

Boussole de l'énergie PSI

Naviguer dans
la transition énergétique
#1 / 2025

Prendre le virage

Une analyse de l'avenir du transport de passagers en Suisse – comment atteindre le zéro-net de gaz à effet de serre dans la mobilité individuelle.



6
Passer à la vitesse supérieure: la transition vers la mobilité électrique

10
Batteries électriques, hydrogène ou carburants synthétiques?

16
«Notre souhait serait une population plus multimodale.»
Entretien avec Regina Witter et Peter Schmid

Editorial

Comme de nombreux pays dans le monde, la Suisse cherche à réduire à zéro ses émissions de gaz à effet de serre d'ici le milieu du siècle. Cet objectif a des implications considérables pour le secteur des transports, mais aussi pour l'ensemble du système énergétique. Ceci motive une grande partie de nos recherches au Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques (LEA) du PSI. Nous lançons aujourd'hui *La boussole de l'énergie du PSI* afin de fournir un contexte et une analyse qui permettent de comprendre la transition énergétique.

La transition énergétique touche de nombreux aspects du quotidien: de la façon dont nous approvisionnons nos logements et nos industries, à la manière dont nous nous déplaçons, dont nous produisons des marchandises et dont nous aménageons nos villes. Dans *La boussole de l'énergie du PSI*, nous nous pencherons sur un sujet différent dans chaque numéro, en fournissant une analyse scientifique centrée sur la Suisse et applicable à de nombreux pays. Notre objectif est de fournir aux lecteurs les connaissances nécessaires pour prendre des décisions éclairées en matière de transition énergétique.

Ce premier numéro traite du transport terrestre de passagers. Le transport de passagers est une des sources majeures d'émissions de gaz à effet de serre en Suisse, et la demande de mobilité continuera de croître avec la population. Pour atteindre l'objectif de zéro émission nette, des changements majeurs sont nécessaires dans ce secteur. Au fil des pages suivantes, nous allons nous pencher sur nos travaux de recherche portant sur ces changements et nous explorerons les options pour les réaliser.

Nous allons commencer par fournir des informations générales pour comprendre comment nous modélisons et analysons les systèmes énergétiques au sein du LEA. Nous nous pencherons ensuite sur la transition vers une mobilité alimentée par des batteries, en explorant l'infrastructure de recharge et la manière dont l'hydrogène et les carburants synthétiques peuvent être comparés aux batteries électriques pour les véhicules individuels. Puis nous évaluerons les implications systémiques et les coûts de la transition vers la mobilité et nous examinerons les avantages du passage de la voiture individuelle aux transports publics. Dans une interview, nous entendrons les points de vue de l'industrie automobile et du gouvernement fédéral suisse. Enfin, nous clôturerons ce numéro par des perspectives et des questions ouvertes qu'il est urgent d'aborder.

Le populaire *Point sur l'énergie*, publié par notre laboratoire de 1999 à 2015, est à la base de cette nouvelle publication. Nous vous invitons à nous faire part de vos commentaires par courrier électronique à l'adresse suivante: lea-info@psi.ch. Si vous n'êtes pas encore abonné et que vous souhaitez continuer à recevoir les prochains numéros de *La boussole de l'énergie du PSI*, il suffit de souscrire un abonnement.

Nous nous réjouissons d'échanger avec nos lecteurs au cours des années qui viennent et nous vous souhaitons une bonne lecture!

Equipe rédactionnelle
Institut Paul Scherrer PSI

Contenu

- 4 **Modéliser la transition vers une mobilité durable**
- 6 **Passer à la vitesse supérieure: la transition vers la mobilité électrique**
- 8 **Le défi de la recharge: développer l'infrastructure pour les véhicules électriques**
- 10 **Batteries électriques, hydrogène ou carburants synthétiques?**
- 12 **Vue d'ensemble: implications systémiques et coûts externes**
- 14 **Repenser la mobilité individuelle: passer de la voiture aux transports publics**
- 16 **«Notre souhait serait une population plus multimodale.»**
Entretien avec Regina Witter et Peter Schmid
- 19 **Perspectives: atteindre le zéro émission nette dans le domaine de la mobilité individuelle**

Photo de couverture
Autoroute de Lavaux (Suisse) de nuit
Photo: Adobe Stock



S'abonner à La boussole de l'énergie du PSI

Si vous souhaitez recevoir nos analyses holistiques et scientifiques par courrier physique ou numérique deux fois par an, il suffit de vous abonner gratuitement en utilisant le lien ou le code QR ci-dessous:

www.psi.ch/fr/news/la-boussole-de-lenergie-du-psi



Modéliser la transition vers une mobilité durable

Dans notre équipe de modélisation, nous explorons systématiquement les options technologiques et les carburants pour réaliser un système énergétique compatible avec l'objectif de zéro émission nette ainsi que leurs implications pour l'économie, la société et l'environnement.

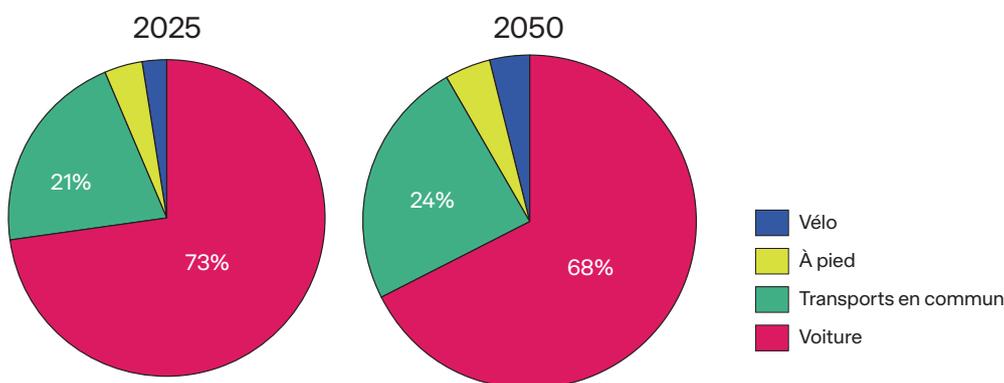


Figure 1: Répartition modale par personne-kilomètre en Suisse en 2025 et 2050

Répartition prévue des modes de transport en 2025 et 2050. D'ici 2050, la distance totale parcourue devrait passer de 129 à 138 milliards de personnes-kilomètres, tandis que la population augmentera de 9 à 10,4 millions d'habitants. Outre l'hypothèse d'une croissance de la demande de transport public, l'ARE prévoit également une augmentation de la part du vélo, qui passerait de 2,3% à 3,8% du nombre total de personnes-kilomètres.

(Source: Office fédéral du développement territorial ARE)

Pour ce faire, nous créons des scénarios dits «de simulation». Par exemple, nous avons élaboré plusieurs scénarios pour montrer comment la Suisse peut réduire à zéro les émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici 2050. Nous utilisons l'un des modèles énergétiques informatiques les plus détaillés: le modèle suisse des systèmes énergétiques (Swiss TIMES Energy Systems Model ou STEM), sur lequel repose l'outil d'optimisation TIMES. Ce modèle englobe l'ensemble du système énergétique suisse d'aujourd'hui et de demain. Si les scénarios peuvent apporter une aide précieuse aux décideurs politiques et économiques, il est important de garder en tête qu'il ne s'agit pas de prédictions.

Pour les analyses présentées dans cette publication, nous utilisons l'un de nos scénarios qui vise de réaliser l'objectif zéro-net d'ici 2050. Nos données d'entrée sur les facteurs sociaux et économiques, comme la croissance de la population et le produit intérieur brut (PIB), proviennent des offices fédéraux suisses. Nos analyses du parc automobile reposent en partie sur les données relatives à la demande en mobilité de l'Office fédéral du développement territorial (ARE). L'ARE prévoit qu'à partir de 2035 en-

viron, la conduite de véhicules individuels sera plus coûteuse en raison d'une combinaison de subventions aux transports publics et de mesures visant à compenser les coûts externes de cet usage individuel de la voiture. Le scénario principal prévoit donc un transfert de l'utilisation de la voiture individuelle vers les transports publics (voir figure 1).

Malgré cette évolution des modes de transport, communément appelée transfert modal, le nombre de voitures en circulation continue d'augmenter dans le scénario tendanciel de l'ARE, où deux kilomètres sur trois sont encore parcourus en voiture en 2050. Cela s'explique en partie par la croissance démographique et économique attendue dans le pays, ainsi que par la préférence des voyageurs pour la voiture.

Dans nos scénarios «zéro émission nette», nous avons fait l'hypothèse de la même répartition modale que dans le scénario ARE: autrement dit, les voyageurs suisses continueront de dépendre largement de la voiture individuelle (voir figure 2). Si cela s'avère exact, la transition vers une mobilité alimentée par des batteries sera d'autant plus importante pour atteindre notre objectif de zéro émission nette de gaz à effet de serre.



33%

Le pourcentage des émissions de gaz à effet de serre imputables au secteur des transports en Suisse.

77%

de ces émissions proviennent du transport terrestre de passagers, principalement des voitures.

(Source: Office fédéral de l'environnement)



Passer à la vitesse supérieure: la transition vers la mobilité électrique

Si la Suisse veut vraiment atteindre le zéro émission nette de gaz à effet de serre, elle doit opérer un changement technologique dans le domaine des véhicules individuels. Dans notre étude, nous partons de l'hypothèse que de nombreuses personnes continueront à conduire des voitures, avec plus d'un million de voitures supplémentaires sur les routes suisses d'ici 2050.

La plupart des voitures en circulation aujourd'hui sont des véhicules équipés d'un moteur à combustion interne (ICEV) fonctionnant au diesel, à l'essence ou au gaz de pétrole liquéfié (GPL). Nos recherches montrent que pour réduire à zéro les émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici 2050, la majorité des voitures devront utiliser des carburants alternatifs (voir figure 2). Ces carburants comprennent l'électricité, l'hydrogène et les carburants synthétiques ou e-carburants.

Dans une grande partie du monde, y compris en Suisse, la transition vers la mobilité électrique a déjà commencé. Les gouvernements mettent en œuvre des politiques visant spécifiquement à encourager

l'adoption des véhicules électriques à batteries (BEV), y compris avec divers avantages fiscaux pour la possession de véhicules «propres» ou très efficaces. Nous reviendrons sur les raisons pour lesquelles les constructeurs et les consommateurs pourraient préférer les BEV à d'autres groupes motopropulseurs dans l'article «Batteries électriques, hydrogène ou carburants synthétiques?». En outre, dès 2035, l'UE interdira la vente de nouvelles voitures à essence et diesel, à moins qu'elles ne fonctionnent avec des carburants alternatifs. Cependant, de nombreux acheteurs de voitures neuves tardent à franchir le pas et cette transition ne se fait pas aussi rapidement que prévu dans notre scénario «zéro émission nette». Bien

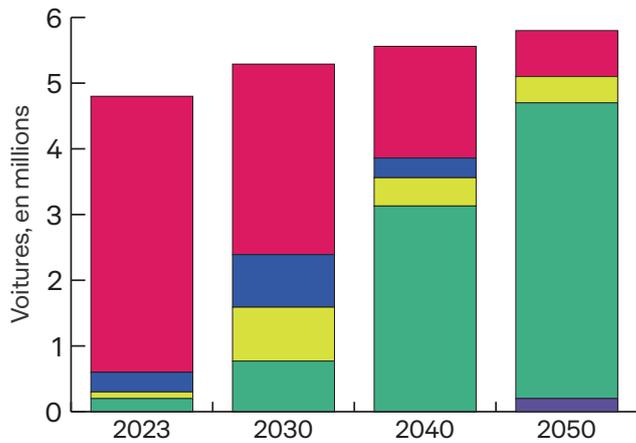


Figure 2: Evolution possible du parc automobile suisse pour atteindre l'objectif zéro émission nette d'ici 2050

Le parc automobile suisse actuel et son évolution possible jusqu'en 2050 pour réduire à zéro les émissions nettes de gaz à effet de serre. Le nombre total de voitures devrait passer de 4,7 millions à 5,9 millions d'ici 2050. Bien que le nombre de voitures augmente, le kilométrage annuel par voiture est plus faible qu'aujourd'hui: en moyenne, les voitures roulent moins. Dans une société ayant atteint l'objectif zéro émission nette, les véhicules à moteur à combustion interne (ICEV) restants doivent fonctionner avec des carburants synthétiques, qui peuvent remplacer l'essence et le diesel et dont l'empreinte carbone est beaucoup plus faible.

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)

que les BEV soient technologiquement prêts à être adoptés à large échelle, plusieurs obstacles s'opposent actuellement à leur adoption.

Le premier obstacle est le prix. Aujourd'hui, les batteries sont onéreuses et font grimper le coût d'achat des BEV. Cependant, malgré l'investissement initial nécessaire, les BEV sont rentables à long terme. En fait, sur l'ensemble de leur durée de vie, les BEV sont compétitifs par rapport aux véhicules à moteur à combustion interne, en tenant compte des dépenses (assurance, entretien, pneus, carburant et prix d'achat) (source: Office fédéral de l'énergie). Mais la plupart des consommateurs qui cherchent à acheter un véhicule n'adoptent pas une approche fondée sur les frais kilométriques, ce qui signifie que les BEV sont souvent perçus comme n'étant pas compétitifs sans une forme quelconque de subvention.

Un deuxième obstacle est la mésinformation concernant les performances environne-

0,2 million

Nombre de véhicules électriques à batterie en circulation en Suisse en 2024, représentant 3% du parc automobile total.

(Source: Office fédéral de la statistique)

4,5 millions

Nombre prévu de voitures électriques à batterie nécessaires sur les routes de Suisse d'ici 2050 selon notre scénario «zéro émission nette». Cela représenterait 76% du parc automobile total.

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)

mentales des BEV par rapport à d'autres types de véhicules individuels, notamment concernant leurs batteries. Les acheteurs potentiels pourraient être dissuadés d'acheter des BEV s'ils pensent que les batteries finissent sous forme de déchets toxiques. Le recyclage jouera un rôle crucial dans l'atténuation de ces deux problèmes. Pour donner une idée de l'ampleur de ces programmes de recyclage: l'UE vise à ce que 73% des batteries de voitures électriques soient recyclées d'ici 2030. Par ailleurs, les technologies de batteries à faible teneur en cobalt ou entièrement exemptes de cobalt gagnent du terrain, contribuant à réduire la demande de cet élément rare, toxique et souvent extrait de manière non éthique.

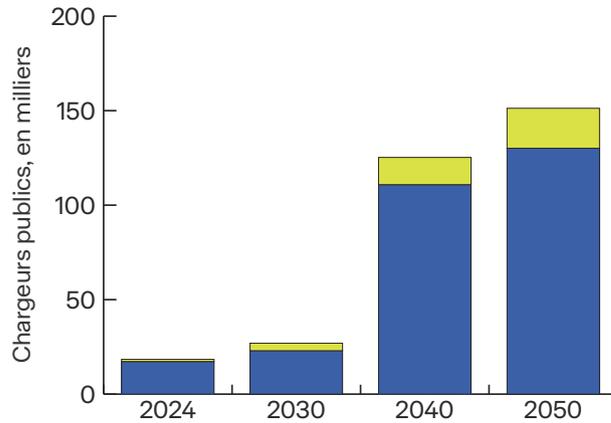
Un dernier obstacle tout aussi important à l'adoption des BEV est l'inquiétude concernant la disponibilité des infrastructures de recharge, que nous examinerons en détail ci-après.

Le défi de la recharge: l'infrastructure pour les véhicules électriques à batterie

La disponibilité des chargeurs est un critère important pour les consommateurs qui envisagent l'achat d'un véhicule électrique à batterie.



Figure 3: Besoins en infrastructures de recharge publiques en Suisse



Le nombre minimum de stations de recharge publiques nécessaires pour répondre à la croissance requise des véhicules électriques à batterie dans notre scénario «zéro émission nette». Les chiffres reflètent une répartition par la taille des stations similaire à celle d'aujourd'hui. En plus des chargeurs publics, nous aurons besoin de plus de 1,6 million de chargeurs domestiques pour assurer la recharge à domicile d'ici 2050. Le chargeur public standard actuel est de 22 kW.

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)

Rapide (>100 kW)
Standard (7-100 kW)

Öffentliche Schnellladestationen (>100 kW)
Öffentliche Ladestationen (7-100 kW)



Dans l'ensemble, deux personnes sondées sur trois qui ne sont pas propriétaires d'un BEV citent l'accès à l'infrastructure de recharge comme le principal obstacle à l'achat d'un BEV (source: Baromètre TCS de l'électromobilité 2023).

Sur ce point, la recharge à domicile joue un rôle important. La majorité des premiers utilisateurs de BEV ont installé une station de recharge privée. Aujourd'hui, avec l'amélioration de l'accès aux chargeurs publics, la proportion de propriétaires suisses de BEV disposant d'un chargeur privé est tombée à un sur trois (source: TCS). La recharge à domicile à l'aide d'un chargeur privé est pratique, rapide et peu coûteuse, étant donné que les tarifs d'électricité résidentiels n'incluent pas les frais liés aux chargeurs publics. Notre étude montre que la fourniture d'un accès à la recharge de nuit par le biais de chargeurs privés à domicile ou de chargeurs publics dans les zones résidentielles permettrait d'augmenter la pénétration des BEV de 12 à 20% au cours de la période 2040-2050.

Hormis la recharge à domicile, la recharge en déplacement et pendant la journée joue également un rôle important. Parmi les conducteurs qui ne disposent pas d'un système de recharge privé à domicile, on observe une augmentation de 24% de l'adoption des BEV lorsque l'infrastructure publique dans les zones non résidentielles est considérablement améliorée, par rapport à une infrastructure de recharge publique qui n'est pas améliorée. Il s'agit

par exemple des chargeurs installés dans les parkings publics, sur les aires de stationnement des magasins et aux bornes de recharge sur les autoroutes.

La figure 3 montre que le nombre de stations de recharge en Suisse doit augmenter considérablement pour favoriser l'adoption des BEV. Selon notre analyse, chaque BEV a besoin d'une capacité de charge totale d'environ 5 kW, répartie sur environ deux BEV par chargeur privé, et entre 25 et 30 BEV par chargeur public. Cela signifie que d'ici 2050, la Suisse aura besoin de huit fois plus de chargeurs publics ordinaires et de seize fois plus de chargeurs publics rapides qu'aujourd'hui.

L'infrastructure de recharge des BEV doit être étendue sur plusieurs fronts. L'installation de chargeurs à domicile reste un problème, d'autant plus que la plupart des Suisses louent leur logement et que les locataires n'ont pas le droit d'installer des chargeurs de BEV dans leur immeuble. Les chargeurs publics dans les zones résidentielles peuvent atténuer ce problème. Lorsqu'on est en déplacement, la combinaison de chargeurs publics dans les zones commerciales et sur les lieux de travail peut également contribuer à combler cette lacune.

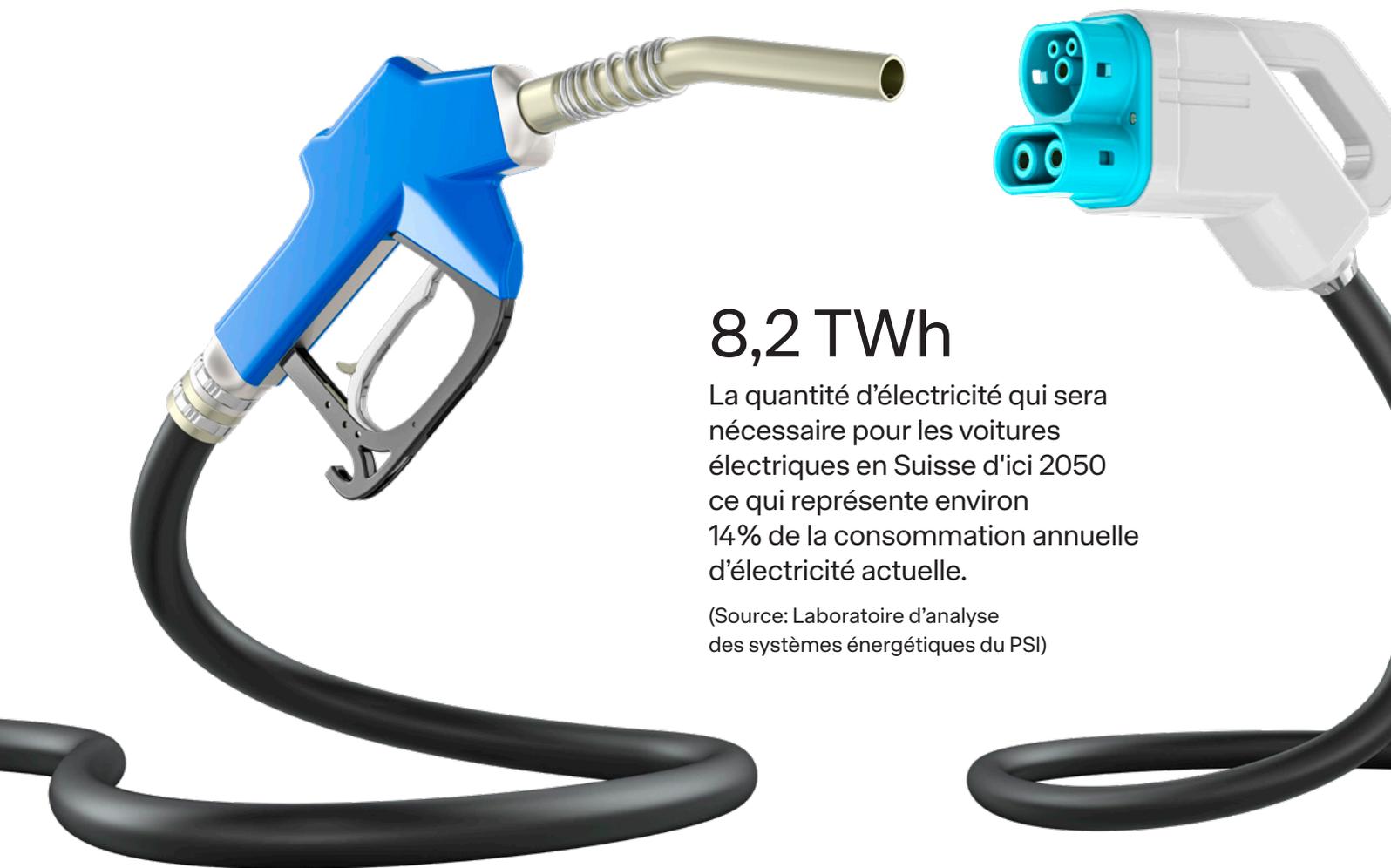
Ces résultats soulignent l'importance de l'infrastructure de recharge pour maintenir la tendance des BEV. Comme nous le verrons plus loin, une infrastructure de recharge inadéquate pour les BEV aujourd'hui pourrait entraîner des inefficacités coûteuses à l'avenir.

Batteries électriques, hydrogène ou carburants synthétiques?

Qu'est-ce qui est le plus logique pour le transport routier individuel futur si l'on veut atteindre les objectifs en matière de respect du climat? Des voitures à batterie ou à hydrogène? Ou faut-il des moteurs à combustion classiques, fonctionnant avec des carburants synthétiques produits à partir de dioxyde de carbone, d'eau et d'électricité provenant de sources renouvelables, appelés «e-carburants»?

Si nous voulons décarboniser le secteur des transports de la manière la plus efficace et la plus économique possible, nos recherches montrent que les BEV sont la meilleure option pour les voitures individuelles. Parmi les options susmentionnées, les BEV sont les plus efficaces sur le plan énergétique, les plus rentables et les plus aptes à être adoptées à large échelle. Par ailleurs, l'hydrogène et les e-carburants sont nécessaires de toute urgence pour d'autres usages que les voitures particulières.

Examinons d'abord l'efficacité. Les BEV ont un rendement d'environ 60% si l'on considère l'énergie qu'ils consomment «du puits à la roue». Les voitures à hydrogène ont un rendement d'environ 25%, en tenant compte de l'énergie perdue sous forme de chaleur inutilisable pendant la production d'hydrogène par électrolyse et pendant le fonctionnement de la voiture. Les véhicules à moteur à combustion interne fonctionnant aux biocarburants n'ont quant à eux qu'un rendement d'environ 10%, en



8,2 TWh

La quantité d'électricité qui sera nécessaire pour les voitures électriques en Suisse d'ici 2050 ce qui représente environ 14% de la consommation annuelle d'électricité actuelle.

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)



grande partie à cause de l'inefficacité inhérente aux moteurs à combustion et du processus de production très énergivores des biocarburants. Comparé à un BEV pour une distance donnée, des voitures à hydrogène et au e-carburant nécessitent respectivement deux fois et demie et six fois plus d'électricité. Les consommateurs remarqueraient l'augmentation des besoins en électricité lorsqu'ils devraient faire le plein, car l'hydrogène et les e-carburants seraient nettement plus chers que ce que coûterait l'électricité pour le chargement de la batterie.

Quant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le temps presse. Les BEV représentent la technologie la plus apte à être adoptée à grande échelle. En effet, aujourd'hui déjà, ces véhicules constituent une alternative viable aux voitures à essence et au diesel. On ne peut pas en dire autant des voitures à pile à combustible, ni des e-carburants: en Suisse, un seul modèle de voiture à pile à combustible est disponible, le nombre actuel de stations de distribution d'hydrogène est de 17, et il faudra encore des années pour que les e-carburants soient commercialisés.

Il y a des applications pour l'hydrogène et les e-carburants bien plus judicieuses que leur utilisation pour le transport terrestre de passagers. Dans certaines industries et pour la production d'engrais, il n'existe pas d'alternative à l'hydrogène à faible teneur

en carbone. Les biocarburants ne seront disponibles qu'en quantités limitées, et ils seront nécessaires pour l'aviation et le transport maritime. Dans ces secteurs, en effet, les groupes motopropulseurs électriques à batterie ne sont pas réalisables, en raison du poids des batteries.

Certaines contraintes pourraient toutefois conduire à des choix technologiques différents. Si les conducteurs continuent à se heurter à une infrastructure de recharge insuffisante, le besoin en voitures à pile à combustible (fonctionnant à l'hydrogène) pourrait augmenter afin d'atteindre l'objectif de zéro émission nette de gaz à effet de serre. Par rapport à une transition vers les BEV, cette solution serait plus coûteuse et nécessiterait de l'électricité supplémentaire pour la production d'hydrogène. Dans les pays où l'électrification est beaucoup plus faible et où les réseaux électriques sont moins fiables, l'électrification de la mobilité individuelle pourrait être disproportionnellement coûteuse, ce qui signifie que le remplacement de l'essence et du diesel par des e-carburants pourrait être une option plus économique. Cette solution serait globalement moins efficace, mais pourrait être moins coûteuse du point de vue de l'ensemble du système énergétique. Ce n'est qu'un exemple de la façon dont la mobilité doit être considérée dans le contexte plus large de la transition énergétique, comme nous le verrons plus loin.

Vue d'ensemble: implications systémiques et coûts externes

Les changements évoqués précédemment dans le secteur des transports entraîneront des modifications importantes dans l'ensemble du système énergétique.



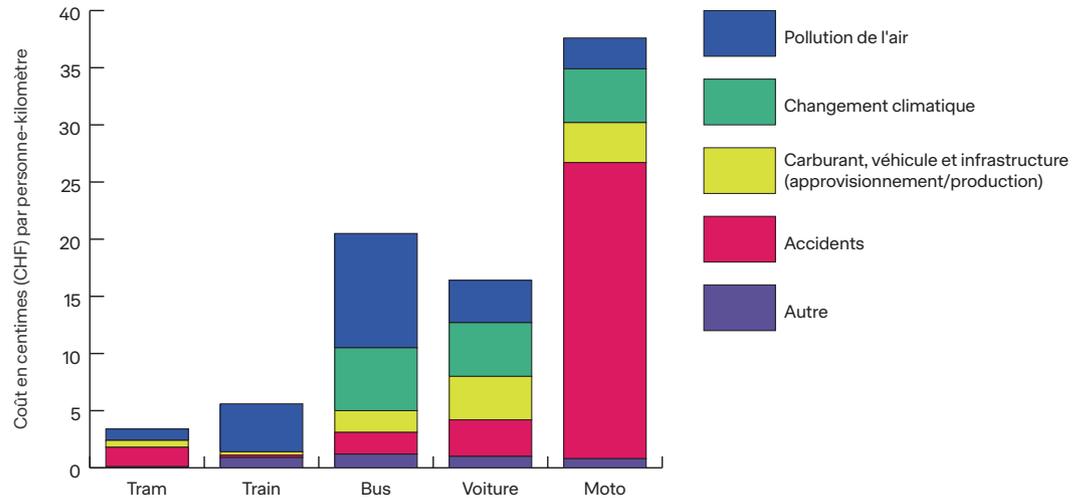
L'un de ces changements sera une augmentation de la demande en électricité. Nos travaux montrent que les voitures électriques qui circuleront en Suisse d'ici 2050 consommeront environ 8,2 TWh d'électricité supplémentaire par an, soit environ un septième de la consommation actuelle. Une partie de cette augmentation de la demande sera compensée dans d'autres domaines, par exemple par des bâtiments mieux isolés. Cependant, la demande d'électricité augmentera globalement, en partie à cause des véhicules électriques.

D'ici 2050, nous estimons que la demande annuelle en électricité de la Suisse passera de 60 à 71 TWh. Bien que cette augmentation globale ne soit pas dramatique, elle est rendue plus difficile par l'abandon progressif prévu de l'énergie nucléaire, qui fournit aujourd'hui environ 30% de l'électricité du pays. Le remplacement de cette capacité nucléaire par d'autres sources d'électricité à faible teneur en carbone représente un défi plus important que la prise en compte de la demande supplémentaire des BEV, laquelle reste relativement modeste. Pour répondre à ces deux aspects, la Suisse devra probablement continuer à développer la capacité photovoltaïque (solaire) à un rythme important, tout en envisageant d'autres sources d'énergie à faible teneur en carbone comme des nouvelles centrales hydroélectriques, l'énergie éolienne

Figure 4: Coûts externes du transport terrestre de passagers

Ce graphique montre les coûts externes de certains modes de transport en Suisse, calculés en centimes de francs suisses par personne-kilomètre. Les bus sont considérés comme coûteux par rapport aux voitures pour deux raisons principales: un faible niveau d'électrification des bus (il s'agit d'un bus diesel) et un faible taux d'occupation (16%).

(Source: Ecoplan / INFRAS pour ARE)



et l'incinération de déchets avec captage et stockage du carbone.

L'intégration réussie de ces sources d'électricité à faible teneur en carbone nécessitera des investissements supplémentaires pour renforcer les réseaux, augmenter les capacités de stockage et les centrales de secours. Etant donné que notre modèle analytique ne comprend pas de représentation détaillée du réseau électrique, il est important de reconnaître que l'intégration d'énergies renouvelables et de véhicules électriques supplémentaires peut impliquer certaines contraintes liées à l'infrastructure du réseau qui n'ont pas encore été pleinement évaluées.

La mise en place d'un système électrique résilient et à faible émission de carbone ne dépendra pas seulement de l'infrastructure nationale, mais aussi de la capacité de la Suisse à coordonner sa transition énergétique avec le reste de l'Europe, en particulier avec ses pays voisins. Une meilleure intégration du marché de l'électricité renforcerait la sécurité de l'approvisionnement et permettrait d'accéder à un marché de l'énergie plus large et plus diversifié.

Combien cela coûtera-t-il?

Nous estimons que la transition énergétique coûtera en moyenne 530 francs suisses par an aux résidents suisses d'ici

2050. Toutefois, la fourchette des coûts par personne est très large. En fonction de facteurs tels que la politique nationale en matière d'importations d'énergie et l'ouverture des consommateurs à l'évolution des technologies, nos recherches suggèrent que la transition énergétique pourrait coûter aux résidents suisses entre 320 et 1390 francs suisses par an. Ce coût comprend les dépenses dans les secteurs du transport et du bâtiment, ainsi que la poursuite de l'expansion de l'approvisionnement en électricité à faible émission de carbone.

Il est important de noter ici que l'atténuation du changement climatique est très probablement beaucoup moins coûteuse que l'adaptation à long terme. En d'autres termes, ces coûts sont certainement inférieurs au coût de l'inaction. Les coûts externes de la combustion des combustibles fossiles, c'est-à-dire les coûts dont nous ne nous acquittons pas directement mais que nous payons sous la forme de dommages causés à l'environnement et à la santé humaine, sont de plus en plus évidents.

Dans le secteur de la mobilité, les émissions de gaz à effet de serre représentent la principale contribution à ces coûts externes, suivies par les polluants atmosphériques. Globalement, les voitures individuelles engendrent des coûts externes de près de 16 milliards de francs suisses par an en Suisse, selon les estima-

tions du dernier rapport de l'Office fédéral du développement territorial ARE sur les coûts externes des transports (Ecoplan / INFRAS). La comparaison des différents moyens de transport montre que les coûts externes des transports publics électrifiés sont nettement inférieurs à ceux des voitures individuelles, mais aussi des bus publics fonctionnant avec des combustibles fossiles. Les coûts externes estimés des voitures s'élèvent à plus de 16 centimes (en francs suisses) par personne-kilomètre, tandis que ceux des trains s'élèvent à moins de 6 centimes par personne-kilomètre. La figure 4 présente une ventilation de ces coûts.

Enfin, la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de la mobilité individuelle permettra à la Suisse d'éviter de mettre en œuvre des mesures plus coûteuses pour atteindre l'objectif de zéro émission nette, telles que de nouvelles technologies onéreuses pour le transport de marchandises, la rénovation de bâtiments difficiles à réhabiliter et des mesures supplémentaires de captage et de stockage du carbone. Un moyen de réduire les coûts externes dans le secteur de la mobilité individuelle serait de poursuivre l'électrification des transports publics et, parallèlement, de mobiliser un transfert modal de la voiture vers le vélo, la marche et les transports publics. La section suivante traite des moyens d'y parvenir.

Repenser la mobilité individuelle: passer de la voiture au transport public

Pour atteindre le zéro émission nette dans le transport terrestre de passagers, un transfert modal important est nécessaire: c'est-à-dire le passage d'un mode de transport à un autre, par exemple de la voiture à ce que l'on appelle les «options de mobilité douce», ou de la voiture aux transports en commun.



Bien que les véhicules électriques ne produisent aucunes émissions directes de gaz à effet de serre, leur production et leur fonctionnement génèrent encore des émissions importantes, comme l'illustre la figure 5. Pour décarboner complètement l'ensemble du cycle de vie des BEV, des technologies de captage et de stockage du carbone (CSC) et d'élimination du dioxyde de carbone (CDR) seront nécessaires. Aujourd'hui, cependant, ces technologies sont encore immatures et coûteuses.

Les options de mobilité douce, y compris les vélos électriques, sont beaucoup moins chères que les voitures et peuvent être utilisées sur des trajets plus courts afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les transports en commun sont une option à faible émission de carbone pour les distances et les conditions pour lesquelles un vélo ne suffit pas.

Pour encourager ce changement, il est important de comprendre les facteurs autres que le coût qui influencent les choix individuels en

matière de transport. Il s'agit notamment du confort, des habitudes et surtout de la durée du trajet. Les facteurs non monétaires sont en fait les principaux moteurs du choix d'un mode de transport. De nombreuses personnes préfèrent conduire leur voiture parce qu'elles la trouvent plus pratique que les transports publics. En Suisse, où les automobilistes ont tendance à être peu sensibles au prix, la durée du trajet est particulièrement déterminante. Les résidents suisses sont environ quatre fois plus susceptibles de choisir un mode de transport en fonction de la durée du trajet que du coût.¹

L'une de nos analyses intègre la durée et l'évaluation du temps de déplacement des consommateurs. En d'autres

termes, quelle est la longueur de leurs trajets et dans quelle mesure souhaiteraient-ils que ceux-ci soient plus courts. Elle montre qu'une combinaison de transports publics légèrement plus rapides et de voitures légèrement plus lentes sur les trajets de moyenne et longue distance pourrait favoriser une augmentation de 5 à 10% de la demande en transports publics entre 2030 et 2050. Dans l'ensemble, l'amélioration de l'efficacité, de la fréquence et de l'intégration numérique (y compris une variété d'applications et de services de mobilité) des transports publics peut les rendre plus attrayants pour les voyageurs. Le raccourcissement de la durée des trajets en transports publics, combiné à des politiques ciblées pour différentes distances de déplacement, pourrait encourager une plus grande utilisation des transports publics.

Le cadre réglementaire doit tenir compte des disparités géographiques et socio-économiques entre les voyageurs, car ces facteurs influencent les réactions à la modification de la durée et du coût de déplacement. Les politiques visant à réduire les coûts de transport en commun, en particulier pour les consommateurs à faible revenu plus sensibles aux prix, pourraient faciliter le transfert modal pour ces personnes.

Enfin, au-delà de la réduction des émissions de CO₂, ce transfert modal présenterait plusieurs avantages significatifs, tels que des modes de vie plus sains et une utilisation plus efficace de l'espace urbain. Comme nous l'avons vu dans l'article précédent, les coûts externes des voitures individuelles pour notre santé et le climat sont importants.

1 Microrecensement suisse Mobilité et transports 2021

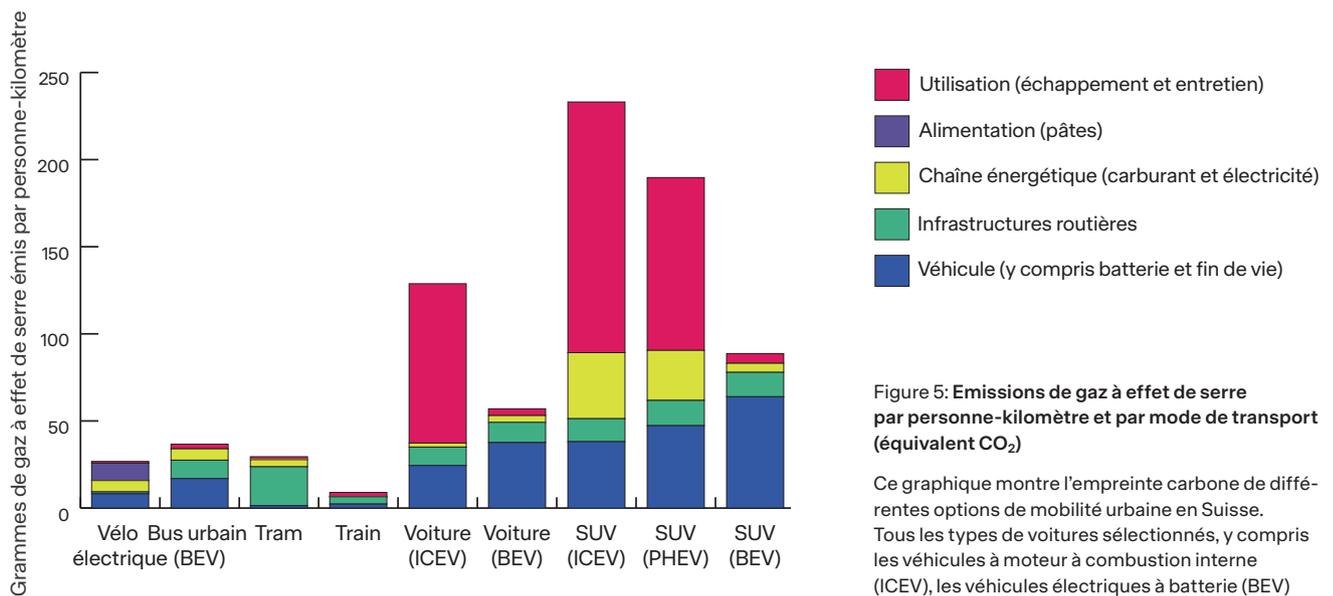


Figure 5: Emissions de gaz à effet de serre par personne-kilomètre et par mode de transport (équivalent CO₂)

Ce graphique montre l'empreinte carbone de différentes options de mobilité urbaine en Suisse. Tous les types de voitures sélectionnés, y compris les véhicules à moteur à combustion interne (ICEV), les véhicules électriques à batterie (BEV) et les véhicules hybrides rechargeables (PHEV), génèrent des émissions de gaz à effet de serre plus élevées que les transports en commun. «Voiture» désigne une voiture de taille moyenne. Les BEV produisent moins d'émissions de gaz à effet de serre pendant leur durée de vie que les véhicules à essence ou diesel, mais les émissions restent considérables, en particulier pour les SUV 100% électriques surdimensionnés. Les taux d'occupation du bus urbain et du tramway sont respectivement de 16% et 29%, ce qui correspond aux moyennes suisses.

(Source: Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI)

Combien d'émissions de gaz à effet de serre puis-je économiser avec une voiture électrique à batterie?

Consultez notre outil de calcul ou téléchargez une copie du modèle de tableur **Mobitool** pour comparer les empreintes carbone de différents véhicules, voir l'effet de la recharge des véhicules électriques avec de l'énergie photovoltaïque de votre propre toit et calculer les avantages environnementaux d'une voiture plus petite. Vous pouvez également l'utiliser pour vérifier les performances environnementales concernant d'autres impacts sur l'environnement que ceux causés par les émissions de gaz à effet de serre.

calculator: <https://calculator.psi.ch>

Mobitool: <https://mobitool.ch>

«Notre souhait est que les gens deviennent plus multimodaux.»

Entretien avec Regina Witter et Peter Schmid

La boussole de l'énergie du PSI:
Quel est le moyen de transport que vous avez utilisé en dernier?

Regina Witter:

J'ai pris le train pour aller travailler. Je travaille à Berne et j'habite à Neuchâtel, juste à côté de la gare. Mais je préférerais habiter encore plus près de mon lieu de travail et m'y rendre à vélo ou, mieux encore, à pied.

Peter Schmid:

Aujourd'hui, je me suis rendu au bureau avec ma voiture de fonction 100 % électrique. Je pourrais aussi me rendre au travail à vélo, mais en tant que spécialiste de la mobilité électrique, je me déplace en voiture.

RW: L'électromobilité est clairement une aubaine pour la décarbonisation des transports. Mais en même temps, il existe un important problème d'espace, notamment dans les villes, qui n'est pas encore résolu. Avec l'augmentation de la population en Suisse, nous avons besoin de solutions efficaces en termes de surface, comme les transports publics.

Nous avons besoin également d'interfaces entre les différents modes de transport. Nous nous intéressons beaucoup à ce que l'on appelle les «hubs de transport». L'idée est de mieux relier les différents moyens de transport entre eux. Nous souhaitons que les gens deviennent plus multimodaux et essaient d'utiliser les transports les plus appropriés. Mais nous aimons le confort. Une fois que nous sommes assis dans notre voiture, nous y restons généralement jusqu'à la destination finale. Nous

avons tous nos comportements et, en général, nous ne les modifions que progressivement.

PS: Je pense aussi que la mobilité individuelle sera à l'étroit dans les agglomérations urbaines. Il y aura peut-être des alternatives: chacun ne conduira plus sa propre voiture, mais utilisera par exemple le covoiturage ou des services de conduite autonome. Je pense que nous aurons encore beaucoup à faire dans ce domaine.

Mais reculons peut-être de deux pas: la mobilité est un besoin fondamental de l'humanité et, dans son ensemble, elle ne sera jamais totalement efficace ou respectueuse du climat. La question est de savoir quels sont les meilleurs compromis. Il est avéré que le véhicule électrique est une meilleure alternative que le moteur à combustion, tout simplement. Est-ce que cela résout le problème? Non, mais c'est un premier pas dans la bonne direction.

PSI: Nous avons déjà évoqué quelques obstacles à la transition vers une mobilité durable. En voyez-vous d'autres qu'il faudra surmonter pour que les gens adoptent la voiture électrique ou les transports publics?

PS: Actuellement, l'un des grands sujets de discussion est l'infrastructure de recharge dans le domaine privé. Les personnes qui vivent dans des logements de location n'ont souvent pas la possibilité de recharger leur voiture électrique. C'est aussi le cas des personnes qui se garent le long des trottoirs.

Ce qui n'aide pas non plus, c'est l'offre actuelle de produits. La tendance est plutôt aux véhicules haut de gamme, qui sont en général plus chers à l'achat. Mais des modèles électriques meilleurs marché seront bientôt mis sur le marché.

RW: En 2018, la Confédération a lancé ce que l'on appelle la «feuille de route pour l'électromobilité», qui regroupe aujourd'hui 74 organisations de tous les niveaux de l'Etat et du secteur privé. Toutes s'accordent à dire qu'il doit être possible de recharger sa voiture partout: sur le lieu de travail, en déplacement, mais aussi et surtout dans l'espace privé. Pour les locataires qui vivent dans des immeubles, les choses ne sont pas simples. De plus, nous entendons toujours dire que l'installation de stations de recharge dans l'espace public en ville est un défi en raison du manque de place. L'espace est un défi fondamental, en particulier pour le trafic motorisé privé. Plus de place pour les rues et les parkings signifie moins de place pour les personnes qui se déplacent à pied ou à vélo, ainsi que pour la végétation. Il s'agit de peser les intérêts: comment utiliser au mieux le peu d'espace disponible dans les villes?

PS: Je pense que ces modes de transport doivent être mis en réseau de manière intelligente et interagir entre eux: des modèles très intéressants sont alors possibles. Il faut des régions modèles où de nouvelles idées puissent être testées à petite échelle. Chez AMAG, nous proposons aux entreprises et aux lotissements des solutions de mobilité avec un choix de différents véhicules, comme des voitures électriques, des vélos ou

des vélos-cargos. Ils permettent de passer au niveau suivant d'intégration des transports publics. Après une évaluation, les régions modèles peuvent être élargies.

PSI: Comment voyez-vous la situation dans d'autres pays européens, par exemple en Norvège ou en Allemagne? Quels enseignements pouvons-nous tirer des autres pays-?

RW: En Norvège, les véhicules électriques bénéficient d'avantages fiscaux importants. Mais en Suisse, nous avons une situation de départ très différente avec notre excellent système de transports publics. Peu d'autres pays européens ont des trains aussi confortables et ponctuels.

PS: La Norvège est un cas particulier. L'électromobilité y a été développée grâce à des subventions publiques massives et elle est aujourd'hui citée en exemple, alors que l'on sait que cela ne fonctionnerait pas dans d'autres pays.

L'Allemagne est malheureusement un mauvais exemple. L'Allemagne a investi massivement dans l'électromobilité, avec des subventions allant jusqu'à 9000 euros par véhicule électrique. Que s'est-il passé? Les véhicules électriques ont d'abord été immatriculés en Allemagne, les subventions ont été perçues et ensuite, les véhicules électriques ont été revendus en Norvège.

En Allemagne, les véhicules hybrides rechargeables ont également été subventionnés. Les entreprises ont été motivées pour passer aux hybrides rechargeables et ont perçu les subventions. En fin de compte, peu de gens ont roulé en mode électrique et il est donc contre-productif d'acheter un véhicule hybride rechargeable.

Il doit y avoir un développement naturel et aligné sur les lois du marché dans le domaine de l'électromobilité. Ce qui est quelque peu dommage, en Suisse, c'est le manque de prévisibilité: dès 2024, par exemple, les véhicules électriques ont tout à coup cessé d'être exonérés de l'impôt sur les importations. En procédant de la sorte, on envoie de mauvais signaux à l'industrie et aux consommateurs. Il en va de même avec le débat sur l'interdiction des véhicules à combustion en 2035, qui sème le doute chez les personnes intéressées par les voitures électriques.

PSI: Quelle est la meilleure façon d'inciter les consommateurs à jouer le jeu?

PS: Grâce à différentes études, nous savons que 83% des consommateurs qui conduisent une voiture électrique ne reviendraient pas à une voiture à combustion. Malheureusement, il y a encore beaucoup d'informations erronées sur l'électromobilité. Notre approche est donc la suivante: informer réellement les gens. Une voiture électrique est-elle plus écologique qu'une voiture avec un moteur à combustion? Qu'advient-il des batteries lorsque je n'en ai plus besoin? Il y a encore beaucoup de travail d'informations à faire.

PSI: Comme l'a mentionné Peter Schmid, des discussions sont en cours au sein de l'UE sur la fin des nouvelles immatriculations de véhicules à combustion. Dans quelle mesure ces conditions-cadres sont-elles déterminantes pour la Suisse?

PS: D'ici 2035, la majorité des véhicules proposés seront électriques. Faut-il



Dr. Regina Witter

travaille depuis 20 ans en tant que spécialiste des transports et de l'aménagement du territoire, en Suisse et à l'étranger. Depuis 2019, elle est responsable suppléante du programme Trafic d'agglomération à l'Office fédéral du développement territorial (ARE). Avec ce programme, la Confédération soutient les cantons et les communes dans le financement d'infrastructures de transport en coordination avec le développement de l'urbanisation.



Peter Schmid

Peter Schmid travaille depuis plus de 30 ans pour l'industrie automobile, dans les domaines du marketing, de la vente et du conseil en Suisse, en Allemagne et aux Etats-Unis. Il dirige le centre de compétence et de conseil pour l'électromobilité et la nouvelle mobilité d'AMAG au Circle, à l'aéroport de Zurich.

intervenir durement avec des réglementations étatiques? Pour l'instant, il semble que le marché s'autorégule. VW a décidé que la marque deviendrait électrique. Mercedes aussi. BMW est peut-être encore un peu plus ouvert à la technologie. Mais je pense que le marché va se réguler et que la Suisse n'a pas besoin d'intervenir.

RW: En principe, expliquer aux gens quelles sont les incitations positives fonctionne bien en Suisse. Une offre de transports publics attrayante incite les gens à les utiliser. Ce n'est peut-être pas aussi rapide qu'avec des mesures restrictives, mais c'est plus durable, car les gens y adhèrent.

PSI: Le trafic automobile doit-il diminuer en Suisse et n'est-ce pas un problème s'il continue à s'intensifier?

RW: En raison du besoin d'espace, cela ne va certainement pas sans poser de problèmes. Aujourd'hui déjà, la surface consacrée au transport représente un tiers de la surface totale d'habitat. Dans les espaces urbains, nous arrivons aux limites, et il est donc très important de trouver des alternatives. De ce fait, il est inquiétant de voir que l'industrie automobile s'oriente de plus en plus vers les gros SUV qui prennent beaucoup de place. Cela va à l'encontre de l'idée d'une utilisation efficace de l'espace. Si davantage de personnes se déplacent ensemble en voiture, cela irait dans le bon sens. Aujourd'hui, pour les trajets vers le lieu de travail, le taux d'occupation moyen n'est que de 1,09 personne par voiture et par trajet, ce qui est très peu.

Je pense que la solution décisive est de coordonner les transports et le développement territorial. L'aménagement du territoire peut indiquer où et combien il faut construire, mais la mise en œuvre incombe presque toujours au secteur privé. Il faudra que celui-ci finisse par

admettre qu'il y a aussi des intérêts économiques à opérer une densification de qualité dans les villes, pour faire en sorte que les gens aient vraiment du plaisir à se déplacer à vélo et en transports publics et ne considèrent pas cela comme un problème.

Il ne s'agit pas de diaboliser la voiture. L'idée est de voir, en fonction de l'espace disponible, quel est le moyen de transport le plus approprié et peut-être aussi le plus rapide. Le moyen de transport le plus rapide en milieu urbain est le vélo, jusqu'à cinq kilomètres en tout cas, et même jusqu'à 15 kilomètres avec le vélo électrique. La plupart des gens ne le savent probablement pas.

PSI: Pensez-vous que les mesures actuellement mises en œuvre ou annoncées seront globalement suffisantes pour atteindre les objectifs climatiques dans le domaine des transports?

RW: De mon point de vue, les choses vont un peu trop lentement. Si chacun faisait un pas dans la bonne direction et prenait de temps en temps les transports publics ou le vélo, on aurait déjà accompli bien des choses.

PS: Je vois les choses de la même manière. Nous sommes probablement un peu en retard sur notre plan, mais je ne pense pas qu'il faille changer quelque chose maintenant ou qu'on puisse le faire à court terme. Lorsque le moment sera venu, les gens en Suisse s'adapteront. C'est un processus lent, certes, mais il va dans la bonne direction et est donc nettement plus durable.

PSI: Donc, en d'autres termes, la carotte suffira et il n'y aura pas besoin du bâton.

RW: Certaines règles sont fixées. Presque toutes les villes ont désormais une gestion du stationnement, il n'est

pas possible de se garer partout gratuitement. Posséder une voiture en ville n'est déjà pas bon marché et cela devient de plus en plus cher. Disons-le ainsi: il faut bien entendu des règles claires pour que la cohabitation dans la société fonctionne. Cela touche également les domaines des transports et de l'espace. Malgré tout cela, nous continuons à vivre dans une démocratie. Je pense que la contrainte ne fonctionne pas en Suisse et qu'elle produit plutôt l'effet inverse de ce que l'on souhaite réellement.

PSI: Peter Schmid, si vous aviez un souhait à adresser à l'administration fédérale suisse pour le secteur des transports, quel serait-il?

PS: Comme je l'ai mentionné, nous avons besoin de prévisibilité pour pouvoir planifier.

PSI: Et vous, Regina Witter, que souhaiteriez-vous voir advenir du côté de l'industrie automobile?

RW: Je trouverais bien que l'on commercialise davantage de petites voitures. Je me demande aussi dans quelle mesure AMAG, par exemple, pourrait s'engager pour le covoiturage. Il ne s'agit pas seulement de vendre des voitures à tous les propriétaires potentiels, mais de proposer un modèle qui permettrait l'utilisation conjointe d'une voiture par plusieurs personnes. Cependant, si le covoiturage s'imposait, cela irait sans doute à l'encontre de l'intérêt commercial, qui est de vendre davantage de voitures.

PS: Bien entendu, cela irait à l'encontre de l'intérêt commercial initial. Toutefois, nous devons évoluer avec notre temps. Toute transformation nécessite une phase d'apprentissage, mais celle-ci est urgente, car on ne peut pas continuer à fonctionner comme on l'a fait au cours des dernières décennies.



Perspectives: atteindre le zéro émission net dans le domaine de la mobilité individuelle

Des fabricants aux décideurs politiques, des promoteurs immobiliers aux collectivités locales, des locataires aux propriétaires, tout le monde peut contribuer à la réussite de la transition vers une mobilité plus durable.

Se mettre d'accord sur ce à quoi l'avenir devrait ressembler est le premier pas vers une action coordonnée. Dans ce numéro de La boussole de l'énergie du PSI, nous avons présenté des travaux de recherche et mis en évidence des défis qui démontrent que:

- l'adoption généralisée de véhicules électriques à batterie est la voie la plus directe et la plus efficace pour réduire à zéro les émissions nettes de gaz à effet de serre dans le secteur de la mobilité;
- l'impact systémique et les coûts de la transition vers la mobilité sont gérables par rapport aux coûts externes d'un scénario de statu quo;
- le transfert modal et l'augmentation de la multimodalité s'accompagnent d'avantages environnementaux et économiques.

Bien entendu, certaines questions restent en suspens. Des recherches supplémentaires doivent porter sur des aspects tels que l'adhésion des consommateurs aux nouvelles technologies, les effets de rebond dû à l'avènement du numérique et le transfert modal. De nombreux aspects du comportement individuel en matière de recharge restent flous. La manière exacte de sécuriser l'approvisionnement en électricité reste également à déterminer. Un autre domaine qui nécessite des réponses urgentes est celui du recyclage

et de l'économie circulaire, en particulier en ce qui concerne les batteries des BEV.

Faire progresser la mobilité individuelle dans le cadre de la transition énergétique exige une approche holistique, c'est-à-dire une approche qui équilibre soigneusement la technologie, l'infrastructure et le changement de comportement pour construire une société à faible émission de carbone qui soit à la fois équitable et résiliente. Au Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques, nous appliquons cette approche à l'ensemble de nos recherches, dans le but de favoriser une prise de décision éclairée. Nous nous réjouissons d'ores et déjà de vous présenter des analyses plus approfondies dans notre prochain numéro.

Impressum

La boussole de l'énergie du PSI
— Naviguer dans
la transition énergétique

Edition #1/2025
ISSN 3042-7223

Editeur
Institut Paul Scherrer PSI
Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI

Rédaction
Christian Bauer, Vinh Dang,
Carolyn Kerchof, Russell McKenna
et Kannan Ramachandran

Autres chercheurs contributeurs
Sandro Luh, Romain Sacchi

Soutien rédactionnel
Melissa Catoja, Martina Gröschl

Traduction de l'édition en allemand
Christian Bauer,
Intermundos GmbH (Deutschland)

Traduction de l'édition en français
Romain Sacchi, Catherine Riva

Mise en page
Monika Blétry

Photos
Adobe Stock sauf
page 3: Institut Paul Scherrer PSI,
page 17: ETH Zürich /
Michel Büchel (Regina Witter),
AMAG (Peter Schmid)

La boussole de l'énergie du PSI
est disponible en français,
en allemand et en anglais. L'abon-
nement au magazine est gratuit.
Vous pouvez vous abonner ici:
[www.psi.ch/fr/news/
la-boussole-de-lenergie-du-psi](http://www.psi.ch/fr/news/la-boussole-de-lenergie-du-psi)

**Analyse des systèmes
énergétiques au PSI**
Le Laboratoire d'analyse des sys-
tèmes énergétiques (LEA) mène des
recherches analytiques globales
sur divers systèmes et technologies
énergétiques, y compris le nucléaire,
les énergies fossiles et les énergies
renouvelables. Notre mission est
de mener des recherches axées sur
les défis qui soutiennent la prise de
décision, renforcent les capacités,
sensibilisent et font progresser l'édu-
cation dans le domaine de l'analyse
des systèmes énergétiques.

Laboratoire d'analyse
des systèmes énergétiques
www.psi.ch/fr/lea
lea-info@psi.ch

Connectez-vous avec nous
sur LinkedIn



[@PSI Laboratory
for Energy Systems
Analysis \(LEA\)](#)

Publications citées dans ce numéro

«Modélisation de la transition vers la mobilité» et «Passer à la
vitesse supérieure: la transition vers la mobilité électrique».

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2022). *Schweizerische
Verkehrsperspektiven 2050: Entwicklung Personenverkehr*.

Panos, E., Kannan, R., Hirschberg, S., & Kober, T. (2023).
An assessment of energy system transformation pathways
to achieve net-zero carbon dioxide emissions in Switzerland.
Communications Earth & Environment, 4(1), 157 (18 pp.).
DOI: 10.1038/s43247-023-00813-6

«Le défi de la recharge: développer l'infrastructure pour les
véhicules électriques»

Luh, S., Kannan, R., McKenna, R., Schmidt, T. J., & Kober, T. (2023).
How, where, and when to charge electric vehicles – net-zero
energy system implications and policy recommendations.
Environmental Research Communications, 5(9), 095004 (30 pp.).
DOI: 10.1088/2515-7620/acf363

GFS.Bern. TCS-Barometer E-Mobilität 2023. *Alltagstauglichkeit
statt Image-überlegungen: Elektrische Fortbewegung bleibt im
Trend*.

«Batteries électriques, hydrogène ou carburants synthétiques?»

Sacchi, R., Bauer, C., Cox, B., & Mutel, C. (2022). When, where and
how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse
gas emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162,
112475 (12 pp.). DOI: 10.1016/j.rser.2022.112475

Sacchi, R., Bauer, C., & Cox, B. L. (2021). Does size matter?
The influence of size, load factor, range autonomy, and
application type on the life cycle assessment of current and
future medium- and heavy-duty vehicles. *Environmental Science
and Technology*, 55(8), 5224-5235. DOI: 10.1021/acs.est.0c07773

«La situation dans son ensemble: implications systémiques
et coûts externes»

Ecoplan / INFRAS. *Externe Effekte des Verkehrs 2021:
Umwelt-, Unfall-, und Gesundheitseffekte des Strassen-,
Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs*.
Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bern. 2024.

«Repenser la mobilité individuelle: passer de la voiture
au transport public»

Bundesamt für Statistik BFS & Bundesamt für Raumentwicklung
ARE. (2021). *Mobilitätsverhalten der Bevölkerung: Ergebnisse des
Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021*.

Luh, S., Kannan, R., McKenna, R., Schmidt, T. J., & Kober, T. (2024).
Quantifying the impact of travel time duration and valuation
on modal shift in Swiss passenger transportation. *Applied Energy*,
356, 122412 (26 pp.). DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122412

Luh, S., Kannan, R., Schmidt, T. J., & Kober, T. (2022). Behavior
matters: a systematic review of representing consumer mobility
choices in energy models. *Energy Research and Social Science*,
90, 102596 (23 pp.). DOI: 10.1016/j.erss.2022.102596

Recherche soutenue par: Innosuisse, via les Centres de
compétence en recherche énergétique (SCCER),
l'Office fédéral de l'énergie, l'Office fédéral de l'environnement,
le Volkswagen Group Sustainability Council et la plateforme
Energy System Integration du PSI pour leur soutien financier.