



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieeffizienter Verkehr

Rapport du 26 septembre 2022

Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme : indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant

**Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme :
indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant**

Date : 26 septembre 2022

Lieu : Berne

Mandat :

Office fédéral de l'énergie OFEN
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Mandataire :

treeze Ltd.
Kanzleistrasse 4
CH-8610 Uster
www.treeze.ch

Auteur :

Rolf Frischknecht, treeze Ltd., frischknecht@treeze.ch

Responsable de domaine de l'OFEN : Daniel Schaller, Spécialiste Efficacité énergétique des transports, daniel.schaller@bfe.admin.ch

Chef de programme de l'OFEN : Christoph Schreyer, Responsable Efficacité énergétique des transports, christoph.schreyer@bfe.admin.ch

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme : indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant

Auteur
Rolf Frischknecht

Mandant
Office fédéral de l'énergie OFEN

Uster, 26 September 2022

Impressum

Titre	Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme: indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant
Auteur	Rolf Frischknecht treeze Ltd., fair life cycle thinking Kanzleistr. 4, CH-8610 Uster www.treeze.ch Téléphone +41 44 940 61 91 info@treeze.ch
Mandant	Office fédéral de l'énergie OFEN
Déclaration de responsabilité	Les informations contenues dans le présent document ont été compilées ou obtenues à partir de sources réputées fiables. Néanmoins, les auteurs ou leurs organisations n'acceptent aucune responsabilité pour toute perte ou dommage résultant de leur utilisation. L'utilisation des informations fournies relève strictement de votre propre responsabilité.
Version	2022.05.30_754-Aktualisierung-Energietikette-v1.3.docx, 26.09.2022 09:58:00

Abréviations

AIE	Agence internationale de l'énergie
CH	Suisse
CO ₂	Dioxyde de carbone
EIA	Administration des États-Unis chargée de l'information en matière d'énergie (<i>Energy Information Administration</i>)
EP	Énergie primaire
EqCO ₂	Équivalent de dioxyde de carbone
EqE	Équivalent essence
EqE-EP	Équivalent essence d'énergie primaire
g	Gramme
GNC	Gaz naturel comprimé («compressed natural gas», CNG)
GO	Garantie d'origine
GPL	Gaz de pétrole liquéfié («liquefied petroleum gas», LPG)
kg	Kilogramme
km	Kilomètre
kWh	Kilowattheure
l	Litre
LEne	Loi sur l'énergie
m ³	Mètre cube
MJ	Mégajoule
MJ EqPét	Mégajoule d'équivalent pétrole
PEM	Membrane échangeuse de protons («proton exchange membrane»)
SMR	Vaporeformage du méthane («steam methane reforming»)
t	Tonne
UCE	Unité de charge écologique
UIOM	Usine d'incinération des ordures ménagères

Zusammenfassung

Die Energieetikette für Personenwagen dient dazu, die Energieeffizienz und die CO₂-Emissionen von Personenwagen zu deklarieren. Auf der Energieetikette werden die Energieeffizienzklasse, der Normverbrauch und der CO₂-Ausstoss angegeben. Die Energieeffizienzklasse wird mit Hilfe der sogenannten Primärenergie-Benzinäquivalente bestimmt. Für die Berechnung der Primärenergie-Benzinäquivalente der Treibstoff- und der Strombereitstellung wird der Energieverbrauch von der Energiequelle (beispielsweise Rohölförderung) über die Veredelung bis zum Tank (Well-to-Tank) berücksichtigt. Die CO₂-Emissionen der Treibstoff- und Strombereitstellung werden mit dem gleichen Ansatz berechnet und müssen in der Preisliste und in Online-Konfiguratoren angegeben werden. Die direkten CO₂-Emissionen, die bei der Verbrennung der Treibstoffe im Fahrzeug entstehen, werden separat angezeigt. Zur Berechnung der Effizienzklassen werden die Fahrzeuge schliesslich anhand der gesamten Wirkungskette, also von der Energiequelle bis zum Rad (Well-to-Wheel), beurteilt.

In dieser Studie werden die Sachbilanzdaten und die Umweltkennwerte der Bereitstellung der wichtigsten Treibstoffe und des Schweizer Strommix beschrieben. Die berechneten Umweltkennwerte dienen als Grundlage für die Energieetikette für Personenwagen und die Bestimmung der Energieeffizienzklassen. Für die Berechnung der Umweltkennwerte der Treibstoff- und Strombereitstellung für die Energieetikette wurde der aktuellste und von den Bundesämtern genutzte UVEK Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2022 verwendet.

Benzin wird als Referenztreibstoff definiert und hat darum ein Primärenergie-Benzinäquivalent von 1.00 L/L. Das Primärenergie-Benzinäquivalent von Diesel ist leicht höher als jenes von Benzin und beträgt 1.09 L/L, dasjenige von Bioethanol (E85) liegt bei 1.66 L/L. Wasserstoff ab Schweizer Tankstelle hat ein Primärenergie-Benzinäquivalent von 0.66 L/m³, das aber je nach Herstellungsverfahren und eingesetztem Strommix stark variiert. Das an Schweizer Tankstellen angebotene Erdgas, dem mindestens 20 % Biogas beigemischt werden, hat ein Primärenergie-Benzinäquivalent von 0.79 L/m³. Das Primärenergie-Benzinäquivalent der Elektrizität (Schweizer Verbraucherstrommix) beträgt 0.22 L/kWh, dasjenige des Schweizer HKN Lieferantenstrommix 0.17 L/kWh.

Die fossilen Kohlendioxidemissionen der Bereitstellung von Benzin und Diesel betragen 527 g CO₂/L bzw. 508 g CO₂/L. Die Bereitstellung von Erdgas / 20 % Biogas und von Wasserstoff ab Schweizer Tankstelle verursacht Kohlendioxidemissionen von 298 g CO₂/m³ bzw. 223 g CO₂/m³. Die fossilen Kohlendioxidemissionen der Schweizer Elektrizität (Verbraucherstrommix) ab einer Niederspannungssteckdose betragen 94 g CO₂/kWh, diejenigen des Schweizer HKN Lieferantenstrommix 22.5 g CO₂/kWh.

Résumé

L'étiquette-énergie pour les voitures de tourisme sert à indiquer l'efficacité énergétique et les émissions de CO₂ des voitures de tourisme. L'étiquette-énergie mentionne la catégorie d'efficacité énergétique, la consommation normalisée et les émissions de CO₂. La catégorie d'efficacité énergétique est déterminée à l'aide de ce qu'on appelle les équivalents essence d'énergie primaire. Pour calculer les équivalents essence d'énergie primaire générés par la production de carburant et d'électricité, il est tenu compte de la consommation d'énergie depuis la source d'énergie (par exemple l'extraction du pétrole brut) jusqu'au réservoir (well to tank), en passant par le raffinage. Les émissions de CO₂ liées à la fourniture de carburant et d'électricité sont calculées sur la même base et figurent dans les listes de prix et les configurateurs en ligne. Les émissions de CO₂ directes générées dans le véhicule par la combustion des carburants sont indiquées séparément. Pour déterminer la catégorie d'efficacité énergétique, les véhicules sont évalués sur l'ensemble de la chaîne, soit de la source d'énergie à la roue (well to wheel).

Cette étude décrit les données des inventaires et les indicateurs environnementaux des principaux carburants et du mix d'électricité suisse. Les indicateurs environnementaux calculés servent de base pour l'étiquette-énergie des voitures de tourisme et pour la définition des catégories d'efficacité énergétique. La liste actualisée des données des écobilans UVEK DQRv2:2022 utilisée par les offices fédéraux a servi de base de calcul pour les indicateurs environnementaux de la production de carburant et d'électricité figurant sur l'étiquette-énergie.

L'essence étant considérée comme carburant de référence, son équivalent essence d'énergie primaire est de 1,00 l/l, celui du bioéthanol (E85) est de 1,66 l/l. L'équivalent essence d'énergie primaire du diesel, légèrement plus élevé que celui de l'essence, est de 1,09 l/l. Parmi les carburants gazeux considérés, l'hydrogène délivré par les stations-service suisses a un équivalent essence d'énergie primaire de 0,66 l/m³, équivalent qui varie fortement en fonction du processus de fabrication et du mix d'électricité utilisé. Le gaz naturel délivré par les stations-service suisses, qui contient au moins 20 % de biogaz, a un équivalent essence d'énergie primaire de 0,79 l/m³. L'équivalent essence d'énergie primaire de l'électricité (mix des consommateurs) est de 0,22 l/kWh, celui des fournisseurs sur la base des garanties d'origines est de 0,17 l/kWh.

Les émissions fossiles de dioxyde de carbone de la production d'essence et de diesel s'élèvent à 527 g de CO₂/l, respectivement à 508 g de CO₂/l. La production de gaz naturel (20% de biogaz) et d'hydrogène délivrés par les stations-service suisses provoque des émissions de dioxyde de carbone de 298 g de CO₂/m³, respectivement de 223 g de CO₂/m³. Les émissions fossiles de dioxyde de carbone du mix électrique Suisse (mix d'électricité effectivement livrée aux consommateurs) à partir d'une prise à basse tension s'élèvent à 94 g de CO₂/kWh, celle du mix d'électricité des fournisseurs suisses sur la base des garanties d'origines s'élèvent à 22,5 g de CO₂/kWh.

Sintesi

L'etichetta Energia per le automobili ha lo scopo di dichiarare l'efficienza energetica e le emissioni di CO₂ delle automobili. Sull'etichetta sono indicate la categoria di efficienza energetica, il consumo normalizzato e le emissioni di CO₂. La categoria di efficienza energetica viene determinata in base al cosiddetto equivalente benzina per l'energia primaria. Per il calcolo dell'equivalente benzina per l'energia primaria relativo alla messa a disposizione del carburante e dell'energia elettrica viene preso in considerazione il consumo di energia dalla fonte (ad esempio l'estrazione del petrolio) alla raffinazione fino al serbatoio (well-to-tank). Le emissioni di CO₂ derivanti dalla messa a disposizione del carburante e dell'energia elettrica sono calcolate con lo stesso fattore e devono essere indicate nei listini prezzi e nei configuratori online -. Le emissioni di CO₂ dirette derivanti dalla combustione dei carburanti nei veicoli sono indicate separatamente. Per calcolare le categorie di efficienza, i veicoli vengono infine valutati sulla base dell'intera catena energetica, ovvero dalla fonte energetica fino alla ruota (well-to-wheel).

Nel presente studio vengono aggiornati gli indicatori ambientali relativi alla messa a disposizione dei principali carburanti e del mix elettrico svizzero. Gli indicatori rappresentano i dati di base per l'etichetta Energia per automobili e per la determinazione delle categorie di efficienza energetica. Per il calcolo degli indicatori ambientali per l'etichetta Energia sono stati utilizzati i più recenti dati dell'ecobilancio UVEK DQRv2:2022, a cui fanno capo anche gli Uffici federali.

La benzina è definita come carburante di riferimento ed ha pertanto un equivalente benzina per l'energia primaria pari a 1.00 l/l, mentre quello del bioetanolo (E85) è di 1.66 l/l. L'equivalente per il diesel, che è leggermente superiore rispetto a quello per la benzina, si attesta a 1.09 l/l. Tra i carburanti gassosi considerati, l'idrogeno da stazioni di rifornimento svizzere presenta il minore equivalente benzina per l'energia primaria (0.66 l/m³); tale valore può tuttavia variare notevolmente a seconda del processo di produzione e del mix elettrico impiegato. Il gas naturale messo a disposizione nelle stazioni di rifornimento svizzere, al quale è aggiunto almeno il 20 per cento di biogas, ha un equivalente benzina per l'energia primaria pari a 0.79 l/m³. L'equivalente benzina per l'energia primaria del mix elettrico (mix di energia elettrica dei consumatori) è pari a 0.17 l/kWh, quello dei fornitori svizzeri a 0.22 l/kWh.

Le emissioni di biossido di carbonio fossile della produzione di benzina e di diesel sono compresi tra 527 g CO₂/l e 508 g CO₂/l. La messa a disposizione di gas naturale / biogas 20 % e di idrogeno da stazioni di rifornimento svizzere genera emissioni di biossido di carbonio pari rispettivamente a 298 g CO₂/m³ e a 223 g CO₂/m³. Le emissioni di biossido di carbonio fossile generate dal mix elettrico (mix di energia elettrica dei consumatori) a partire da una presa di corrente a bassa tensione sono pari a 94 g CO₂/kWh, quelle dei fornitori svizzeri a 22.5 g CO₂/kWh .

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
2	INDICATEURS DE L'ÉTIQUETTE-ÉNERGIE	2
2.1	Approche du «puits de réservoir»	2
2.2	Unités de mesure	2
2.3	Base de données	3
3	PRODUCTION DE CARBURANT	4
3.1	Vue d'ensemble	4
3.2	Essence et diesel	4
3.2.1	Extraction de pétrole	4
3.2.2	Raffinerie	4
3.2.3	Stations-service	6
3.3	Gaz naturel comprimé (GNC) / biogaz	7
3.4	Gaz de pétrole liquéfié (GPL)	8
3.5	Bioéthanol (E85)	8
3.6	Électricité: mix électrique production et échanges commerciaux 2020	8
3.7	Hydrogène	10
4	INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX DE L'ÉTIQUETTE-ÉNERGIE POUR LES VOITURES DE TOURISME	13
4.1	Vue d'ensemble	13
4.2	Valeurs spécifiques des carburants	13
4.3	Équivalents essence d'énergie primaire	14
4.4	Besoins en énergie primaire et émissions de CO ₂	16
4.5	Parts des processus	17
4.5.1	Carburants	17
4.5.2	Électricité (mix électrique des consommateurs 2020)	20
4.6	Comparaison avec l'année précédente et raisons des changements	23
A	ANNEXE: MIX ÉLECTRIQUE DES FOURNISSEURS SUISSES 2020 BASÉ SUR LES GO	27
A.1	Modélisation et composition du mix électrique	27
A.2	Parts des processus	28
	BIBLIOGRAPHIE	31

1 Introduction

L'étiquette-énergie pour les voitures de tourisme est un outil destiné à informer les acheteurs d'un véhicule sur son efficacité énergétique et sur l'impact climatique de ses émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Elle permet en outre de comparer l'efficacité énergétique de voitures de tourisme dont les types de propulsion sont différents. Les bases légales sont l'art. 44 de la loi sur l'énergie totalement révisée, entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2018 (LEne; Assemblée fédérale de la Confédération suisse 2016) en relation avec l'art. 12 et l'annexe 4.1 de l'ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique (OEEE; Conseil fédéral suisse 2018). L'annexe 4.1 définit la conception de l'étiquette, le calcul des limites de catégories et l'adaptation périodique des catégories d'efficacité énergétique aux progrès techniques. Le calcul se fait sur une base annuelle. L'entrée en vigueur intervient le 1^{er} janvier de l'année de validité. D'autres détails sont précisés dans l'ordonnance du DETEC sur les données relatives à l'efficacité énergétique des voitures de tourisme neuves (OEE-VT) (DETEC 2019).

L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) actualise chaque année les données de base de l'étiquette-énergie pour les voitures de tourisme. Les indicateurs environnementaux de la production de carburant et d'électricité se basent sur la liste des données des écobilans du DETEC DQRv2:2022 (KBOB et al. 2022). Les indicateurs suivants sont calculés pour l'étiquette-énergie 2022: besoins en énergie primaire, impact environnemental global, émissions de gaz à effet de serre et émissions de dioxyde de carbone (CO₂) liées à la fourniture de carburant et d'électricité.

La présente étude décrit et aborde les données actualisées des inventaires et les indicateurs environnementaux de la production des principaux carburants et du mix d'électricité suisse. Ces inventaires ont été intégrés dans la liste des données des écobilans du DETEC DQRv2:2022 dans le but d'actualiser les indicateurs environnementaux à la base de l'étiquette-énergie pour les voitures de tourisme. Les inventaires des produits de raffinage suisses et européens reposent sur les données du mix de provenance actuel du pétrole brut transformé. La part des carburants importés de même que leur provenance et les distances de transport ont été recalculées pour la production d'essence et de diesel en Suisse. Les inventaires du mix électrique des fournisseurs suisses basés sur les garanties d'origine et de l'hydrogène fourni dans les stations-service publiques suisses (mix du marché de l'hydrogène, origine de l'électricité utilisée dans les installations d'électrolyse) ont également été actualisés. Les inventaires de l'extraction, du transport à longue distance et du raffinage du pétrole brut ainsi que de la production de produits raffinés (essence, diesel, etc.) qui sont utilisés dans le cadre de ce projet ont été publiés en 2018 (Jungbluth & Meili 2018; Jungbluth et al. 2018; Meili et al. 2018a; Meili et al. 2018b).

2 Indicateurs de l'étiquette-énergie

2.1 Approche du «puits de réservoir»

Le bilan environnemental de la production d'électricité et de carburant est établi selon l'approche «du puits au réservoir» («well to tank»). Il comprend les processus suivants :

- l'extraction des agents énergétiques primaires (pétrole brut, gaz naturel, houille, uranium, bois pour la production de bioéthanol ou d'électricité) et la production de biogaz;
- tous les processus de transformation et de conditionnement des combustibles (raffinage, distillation, épuration, enrichissement, traitement, etc.);
- tous les coûts de transport par pipeline, bateau, camion ou train jusqu'aux stations-service (carburants) et par les réseaux desservant la clientèle de courant à basse tension (électricité), y compris les pertes éventuelles;
- la construction, l'exploitation ainsi que le démantèlement et l'élimination des installations d'infrastructure telles que les plateformes d'exploitation en mer, pipelines, raffineries, centrales, lignes aériennes et stations-service.

L'impact environnemental de l'utilisation des carburants pour l'exploitation des voitures de tourisme n'est pas pris en compte dans la présente analyse. Les émissions de CO₂ générées par la combustion de carburant dans les voitures de tourisme figurent séparément sur l'étiquette-énergie. Elles ne sont donc pas comprises dans les inventaires de la production de carburant.

Les **besoins totaux en énergie primaire** des carburants et du mix d'électricité sont utilisés pour les catégories d'efficacité énergétique. Cet indicateur, qui se calcule par la somme de la teneur en énergie des ressources énergétiques extraites ou récoltées pour produire du carburant et de l'électricité (pétrole brut, gaz naturel, uranium, bois, force hydraulique), est indiqué en mégajoules (MJ).

Des indications sur les **émissions fossiles de CO₂** générées par la production de carburant et d'électricité doivent être en outre ajoutées dans les listes de prix et les configureurs en ligne. Ce gaz à effet de serre est produit lors de la combustion d'agents énergétiques fossiles et lors de la production de clinker. Les émissions de CO₂ sont indiquées en kilogrammes (kg) ou en grammes (g).

2.2 Unités de mesure

Le but de l'étiquette-énergie pour les voitures de tourisme est de comparer différents modèles et systèmes de propulsion quant à leurs besoins en énergie primaire et à leurs émissions de CO₂. La consommation de carburant des véhicules peut être indiquée par son volume (litres ou mètres cube), sa masse (kilogrammes) ou sa teneur énergétique (mégajoules ou kilowattheures).

La densité énergétique, qui indique la teneur énergétique d'un carburant par unité de volume, sert souvent de base pour comparer différents carburants.¹ L'unité des **équivalents essence (EqE)** établit un rapport entre les densités énergétiques des carburants et la densité énergétique de l'essence. Par exemple, la densité énergétique d'un carburant est de moitié celle de l'essence si son EqE est de 0,5. À rendement égal, le réservoir d'un véhicule fonctionnant à ce carburant devrait donc être deux fois plus grand que celui d'une voiture à essence pour atteindre la même autonomie.

Comme les équivalents essence, les **équivalents essence d'énergie primaire (EqE-EP)** peuvent être calculés pour les différents carburants. Au lieu de la densité énergétique, l'énergie primaire totale est indiquée en fonction du volume de carburant, l'essence restant la référence.

Le **facteur d'énergie primaire** se définit comme le rapport entre les besoins totaux en énergie primaire d'un carburant et son pouvoir calorifique inférieur. Il s'exprime en MJ EqPét/MJ. Plus le facteur d'énergie primaire d'un carburant s'approche de 1,0, moins il a fallu dépenser d'énergie primaire pour la production d'énergie en sus de sa teneur énergétique (cf. chap. 4).

2.3 Base de données

La liste actualisée des données des écobilans du DETEC DQRv2:2022 (KBOB et al. 2022), utilisée par les offices fédéraux, est une base de données centrale permettant de calculer les indicateurs environnementaux de la production de carburant et d'électricité. La modélisation se fait selon les règles de comptabilisation de la KBOB (KBOB et al. 2021) qui reposent sur les règles de comptabilisation des bases de données ecoinvent v1&v2. D'autres bases de données spécifiques aux carburants ou à l'électricité sont mentionnées dans les sections du chapitre 3.

¹ Le volume de carburant liquide (essence, diesel, gaz de pétrole liquéfié [GPL], E-85) est indiqué en litres, tandis que celui de carburant gazeux (gaz naturel comprimé [GNC], hydrogène) est exprimé en mètres cube. La densité énergétique ne peut pas être calculée pour l'électricité. S'agissant de l'étiquette-énergie, on utilise une densité énergétique de 1 kWh/kWh pour calculer les équivalents essence de l'électricité.

3 Production de carburant

3.1 Vue d'ensemble

Ce chapitre comprend des informations essentielles sur les écobilans de la production d'électricité, d'hydrogène et des carburants suivants: essence et diesel, gaz naturel comprimé, gaz liquéfié, bioéthanol. Les écobilans de l'essence, du diesel, du gaz naturel et de l'électricité ont été actualisés récemment. C'est pourquoi leur description est plus détaillée que celle des autres carburants. Les nouvelles données publiées début juin 2021 concernant la production de pétrole brut n'ont pas pu être prises en compte.

3.2 Essence et diesel

3.2.1 Extraction de pétrole

Le pétrole brut traité par la raffinerie suisse de Cressier en 2021 a été extrait au Nigéria, au Kazakhstan, en Afrique du Nord et aux États-Unis (Avenergy Suisse 2022, cf. également Tableau 3.1). Le pétrole brut traité par les raffineries européennes provient de nettement plus de régions et de pays (cf. Tableau 3.2). Les inventaires de l'extraction de pétrole dans des régions et des pays de production importants ont été récemment actualisés (Meili et al. 2018a). Ils sont intégrés dans la liste des données des écobilans du DETEC DQRv2:2022. Les inventaires actualisés en 2019 sont utilisés pour l'extraction de brut en Afrique du Nord (Libye et Algérie), en Grande-Bretagne et en Azerbaïdjan (Stolz & Frischknecht 2019).

3.2.2 Raffinerie

L'essence et le diesel fournis par les stations-service suisses sont des carburants produits par la raffinerie suisse de Cressier ou importés d'Europe. Le mix de provenance du pétrole brut traité dans la raffinerie suisse resp. les raffineries d'Europe a été déterminé sur la base des statistiques actuelles d'Avenergy Suisse (2022) et de l'Agence internationale de l'énergie (AIE 2022).

Le pétrole brut traité par la raffinerie suisse en 2021 provenait du Nigéria (39,5%, incl. Côte d'Ivoire), des États-Unis (31,5%) d'Afrique du Nord (Libye: 24,5%, Algérie: 1,8%) et du Kazakhstan (2,7%) (Avenergy Suisse 2022). Les quantités de pétrole brut importées des différentes régions de production et les distances de transport sont répertoriées dans le Tableau 3.1. Les distances de transport à longue distance de pétrole brut provenant des différentes régions de production sont fournies par Meili et al. (2018b).

Le pétrole brut extrait au Nigeria est transporté par pipeline sur une distance de 160 km jusqu'à la côte, puis transbordé sur un pétrolier. Celui-ci achemine le pétrole brut jusqu'à

Marseille. Le pétrole brut du Kazakhstan passe par un pipeline jusqu'à la mer Noire (Novorossiïsk) avant d'être transporté par pétrolier jusqu'à la mer Méditerranée. En ce qui concerne l'Afrique du Nord, on présume que le pétrole brut est transporté jusqu'à la côte par un pipeline d'une longueur de 120 km. Il est ensuite acheminé par pétrolier jusqu'à Fos-sur-Mer près de Marseille. Le pétrole brut déchargé à Marseille est amené par un pipeline onshore sur une distance de 600 km jusqu'à la raffinerie en Suisse (Meili et al. 2018b).

Tableau 3.1 Mixe de provenance en 2021 et distances de transport du pétrole brut traité à la raffinerie suisse de Cressier (Avenergy Suisse 2022; Meili et al. 2018b; calculs propres).

Rohöl Schweiz	Herkunftsmix		Pipeline	Tanker
	kt	%	km	km
Nordafrika	606'827	26.2%	1'220	1'150
Nigeria	914'198	39.5%	760	8'000
USA	728'332	31.5%	1'870	10'100
Kasachstan	62'366	2.7%	2'560	3'700
Total	2'311'723	100.0%	1'279	6'747

La provenance du pétrole brut traité dans les raffineries européennes diffère sensiblement du mix suisse (cf. Tableau 3.2). Les principaux pays et régions de provenance sont la Russie (28,2%), la Norvège (11,4%), les États-Unis (10,2%), l'Afrique du Nord (10,0%), le Nigéria et d'autres pays d'Afrique australe (8,6 %), l'Iraq (8,5 %), la Grande-Bretagne (6,7 %), l'Arabie saoudite (4,9 %) et le Kazakhstan (4,7 %) (AIE 2022). Le reste du pétrole brut traité par les raffineries européennes est importé d'Asie centrale et d'Amérique du Sud. Les distances de transport pour les pipelines et les pétroliers se basent en grande partie sur les données de Meili et al. (2018b) (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 Mix de provenance 2021 et distances de transport du pétrole brut traité dans les raffineries européennes (AIE 2022; Meili et al. 2018b; calculs propres).

Rohöl Europa	Herkunftsmix		Pipeline	Tanker
	kt	%	km	km
Nordafrika	53'639	10.0%	720	1'150
Nigeria / südliches Afrika	46'171	8.6%	260	8'000
Saudi-Arabien	26'364	4.9%	1'420	4'100
Irak	45'554	8.5%	1'070	2'900
USA	54'644	10.2%	1'370	9'700
Mexiko	7'687	1.4%	360	10'000
Südamerika	14'957	2.8%	430	8'570
Norwegen	61'240	11.4%	500	1'050
Grossbritannien / Europa	35'815	6.7%	100	1'000
Russland	150'689	28.2%	3'600	0
Kasachstan	25'402	4.7%	2'060	3'700
Aserbaïdschan	10'333	1.9%	1'700	3'700
Übrige Förderregionen	2'806	0.5%	1'620	3'061
Total	535'301	100.0%	1'620	3'061

Les inventaires de la production de produits pétroliers dans la raffinerie suisse et les raffineries européennes ont été actualisés par Jungbluth et al. (2018) et intégrés dans la liste

des données des écobilans du DETEC DQRv2:2022. Les besoins en pétrole brut des raffineries sont alloués aux différents produits en fonction du pouvoir calorifique.

3.2.3 Stations-service

Les parts de la raffinerie suisse et des raffineries européennes dans l'essence et le diesel fournis en Suisse ont été actualisées sur la base des statistiques d'Avenergy Suisse (2022). En 2021, 26,2% de l'essence et 29,9% du diesel ont été produits dans la raffinerie suisse (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 Mix de provenance de l'essence et du diesel dans les stations-service suisses en 2021 (Avenergy Suisse 2022).

Herkunftsmix	Benzin		Diesel	
	kt	%	kt	%
Schweiz	522	26.2%	1'196	29.9%
Europa	1'471	73.8%	2'805	70.1%
Total	1'993	100.0%	4'002	100.0%

En plus de la part des importations, l'étude a réexaminé les distances de transport pour l'importation d'essence et de diesel en Suisse avec différents moyens de transport. La statistique de provenance et la statistique des moyens de transport de l'Union pétrolière ont servi de base pour ces calculs (Avenergy Suisse 2022). Les deux principaux pays d'origine pour l'importation d'essence en Suisse sont l'Allemagne (78,8%) et l'Italie (10,1%). Le diesel importé est principalement produit en Allemagne (55,9%), aux Pays-Bas (20,5%) ainsi qu'en Belgique et au Luxembourg (13,1%). La statistique des moyens de transport recense, pour les différents pays d'origine, les moyens de transport au passage de la frontière en Suisse. Une grande partie des produits, en particulier en provenance des raffineries allemandes, est transportée en Suisse par le rail. L'acheminement des importations d'essence et de diesel par camion (Italie), transport fluvial (Pays-Bas, Belgique, Luxembourg) et pipeline (France) est également important. Les plus grandes raffineries ont été identifiées pour chaque pays d'origine et les distances de transport vers la Suisse calculées à l'aide de Google Maps. Le mix de provenance de l'essence et du diesel a été combiné avec les données relatives aux moyens de transport pour les importations en Suisse, afin de déterminer la distance de transport moyenne pour chaque moyen de transport (cf. Tableau 3.4). En accord avec Jungbluth und Meili (2018), une distance de transport moyenne de 50 km par camion et de 30 km par le rail a été admise pour la distribution régionale des produits en Suisse.

Tableau 3.4 Distances de transport et moyens de transport pour l'importation d'essence et de diesel à partir des raffineries européennes à destination des stations-service suisses en 2021, sur la base des données d'Avenergy Suisse (2022) et de calculs propres

Transportdistanzen	Benzin	Diesel
	km	km
Bahn	173	155
Lastwagen	67	35
Binnenschiff	207	329
Flugzeug	0	0
Pipeline	1	34
Hochseetanker	0	11
Regionalverteilung Bahn	30	30
Regionalverteilung Lastwagen	50	50
Total	528	643

3.3 Gaz naturel comprimé (GNC) / biogaz

Le bilan écologique de la production de gaz naturel fourni par les stations-service suisses comprend l'extraction du gaz naturel, le transport à longue distance par pipeline et méthanier, la distribution fine en Suisse ainsi que la compression et le ravitaillement aux stations-service. Les données d'écobilan les plus récentes pour la production de gaz naturel décrivent la situation de production et d'approvisionnement pour l'année 2010 et sont documentées en détail par Bauer et al. (2012). Les données des inventaires de la production combinée de pétrole et de gaz naturel en Norvège ont été actualisées par Meili et al. (2018a).

Le gaz naturel utilisé en Suisse provient de Russie (31,4%), des Pays-Bas (27,3%), de Norvège (26,5%), d'Allemagne (8,1%), d'Afrique du Nord (2,4%), de Grande-Bretagne (2,2%), du Nigéria (1,3%) et du Moyen-Orient (0,9%). 3% des livraisons de gaz naturel se font par méthanier. Les fuites de gaz naturel dans le réseau de transport russe représentent environ 1,3% du volume de gaz naturel livré en Europe. En Suisse, 0,7% du gaz naturel est nécessaire pour assurer la compression dans le réseau à haute pression et près de 0,4% est en outre perdu dans le réseau à basse pression en raison de fuites. En comparaison, les pertes de méthane lors du ravitaillement sont négligeables.

Le gaz naturel proposé par les stations-service suisses comprend une part d'au moins 20% de biogaz. Le biogaz traité est produit à partir de boues d'épuration (61,0%), de déchets verts (37,4%) et d'installations de biogaz agricoles (1,6%) (Kägi et al. 2021). Comme le biogaz est produit à partir de déchets, la teneur énergétique et l'impact environnemental sont classés dans les déchets traités. C'est pourquoi le biogaz a une teneur en énergie primaire de 0 MJ. Les dépenses liées au traitement et à la distribution du biogaz sont toutefois prises en compte dans l'écobilan. En font partie la construction de l'installation de biogaz et du pipeline, la production d'électricité, de gaz naturel et d'auxiliaires pour le traitement ainsi que les émissions polluantes provenant de la transformation et des fuites. La valorisation du biogaz en biométhane se fait par adsorption à pression alternée (PSA), lavage aux amines ou méthode de séparation membranaire. La production annuelle des

installations de traitement qui ont injecté du biométhane dans le réseau de gaz naturel en 2020 correspond au mix technologique suivant: 15,7,% pour l'adsorption à pression alternée, 57,8% pour le lavage aux amines et 26,5% pour la méthode de séparation membranaire (Kägi et al. 2021).

3.4 Gaz de pétrole liquéfié (GPL)

Le gaz de pétrole liquéfié ou GPL («liquefied petroleum gas», LPG) est produit dans les raffineries de pétrole. Il se compose d'un mélange de propane et de butane. L'écobilan de la production du gaz liquéfié fourni par les stations-service suisses comprend, par analogie à l'essence et au diesel, l'extraction du pétrole, le transport à longue distance du pétrole brut jusqu'aux raffineries ainsi que la distribution fine du produit aux stations-service et le ravitaillement (cf. point 3.2 et Hischier et al. 2010). Les inventaires actualisés de l'extraction, du transport et du raffinage du pétrole brut (Meili et al. 2018a, 2018b; Jungbluth et al. 2018) sont intégrés dans la liste des données des écobilans du DETEC DQRv2:2022 (cf. point 3.2). En 2021, la part du gaz de pétrole liquéfié produit en Suisse atteignait 45,2%, le reste (54,8%) étant importé.

3.5 Bioéthanol (E85)

Le bioéthanol se compose à 85%-vol. d'éthanol et à 15%-vol. d'essence. L'éthanol peut être produit à partir de plusieurs matières premières. L'éthanol figurant dans l'écobilan est fabriqué en Suède à partir de bois. Pour une tonne d'éthanol (95%, en eau), il faut environ 9 m³ de copeaux de bois. La production de bioéthanol comprend l'exploitation du bois ainsi que la production d'éthanol en Suède, le transport par le rail en Suisse, la distribution fine par camion en Suisse et le ravitaillement aux stations-service. Les inventaires sont documentés par Jungbluth et al. (2007). Les inventaires de la production de bois ont été actualisés par Werner (2017). La production de l'essence incorporée est décrite au point 3.2.

3.6 Électricité: mix électrique production et échanges commerciaux 2020

L'écobilan de la production d'électricité en Suisse comprend la construction, l'exploitation, le démantèlement et l'élimination des centrales, y compris la fabrication des matériaux. La fourniture et l'élimination des combustibles, y compris l'extraction et le transport jusqu'aux centrales, sont aussi prises en compte. La construction de l'infrastructure du réseau électrique ainsi que les pertes électriques survenant lors du transport et de la distribution sont prises en considération jusqu'à la prise à basse tension.

Dans l'étiquette-énergie pour les voitures de tourisme, la production d'électricité se fonde désormais sur le mix électrique des consommateurs suisses. Ce mix électrique représente l'électricité livrée aux clients finaux suisses en 2020. Il correspond au mix électrique

suisse par défaut qui doit être utilisé dans les écobilans conformément aux règles de comptabilisation de la KBOB et al. (2021).

Le mix électrique des consommateurs suisses 2020 a été déterminé sur la base de la production indigène et des échanges commerciaux (cf. aussi Frischknecht et al. 2020; Krebs & Frischknecht 2020). Le volume d'électricité produit dans le pays et destiné aux consommateurs nationaux a été déterminé pour chaque heure de l'année, en déduisant le volume des exportations commerciales du volume de production. Le mix de production national de la même heure a été attribué à ce volume d'électricité. Les importations commerciales en provenance des pays voisins (Allemagne, France, Italie et Autriche) ont été modélisées à l'aide des mix de production horaires nationaux respectifs de ces pays.

Les données relatives à la production d'électricité et aux échanges d'électricité proviennent de ENTSO-E transparency platform². Les données utilisées concernant la consommation d'électricité de la Suisse en 2020 (valeurs enregistrées chaque quart d'heure dans le fichier Statistique de l'énergie suisse 2020) ont été publiées par Swissgrid³.

La consommation et le mix d'électricité pour les centrales de pompage-turbinage ont été déterminés en multipliant la production horaire par le facteur 1,25 et en la caractérisant avec les parts technologiques de la production d'électricité des 12 heures précédentes.

Le mix des consommateurs en résultant représente environ le mix des technologies pour la production des volumes d'électricité achetés par les entreprises suisses d'approvisionnement en électricité et par les entreprises ayant accès au marché libéralisé de l'électricité en 2020.

Les parts des technologies diffèrent sensiblement de celles du mix électrique des fournisseurs suisses basé sur les garanties d'origine (GO) en 2020 (cf. annexe A): les parts de l'énergie nucléaire (près de 38%) et des centrales fossiles (près de 9%) sont nettement plus élevées (respectivement de 18 points de pourcentage et de 8 points de pourcentage) et la part de la force hydraulique (près de 35%) est inférieure de 30,5 points de pourcentage (cf. Tableau 3.5 et Tableau A.1) par rapport au mix de catégories d'électricité fournies aux clients finaux suisses.

² <https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show> (accès aux données en avril 2022). Production: actual generation per production type, 1.1.-31.12.2020; échanges: scheduled commercial exchanges.

³ <https://www.swissgrid.ch/fr/home/operation/grid-data/generation.html> (accès aux données en avril 2022)

Tableau 3.5 Mix électrique des consommateurs suisses 2020 sur la base de l'intégration des valeurs horaires de la production et des échanges commerciaux (résumé)

Technologie	Parts	dont en Suisse
Lignite	1,87%	0,00%
Houille	1,02%	0,00%
Gaz naturel	5,53%	0,00%
Autres énergies fossiles	0,89%	0,45%
Énergie nucléaire	37,86%	16,42%
Centrales de pompage-turbinage	2,94%	2,02%
Biomasse	2,72%	1,40%
Force hydraulique	35,35%	27,09%
Énergie éolienne	6,64%	0,11%
Photovoltaïque	4,02%	2,11%
Déchets	1,18%	0,83%
Total	100,0%	50,4%

L'annexe A décrit le mix électrique des fournisseurs suisses basé sur les garanties d'origine (GO) en 2020 et quantifie son impact sur l'environnement .

3.7 Hydrogène

L'écobilan de la production d'hydrogène comprend la production de l'hydrogène, le transport de l'hydrogène produit de manière centralisée (importation et livraison) ainsi que la compression et le ravitaillement aux stations-service. Les inventaires pour la fourniture d'hydrogène aux stations-service suisses sont documentés par Tschümperlin et Frischknecht (2017).

Pour la production d'hydrogène destiné à servir de carburant, deux procédés sont considérés: l'électrolyse de l'eau et le vaporeformage du méthane (SMR). L'électrolyse de l'eau consiste à diviser l'eau en hydrogène et en oxygène par un courant électrique. Plusieurs types d'électrolyseur peuvent être utilisés, par exemple un électrolyseur à membrane échangeuse de protons (électrolyseur PEM), qui fonctionne avec de l'eau désionisée, ou un électrolyseur alcalin, qui a besoin de potasse comme électrolyte. En raison de la forte consommation d'électricité (64,5 kWh par kg d'hydrogène, Tschümperlin & Frischknecht 2017), le mix électrique utilisé pour l'électrolyse de l'eau est très important au regard de l'impact environnemental de l'hydrogène produit. Plusieurs mix électriques concernant la production centralisée et décentralisée d'hydrogène ont été analysés pour le processus d'électrolyse de l'eau. L'électricité à la sortie d'une centrale hydroélectrique peut être utilisée pour la production centralisée d'hydrogène (production sur le site de la centrale hydroélectrique).

S'agissant du SMR, le gaz naturel, qui se compose principalement de méthane, et la vapeur d'eau sont transformés en hydrogène et en dioxyde de carbone. L'inventaire

correspondant est en grande partie repris de Simons et Bauer (2011). Le rendement de conversion par rapport au pouvoir calorifique supérieur s'élève à 79,2% et le dioxyde de carbone produit n'est pas réutilisé et émis.

L'hydrogène produit de manière centralisée est acheminé par camions de 32 tonnes (camions à remorque), qui peuvent transporter 338 kg d'hydrogène au maximum sur une distance moyenne de 75 km jusqu'aux stations-service. Dans les stations-service, l'hydrogène est électriquement comprimé de 30 à 880 bars. Une pression de 880 bars est nécessaire pour garantir dans tous les cas une pression de 700 bars à une température de 15 °C dans le réservoir plein du véhicule (Bünger et al. 2014).

La Suisse compte désormais dix stations-service à hydrogène, dont neuf sont accessibles au public. Les stations-service accessibles au public se trouvent à Zofingue, Rümlang, Rothenburg, Hunzenschwil, Crissier, Berne, Frenkendorf, Geensee, Gossau et Müntschemier. Elles sont exploitées par Coop, Avia, Agrola resp. Schwab-Guyot.⁴ Les deux stations-service de Frenkendorf et Gossau ont été mises en exploitation en 2022.

Les stations-service accessibles au public sont approvisionnées en hydrogène par Hydros spider. Selon les déclarations d'Hydros spider, l'hydrogène est soit produit dans sa propre installation d'électrolyse à 2 MW située près de la centrale hydroélectrique au fil de l'eau d'Alpiq à Gösgen, soit acheté à des tiers. L'hydrogène acheté à des tiers provient de Suisse et des pays voisins. Il est soit vert (car produit avec de l'électricité assortie de garanties d'origine, GO), soit gris, les émissions de CO₂ produites étant compensées.⁵ Le mix d'origine de l'hydrogène vendu dans les stations-service accessibles au public en Suisse n'est pas communiqué en détail. La capacité de l'installation de production sur le site de la centrale au fil de l'eau de Niedergösigen est suffisante pour couvrir 85% des besoins de l'année dernière.⁶ Pour des raisons de force majeure, ce taux de couverture est loin d'avoir pu être atteint en 2021, ce qui a entraîné l'achat de quantités non négligeables d'hydrogène vert et gris.⁷ Compte tenu de la situation exceptionnelle, le mix de production utilisé dans l'inventaire est déterminé sur la base de la capacité. En conséquence, 85% de la production venait de la centrale au fil de l'eau et l'hydrogène acheté était pour moitié vert (7,5%) et pour l'autre moitié gris (7,5%). Pour la production de l'hydrogène vert acheté, la production physique d'électricité et les GO ont été achetées séparément.

Pour l'hydrogène vert acheté, le mix électrique des consommateurs est utilisé conformément aux règles de comptabilisation de la KBOB (KBOB et al. 2021, ch. 6.6 et 6.7). Les certificats d'émission ne sont pas pris en compte dans l'écobilan de l'hydrogène

⁴ <https://hydros spider.ch/tankstellen/>, consulté le 20.05.2022.

⁵ Communications personnelles de Nicolas Crettenand, Hydros spider AG, du 14.04. au 12.05.2022

⁶ Communication personnelle de Philipp Dietrich, CTO H₂ Energy Holding, à Christoph Schreyer, OFEN, 3 juin 2022

⁷ Communication personnelle de Rolf Moser, président du conseil d'administration, H₂ Energy Holding, à Christoph Schreyer, OFEN, 3 juin 2022

produit par reformage du méthane, en vertu des règles de comptabilisation de la KBOB (KBOB et al. 2021, ch. 6.7).

L'hydrogène est acheminé par camions-remorques aux stations-service accessibles au public.

Il existe en outre une station-service à hydrogène semi-publique de l'Empa à Dübendorf. Pour y accéder, les particuliers doivent préalablement demander un badge et peuvent ainsi faire le plein d'hydrogène en tout temps. L'hydrogène de la station-service de l'Empa est également produit par électrolyse PEM et comprimé à un niveau de pression de 700 bars pour les voitures de tourisme.⁸ L'électricité utilisée pour l'électrolyse est produite à 2,5% par une installation photovoltaïque interne, à 7,2 % dans sa propre centrale de cogénération (biogaz 26 %, gaz naturel 74 %) et à 90,3% par une centrale au fil de l'eau à Eglisau.⁹

Fin 2021, selon le portail European Alternative Fuels Observatory, il y avait en Suisse 200 voitures à pile à combustible.¹⁰ Quelque 14 250 kg d'hydrogène à 700 bars ont été achetés en 2021 pour des voitures de tourisme aux stations-service à hydrogène accessibles au public, tandis que 3350 kg d'hydrogène à 700 bars étaient achetés à la station-service semi-publique de Dübendorf.¹¹ Les stations-service accessibles au public couvrent donc près de 81% de l'hydrogène acheté dans des stations-service de Suisse pour des voitures de tourisme. Les 19% restants sont mis à disposition par la station-service semi-publique de l'Empa, à Dübendorf.

Le mix d'hydrogène à la pompe en Suisse en 2021 était issu à 6,1% du reformage du méthane et à 93,9% de l'électrolyse. Dans le cadre de l'électrolyse, 68,9% de l'hydrogène est produit de manière centralisée avec de l'électricité issue de la force hydraulique, 6,1% est produit de manière centralisée avec le mix électrique des consommateurs suisses, 17,1% est produit de manière décentralisée avec de l'électricité issue de la force hydraulique, 1,4% est produit de manière décentralisée grâce à l'électricité d'une centrale de cogénération (environ trois quarts de gaz naturel et un quart de biogaz) et 0,4% est produit de manière décentralisée avec de l'électricité photovoltaïque.

⁸ Communication personnelle de Christian Bach, Empa, 28.04.2020.

⁹ Communication personnelle de Christian Bach, Empa, 03.05.2022.

¹⁰ <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/switzerland/vehicles-and-fleet>, consulté le 20.05.2022.

¹¹ Communications personnelles des exploitants de stations-service à hydrogène (Agrola, Avia, Coop, Schwab-Guyot), mai 2022 et de Christian Bach, Empa, mai 2022; la quantité d'hydrogène achetée à la pompe pour des voitures de tourisme dans les stations-service Coop a été estimée, en se basant sur la part au niveau du volume total des ventes dans d'autres stations-service.

4 Indicateurs environnementaux de l'étiquette-énergie pour les voitures de tourisme

4.1 Vue d'ensemble

Ce chapitre décrit dans un premier temps les valeurs spécifiques (pouvoir calorifique, densité) des carburants sous revue (point 4.2). Puis il analyse les équivalents essence d'énergie primaire qui en découlent sur la base des écobilans (point 4.3) ainsi que les besoins en énergie primaire et les émissions de CO₂ (point 4.4). Le point 4.5 décrit les parts des différentes étapes de traitement aux émissions totales de CO₂ et aux besoins en énergie primaire. Le point 4.6 résume les équivalents essence d'énergie primaire et les émissions de dioxyde de carbone de la production de carburant et d'électricité et il décrit les principales raisons des changements par rapport à l'année précédente.

4.2 Valeurs spécifiques des carburants

La densité et le pouvoir calorifique des carburants pris en compte dans l'étiquette-énergie se basent, à l'exception du GNC (10% de biogaz), du GNC (20% de biogaz) et de l'hydrogène, sur les valeurs utilisées pour l'inventaire suisse des gaz à effet de serre (OFEV 2019). Les valeurs spécifiques des carburants examinés figurent dans la colonne de gauche du Tableau 4.1. La densité et le pouvoir calorifique de l'hydrogène ne sont pas compris dans les valeurs spécifiques de l'OFEV (2019): ils se fondent sur les valeurs publiées dans l'ouvrage de référence de thermodynamique de Baehr (1989). Pour le GNC (10% et 20% de biogaz), tant les valeurs spécifiques à la base des inventaires de la production de gaz naturel et de biogaz comprises dans la liste des données des écobilans du DETEC DQRv2:2022 que celles du carburant test (100% de méthane) sont utilisées. Un correctif de consommation standard est en outre appliqué. La procédure est expliquée ci-dessous.

Pour les voitures de tourisme roulant au gaz naturel, la mesure de consommation standard est réalisée avec un carburant test qui, se composant à 100% de méthane, diffère du carburant fourni par les stations-service suisses. La densité et le pouvoir calorifique du carburant test utilisé pour le calcul de l'équivalent essence et de l'équivalent essence d'énergie primaire du GNC (10% et 20% de biogaz) se basent sur les données de l'Empa.¹²

Le gaz naturel et le biogaz figurant dans les inventaires de la liste des données des écobilans du DETEC DQRv2:2022 se basent sur la composition des carburants vendus en Suisse. La densité et le pouvoir calorifique utilisés dans les inventaires de la production

¹² Communication personnelle de Christian Bach, Empa, 13.05.2020.

de gaz naturel et de biogaz s'écartent des valeurs spécifiques du carburant test décrites ci-dessus. Les différences dans les valeurs spécifiques ont été prises en compte dans le calcul de l'équivalent essence d'énergie primaire du GNC (10% et 20% de biogaz). Les besoins spécifiques en énergie primaire par kilogramme de gaz naturel sont divisés par le pouvoir calorifique utilisé dans les inventaires (facteur d'énergie primaire, cf. Tableau 4.1), puis multipliés par le pouvoir calorifique du carburant test. Cette solution permet de garantir que la quantité d'énergie du gaz naturel extrait ou du biogaz produit coïncide avec la consommation d'énergie des voitures de tourisme roulant au gaz naturel.

Pour calculer la consommation normalisée des voitures de tourisme roulant au gaz naturel qui est indiquée sur l'étiquette-énergie, les émissions de toutes les matières carbonées sont mesurées en grammes de carbone, converties stoechiométriquement en grammes de méthane et, avec une densité normalisée, converties en normomètres cubes (Nm^3) (Commission européenne 2017)¹³. Cette densité est de presque 3,7% plus faible que la densité du carburant test utilisé. L'indication de la consommation normalisée sur l'étiquette-énergie des voitures de tourisme roulant au gaz naturel est ainsi trop élevée. Le correctif de consommation standard appliqué pour corriger l'indication exagérée de consommation de carburant des voitures de tourisme roulant au gaz naturel correspond au rapport entre la densité normalisée et la densité du carburant test. Le correctif de consommation standard s'applique au calcul de l'équivalent essence et de l'équivalent essence d'énergie primaire du GNC (10% et 20% de biogaz).

4.3 Équivalents essence d'énergie primaire

Les équivalents essence permettent de comparer les carburants fournis à la pompe ou le courant de charge, quant à leur densité énergétique, avec l'essence prise comme carburant de référence (cf. point 2.2). Le diesel et le gaz naturel comprimé (GNC [10% et 20% de biogaz]) ont un équivalent essence respectif de 1,14 l/l et de 1,03 l/m³. L'équivalent essence de l'hydrogène s'élève à 0,34 l/m³, alors que l'électricité présente un équivalent essence de 0,11 l/kWh.

Les équivalents essence d'énergie primaire tiennent compte des processus en amont de la production de carburant et d'électricité. Ils permettent ainsi de comparer l'efficacité énergétique de voitures de tourisme équipées de différents systèmes de propulsion. Partant, ils constituent la valeur pertinente pour déterminer la catégorie d'efficacité énergétique indiquée sur l'étiquette-énergie. Contrairement à l'équivalent essence des carburants, soit une mesure de leur densité énergétique qui doit être la plus élevée possible (autonomie accrue pour le même volume de réservoir), des valeurs plus faibles sont généralement un avantage pour les équivalents essence d'énergie primaire. Des besoins plus faibles en énergie primaire (c'est-à-dire un facteur d'énergie primaire ou un équivalent essence d'énergie primaire plus bas) signifient que l'extraction, le traitement et le transport d'un carburant jusqu'à la station-service requièrent moins d'énergie. Sur

¹³ Communication personnelle de Christian Bach Christian Bach, Empa, 01.06.2017.

l'étiquette-énergie, les facteurs d'énergie primaire englobent l'ensemble des besoins en énergie primaire, renouvelables et non renouvelables.

La colonne de droite du Tableau 4.1 comprend le facteur d'énergie primaire, les besoins spécifiques en énergie primaire ainsi que les équivalents essence d'énergie primaire des carburants. Le gaz naturel comprenant 20% de biogaz a le facteur d'énergie primaire spécifique le plus faible (1,04 MJ EqPét/MJ). Il est suivi du gaz naturel contenant 10% de biogaz, dont le facteur d'énergie primaire est de 1,1 MJ EqPét/MJ. Les facteurs d'énergie primaire de l'essence et du diesel s'élèvent respectivement à 1,35 et à 1,30 MJ EqPét/MJ. Le facteur d'énergie primaire comparativement élevé du bioéthanol (E85) (3,12 MJ EqPét/MJ) est principalement déterminé par la production de bois en forêt (82%), la distillation d'éthanol et la production d'essence ayant une importance mineure. Le facteur d'énergie primaire de l'hydrogène dépend fortement du procédé de fabrication et du mix électrique utilisé. L'hydrogène fabriqué de manière centralisée à partir du SMR a le facteur d'énergie primaire le plus faible (2,30 MJ EqPét/MJ), tandis que le facteur d'énergie primaire de l'hydrogène produit de manière décentralisée par électrolyse de l'eau avec le mix des fournisseurs est à peu près deux fois plus élevé (4,20 MJ EqPét/MJ). Le mix d'hydrogène moyen à la pompe en Suisse [68,9% est produit avec de l'électricité issue de la force hydraulique de manière centralisée, 6,1% est produit par reformage du méthane, 6,1% est produit de manière centralisée avec le mix électrique des consommateurs suisses, 17,1% est produit avec de l'électricité issue de la force hydraulique de manière décentralisée, 1,4% est produit de manière décentralisée grâce à l'électricité d'une centrale de cogénération (environ trois quarts de gaz naturel et un quart de biogaz) et 0,4% est produit avec de l'électricité photovoltaïque de manière décentralisée] a un facteur d'énergie primaire de 2,62 MJ EqPét/MJ. Le facteur d'énergie primaire de l'électricité s'élève à 2,55 MJ EqPét/kWh, respectivement à 9,18 MJ EqPét/kWh (base: mix électrique des consommateurs 2020). Le facteur d'énergie primaire du mix électrique des fournisseurs basé sur les garanties d'origine (GO) s'élève à 1,97 MJ EqPét/MJ, respectivement à 7,10 MJ EqPét/kWh.

Définie comme le carburant de référence pour les équivalents essence d'énergie primaire, l'essence a un équivalent de 1,00 l/l. L'équivalent essence d'énergie primaire du diesel est légèrement plus élevé que celui de l'essence (1,09 l/l). Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) et le gaz naturel comprimé (GNC) avec 10% et 20% de biogaz ont respectivement un équivalent essence d'énergie primaire de 0,80 l/l, 0,85 l/m³ et 0,79 l/m³. Le bioéthanol (E85) a l'équivalent essence d'énergie primaire le plus élevé (1,66 l/l). L'équivalent essence d'énergie primaire de l'hydrogène varie fortement en fonction du procédé de fabrication (SMR: 0,58 l/m³, électrolyse de l'eau avec mix électrique des consommateurs: 1,28 l/m³). En moyenne, l'équivalent essence d'énergie primaire de l'hydrogène fourni aux stations-service suisses s'élève à 0,66 l/m³. L'équivalent essence d'énergie primaire de l'électricité (mix électrique des consommateurs) est calculé comme le rapport entre le facteur d'énergie primaire et les besoins spécifiques en énergie primaire de l'essence. Il s'élève à 0,22 l/kWh. Celui du mix électrique des fournisseurs basé sur les garanties d'origine (GO) s'élève à 0,17 l/kWh.

Tableau 4.1 Valeurs spécifiques et besoins en énergie primaire des carburants normalisés de l'étiquette-énergie 2022. La densité, le pouvoir calorifique spécifique et la densité énergétique reposent sur les données de l'OFEV (2019) et de l'Empa^{12,13} (GNC [10% et 20% de biogaz]).

Treibstoff	Stoffkennwerte					Primärenergiekennwerte		
	Normverbrauchs-korrektur	Dichte	Spezifischer Heizwert	Energiedichte	Benzin-äquivalent	Primärenergie-faktor	Spezifische Primärenergie	Primärenergie-Benzinäquivalent
Benzin	1.000	0.737 kg/L	42.6 MJ/kg	8.72 kWh/L	1.00 L/L	1.35 MJ Öl-eq/MJ	42.5 MJ Öl-eq/L	1.00 L/L
Diesel	1.000	0.830 kg/L	43.0 MJ/kg	9.91 kWh/L	1.14 L/L	1.30 MJ Öl-eq/MJ	46.4 MJ Öl-eq/L	1.09 L/L
CNG / 10% Biogas	0.963	0.679 kg/m ³	49.7 MJ/kg	9.36 kWh/m ³	1.03 L/m ³	1.11 MJ Öl-eq/MJ	37.6 MJ Öl-eq/m ³	0.85 L/m ³
CNG / 20% Biogas	0.963	0.679 kg/m ³	49.7 MJ/kg	9.36 kWh/m ³	1.03 L/m ³	1.04 MJ Öl-eq/MJ	35.0 MJ Öl-eq/m ³	0.79 L/m ³
LPG (85% C ₃ H ₈)	1.000	0.540 kg/L	46.3 MJ/kg	6.94 kWh/L	0.80 L/L	1.36 MJ Öl-eq/MJ	34.0 MJ Öl-eq/L	0.80 L/L
E85	1.000	0.782 kg/L	29.0 MJ/kg	6.31 kWh/L	0.72 L/L	3.12 MJ Öl-eq/MJ	70.7 MJ Öl-eq/L	1.66 L/L
Elektrizität, Verbrauchermix 2020	*	*	*	1.00 kWh/kWh	0.11 L/kWh	2.55 MJ Öl-eq/MJ	9.18 MJ Öl-eq/kWh	0.22 L/kWh
Wasserstoff								
- Mix ab Schweizer Tankstelle	1.000	0.0899 kg/m ³	120 MJ/kg	3.00 kWh/m ³	0.34 L/m ³	2.62 MJ Öl-eq/MJ	28.2 MJ Öl-eq/m ³	0.66 L/m ³
Elektrizität HNK Lieferantenmix 2020	*	*	*	1.00 kWh/kWh	0.11 L/kWh	1.97 MJ Öl-eq/MJ	7.10 MJ Öl-eq/kWh	0.17 L/kWh

4.4 Besoins en énergie primaire et émissions de CO₂

Les besoins en énergie primaire et les émissions de dioxyde de carbone des carburants et de l'électricité sont déterminés selon l'approche «du puits au réservoir» («well to tank») expliquée au point 2.1. Ils comprennent les différents processus depuis l'extraction des ressources énergétiques (comme le pétrole brut) jusqu'à la livraison des carburants à la station-service. Les émissions générées par la combustion des carburants dans le véhicule ne sont pas prises en compte. Les besoins en énergie primaire et les émissions de dioxyde de carbone des carburants et de l'électricité sont indiqués dans le Tableau 4.2.

Les facteurs d'énergie primaire figurant dans le Tableau 4.2 constituent la base pour le calcul des équivalents essence d'énergie primaire. En plus des carburants normalisés (Tableau 4.1), les besoins en énergie primaire et les émissions de dioxyde de carbone pour le gaz naturel pur et le biogaz pur sont également recensés dans le Tableau 4.2. Comme le biogaz est produit à partir de déchets, son facteur d'énergie primaire (0,391 MJ EqPét/MJ) est inférieur à 1 et nettement plus faible que ceux des autres carburants. Le gaz naturel pur a un facteur d'énergie primaire de 1,19 MJ EqPét/MJ.

Les émissions fossiles de dioxyde de carbone générées par la production d'essence et de diesel s'élèvent respectivement à 527 g CO₂/l et 508 g CO₂/l. La production de GNC comprenant 10% et 20% de biogaz aux stations-service suisses génère des émissions de dioxyde de carbone de respectivement 275 g CO₂/m³ et 298 g CO₂/m³. La production d'hydrogène aux stations-service suisses engendre des émissions fossiles de dioxyde de carbone de 223 g CO₂/m³. Les émissions de dioxyde de carbone de l'hydrogène dépendent fortement du procédé de fabrication et varient entre 81 g CO₂/m³ (électrolyse de l'eau avec une production hydroélectrique décentralisée) et 1300 g CO₂/m³ (SMR). L'hydrogène produit de manière décentralisée avec du courant photovoltaïque induit des

émissions fossiles de dioxyde de carbone de 268 g CO₂/m³. Le mix électrique suisse (base: mix électrique des consommateurs 2020) à partir d'une prise à basse tension génère des émissions fossiles de dioxyde de carbone de 94,3 g CO₂/kWh. Le mix électrique des consommateurs représente l'électricité vendue en Suisse et se base sur les valeurs horaires de production nationale et les échanges commerciaux avec les pays voisins. Il diffère nettement du mix électrique des fournisseurs basé sur les garanties d'origine (mix électrique des fournisseurs; cf. annexe A). Le mix électrique des fournisseurs 2020 basé sur les garanties d'origine (GO) génère des émissions de CO₂ de l'ordre de 22,5 g CO₂/kWh.

Tableau 4.2 Densité, pouvoir calorifique, besoins en énergie primaire et émissions de dioxyde de carbone des carburants pour l'étiquette-énergie 2022. Les indicateurs environnementaux reposent sur la liste des données des écobilans du DETEC DQR v2:2022

Treibstoffe	Dichte		Heizwert Hu		Primärenergie		Primärener- giefaktor MJ Öl-eq/MJ	Kohlendioxidemissionen	
	kg/Nm ³	kg/L	MJ/Nm ³	MJ/kg	MJ Öl-eq/kg	MJ Öl-eq/L		kgCO ₂ /kg	kgCO ₂ /L
Benzin		0.737		42.6	57.7	42.5	1.35	0.715	0.527
Diesel		0.830		43.0	55.9	46.4	1.30	0.612	0.508
E85		0.782		29.0	90.5	70.7	3.12	0.600	0.469
CNG / 10% Biogas	0.759	0.00076		47.8	53.3	0.0405	1.11	0.362	0.00027
CNG / 20% Biogas	0.758	0.00076		47.6	49.4	0.0375	1.04	0.393	0.00030
CNG	0.760	0.00076		48.0	57.2	0.0434	1.19	0.332	0.00025
Biogas	0.750	0.00075		45.9	18.0	0.0135	0.391	0.642	0.00048
LPG		0.540		46.3	62.9	34.0	1.36	0.805	0.435
Wasserstoffmix, ab Tankstelle Schweiz	0.0899	0.000090		120	314	0.0282	2.62	2.48	0.00022

Elektrizität	Primärenergie		Primärener- giefaktor MJ Öl-eq/MJ	Kohlendioxidemissionen	
	MJ Öl-eq/MJ	MJ Öl-eq/kWh		kgCO ₂ /MJ	kgCO ₂ /kWh
Elektrizität Verbrauchermix 2020	2.55	9.18	2.55	0.0262	0.0943

Elektrizität (Alternativen)	Primärenergie		Primärener- giefaktor MJ Öl-eq/MJ	Kohlendioxidemissionen	
	MJ Öl-eq/MJ	MJ Öl-eq/kWh		kgCO ₂ /MJ	kgCO ₂ /kWh
Elektrizität, Mix erneuerbare Stromprodukte 2020	1.19	4.28	1.19	0.0028	0.0102
Elektrizität HKN Lieferantenmix 2020	1.97	7.10	1.97	0.0062	0.0225

4.5 Parts des processus

4.5.1 Carburants

Les parts des principaux processus dans les besoins totaux en énergie primaire et dans les émissions fossiles de CO₂ sont représentées aux Figure 4.1 et Figure 4.2. Pour l'essence, le diesel et le gaz naturel (10% ou 20% de biogaz), on distingue les processus suivants:

- extraction: extraction de pétrole brut et de gaz naturel, production de biogaz;
- transport à longue distance de pétrole brut et de gaz naturel (pas nécessaire pour le biogaz);

- raffinage / traitement: fabrication d'essence et de diesel à partir du pétrole brut, traitement du biogaz;
- distribution fine des carburants;
- fourniture aux stations-service.

S'agissant des besoins en énergie primaire, la teneur en énergie primaire des carburants est indiquée en plus des processus indiqués ci-dessus (cf. Figure 4.1). Pour l'essence, le diesel et le gaz naturel, la teneur en énergie primaire correspond au pouvoir calorifique inférieur du carburant. Le biogaz est produit à partir de déchets (cf. point 3.3) et a une teneur en énergie primaire de 0 MJ, car les besoins en énergie primaire ont déjà été compensés pour les produits devenus des déchets. La teneur en énergie primaire de l'essence, du diesel, du GNC à 10% de biogaz et du GNC à 20% de biogaz atteint respectivement 73,8%, 76,9%, 81,2% et 77,9% des besoins totaux en énergie primaire nécessaires à la production de ces carburants. L'extraction nécessite 11,5% et respectivement 13,6% des besoins en énergie primaire de l'essence et du diesel. Pour le GNC (10% et 20% de biogaz), la part de l'extraction dans les besoins en énergie primaire s'élève respectivement à 5,8% et 7,6%. Le transport à longue distance représente entre 1,4% (essence) et 4,0% (GNC avec une part de 10% de biogaz) des besoins en énergie primaire. Le raffinage a une part de respectivement 11,6% et 7,1% dans les besoins en énergie primaire de l'essence et du diesel. Le traitement est moins important pour le gaz naturel comportant 10% ou 20% de biogaz (respectivement 1,3% et 2,7% des besoins en énergie primaire). La distribution fine et les stations-service représentent moins de 1% des besoins totaux en énergie primaire pour l'essence et le diesel. Pour le GNC (10% et 20% de biogaz), la part de la distribution fine est de 1,9%. La part des stations-service dans les besoins en énergie primaire du GNC (respectivement 5,8% pour le GNC à 10% de biogaz et 6,1% pour le GNC à 20% de biogaz) s'explique principalement par la consommation électrique des compresseurs. Les parts revendiquées par les infrastructures sont indiquées séparément pour chaque processus (plages hachurées de la Figure 4.1) et sont minimales (1,1% à 2,6% des besoins en énergie primaire).

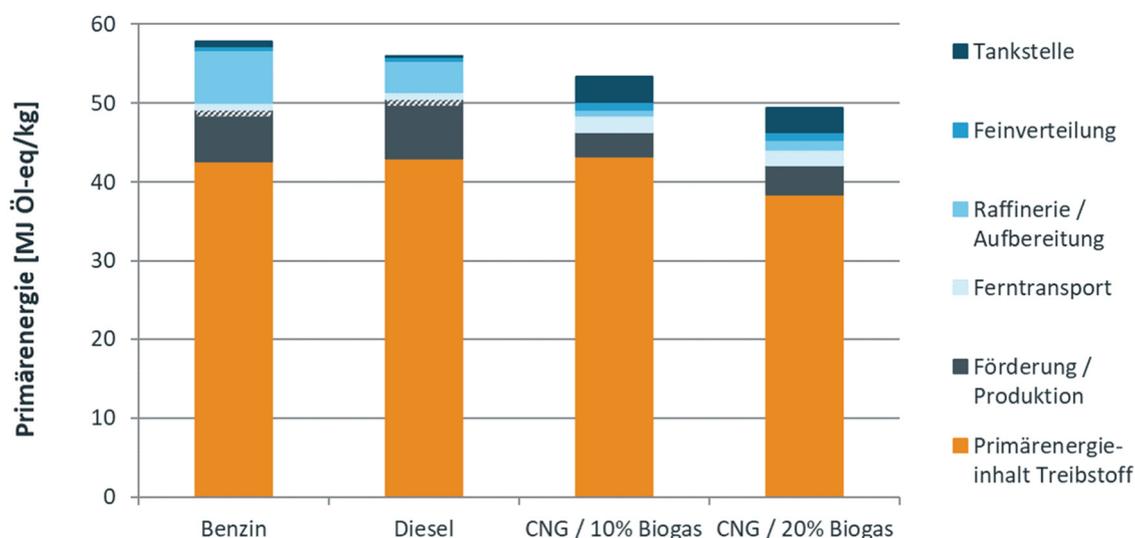


Figure 4.1 Parts de la teneur en énergie primaire et des principaux processus dans les besoins (totaux) en énergie primaire nécessaires à la fourniture des carburants (essence, diesel, GNC à 10% de biogaz et GNC à 20% de biogaz). Les parts imputables aux infrastructures sont représentées séparément pour chaque processus (plages hachurées).

Les émissions fossiles de CO₂ liées à la production d'essence et de diesel sont générées respectivement à 43,5% et 52,8% par l'extraction (cf. figure 4.2). Pour le gaz naturel (10% ou 20% de biogaz), la part de l'extraction/de la production dans les émissions de CO₂ s'élève respectivement à 40,4% et 43,4%. Le transport à longue distance a une part de 29,4% respectivement 24,0% dans les émissions totales de CO₂ du GNC (10% et 20% de biogaz). Pour la production d'essence et de diesel, le transport à longue distance est en revanche de moindre importance, ses parts dans les émissions de CO₂ étant respectivement de 6,6% et 8,0%. Le raffinage est responsable de respectivement 45,4% et 34,6% des émissions de CO₂ générées par la production d'essence et de diesel. Le traitement qu'implique la production de GNC (10% et 20% de biogaz) engendre une moindre part d'émissions de CO₂ (respectivement 6,4% et 11,8%), car seul le biogaz doit être traité. La distribution fine de l'essence et du diesel génère respectivement 3,4% et 4,0% des émissions de CO₂ causées par la production de ces carburants. Pour le gaz naturel (10% et 20% de biogaz), la distribution fine a une part de respectivement 14,9% et 12,5% dans les émissions totales de CO₂. La part des émissions de CO₂ des stations-service dans les émissions totales générées par la production de carburant est respectivement de 1,2% et 0,6% pour l'essence et le diesel et de 8,9% et 8,3% pour le GNC (10% et 20% de biogaz). La part nettement plus élevée pour le GNC est due aux charges inhérentes à la compression et aux émissions globalement plus faibles de la production du carburant. Les parts liées aux infrastructures, qui sont indiquées séparément pour chaque processus (plages hachurées de la figure 4.1), sont globalement de l'ordre de 9,4% à 14,7% dans les émissions totales de CO₂.

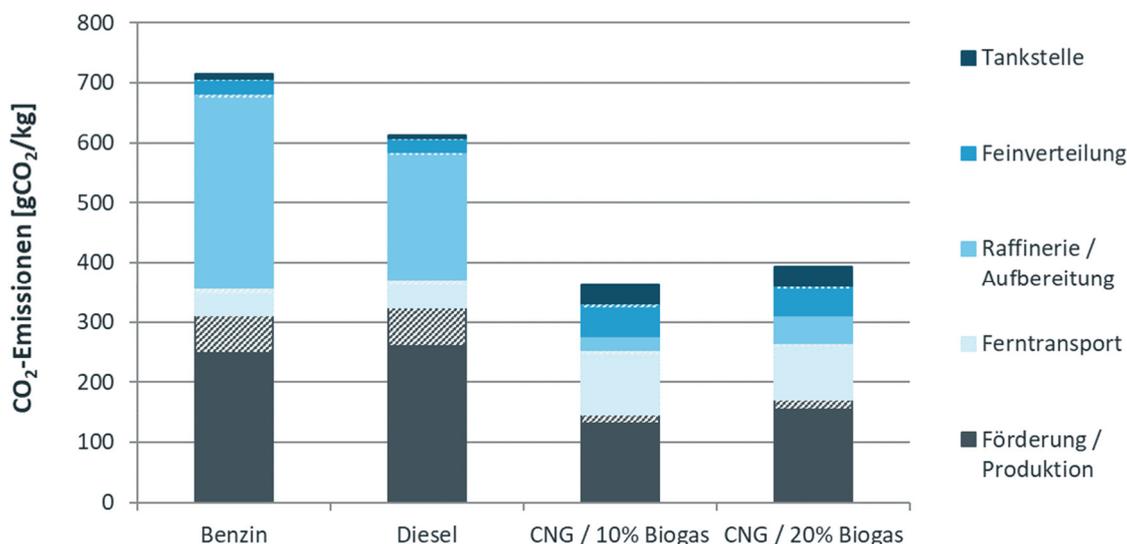


Figure 4.2 Parts des principaux processus dans les émissions fossiles de CO₂ générées par les carburants (essence, diesel, GNC à 10% de biogaz et GNC à 20% de biogaz). Les parts imputables aux infrastructures sont représentées séparément pour chaque processus (plages hachurées).

4.5.2 Électricité (mix électrique des consommateurs 2020)

Les émissions spécifiques de gaz à effet de serre du mix électrique suisse se montent à 108 g EqCO₂/kWh (cf. Figure 4.3) et sont donc environ 270 % plus élevées (3,7 fois plus élevées) que celles du mix électrique des fournisseurs suisses 2020 basé sur les garanties d'origine (29,3 g EqCO₂/kWh, cf. annexe A).

Le mix électrique des consommateurs suisses basé sur la production et les échanges commerciaux consomme par kWh près de 2,1 kWh EqPét d'énergie primaire non renouvelable et 0,44 kWh EqPét d'énergie primaire renouvelable .

L'équivalent essence d'énergie primaire du mix électrique des consommateurs suisses est de 0,22 l/kWh et est donc nettement plus élevé que celui du mix électrique des fournisseurs suisses 2020 basé sur les garanties d'origine (0,17 l/kWh).

Le mix électrique des consommateurs basé sur la production et les échanges commerciaux génère un impact environnemental global de 483 UCE par kWh, soit plus du double de celui du mix électrique des fournisseurs suisses 2020 basé sur les garanties d'origine (237 UCE par kWh).

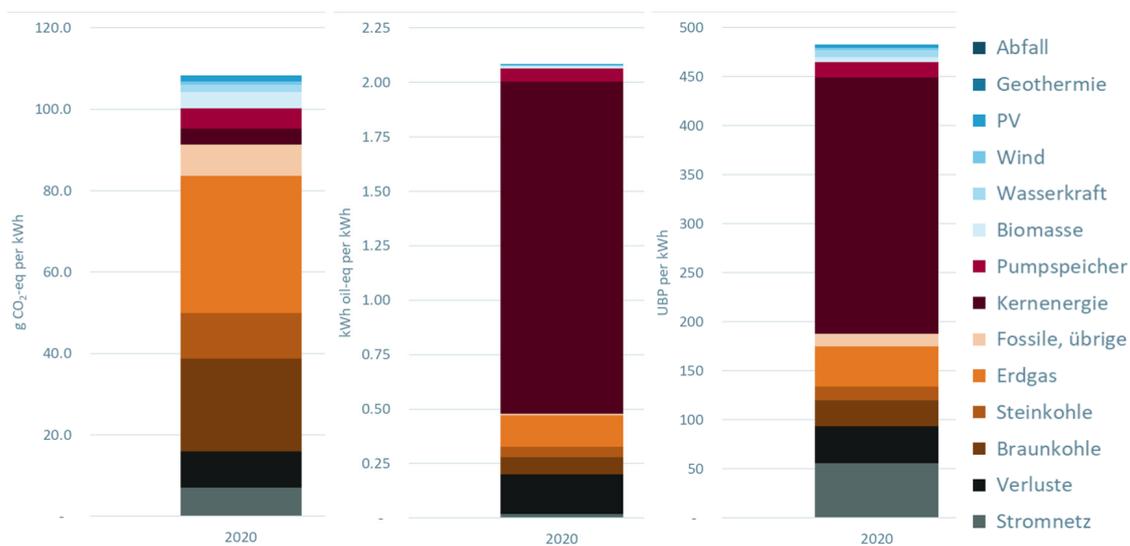


Figure 4.3 Indicateurs environnementaux (à gauche: émissions de gaz à effet de serre, au centre: besoins en énergie primaire non renouvelable, à droite: impact environnemental global conformément aux écofacteurs suisse 2021 selon la méthode de la saturation écologique) du mix électrique des consommateurs 2020 basé sur la production et les échanges commerciaux.

Pour la production d'électricité, on quantifie les parts de la force hydraulique, des autres agents énergétiques renouvelables, de l'énergie nucléaire, des agents énergétiques fossiles et des centrales de pompage-turbinage ainsi que celles du réseau de transport et de distribution¹⁴. Les besoins en énergie primaire du mix électrique des consommateurs suisses 2020 sont générés pour 60,9% par les centrales nucléaires (cf. Figure 4.4) l'efficacité thermique des centrales nucléaires étant importante, ainsi que, dans une moindre mesure, l'enrichissement d'uranium. La production d'électricité des centrales hydroélectriques, avec une part de près de 35% dans le mix électrique des consommateurs suisses (cf. tableau a.1), génère 16,2% des besoins en énergie primaire. De manière générale, l'électricité issue de sources renouvelables, à l'exception des centrales à bois, est nettement moins gourmande en énergie primaire que l'électricité produite par les centrales nucléaires ou fossiles.¹⁵ Les agents énergétiques fossiles, les autres agents énergétiques renouvelables et les centrales de pompage-turbinage ont une part de 11,8%, 6,8% et respectivement 3,6% dans les besoins totaux en énergie primaire du mix électrique des consommateurs. La part des réseaux de transport et de distribution dans les

¹⁴ Comme cette modélisation n'utilise pas les informations sur les catégories d'électricité, mais sur la production d'électricité, il n'y a pas d'«agents énergétiques non vérifiables» (cf. mix électrique des fournisseurs basé sur les GO, annexe A).

¹⁵ Pour calculer les besoins en énergie primaire des technologies de production d'électricité renouvelable, on prend en compte l'énergie récoltée selon Frischknecht et al. (2015). Dans la production d'énergie des installations renouvelables, l'énergie de rotation (pour la force hydraulique et l'énergie éolienne) est considérée comme l'agent énergétique primaire, alors que l'énergie électrique générée directement derrière la cellule photovoltaïque est utilisée comme indicateur de l'énergie primaire dans les applications photovoltaïques.

besoins en énergie primaire de l'électricité est inférieure à 1%. L'infrastructure des centrales revêt une importance secondaire quant aux besoins en énergie primaire (moins de 2%).

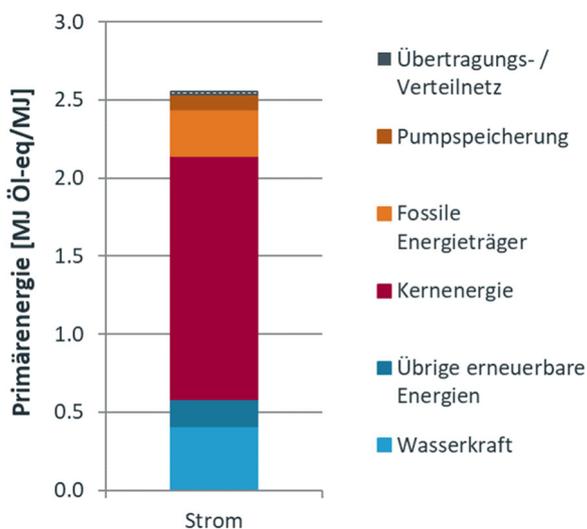


Figure 4.4 Parts des principaux processus dans l'énergie primaire de l'électricité (mix électrique des consommateurs suisses 2020). Les parts imputables aux infrastructures sont représentées séparément pour chaque processus (plages hachurées).

Les émissions de CO₂ du mix électrique des consommateurs suisses 2020 sont générées à 80,8% par de l'électricité provenant d'agents énergétiques fossiles (cf. Figure 4.5). Le pompage-turbinage, les autres agents énergétiques renouvelables, l'énergie nucléaire et la force hydraulique sont à l'origine de respectivement 5,1 %, 4,2 %, 4,0 % et 1,8 % des émissions de CO₂. Dans ce cadre, l'infrastructure est responsable d'une grande partie des émissions de la force hydraulique et des autres agents énergétiques renouvelables (plages hachurées de la Figure 4.5). Le réseau de transport et de distribution représente 4,1% des émissions de CO₂ du mix électrique des consommateurs.

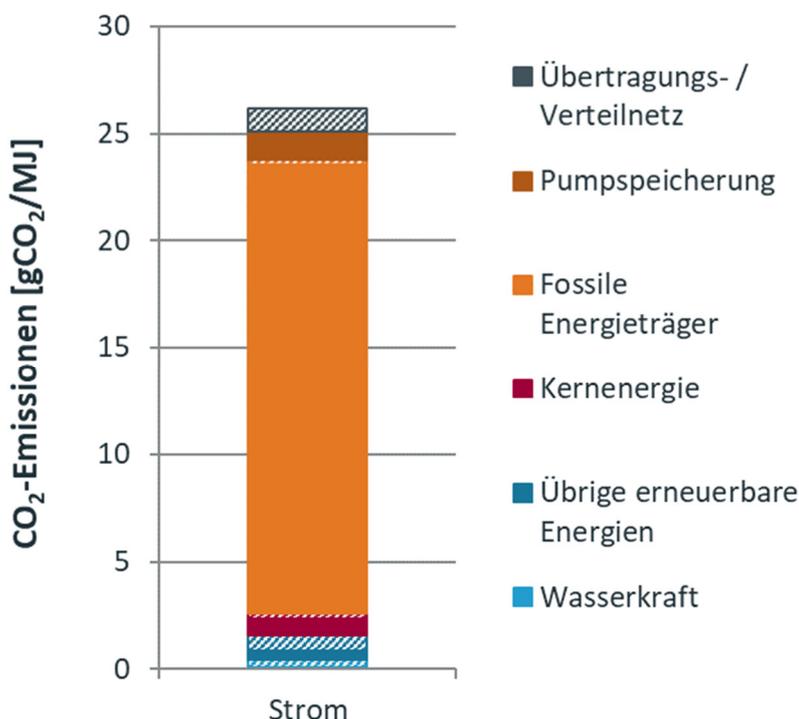


Figure 4.5 Parts des principaux processus dans les émissions fossiles de CO₂ de l'électricité (mix électrique des consommateurs suisses 2020). Les parts imputables aux infrastructures sont représentées séparément pour chaque processus (plages hachurées).

4.6 Comparaison avec l'année précédente et raisons des changements

Les équivalents essence d'énergie primaire et les émissions de dioxyde de carbone liées à la production de carburant et d'électricité pour l'année 2022 sont comparés aux valeurs de l'année précédente dans les tableau 4.3 et tableau 4.4. Les principales raisons des changements observés y sont en outre présentées. Les indicateurs environnementaux 2021 de la production de carburant et d'électricité sont décrits par Frischknecht et al. (2021). Les inventaires actualisés de la production des différents carburants et du mix électrique des consommateurs et d'autres mix électriques ont servi au calcul des indicateurs environnementaux 2022 (cf. chapitre 3 et annexe A).

Les légers changements concernant les émissions de CO₂ générées par la production d'essence et de diesel s'expliquent par des modifications dans le ratio Suisse/Europe et dans le mix de provenance du pétrole brut traité dans la raffinerie suisse et les raffineries européennes. La hausse des émissions de CO₂ liées à la production de gaz liquéfié est également provoquée par des émissions accrues concernant la production du pétrole brut, imputables au mix de provenance du pétrole brut et à la répartition de la production entre la Suisse et l'Europe. Les modifications de l'équivalent essence d'énergie primaire du GNC (10% et 20% de biogaz) et des émissions de CO₂ liées à sa production sont dues à

une actualisation des données des inventaires des chaînes de valeur ajoutée du biogaz et du mix électrique (utilisé pour la compression dans les stations-service).

Le passage du mix électrique des fournisseurs basé sur les GO au mix électrique des consommateurs entraîne une augmentation de plus de 25% de l'équivalent essence d'énergie primaire ainsi que des émissions de CO₂ près de trois fois plus élevées.

En comparaison avec 2019, le mix électrique des consommateurs 2020 présente des parts légèrement plus faibles pour l'électricité produite avec du charbon et l'énergie nucléaire et des parts légèrement plus élevées pour la force hydraulique et les nouvelles énergies renouvelables. C'est la raison pour laquelle l'équivalent essence d'énergie primaire et les émissions de CO₂ ont légèrement diminué par rapport à 2019.

La composition du mix des fournisseurs 2020 basé sur les GO a changé par rapport au mix des fournisseurs 2019 basé sur les GO utilisé l'année précédente. La part d'électricité importée depuis les pays européens a baissé de 24,4% à 20,2%. En raison de la part nettement plus faible d'agents énergétiques non vérifiables dans le mix des fournisseurs 2020 basé sur les GO (une large part étant imputable à la catégorie «énergie nucléaire»), les émissions de dioxyde de carbone sont un peu moins élevées que l'année précédente. Ces changements se répercutent également sur l'équivalent essence d'énergie primaire et les émissions de dioxyde de carbone de l'hydrogène produit de manière décentralisée par électrolyse de l'eau avec le mix électrique des fournisseurs.

La hausse de l'équivalent essence d'énergie primaire et la nette augmentation des émissions de CO₂ du mix d'hydrogène à la pompe en Suisse est imputable à des changements au niveau du mix de production. L'hydrogène fourni aux stations-service accessibles au public provenait à 85% de la production de l'installation d'électrolyse d'Hydrospider sur le site de la centrale hydroélectrique au fil de l'eau de Niedergösgen. 7,5% a été produit par électrolyse (mix électrique des consommateurs) et 7,5% par reformage du méthane (cf. aussi point 3.7). Dans la station-service semi-publique, l'hydrogène est produit de manière décentralisée et principalement avec la force hydraulique. Le mix se composait l'année précédente encore exclusivement d'hydrogène produit de manière centralisée avec de l'électricité d'origine hydraulique et de manière décentralisée avec de l'électricité d'origine hydraulique et de l'électricité photovoltaïque.

Tableau 4.3 Comparaison des équivalents essence d'énergie primaire de la production de carburant et d'électricité pour les années 2022 et 2021; raisons des changements.

Treibstoff	Primärenergie-Benzinäquivalent 2022	Primärenergie-Benzinäquivalent 2021	Veränderung %	Gründe für Veränderung
Benzin	1.00 L/L	1.00 L/L	0.0%	Keine Veränderung (Referenztreibstoff)
Diesel	1.09 L/L	1.09 L/L	0.0%	Keine Veränderung
CNG / 10% Biogas	0.85 L/m ³	0.84 L/m ³	0.8%	Keine Veränderung; Aktualisierung Biogasbereitstellung
CNG / 20% Biogas	0.79 L/m ³	0.78 L/m ³	1.1%	Keine Veränderung; Aktualisierung Biogasbereitstellung
LPG (85% C ₃ H ₈)	0.80 L/L	0.78 L/L	2.2%	Aktualisierung Marktmit (Anteil Schweiz geringer), Aktualisierung Rohölherkunft
E85	1.66 L/L	1.67 L/L	-0.4%	Keine Veränderung
Elektrizität	0.22 L/kWh	0.17 L/kWh	26.8%	Wechsel vom HKN-Lieferantenmix zum Verbrauchermix, deutlich höhere Anteile Kernenergie und fossile Kraftwerke
Elektrizität, Verbrauchermix 2020	0.22 L/kWh	0.23 L/kWh	-4.6%	Aktualisierung Sachbilanz gemäss Modell "Produktion und kommerzieller Handel": tiefere Anteile Kohle und Kernenergie, höhere Anteile Wasserkraft und neue Erneuerbare
Elektrizität, HKN Lieferantenmix 2020	0.17 L/kWh	0.17 L/kWh	-2.0%	Aktualisierung Sachbilanz gemäss Pronovo Cockpit Stromkennzeichnung 2021: tieferer Importanteil, tieferer Anteil nicht überprüfbarer Energieträger (Residualmix), mehr Kernenergie im Residualmix als im HKN Mix 2020
Wasserstoff				
- Lieferanten-Strommix, dezentral	1.06 L/m ³	1.09 L/m ³	-2.0%	Aktualisierung Sachbilanz HKN Lieferanten-Strommix (siehe oben)
- PV-Strom, dezentral	0.73 L/m ³	0.74 L/m ³	-0.5%	Keine Veränderung (aktualisierte Daten Stahl praktisch ohne Auswirkungen)
- Wasserkraft-Strom, dezentral	0.64 L/m ³	0.65 L/m ³	-0.6%	Keine Veränderung (aktualisierte Daten Stahl praktisch ohne Auswirkungen)
- Wasserkraft-Strom, zentral	0.61 L/m ³	0.60 L/m ³	1.5%	Aktualisierung Strommix (für den Betrieb der Tankstelle), grössere Distanz Anlieferung
- Methan-Dampfpreformierung, zentral	0.58 L/m ³	0.56 L/m ³	3.7%	Aktualisierung Strommix (für den Betrieb der Tankstelle), grössere Distanz Anlieferung
- Mix ab Schweizer Tankstelle	0.66 L/m ³	0.61 L/m ³	9.0%	Aktualisierung Wasserstoffmix ab Schweizer Tankstelle (höhere Anteile Wasserstoff hergestellt mit Verbrauchermix und durch Methanreformierung)

Tableau 4.4 Comparaison des émissions de dioxyde de carbone causées par la production de carburant et d'électricité pour les années 2022 et 2021; raisons des changements.

Treibstoff	Kohlendioxid-emissionen 2022	Kohlendioxid-emissionen 2021	Veränderung %	Gründe für Veränderung
Benzin	527 gCO ₂ /L	506 gCO ₂ /L	4.0%	Aktualisierung Sachbilanzen Erdöl-kette (Versorgungsmix): höhere Anteile aus Förderregionen mit höheren Emissionen
Diesel	508 gCO ₂ /L	484 gCO ₂ /L	4.9%	Aktualisierung Sachbilanzen Erdöl-kette (Versorgungsmix): höhere Anteile aus Förderregionen mit höheren Emissionen
CNG / 10% Biogas	275 gCO ₂ /m ³	253 gCO ₂ /m ³	8.5%	Aktualisierung Sachbilanzen Biogas, Aktualisierung Sachbilanz Strom Tankstelle
CNG / 20% Biogas	298 gCO ₂ /m ³	273 gCO ₂ /m ³	9.3%	Aktualisierung Sachbilanzen Biogas, Aktualisierung Sachbilanz Strom Tankstelle
LPG (85% C ₃ H ₈)	435 gCO ₂ /L	390 gCO ₂ /L	11.4%	Aktualisierung Markt-mix (Anteile Schweiz, Europa), Aktualisierung Rohölherkunft
E85	469 gCO ₂ /L	464 gCO ₂ /L	1.2%	Keine Veränderung
Elektrizität	94 gCO ₂ /kWh	25 L/kWh	281.8%	Wechsel vom HKN-Lieferanten-mix zum Verbrauchermix, deutlich höhere Anteile Kernenergie und fossile Kraftwerke
Elektrizität, Verbrauchermix 2020	94 gCO ₂ /kWh	96 gCO ₂ /kWh	-1.6%	Aktualisierung Sachbilanz gemäss Modell "Produktion und kommerzieller Handel": tiefere Anteile Kohle und Kernenergie, höhere Anteile Wasserkraft und neue Erneuerbare
Elektrizität, HKN Lieferanten-mix 2020	22 gCO ₂ /kWh	25 gCO ₂ /kWh	-8.9%	Aktualisierung Sachbilanz gemäss Pronovo Cockpit Stromkennzeichnung 2021: tieferer Importanteil, tieferer Anteil nicht überprüfbarer Energieträger (Residualmix), mehr Kernenergie im Residualmix als im HKN Mix 2020
Wasserstoff				
- Lieferanten-Strommix, dezentral	195 gCO ₂ /m ³	204 gCO ₂ /m ³	-4.6%	Aktualisierung Sachbilanz Lieferanten-Strommix (siehe oben)
- PV-Strom, dezentral	268 gCO ₂ /m ³	262 gCO ₂ /m ³	2.0%	Aktualisierte Daten zu Stahl (deutlich höhere CO ₂ -Emissionen)
- Wasserkraft-Strom, dezentral	80.7 gCO ₂ /m ³	76.5 gCO ₂ /m ³	5.6%	Aktualisierte Daten zu Stahl (deutlich höhere CO ₂ -Emissionen)
- Wasserkraft-Strom, zentral	90.1 gCO ₂ /m ³	66.1 gCO ₂ /m ³	36.4%	Aktualisierung Strommix (für den Betrieb der Tankstelle), grössere Distanz Anlieferung
- Methan-Dampf-reformierung, zentral	1294 gCO ₂ /m ³	1246 gCO ₂ /m ³	3.8%	Aktualisierung Strommix (für den Betrieb der Tankstelle), grössere Distanz Anlieferung
- Mix ab Schweizer Tankstelle	223 gCO ₂ /m ³	68 gCO ₂ /m ³	229.8%	Aktualisierung Wasserstoffmix ab Schweizer Tankstelle (höhere Anteile Wasserstoff hergestellt mit Verbrauchermix und durch Methanreformierung)

A Annexe: mix électrique des fournisseurs suisses 2020 basé sur les garanties d'origine

A.1 Modélisation et composition du mix électrique

Sur la base des garanties d'origine (GO) utilisées pour le marquage de l'électricité en Suisse en 2020, le mix électrique des fournisseurs suisses a été actualisé par Pronovo (2021a). La catégorie et la provenance (Suisse/étranger) de l'électricité vendue en Suisse aux clients finaux en ressortent.

Tableau A.1 Parts des différentes technologies dans le mix électrique des fournisseurs suisses 2020 basé sur les GO (Pronovo 2021a).

Technologie	Total	Aus der Schweiz	Import
Erneuerbare Energien	76.22%	58.98%	17.24%
Wasserkraft	65.88%	49.99%	15.89%
Andere Erneuerbare	3.34%	1.99%	1.35%
<i>Sonne</i>	1.45%	1.44%	0.01%
<i>Wind</i>	1.36%	0.05%	1.31%
<i>Biomasse</i>	0.53%	0.50%	0.03%
<i>Geothermie</i>	0.00%	0.00%	0.00%
Geförderter Strom	7.00%	7.00%	0.00%
Nicht erneuerbare Energien	21.04%	19.85%	1.19%
Kernenergie	19.89%	19.73%	0.16%
Fossile Energieträger	1.15%	0.12%	1.03%
<i>Erdöl</i>	0.01%	0.01%	0.00%
<i>Erdgas</i>	0.90%	0.11%	0.79%
<i>Steinkohle</i>	0.24%	0.00%	0.24%
Abfälle	0.69%	0.69%	0.00%
Nicht überprüfbare Energieträger	2.05%	0.00%	2.05%
Total	100.00%	79.52%	20.48%

Le mix électrique des fournisseurs suisses est produit en grande partie, GO à l'appui, dans les centrales hydroélectriques (65,9%) et les centrales nucléaires (19,9%) (cf. Tableau A.1). Les parts des autres agents énergétiques renouvelables et du courant au bénéfice de mesures d'encouragement s'élèvent respectivement à 3,3% et 7,0%. Les agents énergétiques fossiles et les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) présentent comparativement de faibles parts dans l'électricité vendue en Suisse. La part des agents énergétiques non vérifiables dans le mix des fournisseurs s'élève à 2,0%, soit une nouvelle diminution par rapport à 2019 (4,3%; Frischknecht & Krebs 2021). L'électricité issue d'agents énergétiques non vérifiables est modélisée selon le mix résiduel suisse de 2020 (AIB 2021) qui est constitué à hauteur de plus de 70% par la catégorie «énergie nucléaire». Les GO indiquent que l'électricité fournie aux clients

Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme :
indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant

suisses par les entreprises électriques est produite à peu près aux quatre cinquièmes dans les centrales suisses et importée de pays européens à raison d'environ un cinquième.

La catégorie «courant au bénéfice de mesures d'encouragement» correspond à l'électricité issue des installations qui perçoivent une rétribution du courant injecté à prix coûtant (RPC), répartie entre les différentes technologies renouvelables selon le rapport annuel de Pronovo SA (Pronovo 2021b). Le volume de production et les parts des différentes technologies y sont recensés (Tableau A.2). Le courant au bénéfice de mesures d'encouragement est principalement produit à partir de la force hydraulique (48,7%) et de la biomasse (30,7%). Les parts du photovoltaïque et de l'éolien dans la production suisse d'électricité au bénéfice de mesures d'encouragement s'élèvent respectivement à 17,6% et 3,0%.

Tableau A.2 Parts des différentes technologies dans la production électrique suisse bénéficiant de mesures d'encouragement en 2020 (Pronovo 2021b).

Technologie	Produktion	Anteil
Einheit	GWh	%
Wind	116.0	3.02%
Wasserkraft	1873.0	48.73%
Biomasse	1179.0	30.67%
Fotovoltaik	676.0	17.59%
Total	3844.0	100.00%

L'électricité issue de la biomasse a été subdivisée en courant produit à partir de bois, de biogaz agricole, de biogaz industriel et de biomasse incinérée dans les UIOM. Ces données proviennent de la statistique suisse des énergies renouvelables (OFEN 2021). Les parts des différentes technologies sont indiquées dans le Tableau A.3.

Tableau A.3 Parts des différentes technologies dans la production électrique issue de la biomasse en 2020 (OFEN 2021).

Technologie	Produktion	Anteil
Einheit	GWh	%
Holz	289.8	18.56%
Biogas Landwirtschaft	138.5	8.87%
Biogas Industrie	212.9	13.64%
Biomasse KVA	919.9	58.93%
Total	1561.1	100.00%

A.2 Parts des processus

Pour la production d'électricité, on quantifie les parts de la force hydraulique, des autres agents énergétiques renouvelables, de l'énergie nucléaire, des agents énergétiques fossiles et des agents énergétiques non vérifiables ainsi que celles du réseau de transport et de distribution. Les besoins en énergie primaire du mix électrique des fournisseurs suisses 2020 basé sur les GO sont générés pour 45,2% par la catégorie «énergie nucléaire» (cf. Figure A.1), l'efficacité thermique des centrales nucléaires étant importante, ainsi

**Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme :
indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant**

que, dans une moindre mesure, l'enrichissement d'uranium. La catégorie «agents énergétiques non vérifiables» représente 3,9% des besoins totaux en énergie primaire. La catégorie «force hydraulique», avec une part de 66% dans le mix électrique des fournisseurs suisses basé sur les GO (cf. Tableau A.1), génère 44% des besoins en énergie primaire. De manière générale, l'électricité issue des sources renouvelables, à l'exception de la catégorie «centrales à bois», est nettement moins gourmande en énergie primaire que l'électricité provenant des centrales nucléaires ou fossiles (Messmer & Frischknecht 2016).¹⁶ Les catégories «autres agents énergétiques renouvelables» et «agents énergétiques fossiles» ont une part respective de 3,9% et 2,1% dans les besoins totaux en énergie primaire du mix des fournisseurs basé sur les GO. La part des réseaux de transport et de distribution dans les besoins en énergie primaire de l'électricité est inférieure à 1%. L'infrastructure des centrales revêt une importance secondaire quant aux besoins en énergie primaire (moins de 2%).

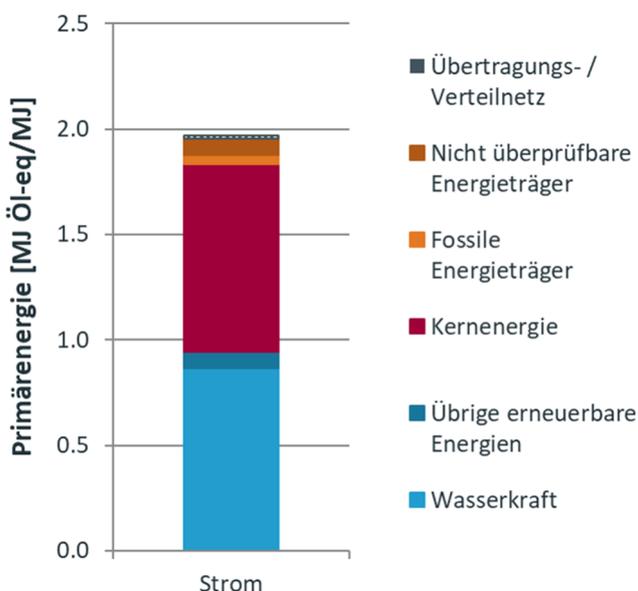


Figure A.1 Parts des principales catégories d'électricité et du réseau de transport et de distribution dans l'énergie primaire du mix électrique des fournisseurs suisses 2020 basé sur les GO. Les parts imputables aux infrastructures sont représentées séparément pour chaque processus (plages hachurées).

Les émissions de CO₂ du mix électrique des fournisseurs suisses 2020 basé sur les GO sont générées à 40,2% par la catégorie d'électricité «agents énergétiques fossiles»

¹⁶ Pour calculer les besoins en énergie primaire des technologies de production d'électricité renouvelable, on prend en compte l'énergie récoltée selon Frischknecht et al. (2015). Dans la production d'énergie des installations renouvelables, l'énergie de rotation (pour la force hydraulique et l'énergie éolienne) est considérée comme l'agent énergétique primaire, alors que l'énergie électrique générée directement derrière la cellule photovoltaïque est utilisée comme indicateur de l'énergie primaire dans les applications photovoltaïques.

**Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme :
indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant**

(cf. Figure A.1). La catégorie d'électricité «agents énergétiques non vérifiables» engendre 3,9% du total des émissions de CO₂ de ce mix. Pour la modélisation de cette catégorie, on utilise le mix résiduel suisse 2020 qui est constitué pour une large part de la catégorie «énergie nucléaire». Les catégories «force hydraulique», «énergie nucléaire» et «autres agents énergétiques renouvelables» sont à l'origine de respectivement 16,7%, 13,5% et 8,4% des émissions de CO₂. Dans ce cadre, l'infrastructure est responsable d'une grande partie des émissions des catégories «force hydraulique» et «autres agents énergétiques renouvelables» (plages hachurées de la Figure A.2). Le réseau de transport et de distribution représente 17,3% des émissions de CO₂ du mix électrique des fournisseurs basé sur les GO.

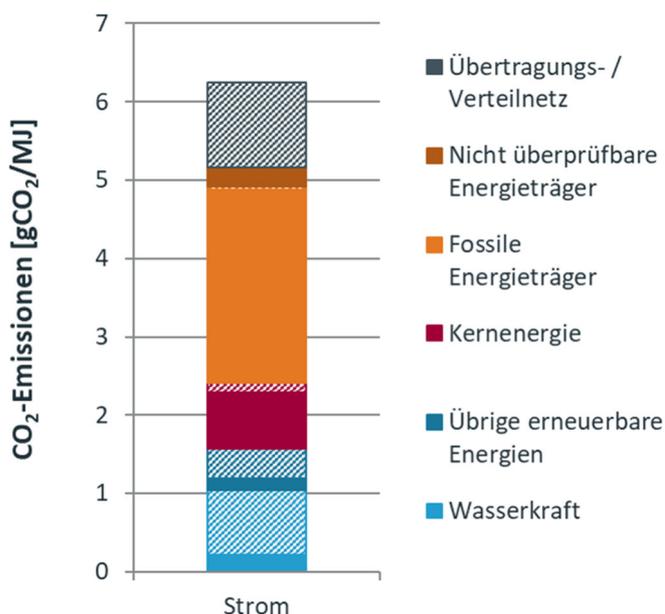


Figure A.2 Parts des principales catégories d'électricité et du réseau de transport et de distribution dans les émissions fossiles de CO₂ du mix électrique des fournisseurs suisses 2020 basé sur les GO. Les parts imputables aux infrastructures sont représentées séparément pour chaque processus (plages hachurées).

Bibliographie

- AIB (2021) European Residual Mixes; Results of the calculation of Residual Mixes for the calendar year 2020; Version 1.0, 2021-05-31. Association of Issuing Bodies, AIB, Bruxelles, Belgique, consulté dans: <https://www.aib-net.org/>.
- AIE (2022) Monthly Oil Statistics 2021. Agence internationale de l'énergie AIE, Paris, consulté dans: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/monthly-oil-statistics>.
- Assemblée fédérale de la Confédération suisse (2016) Loi du 30 septembre 2016 sur l'énergie, LENE (état au 1^{er} janvier 2018), Berne, consulté dans: <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20121295/202101010000/730.0.pdf>
- Avenergy Suisse (2022) rapport annuel 2021. Avenergy Suisse, Zurich.
- Baehr H. D. (1989) Thermodynamik.
- Bauer C., Frischknecht R., Eckle P., Flury K., Neal T., Papp K., Schori S., Simons A., Stucki M. et Treyer K. (2012) Umweltauswirkungen der Stromerzeugung in der Schweiz. ESU-services Ltd & Paul Scherrer Institute, sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), Uster & Villigen.
- Bünger U., Landinger H., Pschorr-Schoberer E., Schmidt P., Weindorf W., J. J., Lambrecht U., Naumann K. et Lischke A. (2014) Power-to-Gas (PtG) im Verkehr: Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ), München, Heidelberg, Leipzig, Berlin.
- Commission européenne (2017) Règlement (UE) n° 2017/1151 de la Commission du 1^{er} juin 2017 modifiant le règlement (UE) 2017/1151 complétant le règlement (CE) n° 715/2007 du Parlement européen et du Conseil relatif à la réception des véhicules à moteur au regard des émissions des véhicules particuliers et utilitaires légers (Euro 5 et Euro 6) et aux informations sur la réparation et l'entretien des véhicules, modifiant la directive 2007/46/CE du Parlement européen et du Conseil, le règlement (CE) n° 692/2008 de la Commission et le règlement (UE) n° 1230/2012 de la Commission et abrogeant le règlement (CE) n° 692/2008, ainsi que la directive 2007/46/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les émissions en conditions de conduite réelles des véhicules particuliers et utilitaires légers (Euro 6). Consulté dans: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1151&from=EN>.
- Conseil fédéral suisse (2018) Ordonnance du 1er novembre 2017 sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique d'installations, de véhicules et d'appareils fabriqués en série (Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique, OEEE) (état le 1er janvier 2018). Dans: *RS 730.02*, Berne, consulté dans: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20162950/201807310000/730.02.pdf>.
- DETEC (2019) Ordonnance du DETEC sur les données relatives à l'efficacité énergétique des voitures de tourisme neuves (OEE-VT). Dans: *730.011.1*. Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), Berne.
- Frischknecht R., Wyss F., Büsser Knöpfel S., Lützkendorf T. and Balouktsi M. (2015) Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **20**(7), pp. 957-969, 10.1007/s11367-015-0897-4, consulté dans: <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-015-0897-4>.

**Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme :
indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant**

- Frischknecht R., Alig M. et Stolz P. (2020) Electricity Mixes in Life Cycle Assessments of Buildings. treeze Ltd., Uster.
- Frischknecht R. et Krebs L. (2021) Energieetikette für Personenwagen: Umweltkennwerte 2021 der Strom- und Treibstoffbereitstellung. treeze Ltd., Uster, CH.
- Hischier R., Althaus H.-J., Bauer C., Büsser S., Doka G., Frischknecht R., Kleijer A., Leuenberger M., Nemecek T. and A. S. (2010) Documentation of changes implemented in ecoinvent Data v2.2. ecoinvent Centre, Zurich.
- Jungbluth N., Chudacoff M., Dauriat A., Dinkel F., Doka G., Faist Emmenegger M., Gnansounou E., Kljun N., Schleiss K., Spielmann M., Stettler C. and Sutter J. (2007) Life Cycle Inventories of Bioenergy. ecoinvent report No. 17, v2.0. ESU-services, Uster, consulté dans: www.ecoinvent.org.
- Jungbluth N. et Meili C. (2018) Life cycle inventories of oil products distribution. ESU-services GmbH, Schaffhouse.
- Jungbluth N., Meili C. et Wenzel P. (2018) Life cycle inventories of oil refinery processing and products. ESU-services GmbH, Schaffhouse.
- Kägi T., Waldburger L., Kern C., Roberts G., Zschokke M., Conte F. et Weber L. (2021) Life cycle inventories of heating systems; Heat from natural gas, biomethane, district heating, electric heating, heat pumps, PVT, wood, cogeneration. Carbotech AG, Bâle et Zurich.
- KBOB, ecobau et IPB (2021) Règles concernant l'établissement des écobilans des matériaux et des produits de construction en Suisse, version 5.0. Plate-forme de données des écobilans dans la construction, KBOB, eco-bau, IPB, Berne.
- KBOB, ecobau et IPB (2022) UVEK Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2022. Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics c/o Office fédéral des constructions et de la logistique (OFCL), consulté dans: www.lc-inventories.ch.
- Krebs L. et Frischknecht R. (2020) Umweltbilanz Strommixe Schweiz 2018. treeze Ltd., Uster.
- Meili C., Jungbluth N. et Annaheim J. (2018a) Life cycle inventories of crude oil extraction. ESU-services GmbH, Schaffhouse.
- Meili C., Jungbluth N. et Wenzel P. (2018b) Life cycle inventories of long-distance transport of crude oil. ESU-services GmbH, Schaffhouse.
- Messmer A. et Frischknecht R. (2016) Umweltbilanz Strommixe Schweiz 2014. treeze Ltd., Uster.
- OFEN (2021) Statistique suisse des énergies renouvelables, édition 2020. Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, consulté dans: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/statistiques-et-geodonnees/statistiques-de-lenergie/statistiques-sectorielles.html>.
- OFEV (2019) Fiche d'information. Facteurs d'émission de CO₂ selon l'inventaire des gaz à effet de serre de la Suisse. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne, Suisse, consulté dans: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/klima/fachinfo-daten/CO2_Emissionsfaktoren_THG_Inventar.pdf.download.pdf/Faktenblatt_CO2-Emissionsfaktoren_01-2022_FR.pdf
- Pronovo (2021a) Cockpit du marquage de l'électricité suisse, état en août 2021. Pronovo AG, Frick, consulté dans: <https://pronovo.ch/fr/services/rapports-et-publications/>.

**Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme :
indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant**

Pronovo (2021b) Système de rétribution de l'énergie (SRI), financement des frais supplémentaires (FFS), rapport annuel 2020. Pronovo AG, Frick, consulté dans: <https://pronovo.ch/fr/services/rapports-et-publications/>.

Simons A. et Bauer C. (2011) Life cycle assessment of hydrogen production. In: *Transition to Hydrogen; Pathways Toward Clean Transportation* (Ed. Wokaun A. and Wilhelm E.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Stolz P. et Frischknecht R. (2019) Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme: indicateurs environnementaux 2019 de la production de carburant et d'électricité. treeze Ltd., Uster.

Tschümperlin L. et Frischknecht R. (2017) Ökobilanz von Wasserstoff als Treibstoff: actualisation en 2017. treeze Ltd., Uster.

Werner F. (2017) Background report for the life cycle inventories of wood and wood based products for updates of ecoinvent 2.2. Werner Environment & Development, Zurich.