doit être réalisé.

### Références

- [1] Jérôme Dujardin et al., « Synergistic optimization of renewable energy installations through evolution strategy », *Environmental Research Letters*, 2021, doi.org/10.1088/1748-9326/abfc75.
- [2] Annelen Kahl et al., « The bright side of PV production in snow-covered mountains », *PNAS*, 2019, doi.org/10.1073/pnas.1720808116.
- [3] Alina Walch et al., « Big data mining for the estimation of hourly rooftop photovoltaic potential and its uncertainty », *Applied Energy*, 2020, doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114404.
- [4] www.bfe.admin.ch/sweet.

### Auteurs

D' **Annelen Kahl** est collaboratrice scientifique à l'EPFL et au SLF ainsi que CEO de Sunwell Sàrl.  
→ Sunwell Sàrl, 1015 Lausanne  
→ annelen.kahl@sunwell.tech

**Jérôme Dujardin** est doctorant à l'EPFL.  
→ EPFL, 1015 Lausanne  
→ jerome.dujardin@epfl.ch

Prof. D' **Michael Lehning** est professeur ordinaire au WSL et à l'EPFL dans les domaines des processus de la neige et des sciences cryosphériques.  
→ WSL, 7260 Davos  
→ lehning@epfl.ch

## COMSOL Day

Corrosion & Electrodeposition

## Entdecken Sie, was mit *multiphysikalischer Simulation* *möglich ist*

Lernen Sie gemeinsam mit Fachleuten und Simulationsspezialisten, wie man Simulation zur Analyse von Korrosions- und Galvanikanwendungen einsetzt.

KOSTENLOSE REGISTRIERUNG: [comsol.ch/comsol-days/corrosion-electrodeposition](https://comsol.ch/comsol-days/corrosion-electrodeposition)

### THEMEN UMFASSEN

- Kathodischer Schutz
- Galvanische Abscheidung
- Galvanische Korrosion
- Gepulste Beschichtung und transiente Verfahren
- Umgang mit grossen Modellen
- Galvanische Elektrodenverformung

