Organisation faîtière de l'économie des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique

Berne, août 2025

Positions du Conseil Scientifique d'aeesuisse

D'ici 2050, comment la Suisse peut-elle s'approvisionner en énergie renouvelable de manière fiable – et réduire ses émissions de gaz à effet de serre à zéro émission nette ?

Résumé

- D'ici 2050, la Suisse veut réduire ses émissions de gaz à effet de serre à zéro émission nette. Cela nécessite une transformation fondamentale du système énergétique : abandon du pétrole et du gaz fossiles dans les bâtiments et les transports au profit des pompes à chaleur et des véhicules électriques.
- Le couplage des secteurs du chauffage et des transports avec celui de l'électricité augmentera la consommation finale d'électricité ; selon les calculs actuels, de 50-60 TWh/a aujourd'hui à 70-80 TWh/a. Cette augmentation et le remplacement des centrales nucléaires nécessitent une expansion significative de la production d'électricité renouvelable. La plus grande part proviendra du photovoltaïque (PV). L'énergie éolienne peut apporter une contribution importante, en particulier pour l'approvisionnement en hiver. Elle doit donc être promue malgré les défis en termes d'acceptation.
- La fluctuation de la production photovoltaïque doit être compensée. Le solaire PV peut être bien intégré grâce à une interaction intelligente entre l'hydroélectricité flexible, le stockage d'énergie (batteries, stockage par pompage), la réduction sélective de la production et les charges flexibles (stations de recharge pour véhicules électriques, pompes à chaleur, systèmes de chauffage électrique industriels avec stockage de chaleur).
- Cependant, cela nécessite des ajustements tels que l'accès général à des tarifs d'électricité dynamiques et des instruments de planification appropriés pour intégrer la flexibilité du côté de la demande.
- La consommation et la production d'électricité sont compensées de manière saisonnière par les centrales de cogénération et les importations d'électricité. Alors que par le passé, la balance commerciale fluctuait entre les importations nettes et les exportations, à l'avenir, les importations nettes d'électricité auront tendance à se situer entre 5 et 10 TWh/a. Des valeurs similaires ont déjà été atteintes au cours des deux dernières décennies, au cours des années où les importations étaient exceptionnellement importantes. La conclusion d'un accord commercial sur l'électricité avec l'UE est cruciale à cet égard. Il n'est pas nécessaire de disposer de nouvelles centrales électriques de base.
- Le couplage sectoriel réduit considérablement les importations de sources d'énergie chimiques telles que le gaz naturel, le mazout et les carburants. Alors qu'ils étaient de 130 à 150 TWh/a ces dernières années (plus d'un ordre de grandeur de plus que les importations d'électricité), seuls 20 à 30 TWh/a seront nécessaires dans un scénario de neutralité carbone, en grande partie sous la forme de carburants d'aviation renouvelables.

La dépendance de la Suisse vis-à-vis des importations d'énergie diminue donc considérablement.

- L'efficacité continue d'être la « source d'énergie » la plus importante. Le secteur de la construction en particulier est à la traîne par rapport aux objectifs. Pour parvenir à l'augmentation urgente du taux de rénovation économe en énergie, il convient de continuer à promouvoir des mesures telles que le remplacement des systèmes de chauffage au mazout et au gaz par des pompes à chaleur, l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et d'autres solutions prêtes à être commercialisées.
- Ces résultats sont basés sur un large consensus de la communauté scientifique suisse, qui s'est organisé dans le cadre des projets SWEET de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Sans un tel soutien scientifique permanent – de la recherche fondamentale à l'application pratique – la transition énergétique ne pourra pas réussir à atteindre ses buts.
- Une attitude généralement positive à l'égard de l'innovation nous aidera à relever les défis de la neutralité carbone. Il s'agit de réglementations telles que les tarifs flexibles de l'électricité. L'aménagement du territoire est également d'une grande importance, car de nombreuses nouvelles technologies nécessitent naturellement de l'espace, par exemple le photovoltaïque alpin, l'agri-photovoltaïque ou les systèmes de stockage de chaleur dans les grands bassins terrestres. Nous devons également surmonter l'attitude « not-in-my-backyard » largement répandue concernant les lignes électriques, les éoliennes, etc.
- Notre futur système énergétique doit être robuste. Il doit donc fonctionner de manière sûre et rentable dans diverses situations, qu'il s'agisse d'un commerce d'énergie sans entrave ou d'un isolement en situation de crise. La meilleure assurance pour cela est un accès sans entrave aux marchés européens de l'énergie et un parc de centrales de cogénération exploitées avec des sources d'énergie liquides provenant des réserves d'énergie stratégiques. Fidèle à la devise : « Espérer le meilleur et se préparer au pire ».

Le conseil scientifique d'aeesuisse est clairement d'avis que la Suisse dispose de très bonnes conditions pour réussir sa transition énergétique et à sonobjectif de zéro émission nette d'ici 2050. Il réduira également considérablement sa dépendance aux importations d'énergie. Toutes les technologies nécessaires sont disponibles et connues. Le facteur décisif pour la mise en œuvre est la volonté politique et sociale.

Situation de départ

D'ici 2050, la Suisse veut réduire ses émissions de gaz à effet de serre à zéro émission nette. C'est au cœur de la loi sur le climat et l'innovation (LDC), qui a été adoptée le 18 juin 2023 par 59,1 % de oui[1]. Bien qu'il y ait un accord sur l'objectif, le chemin est encore semé d'incertitudes. La question de la sécurité de l'approvisionnement en énergie est au cœur de

[1] https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/info-specialistes/reduction-emissions/objectifs-reduction/objectif-2050.html

cette démarche : l'électricité[2], mais aussi les carburants, la biomasse et diverses sources de chaleur telle que la géothermie.

Les positions suivantes du Conseil scientifique d'aeesuisse se penchent sur la sécurité de l'approvisionnement en énergie en Suisse – heure par heure au cours d'une année 2050 typique dans le cadre d'un scénario net zéro. Ils se basent sur l'état actuel des connaissances de la recherche suisse, organisée dans le cadre du projet SWEET-CROSS[3]. Le problème des réseaux électriques internationaux et nationaux (au niveau de la distribution et du transport) n'est pas au centre de ce rapport. L'effet positif d'une intégration intelligente du photovoltaïque sur les réseaux de distribution est esquissé ci-dessous dans les résultats du modèle.

Émissions de gaz à effet de serre et importations d'énergie

Entre 1990 et 2010, les émissions de gaz à effet de serre de la Suisse se sont élevées en moyenne à 58 millions de tonnes d'équivalent CO_2 (y compris le trafic aérien international, Fig. 1, à gauche). Depuis 2014, on observe une nette tendance à la baisse, avec une baisse des émissions d'environ 1 million de tonnes par an. La raison en est la diminution constante de l'utilisation du mazout et du gaz naturel dans le secteur du bâtiment ; La consommation d'essence et de diesel est également en baisse dans le secteur des transports. D'ici 2050, même dans une Suisse net zéro, il y aura encore des émissions résiduelles de l'ordre de 10 à 15 millions de tonnes par an. Celles-ci proviennent des secteurs de l'agriculture, de l'industrie (en particulier de la production de ciment) et de l'aviation. Elles doivent être évitées ou compensées par des mesures telles que le captage et le stockage du CO_2 (CSC) ou avec les technologies d'émissions négatives.[4]

La tendance à la baisse des émissions de CO_2 se reflète dans la diminution des importations de combustibles fossiles (graphique 1, au centre) : alors que celles-ci s'élevaient en moyenne à 175 TWh/a entre 2000 et 2010, une réduction annuelle de 3 à 4 TWh a été observée à partir de 2014. Cette tendance devra se poursuivre si la Suisse veut atteindre l'objectif de zéro émission nette. Les importations d'essence et de diesel tomberont à presque zéro lorsque le transport individuel de passagers, en particulier, sera largement électrifié. Les solutions à base de carburant ne sont plus utilisées que dans le transport lourd ou la navigation intérieure. Le mazout et le gaz naturel disparaîtront également dans le secteur du bâtiment, le chauffage des locaux et l'eau chaude seront fournis principalement par des pompes à chaleur, complétées par d'autres sources d'énergie telles que l'énergie solaire et géothermique, le bois et les déchets. Ce dernier, à l'instar du biogaz produit en Suisse, sera principalement utilisé pour des applications à plus forte valeur ajoutée, telles que les biens de transformation industrielle. L'approvisionnement en chaleur par le biais de conduites va également gagner en importance – en continuant par les usines d'incinération, mais en se basant de plus en plus sur la chaleur de l'environnement provenant de l'air, de l'eau et du sous-sol au moyen de pompes à chaleur centralisées ou distribuées. À l'avenir, le kérosène continuera d'être importé, de plus en plus sous forme de carburants synthétiques (Sustainable Aviation Fuels – SAF).

[2] https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/approvisionnement-en-electricite/securite-de-approvisionnement-en-electricite.html
[3] https://sweet-cross.ch/
[4] https://aeesuisse.ch/wp-content/uploads/2024/06/aeesuisse_WiBe_CCS_Position_24060859.pdf

La figure 1 (au milieu) montre également le solde net annuel des importations et des exportations d'électricité (ces dernières sont indiquées séparément sous forme de barres grises, à l'exclusion du transit de l'électricité pure). Une comparaison avec d'autres importations d'énergie montre clairement qu'elles dépassent de loin le volume net des échanges d'électricité.

Conclusion 1 : La dépendance de la Suisse vis-à-vis des importations d'énergie concerne principalement les combustibles fossiles. Celles-ci diminueront considérablement dans une Suisse net zéro.

De combien d'électricité supplémentaire avons-nous besoin pour atteindre l'objectif de zéro émission nette ?

L'électrification extensive du trafic routier et le chauffage des bâtiments augmenteront la consommation d'électricité. Celle-ci a été quantifiée par de nombreuses équipes de recherche suisses dans le cadre des Perspectives énergétiques 2050+[5] et dans le cadre du projet SWEET-CROSS financé par l'OFEN[6] . Les modèles cartographient la demande d'énergie suisse par groupe de consommateurs. Dans le cadre d'un processus d'optimisation, des combinaisons de technologies de production sont déterminées qui minimisent les coûts de production afin de couvrir la demande d'énergie dans le respect des limites d'émission fixées. Pour une évaluation correcte de la consommation et de la production d'électricité futures, il est nécessaire de définir des variables centrales. La figure 2 décompose le solde de l'électricité sous forme de graphique en cascade pour l'année 2023 à titre d'exemple :

- **La production nationale** est la production de toutes les centrales électriques (hydroélectricité, énergie nucléaire, autres centrales thermiques telles que les usines d'incinération des déchets, photovoltaïque et éolienne).
- Si l'on soustrait la consommation des pompes dans les centrales de pompage-turbinage, on obtient **la production nette**.
- De grandes quantités d'électricité sont importées et exportées chaque année. Si celle-ci est incluse dans le bilan, la **consommation du pays** est obtenue.
- Si l'on en déduit les pertes sur le réseau, il reste la **consommation finale**, qui est ici décomposée en catégories de consommation de base (éclairage, moteurs, informatique, etc.), de chaleur industrielle (radiateurs électriques industriels), de chauffage des locaux et d'eau chaude (pompes à chaleur, radiateurs électriques) et de mobilité (trains, véhicules électriques).

Comme le montre la figure 3 (ci-dessous), la consommation finale d'électricité a atteint un pic vers 2010 et a diminué depuis, principalement en raison de mesures d'efficacité de la consommation de base (éclairage, appareils, etc.). La proportion de systèmes de chauffage électrique inefficaces diminue également régulièrement (proportion hachurée du chauffage des locaux sur la figure 3). Les scénarios futurs montrent une augmentation du chauffage des locaux et de l'eau chaude en raison de la part croissante des pompes à chaleur.

[5] https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politique/perspectives-energetiques-2050-plus.html
[6] https://sweet-cross.ch/

L'augmentation de l'e-mobilité est encore plus forte. Dans certains résultats de modèles, l'électrolyse de l'hydrogène (violet) apparaît également comme un futur moteur de la consommation d'électricité. L'hydrogène est utilisé comme combustible ou pour produire de l'électricité et de la chaleur. La consommation électrique supplémentaire potentielle des centres de données n'est prise en compte que dans la dernière étude de VSE, avec 3 TWh/a (fig. 3, VSE update). Cette augmentation est toutefois trop faible pour influencer de manière significative les conclusions principales des autres modèles.

La figure 3 (en haut) montre la production nette. Cela illustre la prédominance du photovoltaïque, le rôle accru des centrales thermiques alimentées au bois, aux déchets ou au biogaz, et une tendance à l'augmentation des importations nettes d'électricité. Dans les deux sous-chiffres, la consommation nationale est également marquée.

Il convient de noter à nouveau que la question de savoir si les flux de charge, en particulier les importations et les exportations d'électricité, peuvent être gérés par les réseaux n'est pas examinée en détail par la plupart des modèles. Seul le modèle Nexus-e de l'ETH Zurich[7] calcule explicitement les flux d'électricité au niveau des réseaux de transport ; aucun problème n'a été constaté pour les scénarios net zéro. Au niveau du réseau de distribution, l'expansion du photovoltaïque et l'augmentation de la demande d'électricité pour les véhicules électriques augmenteront la charge sur les réseaux. Cependant, cela peut être atténué par des mesures appropriées[8]. Une autre restriction concerne le trafic aérien, c'est-à-dire l'approvisionnement en kérosène. Cet aspect n'est pas encore suffisamment pris en compte par tous les modèles. Dans SWEET-reFuel.ch[9] , cette question sera examinée plus en détail, en particulier la question de savoir si des carburants d'aviation durables (SAF) doivent être produits ou importés en Suisse.

Conclusion 2 Les résultats des équipes de modélisation suisses montrent que l'objectif de zéro émission nette est réalisable. L'électrification du trafic routier et l'approvisionnement en chaleur des bâtiments au moyen de pompes à chaleur sont déterminants à cet égard. Cette évolution réduira massivement les importations d'énergie fossile. Une éventuelle augmentation des importations d'électricité est faible en comparaison.

Les résultats de ces modèles sont-ils plausibles ? Une estimation simple

La consommation future d'électricité est un paramètre qui fait l'objet de discussions intensives dans la politique et dans le public. Les calculs des équipes de recherche suisses de la figure 3 montrent une tendance claire : la consommation finale d'électricité passera de 50-60 TWh/a aujourd'hui à 70-80 TWh/a, principalement en raison de l'augmentation de la consommation d'électromobilité et de pompes à chaleur. Ces résultats sont basés sur des modèles, dont les plus simples sont difficilement compréhensibles pour les non-spécialistes.

Une estimation simple peut être faite en regardant la consommation finale d'énergie. Comme le montre la figure 1 (à droite), ce chiffre a été d'un peu plus de 200 TWh/a ces dernières années, y compris les 50-60 TWh/a d'électricité susmentionnés. Prenons l'exemple de l'année 2023. À

[7] https://nexus-e.org/
[8] Offre de flexibilité de l'électromobilité et des bâtiments, rapport de synthèse, https://sweet-pathfndr.ch/
[9] https://www.sweet-refuel.ch/

cette époque, la consommation finale s'élevait à un total de 213 TWh, dont 56 TWh d'électricité. Sur les 213 TWh, 55 TWh provenaient de l'essence et du diesel et 37 TWh du mazout et du gaz pour le chauffage des locaux et l'eau chaude. Si tout le trafic routier était électrifié, les 55 TWh de carburant seraient remplacés par 18 TWh d'électricité. Cela correspond au passage de 6 litres/100 km à 20 kWh/100 km. De même, les 37 TWh de combustibles seraient remplacés par 11 TWh d'électricité si des pompes à chaleur d'un coefficient de performance de 3-4 étaient utilisées. Un dernier aspect est le remplacement des systèmes de chauffage électrique direct par des pompes à chaleur. Comme le montre la figure 3 (ci-dessous), 5 TWh d'électricité pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sont encore utilisés aujourd'hui pour le chauffage par résistance électrique. Si celles-ci sont remplacées par des pompes à chaleur, les besoins en électricité sont réduits du même facteur de 3 à 4, c'est-à-dire qu'ils diminuent d'environ 3 TWh.

Le résultat est le suivant : si la consommation finale d'essence, de diesel, de mazout, de gaz et de chauffage électrique avait été remplacée d'un seul coup par des véhicules électriques et des pompes à chaleur plus efficaces en 2023, la consommation finale d'électricité serait passée de 56 TWh à 82 TWh.

	56	TWh	de consommation finale d'électricité à ce jour
+	18	TWh	Remplacement des véhicules à carburant fossile par des véhicules électriques
+	11	TWh	Remplacement du chauffage et de l'eau chaude générés par des combustibles fossiles par des pompes à chaleur
–	3	TWh	Remplacement des radiateurs à résistance électrique par des pompes à chaleur
=	82	TWh	

Cette valeur se situe à l'extrémité supérieure des calculs de modèles beaucoup plus fondés de la communauté scientifique suisse, mais elle confirme et vérifie de manière plausible l'ampleur de l'augmentation.

Cette estimation simple exclut d'autres aspects tout aussi importants pour atteindre l'objectif de neutralité carbone, notamment l'augmentation générale de l'efficacité de la consommation d'électricité et de chaleur, le développement et l'expansion d'autres sources d'énergie telles que le biogaz, l'énergie solaire thermique, l'énergie géothermique ou la conversion de ressources précieuses telles que le bois et les déchets pour des applications à plus forte valeur ajoutée pour la chaleur industrielle. L'ensemble du captage, de l'utilisation et du stockage du CO_2, de la production et de l'utilisation du biochar, de la construction en bois et de l'importance de toutes ces approches pour générer des émissions négatives est également réservé aux modèles plus complexes. Il s'agit notamment d'hypothèses sur le développement de la population, la prospérité et le mode de vie, ainsi que sur l'ampleur du secteur des services et de la production industrielle, y compris leur structure et leur efficacité.

Conclusion 3 Selon le consensus scientifique actuel, l'électrification du trafic routier et l'approvisionnement en chaleur dans le secteur du bâtiment feront passer la consommation finale d'électricité dans une Suisse nette zéro de 50-60 TWh/a aujourd'hui à 70-80 TWh/a.

Ces scénarios sont-ils robustes ? Ou le net zéro ne fonctionne-t-il que lorsqu'il fait beau ?

La dépendance de la Suisse vis-à-vis des importations d'énergie diminuera considérablement. Néanmoins, la Suisse n'est pas non plus une île dans les scénarios CROSS. Un commerce de l'électricité fonctionnel et la possibilité d'introduire des sources d'énergie telles que le méthane, l'hydrogène, le diesel et le kérosène – fossiles, biogènes ou synthétiques – sont encore prévues. Une objection justifiée est la suivante : que se passe-t-il si de telles importations ne sont pas possibles certaines années ? Quand il y a un marasme noir dans toute l'Europe ? Quand les importations de gaz ou de pétrole s'arrêtent en raison de crises internationales ou de guerres ? Ce n'est pas nécessairement la probabilité que de tels événements se produisent qui est déterminante, mais plutôt les effets potentiellement dramatiques et les mesures prises pour s'y préparer de manière proactive.

Les modèles de systèmes énergétiques, tels que ceux utilisés dans CROSS, peuvent aider à répondre à ces questions. Les résultats suivants ont été obtenus à l'aide du modèle suisse Energyscope de l'EPFZ[10]. Au lieu d'optimiser le système énergétique uniquement pour une certaine année future, au cours de laquelle, par exemple, les importations d'électricité sont possibles ou limitées, un système est conçu pour plusieurs années en parallèle. Ainsi, le système optimal est celui qui fait le mieux face à de multiples situations possibles.

Dans ce cas, trois années futures différentes – ou scénarios – ont été définies (voir Fig. 4) :

A Toutes les importations d'énergie sont disponibles sans restrictions. Il s'agit d'un scénario souhaitable et, avec la conclusion d'un accord sur l'électricité, également réaliste.

B De novembre à février, aucune importation ou exportation d'électricité n'est possible. Cela suppose un marasme sombre extrême, c'est-à-dire la crainte que nos voisins aient besoin de leur propre électricité en hiver.

C Tous les échanges d'énergie (à l'exception du kérosène) sont interrompus tout au long de l'année. Une telle situation ne se produirait que dans une situation de crise extrême, telle qu'une guerre prolongée en Europe.

En optimisation, chaque scénario est pondéré en fonction de la probabilité d'occurrence : si l'on suppose 10 années futures, 7 ans correspondraient au scénario A, 2 ans au scénario B et un an au scénario de crise extrême C. L'ordre dans lequel ces années alternent n'a pas d'importance pour la modélisation. Il convient de souligner clairement qu'il s'agit d'un tableau extrêmement sombre de l'avenir. Néanmoins, ces considérations sont importantes car elles répondent aux préoccupations de la population et des politiciens. Dans les deux sections suivantes, les résultats sont examinés en détail : d'abord pour le photovoltaïque en été, puis pour l'approvisionnement en électricité en hiver.

Comment le photovoltaïque s'intègre dans le système énergétique

La transition d'une production d'électricité prévisible basée sur l'énergie nucléaire et hydro-électrique à un mélange d'hydroélectricité, de photovoltaïque et d'éolien est un défi. Mais la solution réside aussi dans le paquet global avec l'électrification de la chaleur et des transports.

[10] https://sweet-cross.ch/catalog/model/seseth

La figure 5 montre la production et la consommation d'électricité un jour d'été au cours des trois années 2050, c'est-à-dire de (A) l'échange d'énergie gratuite à (C) l'isolement (voir Fig. 4 et la section précédente). Deux variantes ont été envisagées, qui diffèrent en termes de volonté d'utiliser de nouvelles technologies. Dans la variante « innovante », on suppose une expansion accrue de l'énergie hydraulique, éolienne, photovoltaïque alpine et géothermique, ainsi qu'une efficacité accrue dans le secteur du bâtiment, une utilisation plus intensive de la biomasse pour produire du biogaz ou du biodiesel et la disponibilité de stockages de chaleur saisonniers. Dans la variante « conservatrice », ces technologies ne sont pas disponibles. On peut voir pour tous les scénarios que la production cumulée d'électricité renouvelable à partir de l'énergie hydraulique et photovoltaïque, etc., dépasse largement la consommation de base pour l'éclairage, les moteurs, l'informatique, etc. (vert). Cependant, cela est compensé par diverses mesures :

(1) La puissance de crête est réduite. Dans le cas innovant de la figure 5, la capacité installée en courant continu est de 30 GW. La puissance de crête AC réelle générée n'est que de 20 GW (cela est principalement dû au fait que les onduleurs sont généralement sous-dimensionnés – pertes par écrêtage). Sur ce total, 10-15 % de la production est délibérément réduite, ce qui signifie que seulement 1 à 2 % du rendement énergétique est perdu. Cette mesure réduit considérablement la charge sur les réseaux de distribution. Une telle réduction est le résultat d'une optimisation économique. Il serait plus coûteux de vouloir utiliser chaque GWh d'électricité photovoltaïque produit, car les appareils nécessaires, par exemple les systèmes de stockage, et les réseaux devraient être plus grands en conséquence et ils ne pourraient utiliser cette taille que pendant quelques heures en été.

(2) Les centrales à accumulation s'arrêtent pendant la journée et produisent principalement la nuit. Bien entendu, cela ne peut se faire que dans le cadre des exigences de la protection de l'eau. Une mesure supplémentaire possible est les bassins de stockage, quipeuvent garantir un débit d'eau même pendant la journée. Les grandes batteries sur le site des centrales hydroélectriques peuvent également y contribuer.

(3) Les véhicules électriques ont tendance à être chargés pendant la journée, de préférence entre 6 h et 18 h.

(4) La chaleur industrielle, le chauffage des locaux et l'eau chaude sont de plus en plus générés pendant la journée ; les systèmes de stockage de chaleur permettent d'utiliser la chaleur tout au long de la journée.

(5) Les systèmes de stockage d'électricité (batteries, centrales de pompage-turbinage) sont chargés à midi et déchargés la nuit. Les batteries placées à proximité de la production en particulier peuvent contribuer de manière significative à l'allègement du réseau – et deviennent de moins en moins chères en raison des progrès rapides.

(6) De plus, l'électricité est importée et exportée tout au long de la journée. Étant donné que le prix de gros (tiré par l'énergie solaire) aura tendance à être plus bas pendant la journée que la nuit, l'électricité moins chère sera importée pendant la journée (surtout le matin et l'après-midi). D'autre part, les exportations se font à nouveau la nuit, lorsque l'électricité est précieuse, principalement en démarrant les centrales à accumulation pilotables et en déchargeant les installations de stockage d'électricité.

Les scénarios d'échange d'électricité limité (B à C) ne sont pas très différents de ceux d'échange d'électricité libre (A) en ces jours d'été. La variante « conservatrice » montre que la

consommation d'électricité pour l'électrolyse (power-to-H2) augmente afin d'augmenter l'isolation. Cependant, cela ne suit pas la production photovoltaïque. Au contraire, l'équilibrage s'effectue via des systèmes de stockage d'électricité, ce qui permet un fonctionnement constant de l'électrolyse à charge constante. Il convient de noter à nouveau que les éventuels problèmes au niveau du réseau de distribution ne sont pas examinés en détail par les modèles considérés ici.

Une autre limite des résultats du modèle doit être mentionnée : en 2050, tous les éléments du système énergétique mentionnés précédemment seront coordonnés. Cependant, ceux-ci se développeront à des vitesses différentes au cours de la phase de transition. Si, par exemple, le photovoltaïque se développe plus rapidement que la flexibilité offerte par les véhicules à batterie, les pompes à chaleur et les systèmes de stockage d'électricité, il peut y avoir une offre excédentaire, entraînant des prix négatifs et/ou une réduction accrue.

Cependant, cela nécessite des ajustements tels que l'accès général à des tarifs d'électricité dynamiques et des instruments de planification appropriés pour intégrer la flexibilité du côté de la demande.

Conclusion 4 Dans l'ensemble, le cas d'une journée d'été typique montre qu'une interaction coordonnée de tous les composants du système énergétique permet d'utiliser judicieusement la production photovoltaïque. Le PV, l'hydraulique, l'électromobilité, les pompes à chaleur, les systèmes de stockage et le négoce d'électricité constituent la « dream team » de la future Suisse net zéro.

Et ainsi, nous avons à tout moment suffisamment d'électricité à disposition en hiver

La figure 3 (ci-dessus) montre que dans les scénarios de net zéro optimaux en termes de coûts, la production d'énergie photovoltaïque, éolienne et hydroélectrique ne couvre pas à elle seule la demande d'électricité. Ce déficit affecte principalement le semestre d'hiver. L'électricité nécessaire est fournie par les importations et les centrales thermiques. Ces derniers se déclinent en différentes variantes, qui fonctionnent soit au gaz naturel, soit au biométhane, soit à l'hydrogène. Ces sources d'énergie sont importées ou produites en partie en Suisse. Ces centrales thermiques ont tendance à atteindre plusieurs milliers d'heures de fonctionnement pendant les mois d'hiver ; Il ne s'agit donc pas de pures solutions de secours en cas d'urgence.

Il ne s'agit pas d'un défaut de conception, mais d'une solution optimale en termes de coûts. En 2050, la Suisse pourrait également s'approvisionner entièrement en électricité dans le bilan annuel, mais cela serait plus coûteux et pas nécessairement plus sûr. La figure 1 (au centre) montre qu'au cours de 8 des 23 dernières années, il y a eu un excédent effectif d'importations, c'est-à-dire qu'au cours de ces années, il y a eu plus d'importations que d'exportations. À son apogée, l'excédent des importations a atteint 6,3 TWh en 2005 et 6,0 TWh en 2017. Dans ce dernier cas, 11 TWh ont été importés et 5 exportés sur l'année (cela n'inclut pas le transit d'électricité pure). En fait, la majorité des importations ont eu lieu au cours du semestre d'hiver, tandis que les exportations ont eu lieu en été. Les importations nettes indiquées à la figure 3 (ci-dessus) pour les scénarios futurs s'élèvent en moyenne à 5 à 10 TWh/a, ce qui se situe dans une fourchette similaire.

La figure 5 montre des journées d'hiver typiques, toujours pour les variantes « innovantes » et « conservatrices ». Les années où le commerce de l'électricité est possible sans restriction (A),

il se déroule de la même manière qu'en été. Les importations se font pendant la journée, les exportations ont tendance à se faire la nuit. L'hydroélectricité présente également le cycle jour-nuit typique. La différence visible réside dans la production photovoltaïque nettement plus faible, c'est pourquoi le stockage de l'électricité ne joue guère de rôle. Les années où le commerce de l'électricité est restreint et finalement empêché ainsi que d'autres importations (B to C), la production de centrales thermiques augmente. La dynamique été/hiver de la production et de la consommation d'électricité peut également être visualisée à l'aide de diagrammes en cascade. La figure 6 le montre pour l'été et l'hiver, pour les trois scénarios (A à C) et les deux variantes « innovante » et « conservatrice ».

Une comparaison du bilan hivernal des années avec des échanges d'électricité sans restriction (A) entre les variantes « conservatrice » et « innovante » montre que dans le premier cas, les importations nettes en hiver s'élèvent à environ 10 TWh ①. Cette valeur tombe à 5 TWh pour la variante « innovante » ②. Les importations peuvent donc être considérablement réduites par des décisions qui sont en notre pouvoir. Il s'agit notamment de l'expansion de l'énergie hydraulique, de la construction de barrages, de l'énergie photovoltaïque et éolienne alpine, mais aussi d'innovations dans le domaine de l'approvisionnement en chaleur, par exemple de grands systèmes de stockage thermique à long terme et des pompes à chaleur à faible course avec des champs de sondes géothermiques régénérés.

Mais comment le futur système énergétique s'en sortira-t-il les années où les importations d'électricité en hiver (B), ou même toutes les importations d'énergie à l'exception du kérosène (C) sont interrompues ? La réponse se retrouve dans la figure 6 : Si les importations d'électricité sont arrêtées pendant les mois de novembre à février (B), la production de centrales thermiques, ou plus précisément de centrales de cogénération industrielles qui fournissent à la fois de l'électricité et de la chaleur, augmente ③. Dans le même temps, la consommation des systèmes de chauffage électrique industriels ④ diminue, car la demande de chaleur industrielle est désormais fournie par les centrales de cogénération. Ce changement se poursuit jusqu'aux années où le commerce de l'énergie est complètement interrompu (C). Ces centrales de cogénération fonctionnent avec des sources d'énergie liquide (de préférence biogènes ou synthétiques), car ce sont les seules qui peuvent être stockées à moindre coût pendant des années. Une étude récente de l'ETH Zurich et de la ZHAW arrive à une conclusion très similaire[11].

Conclusion 5 Les résultats de notre modèle montrent les principales caractéristiques d'un système énergétique qui nous permettra d'atteindre nos objectifs climatiques tout en étant suffisamment robustes pour faire face à divers scénarios de crise. Outre l'expansion de l'énergie photovoltaïque et éolienne, l'électrification de l'approvisionnement en chaleur et du transport routier et d'autres innovations telles que l'énergie géothermique ou l'augmentation de la production de biogaz, le libre-échange de l'énergie (électricité, sources d'énergie gazeuses et liquides) est d'une importance cruciale. La sécurité d'approvisionnement, même en situation de crise, est assurée par des centrales thermiques qui fonctionnent en cas d'urgence avec des sources d'énergie liquide provenant des réserves d'énergie stratégiques.

[11] https://www.econstor.eu/handle/10419/306555

Illustrations

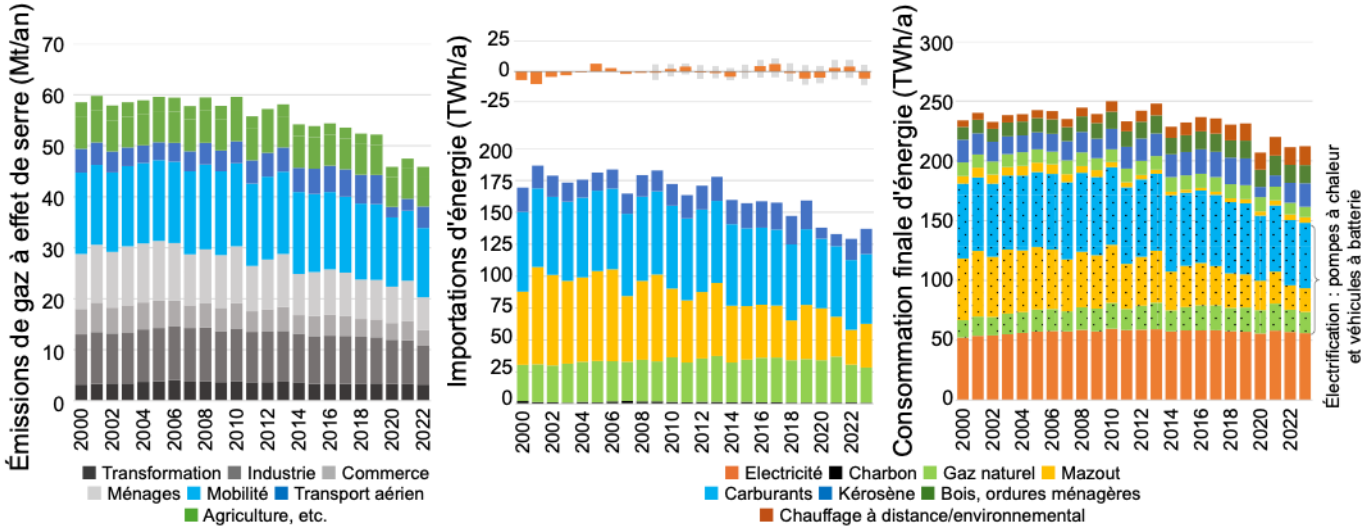

Fig. 1 Émissions historiques de gaz à effet de serre (à gauche), importations d'énergie (au milieu), consommation finale d'énergie (à droite) de la Suisse

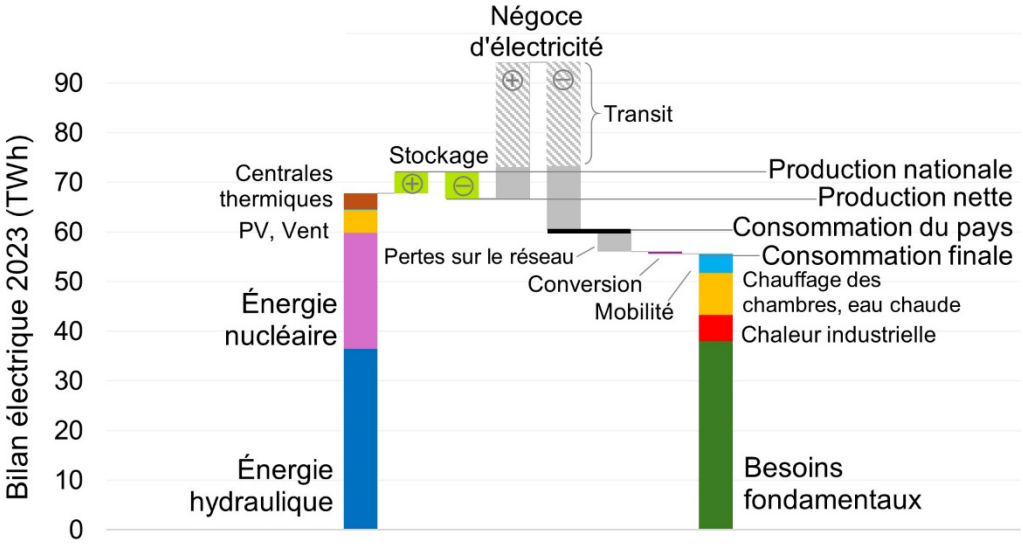

Fig. 2 Bilan électrique 2023 ; Définition des variables importantes

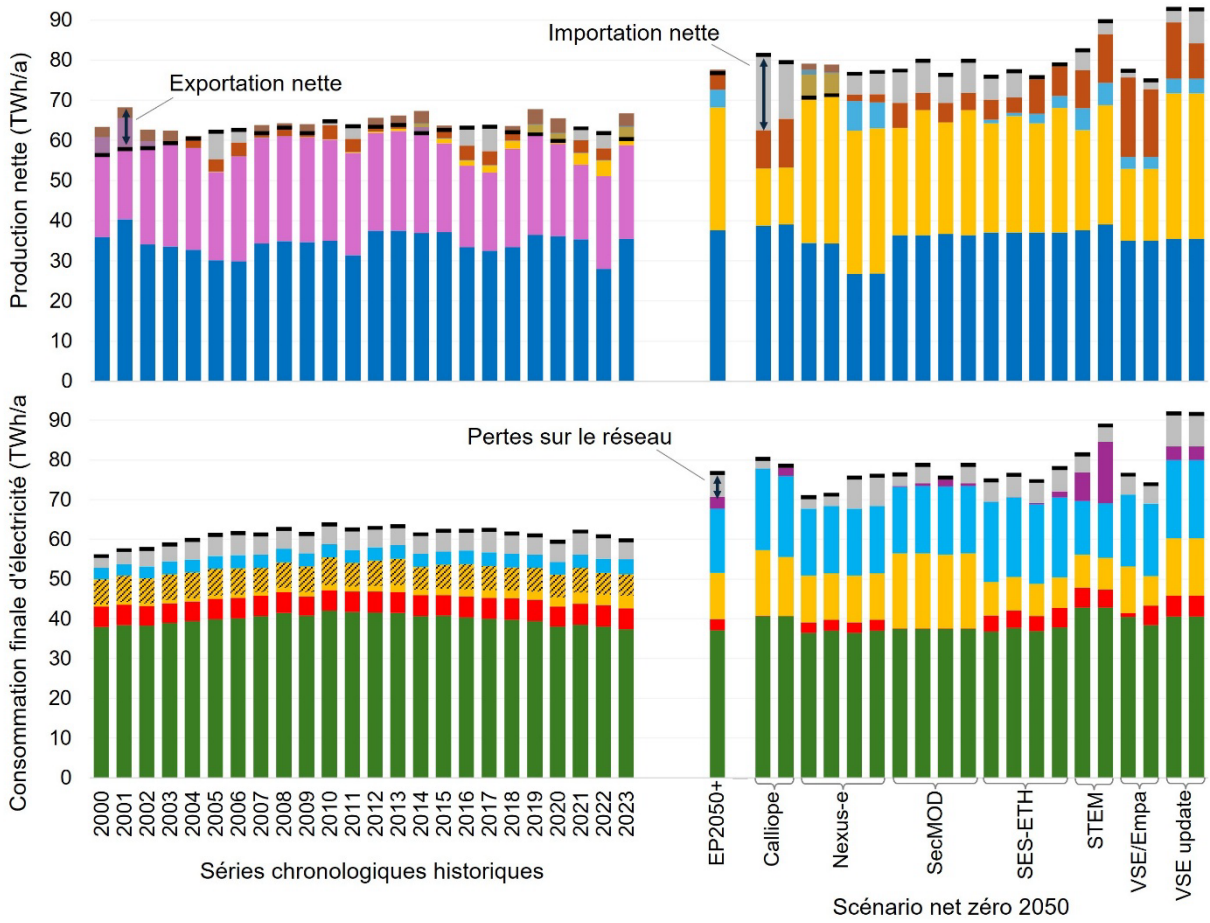

Fig. 3 Production nette et consommation finale d'électricité historiquement et en 2050. Les équipes de recherche impliquées proviennent de l'Université technique de Delft (Calliope[12]), ETH (Nexus-e[13], SES-ETH[14], SecMOD[15]), de PSI (STEM[16]), de l'Empa (ehub-x[17]) et la VSE[18]; Production: ■ Énergie hydraulique, ■ Énergie nucléaire, ■ Photovoltaïque, ■ Vent, ■ Centrales thermiques, ■ le négoce d'électricité; Consommation: ■ Pertes sur le réseau, ■ Conversion, ■ Mobilité, ■ Chauffage des chambres, eau chaude, ■ Chaleur industrielle, ■ Besoins fondamentaux

[12] https://sweet-cross.ch/catalog/model/callliope
[13] https://sweet-cross.ch/catalog/model/nexuse
[14] https://sweet-cross.ch/catalog/model/seseth
[15] https://sweet-cross.ch/catalog/model/secmod
[16] https://sweet-cross.ch/catalog/model/stem
[17] https://sweet-cross.ch/catalog/model/ehub
[18] https://www.strom.ch/de/energiezukunft-2050/startseite

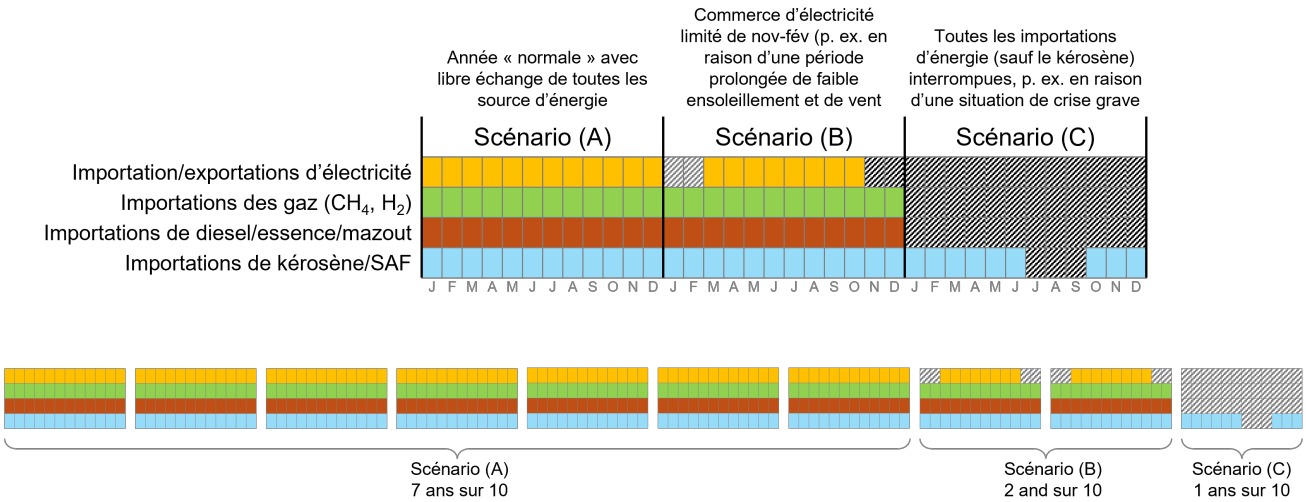

Fig. 4 Définition de scénarios pour une optimisation robuste

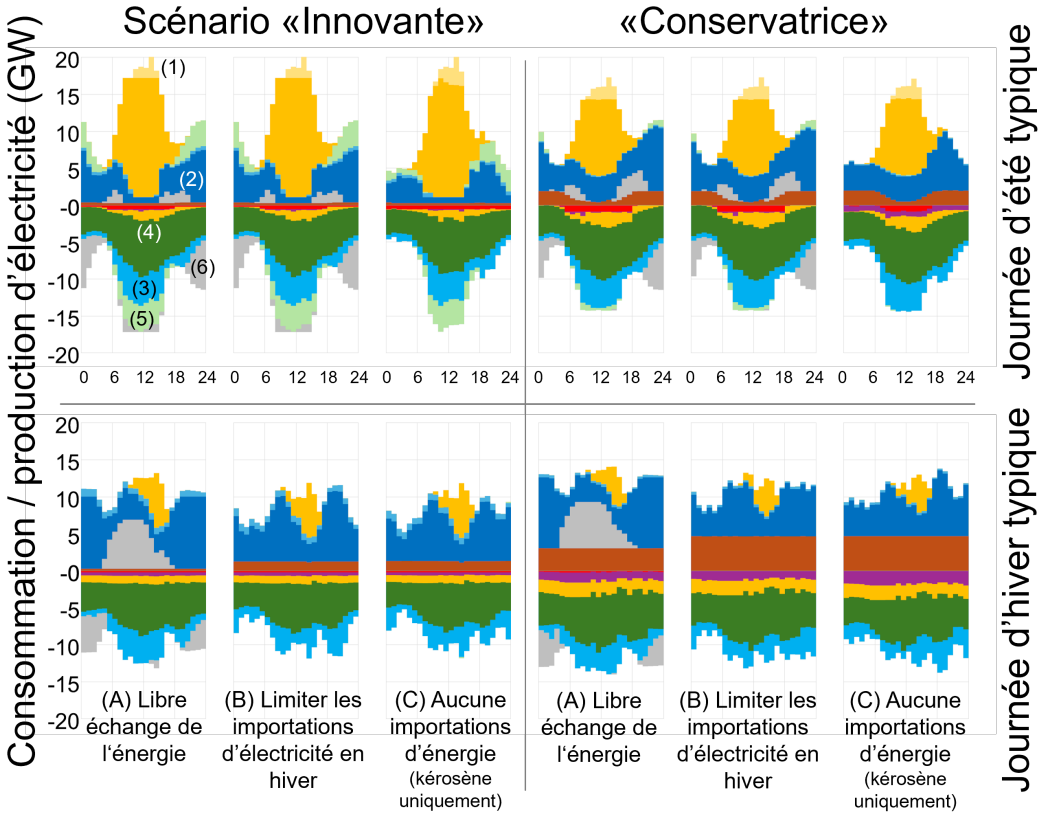

Fig. 5 Production et consommation horaires d'électricité ; Photovoltaïque, Eolien, Stockage, Énergie hydraulique, Négoce électrique, Centrales thermiques, Chaleur industrielle, Conversion, Chauffage des pièces, etc., Besoins de base/pertes sur le réseau, Mobilité

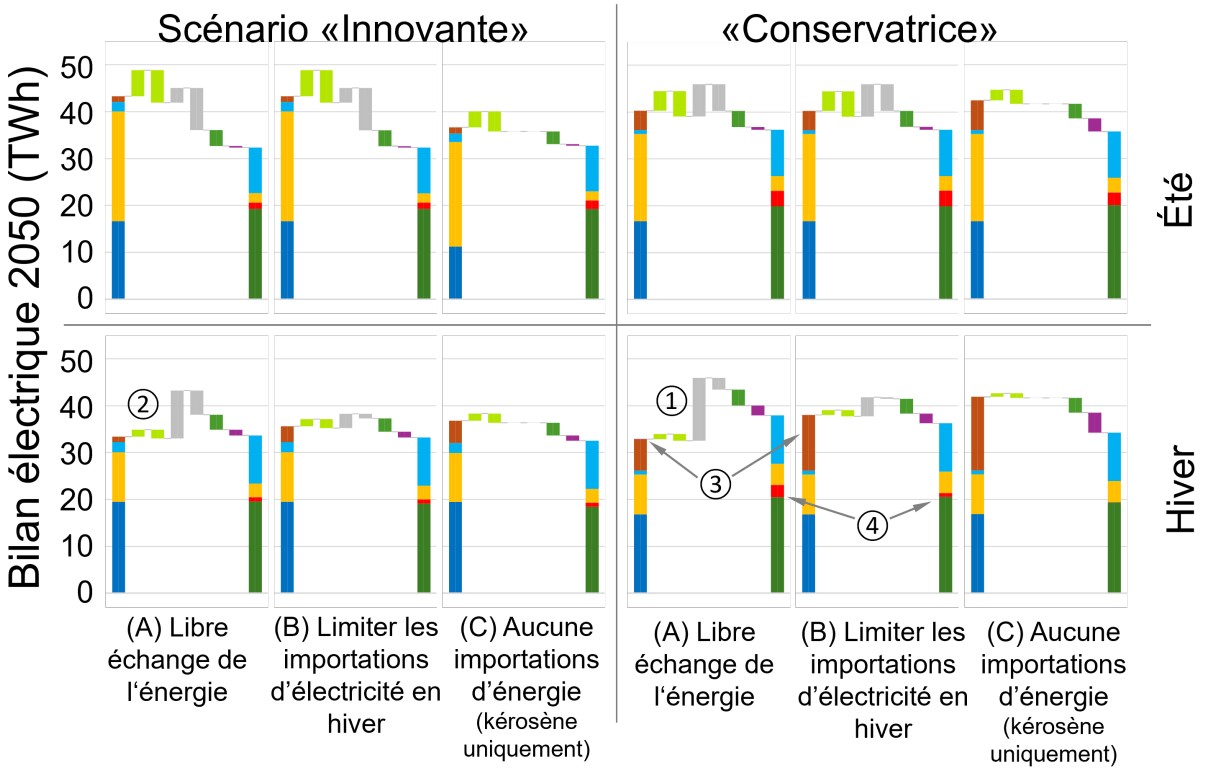

Fig. 6 Bilans d'électricité pour l'hiver et l'été ; Photovoltaïque, Eolien, Stockage, Énergie hydraulique, Négoce électrique, Centrales thermiques, Chaleur industrielle, Conversion, Chauffage des pièces, etc., Besoins de base/pertes sur le réseau, Mobilité

aeesuisse

Organisation faîtière de l'économie des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique

Prof. Dr. Luca Baldini
Porte-parole du conseil scientifique de l'Institut aeesuisse for Building Technology and Process IBP an der ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Prof. Dr. Christophe Ballif
Directeur PV-Lab@EPFL et Sustainable Energy Center@CSEM

Prof. Dr. Massimiliano Capezzali
directeur de l'Institut des Energies de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD)

Dr. Gianfranco Guidate

Directeur adjoint du Centre des sciences de l'énergie de l'ETH Zurich

Prof. Dr. Andreas Häberle, directeur
de l'Institut de technologie solaire SPF, chef du département des énergies renouvelables et de la technologie environnementale de l'UEE à l'OST – Haute école spécialisée de Suisse orientale

Prof. Dr. Martin Patel
Professeur à la Chaire d'efficacité énergétique de l'Université de Genève

Prof. Dr. Greta Patzke
Professeure au Département de chimie de l'Université de Zurich

Dr. François Vuille
Directeur de l'énergie du Canton de Vaud et ancien Executive Director du Energy Center de l' EPFL

Le conseil scientifique d'aeesuisse

Le Conseil scientifique agit comme Think Tank et comme un groupe de réflexion sur le travail politique et de fond d'aeesuisse dans tous les domaines de la politique énergétique et climatique. Des universitaires de renom sont engagés dans le comité consultatif. Ils disposent d'une réputation internationale et d'un réseau national et international.Le Conseil scientifique a trois tâches principales :

- Expertise : Le conseil scientifique réfléchit aux développements actuels et apporte sa contribution à l'élaboration et à la clarification des positions et des contenus.
- Communication : Il participe activement à la formation de l'opinion publique et politique sous la forme d'articles spécialisés, d'apparitions lors d'événements et de contacts avec des politiciens et des autorités.
- Réseau : Il entretient et élargit son réseau et soutient ainsi le positionnement positif d'aeesuisse dans l'économie, la science et la société.