

The background features a network of white lines and dots on a blue-to-orange gradient. The lines represent connections between nodes, with some nodes highlighted by small white circles. The overall aesthetic is clean and technical, suggesting a focus on energy systems and infrastructure.

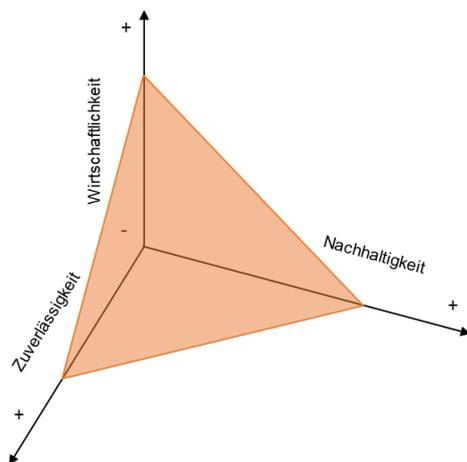
SPOTLIGHT
MODÈLE DE SYSTÈME
ÉNERGÉTIQUE
INTÉGRAL

Matthias Sulzer, Martin Rüdisüli, Robin Mutschler,
Christian Opitz
13 décembre 2022

2050
Avenir énergétique

Analyse d'ensemble du système énergétique

Une analyse d'ensemble se révèle indispensable afin de pouvoir évaluer les perspectives de développement du système énergétique actuel en un système rentable, durable et fiable. Jusqu'à présent, les différents secteurs, notamment l'énergie (électricité, chaleur), la mobilité et l'industrie, sont peu interconnectés. L'électrification de la chaleur (pompes à chaleur) et de la mobilité (véhicules électriques) se traduit par un abandon des agents énergétiques fossiles et par un renforcement du couplage sectoriel, lequel ouvre un espace de solutions en expansion rapide. Il est alors primordial de se baser sur certains critères afin de s'y retrouver. Ces dernières années, trois critères d'évaluation se sont imposés: (i) la fiabilité, (ii) la rentabilité et (iii) la durabilité du système énergétique, comme le montre la figure ci-dessous. Il s'agit de maximiser ces trois critères pour obtenir la meilleure solution pour le système énergétique suisse. Comme souvent, ces critères sont interdépendants. Il en résulte un trilemme: ainsi, lorsque la durabilité est améliorée, la rentabilité se dégrade, et inversement. Il convient donc de peser les intérêts entre les trois critères.



Le choix et l'utilisation des technologies disponibles débouchent sur des combinaisons presque infinies susceptibles de constituer le système énergétique. Afin de prendre des décisions éclairées et optimisées, on élabore aujourd'hui des modèles mathématiques à partir de ces questions extrêmement complexes: cette approche permet de trouver systématiquement la solution optimale dans un espace de solutions quasi infini.

Le modèle de l'AES: simulation de l'avenir énergétique

En collaboration avec l'Empa, l'AES a élaboré un modèle pour le système énergétique suisse qui tient compte de l'infrastructure énergétique des pays voisins. Un modèle est une représentation abstraite de la réalité. Le défi consiste à choisir l'abstraction adéquate des différentes composantes du système, qui illustre suffisamment la réalité sans pour autant accroître inutilement la complexité du modèle. La modélisation passe par les quatre étapes suivantes:

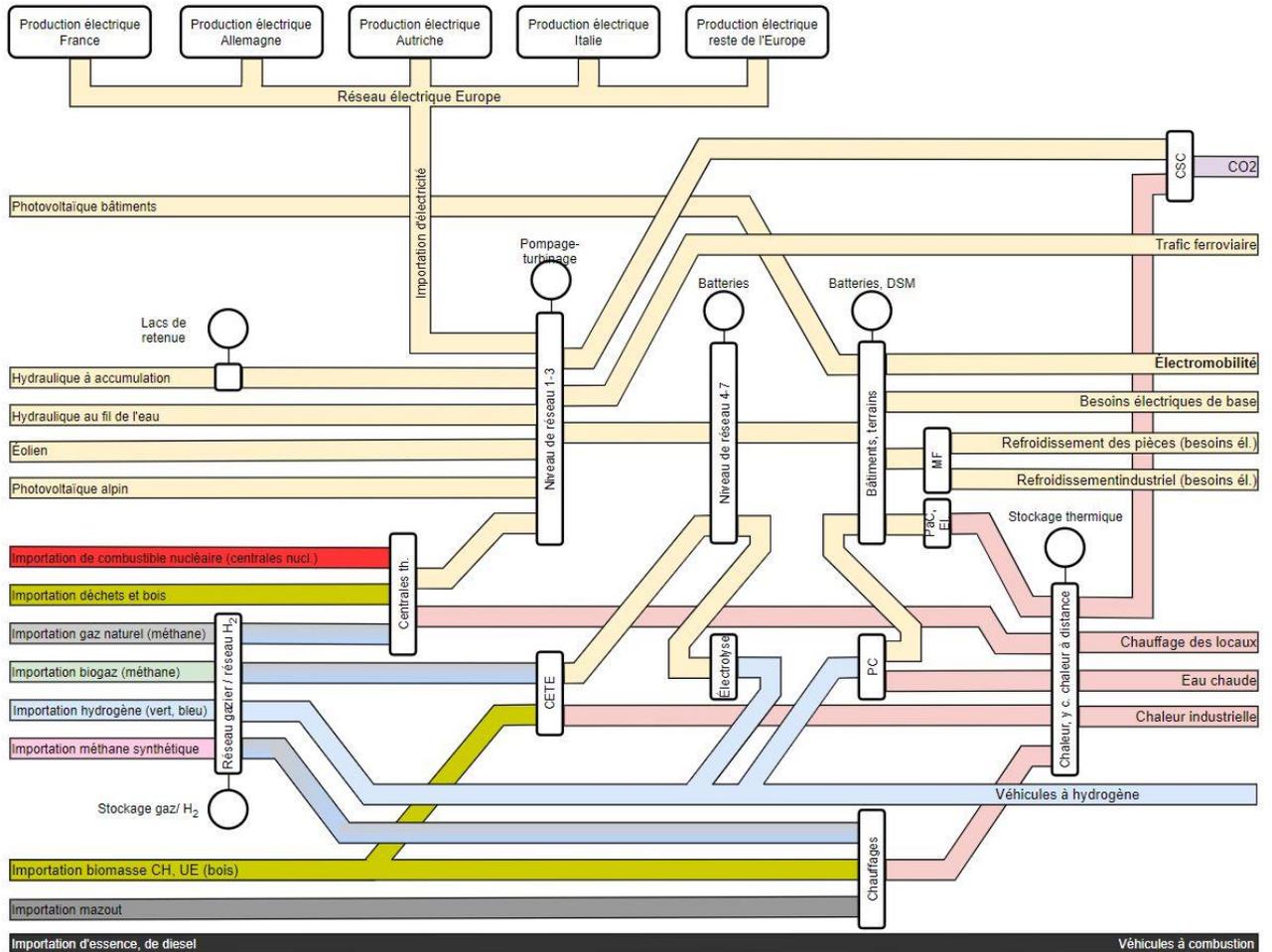
1. Abstraction de la réalité dans les composantes du modèle

2. Paramétrage des composantes du modèle
3. Élaboration du modèle de système à partir des composantes du modèle avec des contraintes exogènes prédéfinies
4. Résolution du modèle, c'est-à-dire identification des solutions optimales

Les étapes 1 et 2, en particulier, ont été mises en œuvre dans le cadre du projet de l'AES, en étroite collaboration avec des expertes et experts de la branche. Les aspects suivants sont représentés dans le modèle de l'AES:

- Besoins en énergie pour les secteurs du bâtiment, de la mobilité, des services et de l'industrie, répartis entre les différents agents énergétiques: électricité, chaleur (chauffage et refroidissement), combustibles et carburants (liquides et gazeux)
- Ressources énergétiques provenant de sources indigènes telles que l'eau, l'énergie éolienne, le solaire, la biomasse, la chaleur ambiante et la géothermie
- Importations d'énergie telles que les produits pétroliers, l'électricité, la biomasse et l'hydrogène
- Technologies de conversion telles que les turbines, les pompes à chaleur, les machines frigorifiques, le photovoltaïque, l'électrolyse, les brûleurs, etc.
- Technologies de stockage telles que batteries fixes, véhicules électriques («*vehicle-to-grid*»), accumulateurs de chaleur, accumulateurs de gaz
- Technologies de réseau telles que le réseau électrique, le réseau gazier et le réseau de chaleur
- *Demand side management* (DSM)

La figure suivante illustre la structure schématique du système énergétique modélisé.

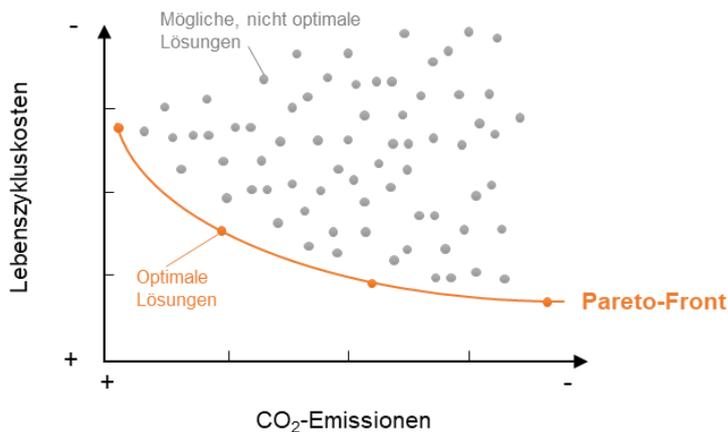


Le modèle de système énergétique de l'AES a été intégralement construit sur une résolution temporelle d'une heure, ce qui permet de calculer des indications sur les flux d'énergie en fonction des heures et d'analyser les pics de charge, les besoins de capacités et les effets dynamiques.

Les solutions possibles doivent remplir une condition fondamentale: équilibrer chaque bilan énergétique à toute heure. Le critère de fiabilité est ainsi respecté à 100%, quelle que soit la solution choisie, et ne peut donc pas être mis en balance par rapport aux critères de rentabilité ou de durabilité. Cette condition est notamment impérative dans un système électrique afin de garantir la sécurité d'approvisionnement.

En revanche, les critères de rentabilité et de durabilité peuvent être mis en balance. Certaines solutions se distinguent par leur rentabilité élevée, d'autres par leur durabilité élevée. Le modèle de l'AES évalue la rentabilité sur la base des coûts de système liés au cycle de vie d'une technologie (LCC), et la durabilité sur la base des émissions indigènes directes de CO₂ (conformément à l'Accord de Paris). L'optimisation vise des coûts de système minimaux pour des émissions de CO₂ minimales. Une fois toutes ces solutions

optimales trouvées, se dessine un front de Pareto (*Pareto front*). Celui-ci permet de sélectionner les solutions qui respectent soit les coûts de système souhaités, soit les émissions de CO₂, comme le montre la figure ci-dessous.



Le calcul de l'incidence des coûts de système et des émissions de CO₂ implique d'avoir spécifié les différentes composantes dans le modèle. Les paramètres suivants ont été pris en compte:

- Technologies
 - Investissement linéaire annualisé sur la durée de vie (CAPEX)
 - Coûts d'exploitation, y compris énergie, entretien et réparation (OPEX)
 - Efficacité de conversion des agents énergétiques utilisés
 - Pertes de stockage (lorsque l'énergie est stockée)
 - Pertes de réseau (lorsque l'énergie est transportée)
- Importations d'énergie
 - Prix de l'importation d'électricité, en fonction des technologies utilisées par les pays de l'UE
 - Prix du marché et intensité en CO₂ des produits pétroliers
 - Capacités transfrontalières d'électricité à destination et en provenance des pays voisins (NTC)
 - Capacités d'importation de gaz (méthane, hydrogène)
 - Capacités d'importation de biomasse

Les algorithmes explorent tout l'espace de solutions. Ils combinent, dimensionnent et simulent toutes sortes de possibilités, jusqu'à ce que des solutions permettent de réduire les coûts de système et les émissions de CO₂ au minimum. Dans les scénarios de l'AES, la solution a été choisie, sur le front de Pareto, sur la base d'un prix du CO₂ prédéfini et de la combinaison de technologies qui en résulte et qui présente des coûts de système minimaux.

Le modèle de l'AES a été paramétré sur la base de scénarios et d'années considérées choisis. Les 13 modèles suivants ont été créés et répartis en fonction des coûts de système minimaux pour un prix du CO₂ donné:

- 4 scénarios
 - «offensif-intégrée»
 - «offensif-isolée»
 - «défensif-intégrée»
 - «défensif-isolée»
- Années d'évaluation
 - Année de référence (statut calibré du système énergétique aujourd'hui)
 - 2030, 4 scénarios
 - 2040, 4 scénarios
 - 2050, 4 scénarios

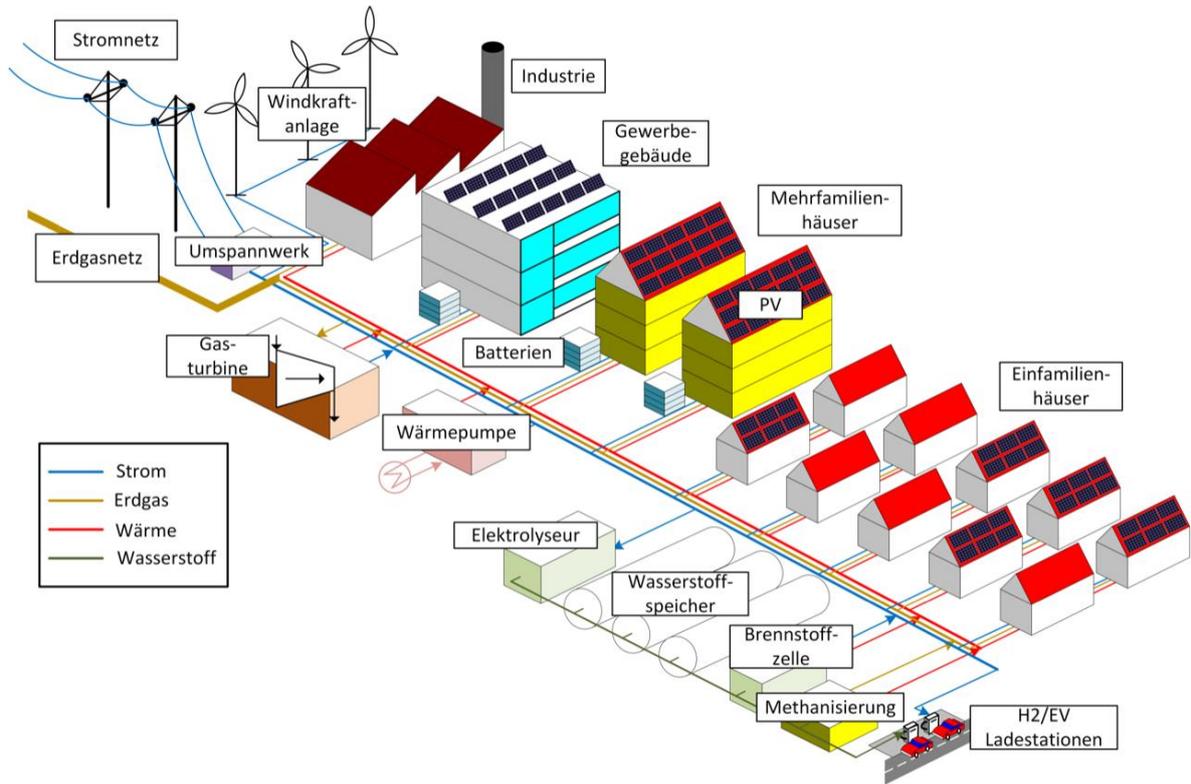
La recherche des solutions optimales s'effectue exclusivement au moyen de calculs basés sur le paramétrage des différents scénarios et années considérées. Le développement et le recours à certaines technologies ainsi que leur utilisation sont choisis sur la base des coûts, de l'efficacité et des émissions de CO₂ avec pour objectif d'afficher des coûts de système minimaux et des émissions de CO₂ minimales (avec le prix du CO₂ fixé dans le modèle de l'AES).

Le choix, le dimensionnement et la mise en œuvre des technologies s'effectuent de manière technologiquement neutre en fonction de paramètres fixés, tels que les coûts de capitaux (CAPEX), les coûts d'exploitation (OPEX), les degrés d'efficacité et les capacités de stockage.

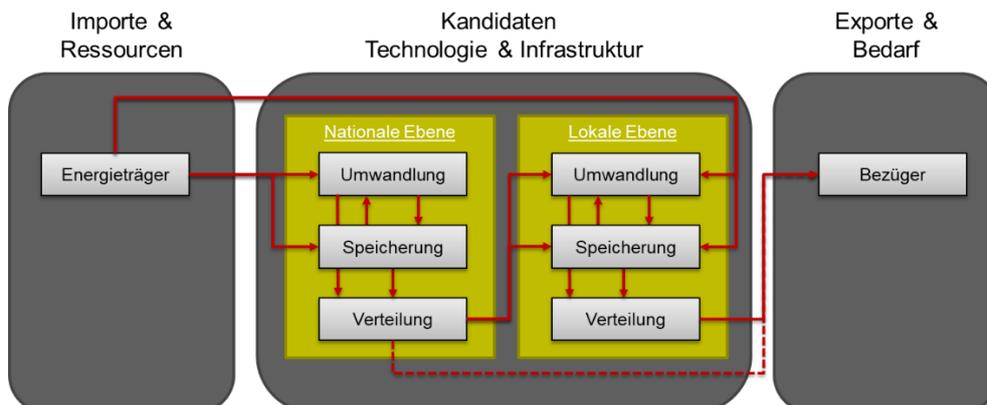
Dans le calcul ex post, les solutions qui n'atteignent pas l'objectif zéro émission nette sont complétées par des technologies à émissions négatives supplémentaires, telles que le captage et le stockage du carbone (CCS). En conséquence, tous les scénarios atteignent l'objectif stratégique de zéro émission nette fixé par le PE 2050+, mais avec des mix technologiques et des coûts de système différents.

Modèle d'optimisation suisse

Le modèle énergétique prend en compte la diversité des consommateurs d'énergie, des technologies de production et de stockage, ainsi que des réseaux énergétiques. Le niveau local peut être représenté de la manière suivante:



Dans une représentation abstraite, n'importe quelle technologie peut être classée comme conversion, stockage ou distribution et prise en compte dans un modèle mathématique (modèle de l'*energy hub*). De plus, les grandes technologies telles que l'hydraulique, les centrales nucléaires, les éoliennes, etc., peuvent aussi être intégrées au niveau national. Dans le modèle de l'AES, plus de 120 technologies ont été prises en compte:



Modèle d'optimisation européen

L'optimisation de l'utilisation des technologies de production d'énergie et de stockage flexibles au niveau européen est réalisée selon une approche en deux étapes. Tout d'abord, un modèle simplifié est utilisé pour planifier l'utilisation sur une base horaire pour l'ensemble de l'année, en négligeant certaines restrictions telles que les durées minimales de fonctionnement et d'arrêt du dispatch. On a ensuite déterminé pour chaque semaine les prélèvements possibles dans les réservoirs hydroélectriques flexibles (réservoirs, centrales de pompage-turbinage). Dans un deuxième temps, un modèle affiné, mais plus complexe à calculer, a permis d'optimiser à nouveau pour chaque semaine (168 heures) l'utilisation de toutes les centrales et de tous les réservoirs en fonction des coûts marginaux en tenant compte de toutes les restrictions d'exploitation ainsi que de l'utilisation autorisée des réservoirs hydroélectriques déterminée précédemment.

Enfin, les coûts horaires, l'utilisation de l'énergie nucléaire et des centrales thermiques en France et en Allemagne, ainsi que les importations et les exportations des pays voisins de la Suisse et du reste de l'Europe ont été intégrés comme donnée fixe dans le modèle suisse (modèle de système énergétique de l'AES). Sur la base de ces entrées, l'échange d'électricité (importation/exportation) de la Suisse avec ses zones-bilan directement voisines est calculé lors d'une étape ultérieure avec le modèle suisse, y compris un module simplifié pour l'utilisation optimale en termes de coûts (dispatch) des centrales hydrauliques, à gaz, à charbon et à pétrole flexibles chez les pays voisins, simultanément avec la modélisation du système énergétique suisse (y compris gaz, chaleur, mobilité, etc.).

Citation

Sulzer, M., Rüdüsüli, M., Mutschler, R., & et al. (13.12.2022): Spotlight Modèle de système énergétique intégral.

Dans: Association des entreprises électriques suisses AES (13.12.2022): «*Avenir énergétique 2050*». Scénarios pour l'avenir énergétique et climatique. URL: www.avenirenergetique2050.ch.