

Scénario de transition énergétique 2050.

Consommation et production
globale d'énergie

Rapport technique

Mars 2021



Scénario de transition énergétique 2050.

Consommation et production globale d'énergie Rapport technique

David Moreau
Flavio Principi
Emmanuel Ravalet

Réalisé sous mandat de négaWatt
Mobil'homme, Av. de Sévelin 28, 1004 Lausanne

Photo de couverture : David Moreau

Impressum

Moreau D., Principi F., Ravalet E. (2021). Scénario de transition énergétique 2050, Consommation et production globale d'énergie, rapport technique. Mobil'homme Sàrl, Lausanne (Suisse)

Profil du mandataire

Mobil'homme est un bureau de sciences sociales actif dans l'urbain et la mobilité, basé à Lausanne (Suisse). Il a été fondé en 2015 comme *spin off* du Laboratoire de sociologie urbaine (LaSUR) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Le bureau Mobil'homme a la particularité de regrouper dans son équipe pluridisciplinaire des chercheurs relevant d'une grande diversité disciplinaire : sociologue, anthropologue, urbaniste, géographe, économiste, historien, ingénieur. Cette richesse de compétences lui permet d'articuler des dispositifs méthodologiques variés et hautement innovants, tout en croisant des compétences qualitatives et quantitatives sur des projets d'envergure. Ses membres continuent par ailleurs d'exercer une activité scientifique de pointe. Ce positionnement unique, mettant des chercheurs en activité au service de la recherche appliquée et de l'expertise de haut niveau, fait du bureau Mobil'homme le point de passage clé entre le monde académique et les besoins des collectivités et des prestataires privés.

www.mobilhomme.ch / info@mobilhomme.ch

MOBIL'HOMME Sàrl.
Études, recherches, expertises
Avenue de Sévelin 28
CH-1004 Lausanne

Sommaire

1	INTRODUCTION.....	9
2	OBJECTIF.....	10
3	METHODOLOGIE.....	11
3.1	Conditions.....	11
3.2	Méthode et simplification	11
3.2.1	Compréhension du système de production et calcul d'un mix énergétique négaWatt détaillé pour 2020.....	11
3.2.2	Simplification du mix énergétique au vu d'une modélisation en 2050.....	12
3.2.3	Revue de littérature et mix énergétique 2050.....	13
4	FONCTIONNEMENT DU FICHIER EXCEL	14
4.1	Onglets input output	14
4.2	Autres onglets.....	14
5	REVUE DE LITTERATURE.....	16
5.1	Historique de la consommation énergétique (OFEN, 2020a).....	16
5.2	ZERO Basis (OFEN, 2020c).....	18
5.3	Révolution énergétique (Greenpeace, 2013).....	20
5.4	Power-to-X	21
6	HYPOTHÈSES.....	23
6.1	Mix énergétique électrique et des réseaux de chaleur	23
6.2	Émission de CO2	23
7	RESULTATS	24
8	COMPARAISON AUX STATISTIQUES ET AUX PERSPECTIVES ENERGETIQUES DE L'OFEN 28	
9	DISCUSSION ET CONCLUSION.....	29
10	REFERENCES	30
11	ANNEXES.....	31
11.1	Bilan énergétique pour la Suisse en 2019 (OFEN, 2020a)	31

1 Introduction

Tout modèle de consommation d'énergie finit par estimer la production d'énergie nécessaire à satisfaire la demande. C'est le cas de ce fichier Excel qui vient conclure la modélisation négaWatt en proposant un mix énergétique et les émissions de CO₂ qui en découlent en 2050.

Deux sources principales de données sont utilisées comme référence. Il s'agit des statistiques globales de l'énergie de l'OFEN (2020a) et les perspectives 2050+ de l'OFEN (2020c).

Réaliser un modèle de production d'énergie est complexe car les systèmes de production sont interconnectés, avec comme objectif principal de satisfaire la demande. Modéliser puis scénariser un système de production est une démarche itérative qui demande des allers-retours entre la répartition de la consommation finale par vecteur énergétique et l'énergie primaire disponible. De plus, de nombreuses contraintes techniques sont présentes avec principalement le respect des puissances disponibles tout au long de l'année pour les multiples vecteurs énergétiques.

Étant donné qu'il s'agit ici de la première édition du scénario négaWatt-Suisse, il a été choisi de simplifier la modélisation de la production d'énergie, principalement au niveau des importations-exportations et pour les transformations énergétiques d'un vecteur à l'autre où seules quelques passerelles ont été considérées. Ces multiples simplifications sont possibles par le fait que le modèle négaWatt propose une consommation d'énergie finale moindre que celle des perspectives énergétiques de l'OFEN, qui sont prises comme références. Ainsi, les niveaux de production de négaWatt sont systématiquement inférieures à ceux de l'OFEN et donc indirectement validés.

Le mix énergétique négaWatt qui en résulte pour 2050 est presque neutre en carbone et presque sans énergie fossile, tout comme celui de l'OFEN. Il offre des avantages certains sur les critères suivants :

- **La neutralité carbone pourrait être atteinte plus rapidement** (négaWatt atteint en 2030 le niveau de consommation de l'OFEN de 2050). Il s'agit bien sûr d'une valeur théorique car les technologies de production d'énergie renouvelable devraient déjà être en place.
- **négaWatt propose un système sans enfouissement de CO₂**, une technologie non durable.
- **Le mix énergétique serait plus robuste** car les besoins en nouvelles technologies, telles que le power-to-x, seraient moindres. En effet, le scénario 2050+ suppose une pénétration rapide de ces nouvelles technologies dans le système de production, impliquant des politiques et des investissements importants qui ne peuvent être totalement garantis.

Ainsi, le scénario négaWatt offre - à travers la sobriété, l'efficacité et les énergies renouvelables - un autre regard sur les évolutions de notre système énergétique, qui pourrait être plus robuste et neutre en carbone plus rapidement.

2 Objectif

Les objectifs du mix énergétique négaWatt pour 2050 sont les suivants :

- Satisfaire la consommation finale d'énergie issus des modélisations ad-hoc;
- Être possible avec les technologies actuelles ;
- Être sans, ou avec peu d'énergie fossile. Néanmoins des émissions de CO₂ sont possibles par l'incinération des déchets ou la combustion du bois et de biogaz ;
- Sortir du nucléaire en 2035 ;
- Avoir un niveau d'importation et d'exportation faible ou nul, afin de garantir l'autonomie énergétique ;
- Minimiser les technologies de captage de CO₂, hormis pour les besoins des technologies power-to-x (P2X), car ces technologies sont complexes et coûteuses. Une approche sobre impliquant une minimisation de la consommation d'énergie est plus robuste ;
- Exclure les technologies d'enfouissement de CO₂ en Suisse et à l'étranger, car elles ne sont pas durablement acceptables.

3 Méthodologie

3.1 Conditions

Réaliser une modélisation de la production d'énergie est un exercice complexe. Étant donné qu'il s'agit ici de la première version du scénario négaWatt, certains points techniques ne sont pas directement intégrés dans la modélisation. Ainsi, la vérification des capacités disponibles sur les cycles usuels inférieurs à une année n'a pas été réalisée. Ces simplifications sont rendues possibles par le fait que l'OFEN a réalisé ses calculs dans son scénario 2050+ et parce que négaWatt propose une consommation finale, puis une production brute, plus basses que celles de l'OFEN, prises comme limites maximales. Ainsi, la consommation moindre proposée par le scénario négaWatt permet par comparaison à 2050+ une validation indirecte.

Les points qui ne sont pas intégrés à l'heure actuelle dans la modélisation négaWatt sont les suivants :

- Les capacités disponibles pour les cycles inférieures à un an (saisons, mois, semaines, jour),
- Les importations et exportations,
- Les variations des stocks,
- Certains transferts énergétiques d'un vecteur à l'autre.

3.2 Méthode et simplification

Afin d'être réaliste et pour qu'il soit facilement modifiable, le modèle négaWatt est une simplification du système actuel. Sa réalisation a nécessité les étapes suivantes :

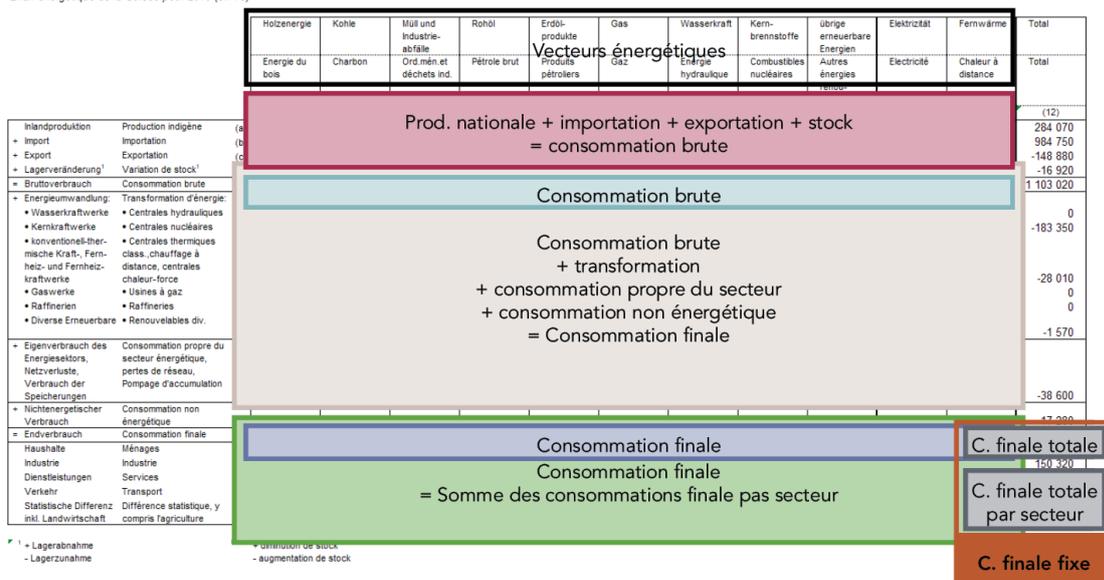
1. Comprendre de manière détaillée le système actuel sur la base des statistiques globales de l'énergie (OFEN, 2020a).
2. Établir un mix énergétique négaWatt actuel de façon à répondre à la consommation finale de nW en 2020, légèrement différente des statistiques actuelles car il s'agit d'une modélisation.
3. Simplifier le mix énergétique actuel, afin de rendre plus évident la modélisation et la compréhension de la production en 2050 tout en intégrant les moyens de production marginalement utilisés aujourd'hui (par exemple le Power-to-X) mais à un fort potentiel en 2050.
4. Établir une revue de littérature sur les perspectives de production d'énergie en 2050.
5. Proposer un mix énergétique négaWatt en 2050.
6. Calculer les émissions de CO₂ en découlant.

3.2.1 Compréhension du système de production et calcul d'un mix énergétique négaWatt détaillé pour 2020

La base de la modélisation négaWatt correspond au bilan énergétique de l'OFEN en 2019. Il est présenté schématiquement sur la Figure 1. La version originale se trouve en annexe (p. 31).

La modélisation négaWatt de 2020 ne présente pas exactement les mêmes valeurs de consommation que les niveaux réels. Il est ainsi nécessaire d'ajuster les valeurs de production présentées par l'OFEN, afin qu'elles répondent à la consommation finale de négaWatt.

Précisons de plus que les consommations finales par vecteur énergétique sont déterminées dans les modélisations par secteur où, par exemple pour le bâtiment, la répartition dans le parc immobilier et l'efficacité des systèmes de chauffage sont déterminées, permettant ainsi le calcul de l'énergie finale.



Bundesamt für Energie BFE, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2019
 Office fédéral de l'énergie OFEN, Statistique globale suisse de l'énergie 2019
 Auskunft/Informations: Giulia Lechthaler-Felber, 058 461 40 49, giulia.lechthaler@bfe.admin.ch

Figure 1 Bilan énergétique de la production en 2020.

3.2.2 Simplification du mix énergétique au vu d'une modélisation en 2050.

Par rapport au bilan énergétique de l'OFEN, certains processus ne sont pas pris en compte et de nouveaux vecteurs énergétiques sont ajoutés. Cette simplification mène à la prise en compte des vecteurs énergétiques et indicateurs suivants :

- **Vecteurs énergétiques finaux et primaires :**
 - Charbon
 - Produits pétroliers
 - Gaz naturel
 - Ordures ménagères et déchets industriels
 - Électricité
 - Combustible nucléaire
 - Force hydraulique
 - Rayonnement solaire
 - Photovoltaïque
 - Chaleur à distance
 - Pompe à Chaleur (PAC)
 - Bois
 - Power-to-X (P2X)
 - Autres énergies renouvelables
- **Indicateurs :**
 - Consommation par secteurs et vecteurs énergétiques finaux
 - Composition du mix électrique, des réseaux de chaleur et du P2X
 - Les transformations suivantes :
 - E. nucléaire → Électricité
 - E. nucléaire → Perte

- E. thermique → Électricité
- E. hydro → Électricité
- E. hydro → Perte
- Photovoltaïque → Électricité
- Déchets → Chaleur à distance
- Gaz nat. → Chaleur à distance
- PAC → Chaleur à distance
- Géothermie → Chaleur à distance
- Chaleur à distance → Perte
- Photovoltaïque → P2X
- P2X → Perte

L'ensemble de ces indicateurs par vecteurs sont calibrés pour 2020 de façon à représenter le plus fidèlement possible la situation actuelle tout en assurant l'équilibre entre la demande et l'offre.

3.2.3 Revue de littérature et mix énergétique 2050

Une revue de littérature est réalisée de façon à mettre en avant les technologies de production d'énergie qui seraient disponibles en 2050 et leur capacité. Le principal document utilisé est le modèle de l'OFEN (2020c) qui est constitué de deux scénarios ; au fil de l'eau (WWB) et ZERO Basis (zéro CO₂), décliné en trois variantes (A, B et C).

Sur cette base, les indicateurs pour 2050 sont renseignés manuellement de manière à répondre aux objectifs de négaWatt (p. 10), d'assurer l'équilibre entre la demande et l'offre et de ne pas dépasser les niveaux de production présentés dans le scénario ZERO Basis. Les valeurs de consommation d'énergie finale moindres proposées par négaWatt par rapport au scénario ZERO Basis permet une validation indirecte, notamment par rapport aux capacités, prises en compte par le scénario de l'OFEN (voir chapitre 3.1 Conditions).

Les consommations finales par secteur et vecteur sont connues, car déterminées dans les modélisations sectorielles. Néanmoins, selon les estimations de production d'énergie par vecteur disponible en 2050, il peut être nécessaire de modifier des indicateurs déterminants de la consommation finale. Par exemple, il est possible de corriger la composition du parc automobile s'il s'avère qu'il y aurait plus d'hydrogène disponible pour les transports en 2050, et inversement. Le processus est donc itératif. D'un point de vue technique, les modifications ne se répercutent par contre pas automatiquement dans les modélisations de consommation sectorielle, il est nécessaire de le faire manuellement.

4 Fonctionnement du fichier Excel

4.1 Onglets input output

Comme pour les autres modèles, l'onglet input-output permet de faire varier les principaux indicateurs avec une visualisation des résultats. Il est constitué de cinq zones représentées par la Figure 2.

1. **Input** : les valeurs qui s'y trouvent sont directement utilisées dans la modélisation.
2. **Suggestion d'input négaWatt** : une proposition d'un jeu de données, correspondant au scénario négaWatt, qui peut être entré dans le modèle par un copier-coller dans la zone 1.
3. **Output** : les valeurs qui s'y trouvent sont les résultats de la modélisation selon les données présentées dans la zone 1.
4. **Output négaWatt** : les résultats de la modélisation selon les données présentées dans la zone 2.
5. **Données informatives et comparatives** : les données présentées sont proposées à titre informatif. Cela peut être des statistiques nationales ou des résultats d'autres modélisations. Cette zone n'est pas systématiquement présente dans les fichiers Excel.

Figure 2 Onglet Input-ouput principaux constitué de 5 zones permettant de faire varier les principaux indicateurs de la modélisation négaWatt.

4.2 Autres onglets

- **Modélisation** : les calculs sont faits dans cet onglet. Les valeurs d'entrée sont celles de la zone 1 sur la Figure 2 et les résultats sont ensuite affichés dans la zone 4 de la Figure 2. La première partie de cette feuille va chercher dans les autres micros-modèles les valeurs de consommation finale.
- **Bilan consommation finale** : c'est un récapitulatif de toutes les consommations finales, par secteurs, sous-secteurs et vecteurs énergétiques pour le scénario négaWatt et par secteur et sous-secteur pour le scénario tendanciel et les effets de la sobriété et de l'efficacité.

- **Tableau et graphique** : cet onglet regroupe toutes les données utiles à la réalisation de tableaux ou de graphiques qui sont présents dans les rapports. Il peut s'agir de données passées ou futures.
- **Tableau croisé** : contient un tableau croisé dynamique des valeurs présentes dans l'onglet modélisation. Utilisé pour analyser les résultats.
- **Données statistiques globales et 2050+** : contient des données utilisées comme référence pour la modélisation, issues de statistiques globales et des perspectives énergétiques de l'OFEN 2050+.
- **Données 2019 statistiques globales** : deux tableaux synthétisant les consommations et productions d'énergie en Suisse en 2019. L'un avec les valeurs des statistiques globales et un autre avec les valeurs de négaWatt, de façon à être le plus proche de la réalité.
- **Bilan énergie manuel** : les mêmes tableaux que ceux de l'onglet précédent mais avec des flux simplifiés pour les scénarios actuels et futurs.

5 Revue de littérature

5.1 Historique de la consommation énergétique (OFEN, 2020a)

Depuis les années 1940, les consommations d'énergies brutes et finales ont augmenté jusqu'en 2010 et sont aujourd'hui en légères baisses. Les principaux agents énergétiques primaires sont le pétrole, le gaz, la force hydraulique et le combustible nucléaire (Figure 3).

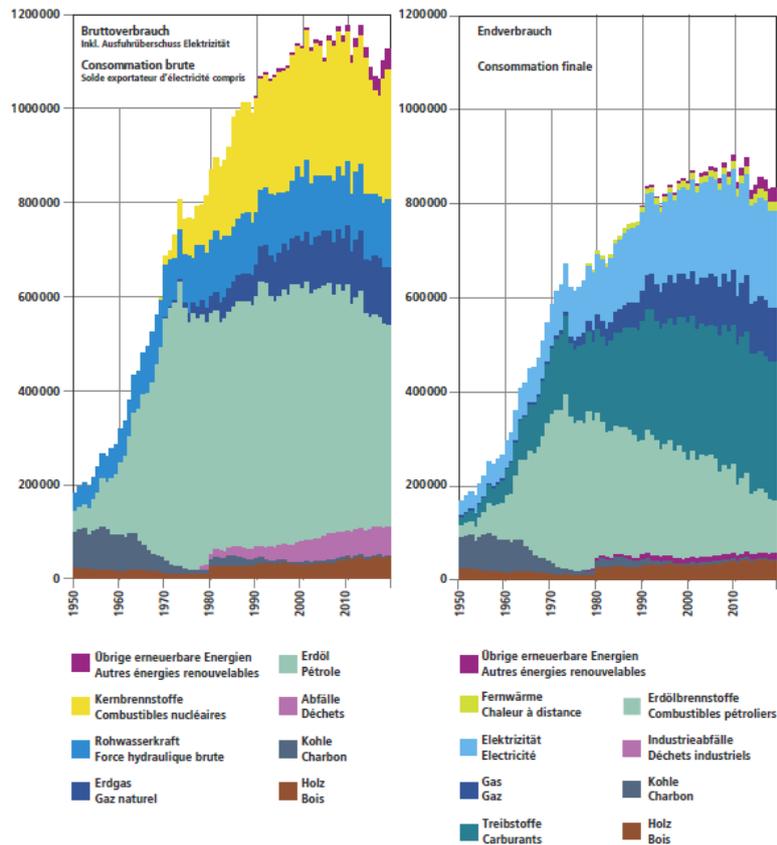


Figure 3 Évolution de la consommation finale d'énergie (OFEN, 2020a).

Les principaux secteurs sont les transports et les ménages (bâtiment) (Figure 4).

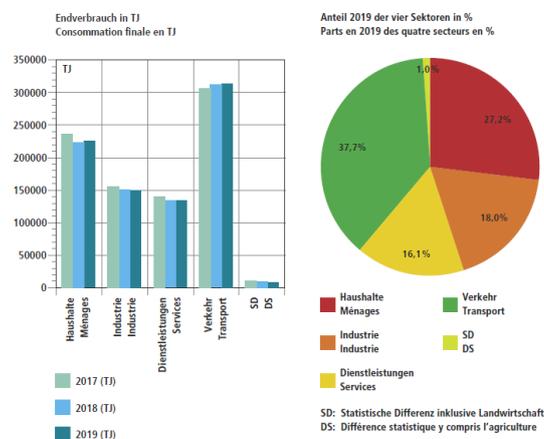


Figure 4 Consommation énergétique finale par secteur (OFEN, 2020a).

Les flux d'énergie entre les agents énergétiques primaires et les consommations finales par secteur sont illustrés par la Figure 5 (ci-dessous) et la Figure 23 (Annexes). Ces valeurs serviront de référence par la suite pour fixer les indicateurs de production de 2020.

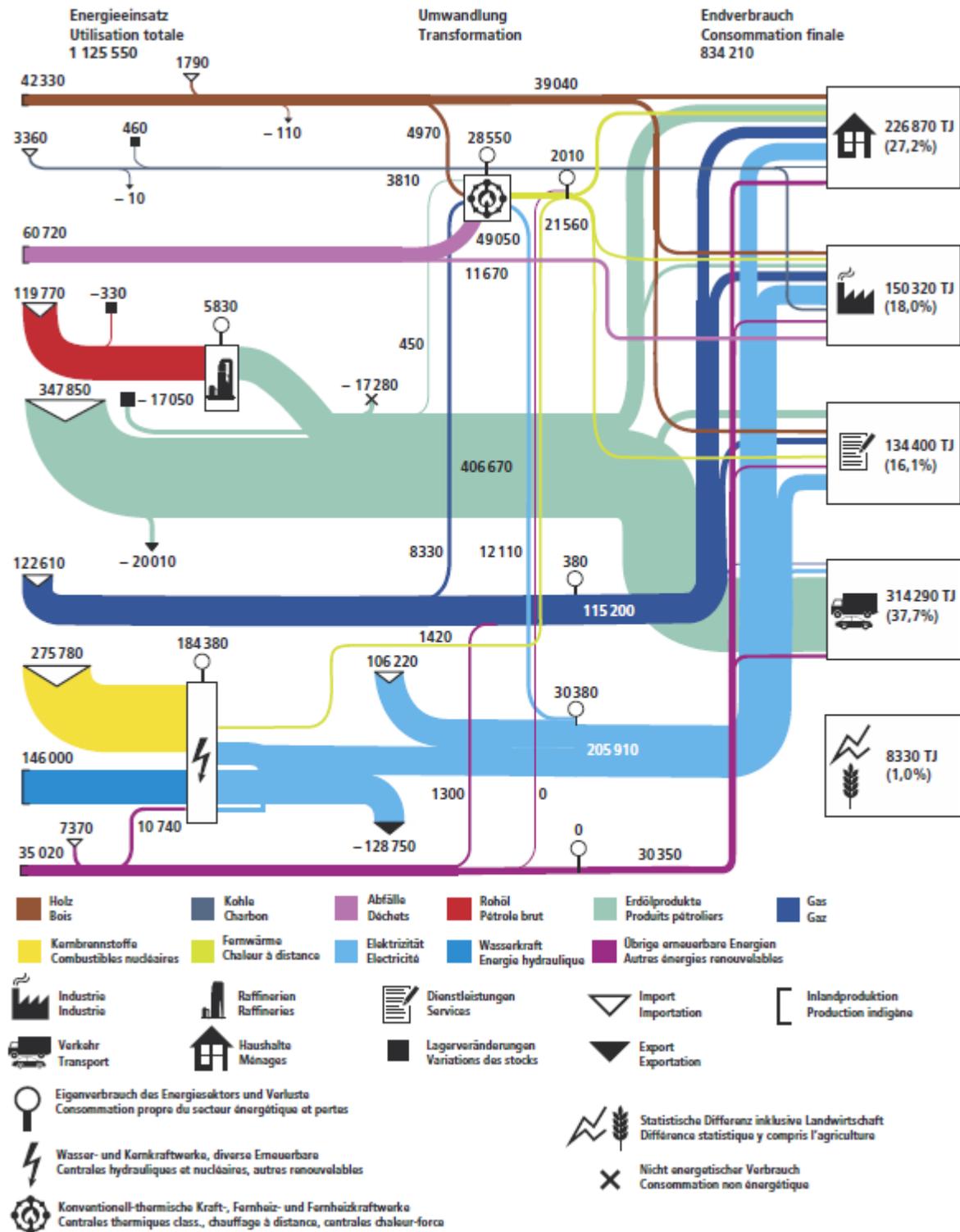


Figure 5 Flux énergétique entre les agents énergétiques primaires et les consommations finales par secteur (OFEN, 2020a).

5.2 ZERO Basis (OFEN, 2020c)

L'OFEN vient de publier les premiers résultats de ses nouvelles perspectives énergétiques 2050+ et d'autres publications plus détaillées suivront dans le courant de l'année 2021. Les données actuellement disponibles sont présentées dans ce chapitre.

Tout d'abord, la consommation finale totale d'énergie passe de 757 PJ aujourd'hui à 524 PJ en 2050 (Figure 6). Dans sa précédente version, les perspectives énergétiques estimaient la consommation d'énergie finale à environ 540 PJ dans le scénario Nouvelle Politiques Énergétiques (NPE) contre environ 570 PJ pour le scénario de référence(PCF) (OFEN, 2012).

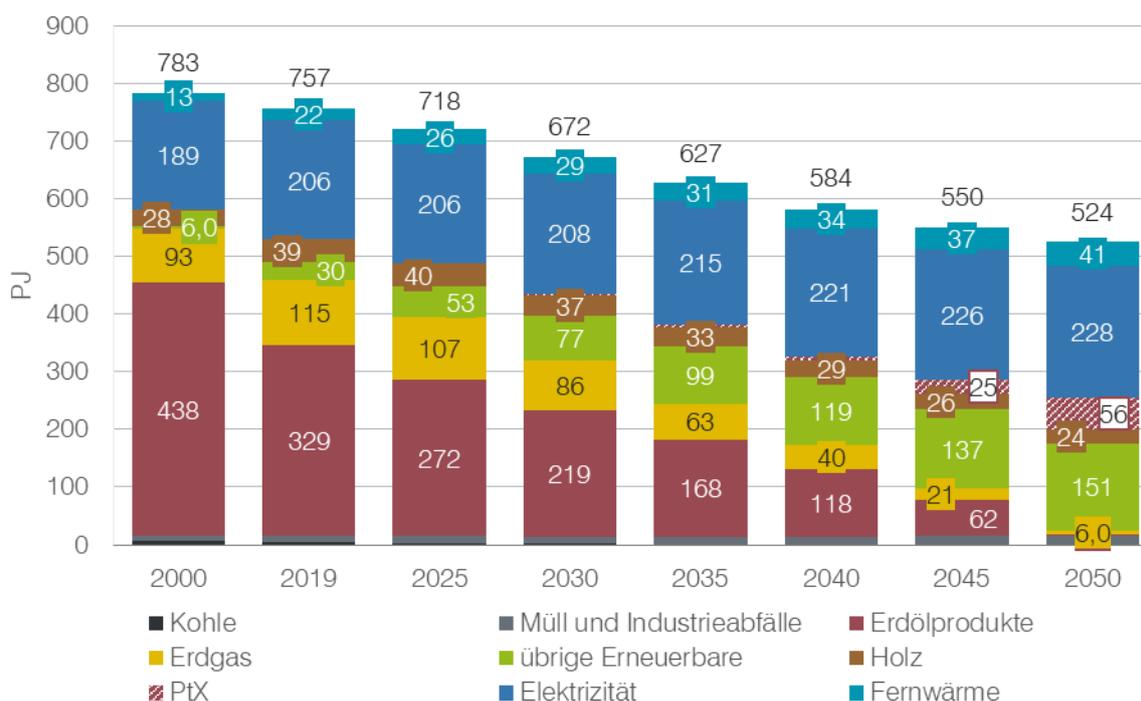


Figure 6 Consommation finale d'énergie (OFEN, 2020c).

A l'autre bout de la chaîne, la consommation brute diminue aussi avec une disparition du nucléaire et une baisse forte des produits pétroliers compensée par des énergies renouvelables (Tableau 1).

Table 14: Bruttoenergieverbrauch

Entwicklung des Bruttoenergieverbrauchs nach Energieträgern im Szenario ZERO Basis, in PJ

Szenario	2000	2019	2025	2030	2035	2040	2045	2050
ZERO Basis Holzenergie	28	47	48	45	44	42	41	39
Kohle	6	4	3	2	1	0	0	0
Müll und Industrieabfall	46	60	59	59	60	60	60	59
Mineralöle	472	356	298	244	194	143	87	22
Erdgas	102	121	116	94	69	45	24	6
Wasserkraft	136	140	146	150	151	158	159	161
Kernbrennstoffe	272	268	178	94	0	0	0	0
übrige Erneuerbare	7	45	78	123	170	232	292	350
Elektrizität	-25	-11	11	27	46	31	16	-1
Fernwärme	0	0	0	0	0	0	0	0
PtX	0	0	0	0	1	2	18	49
Summe	1 044	1 033	938	840	735	713	698	685
WWB Summe	1 044	1 033	956	875	785	764	744	729

Tableau 1 Production brute d'énergie(OFEN, 2020c).

En ce qui concerne la production d'électricité, elle augmente et est presque totalement renouvelable dès 2035 avec des importations qui diminuent au fur et à mesure pour devenir nulle en 2050 sur le bilan annuel (Figure 7). Elles restent néanmoins nécessaires en hiver avec un besoin estimé à 9 PJ.

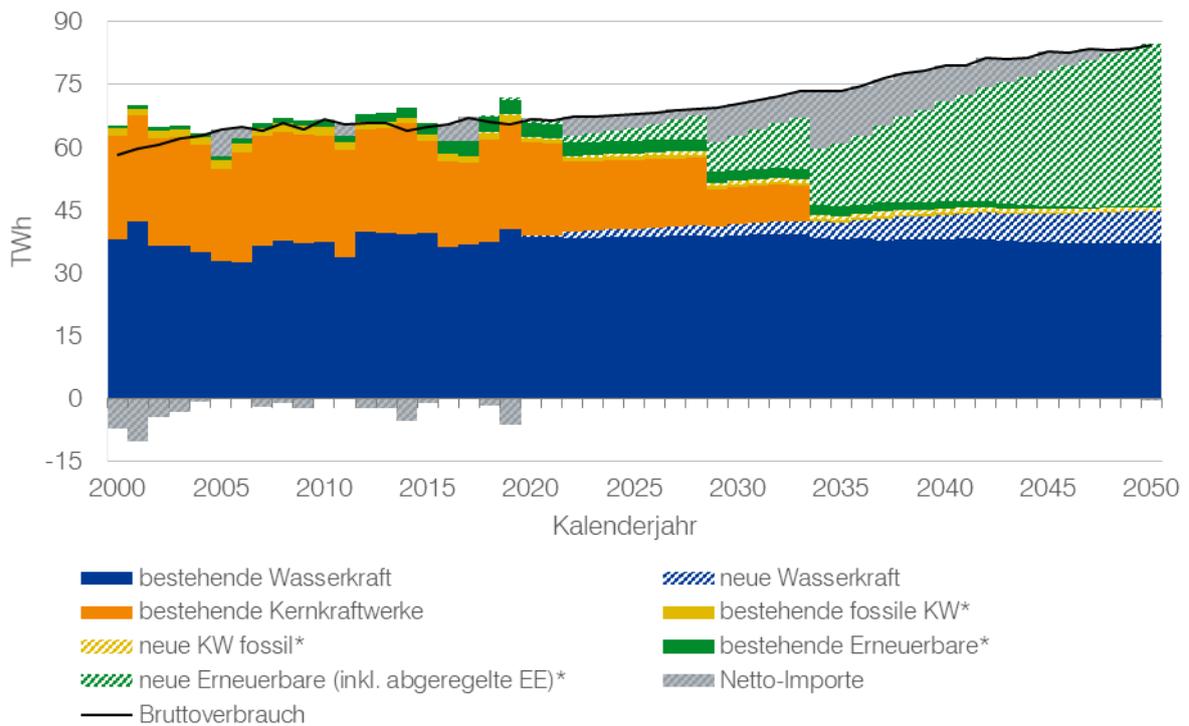


Figure 7 Structure de la production d'électricité par technologie, bilan annuelle (OFEN, 2020c).

La production d'électricité à partir d'énergies renouvelables se développe fortement, essentiellement par du photovoltaïque (Figure 8) et les technologies Power-to-X qui permettent de stocker cette énergie.

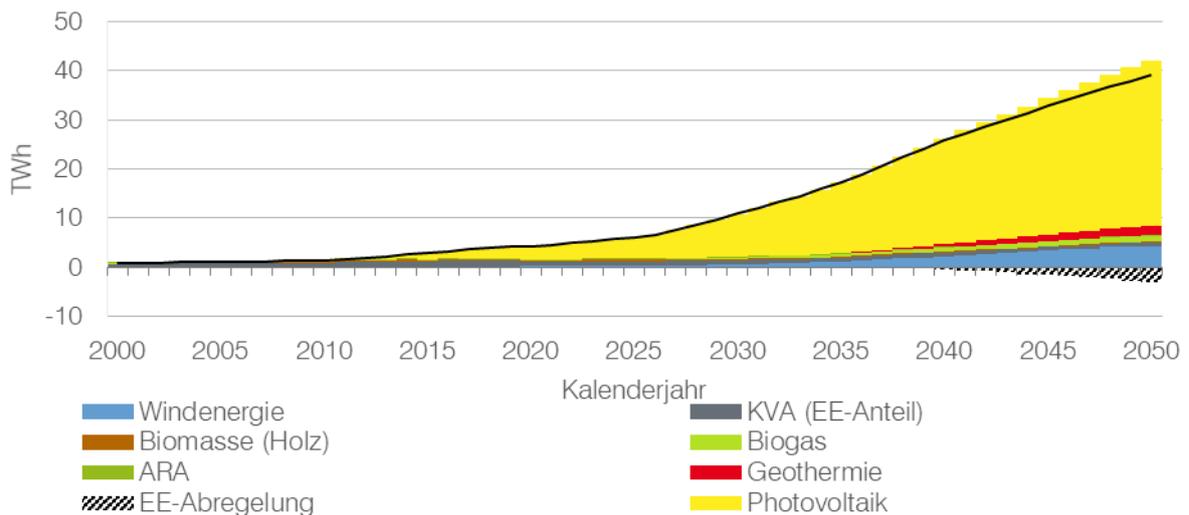


Figure 8 Production d'électricité à partir d'énergie renouvelable (OFEN, 2020c).

Enfin, la Suisse devient neutre en gaz à effet de serre (GES) en 2050 grâce à des technologies d'émissions négative (NET) et de captage et stockage de CO₂ (CCS).

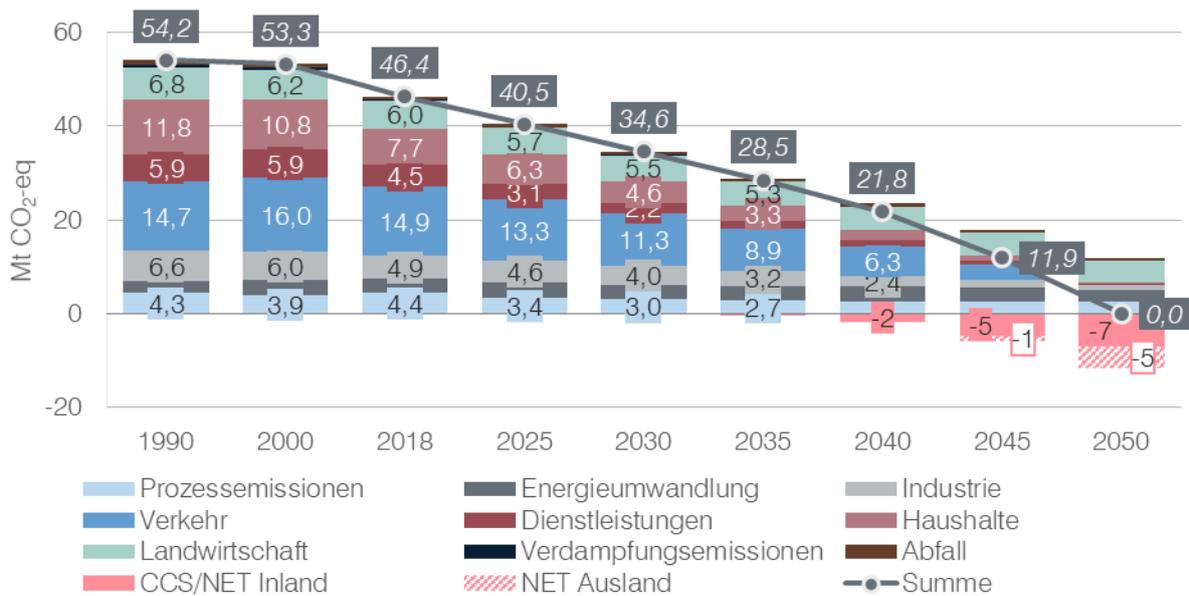


Figure 9 Évolution des GES (OFEN, 2020c).

5.3 Révolution énergétique (Greenpeace, 2013)

Greenpeace a aussi proposé un scénario qui tablait déjà sur une quasi-neutralité carbone (Figure 10).

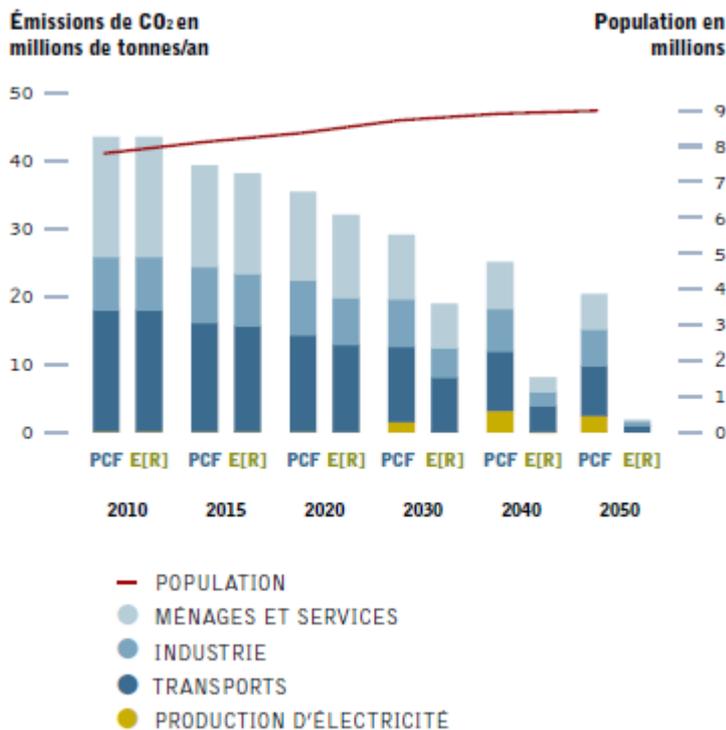


Figure 10 Émission de CO2 selon le scénario de référence de l'OFEN des précédentes perspectives énergétiques (PCF) (OFEN, 2012) et selon Greenpeace (E[R]) (Greenpeace, 2013).

Pour ce faire, la consommation finale baisse (amélioration de l'efficacité) et les énergies renouvelables prennent de plus en plus de place avec notamment du photovoltaïque et des technologies power-to-x (Figure 11 et Figure 12).

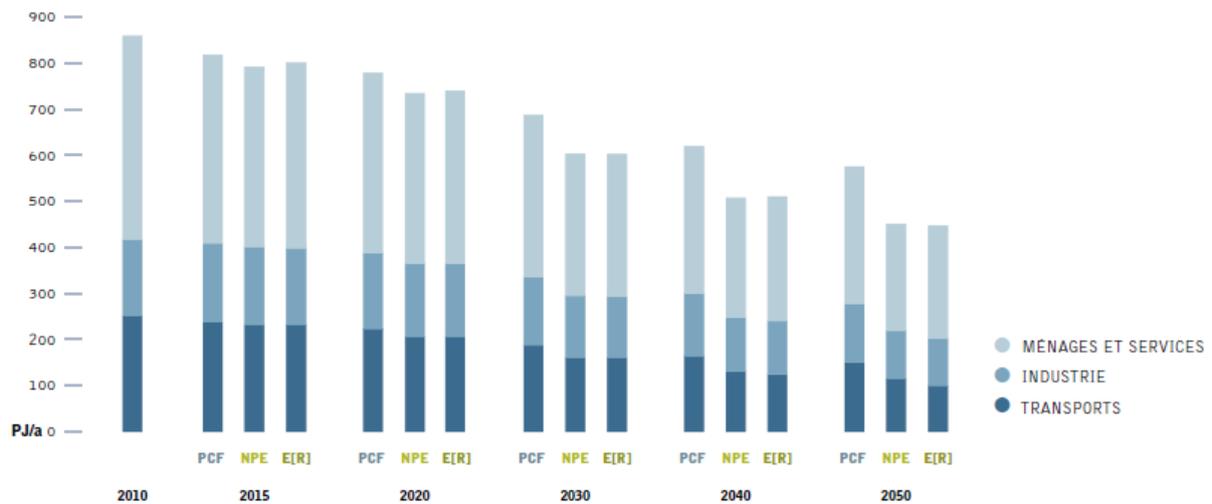


Figure 11 Consommation d'énergie par secteur. PCF : Scénario de référence de l'OFEN en 2012, NPE : nouvelles politiques énergétiques de l'OFEN en 2012 et E[R] : scénario de Greenpeace.

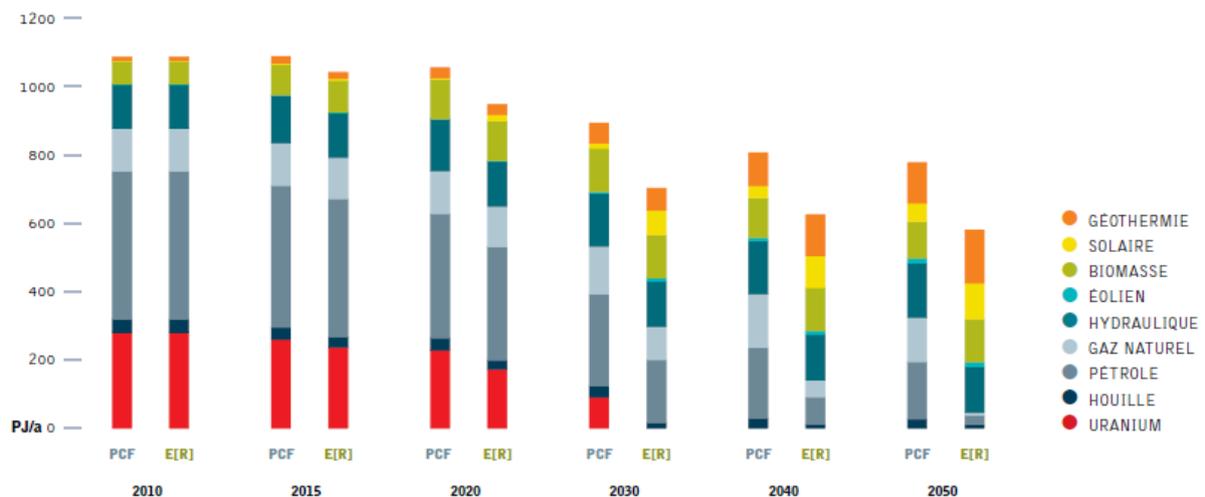


Figure 12 Énergie primaire. PCF : Scénario de référence de l'OFEN en 2012, NPE : nouvelles politiques énergétiques de l'OFEN en 2012 et E[R] : scénario de Greenpeace.

5.4 Power-to-X

Les technologies Power-to-X (P2X) sont une des clés du scénario ZERO Basis. Elles consistent à utiliser le courant excédentaire issu des énergies renouvelables pour produire par conversion électrochimique des vecteurs énergétiques (hydrogène (H₂), méthane (CH₄), méthanol, etc.) qui peuvent être stockés et utilisés au moment voulu comme carburant pour les transports ou la production de chaleur. En effet, l'offre en énergie renouvelable est fluctuante - selon la météo pour le photovoltaïque et l'éolien - et stocker cette énergie lors de pic de production permet de compenser les phases de production faible. De plus, les technologies P2X permettent de compenser les émissions de CO₂, car ce dernier peut être utilisé comme source de carbone dans ces procédés (Institut Paul Scherrer, 2019). La Figure 13 résume ces différents processus.

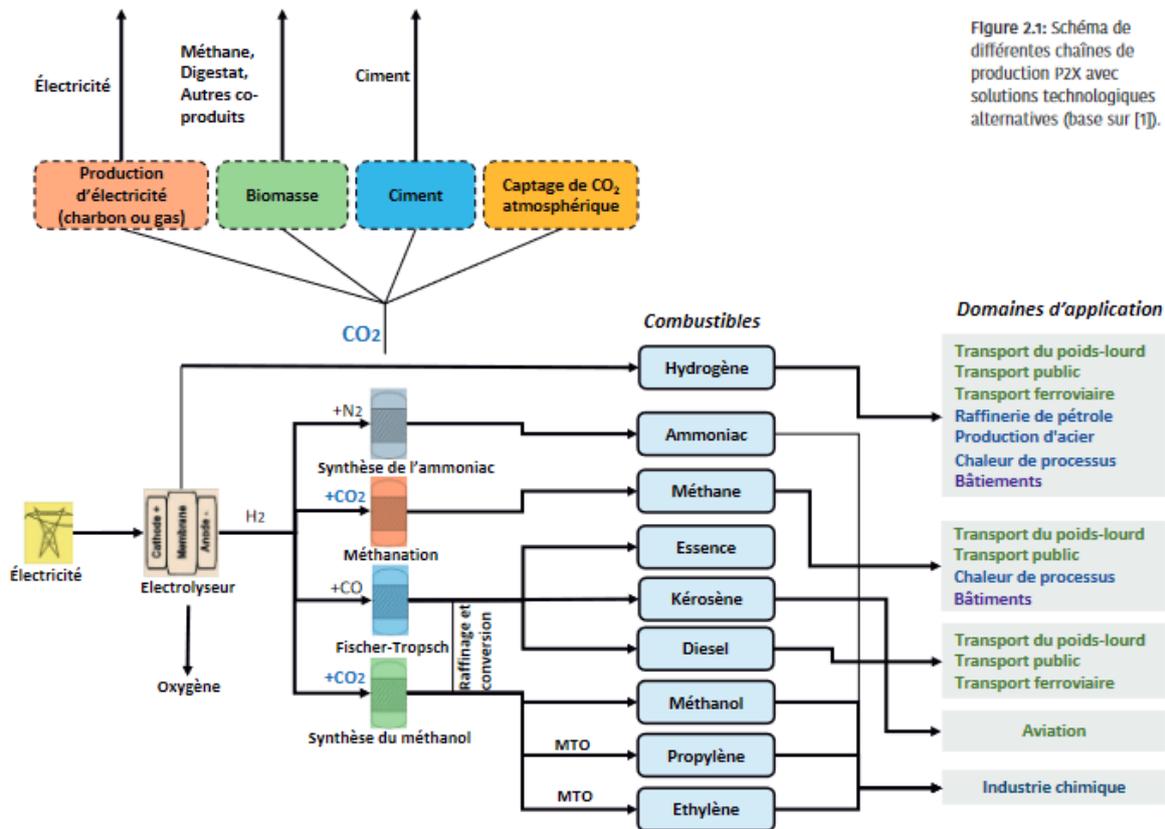


Figure 2.1: Schéma de différentes chaînes de production P2X avec solutions technologiques alternatives (base sur [1]).

Figure 13 Représentation schématiques de procédé P2X (Institut Paul Scherrer, 2019).

Actuellement, les coûts de cette technologie sont élevés, mais ils pourraient diminuer de deux tiers d'ici à 2030 grâce aux progrès techniques et à l'expérience croissante dans ce domaine. Le rendement énergétique de la production d'hydrogène pourrait être de 70 % en 2050 dans le cadre d'une politique de développement rigoureuse de cette technologie (Institut Paul Scherrer, 2019).

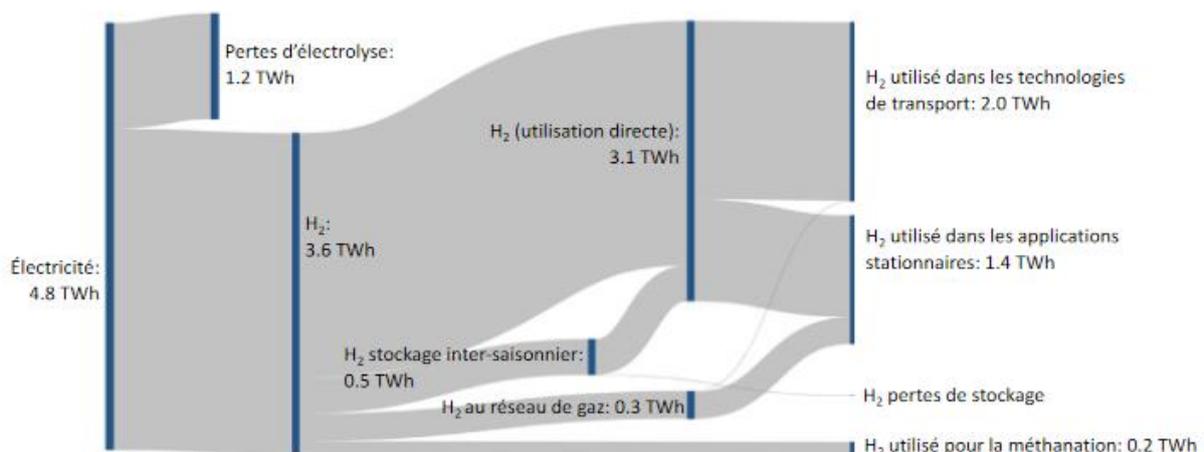


Figure 14 Rendement d'un système P2X réalisable en 2050 dans le cadre d'une politique rigoureuse (Institut Paul Scherrer, 2019).

6 Hypothèses

6.1 Mix énergétique négaWatt pour l'électricité et les réseaux de chaleur

Indicateur	Unité	2020	2050
Part de l'énergie électrique finale issue de la force hydraulique	%	54,5	73
Part de l'énergie électrique finale issue de combustible nucléaire	%	37	0
Part de l'énergie électrique finale issue de centrales thermiques	%	2	0
Part de l'énergie électrique finale issue du photovoltaïque	%	6,5	27
Part de l'énergie électrique finale utilisée pour le pompage turbinage (perte)	%	13	13
Rendement de la production d'électricité à partir de combustible nucléaire	Ef/Ei	0,3	0,3
Rendement de la production de P2X à partir d'électricité	Ef/Ei	0,7	0,7
Part de l'énergie finale des réseaux de chaleur issue de l'incinération de déchets	%	40,0	20,0
Part de l'énergie finale des réseaux de chaleur issue des pompes à chaleur	%	15,0	50,0
Part de l'énergie finale des réseaux de chaleur issue de la géothermie	%	5,0	30,0
Part de l'énergie finale des réseaux de chaleur issue du gaz naturel	%	40,0	0,0

Tableau 2 Indicateurs de répartition des sources énergétiques pour le mix électrique et celui des réseaux de chaleur.

6.2 Émission de CO2

Ces valeurs utilisées pour le modèle négaWatt sont fournies par l'OFEV (2019) sauf pour le P2X qui est calculé à partir du scénario ZERO Basis.

Agent énergétique	Émission de CO2 [Mt/PJ]
Charbon	92,7
Ordures ménagères	91,9
Pétrole brute	73,7
Produits pétroliers	73,8
Gaz naturel	56,3
P2X	-0,1

Tableau 3 Émissions de CO2 par vecteur énergétique brute.

7 Résultats

En 2050 et selon le scénario négaWatt, la Suisse pourrait consommer 355 PJ contre 721 PJ aujourd'hui (Figure 15). Le secteur du bâtiment consommerait 58% de l'énergie finale totale, puis vient l'industrie (24%), les transports (15%) et l'agriculture (3%). L'agriculture n'a pas été modélisée et la valeur actuelle a été reprise en 2050.

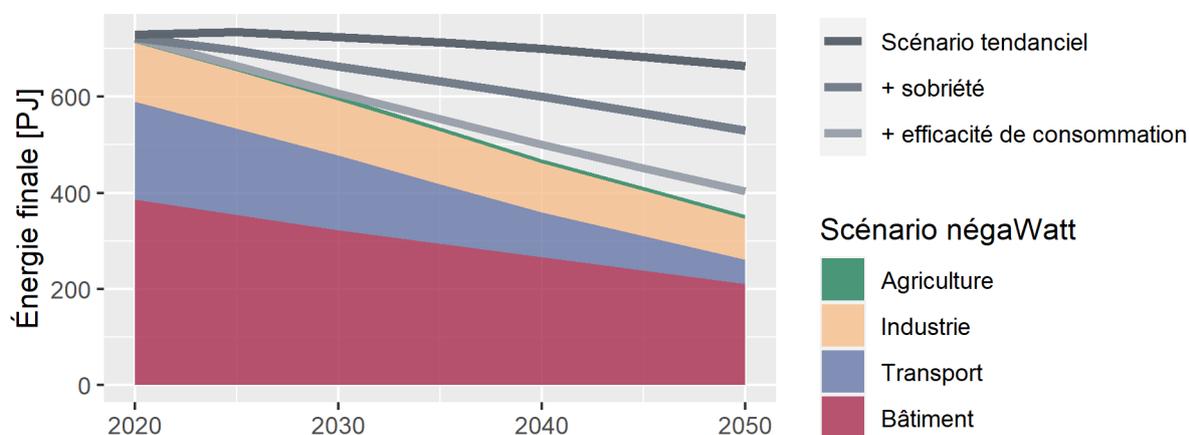


Figure 15 Évolution de la consommation énergétique suisse. Le bâtiment reste le plus gros secteur suivi par l'industrie, les transports et l'agriculture.

En termes de vecteurs énergétiques, la consommation finale en 2050 est principalement électrique (172 PJ, 48%), suivie par les PAC (62 PJ, 17%). Seul 24 PJ (6%) de cette consommation est non renouvelable.

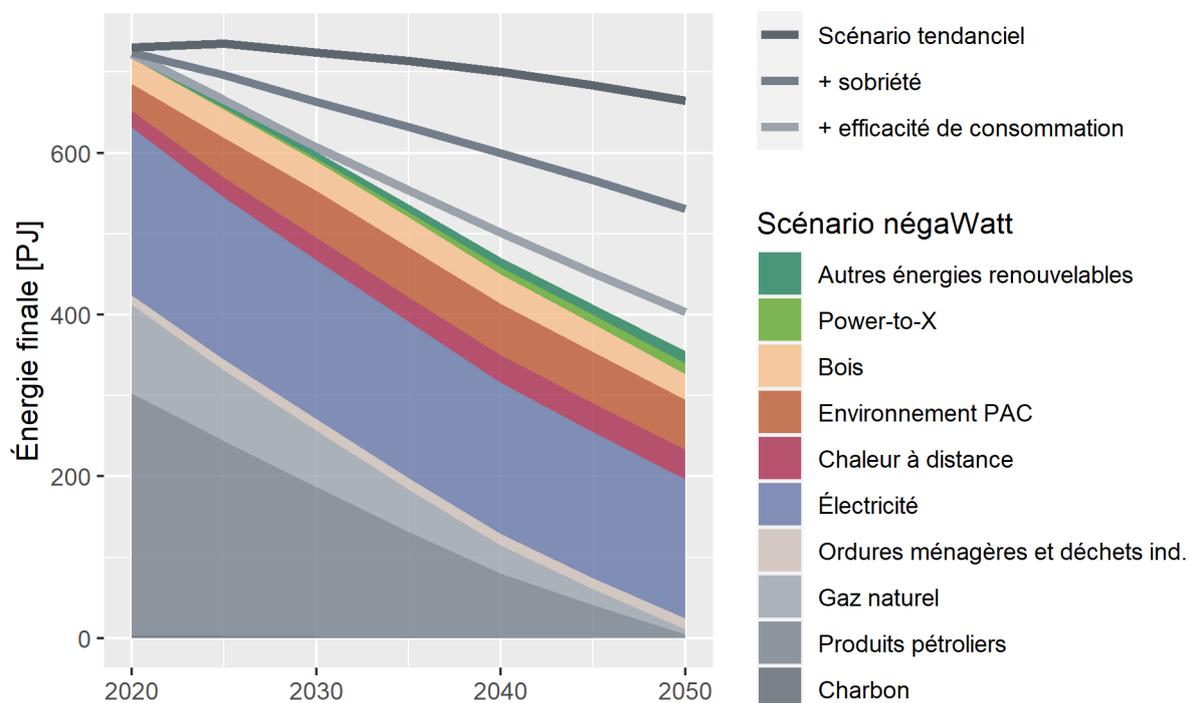


Figure 16 Consommation finale par vecteurs énergétiques. En 2050, seuls 24 PJ sont non renouvelables, dont

Sur cette base, le mix électrique est défini avec l'énergie nucléaire qui est au fur et à mesure remplacée par du photovoltaïque de façon à sortir du nucléaire en 2035 (Figure 17). Il en est de même pour la chaleur à distance où les pompes à chaleur et la géothermie profonde remplaceront l'énergie issue du gaz naturel à l'horizon 2050.

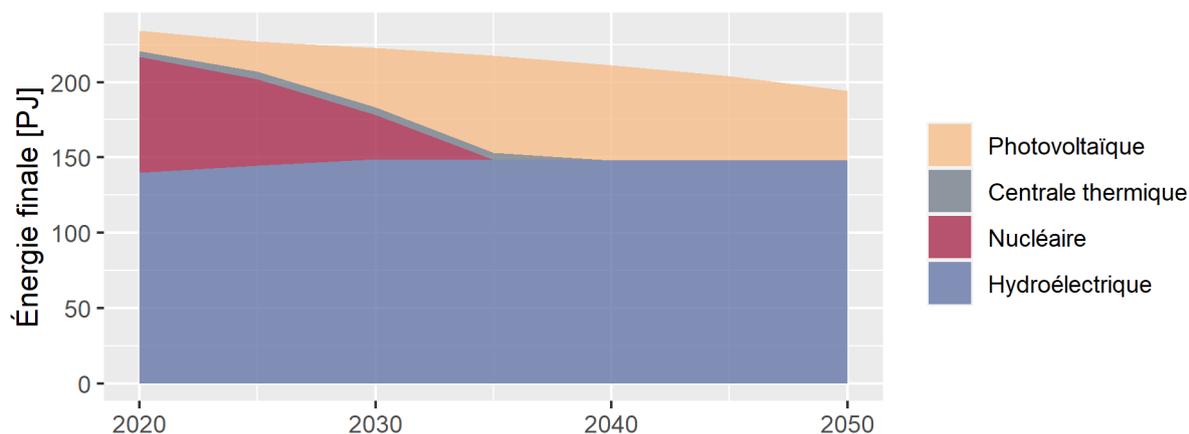


Figure 17 Mix électrique en énergie finale. L'électricité issue du nucléaire sera au fur et à mesure remplacée par du photovoltaïque.

La consommation brute par vecteur énergétique primaire est ensuite calculée (Figure 18) puis les résultats sont validés par comparaison aux perspectives énergétiques 2050+ de l'OFEN (2020) ; sans oublier de vérifier que les consommations énergétiques par vecteur primaire de négaWatt restent inférieures aux niveaux proposés par l'OFEN. Cela est possible car la consommation finale négaWatt est systématiquement inférieure. Cette méthodologie a été choisie car réaliser une prospective détaillée des potentiels de production énergétique est une démarche complexe et coûteuse. En conséquence, se baser sur les résultats de l'OFEN permet des économies de moyens et une validation solide.

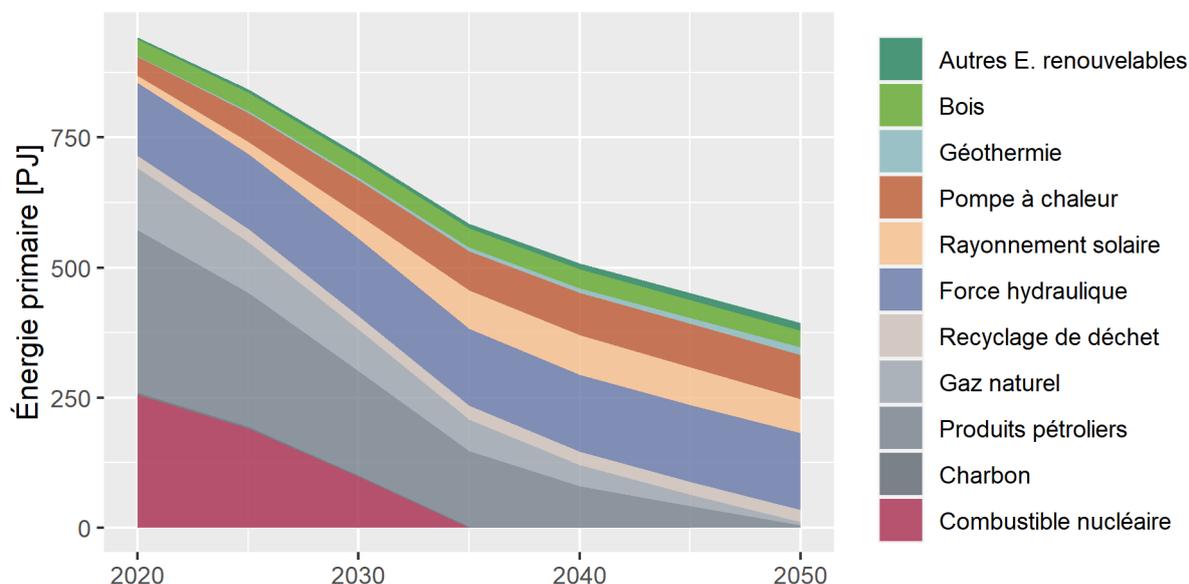


Figure 18 Consommation brute par vecteurs énergétiques primaires. La Suisse sort du nucléaire en 2035 et en 2050 seuls 33,7 PJ ne sont pas renouvelables dont 23 PJ sont issus du recyclage de déchets.

En 2050, la consommation en énergie primaire est de 393 PJ dont 148 PJ (38 %) sont issus de la force hydraulique, 86 PJ (22 %) des PAC et 65 PJ (16 %) du rayonnement solaire. L'énergie produite par les PAC est principalement consommée par le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) alors que l'électricité produite par la force hydraulique ou par rayonnement solaire est consommée par tous les secteurs (Figure 19). De plus, aucune importation d'énergie n'est nécessaire en 2050 pour satisfaire la demande.

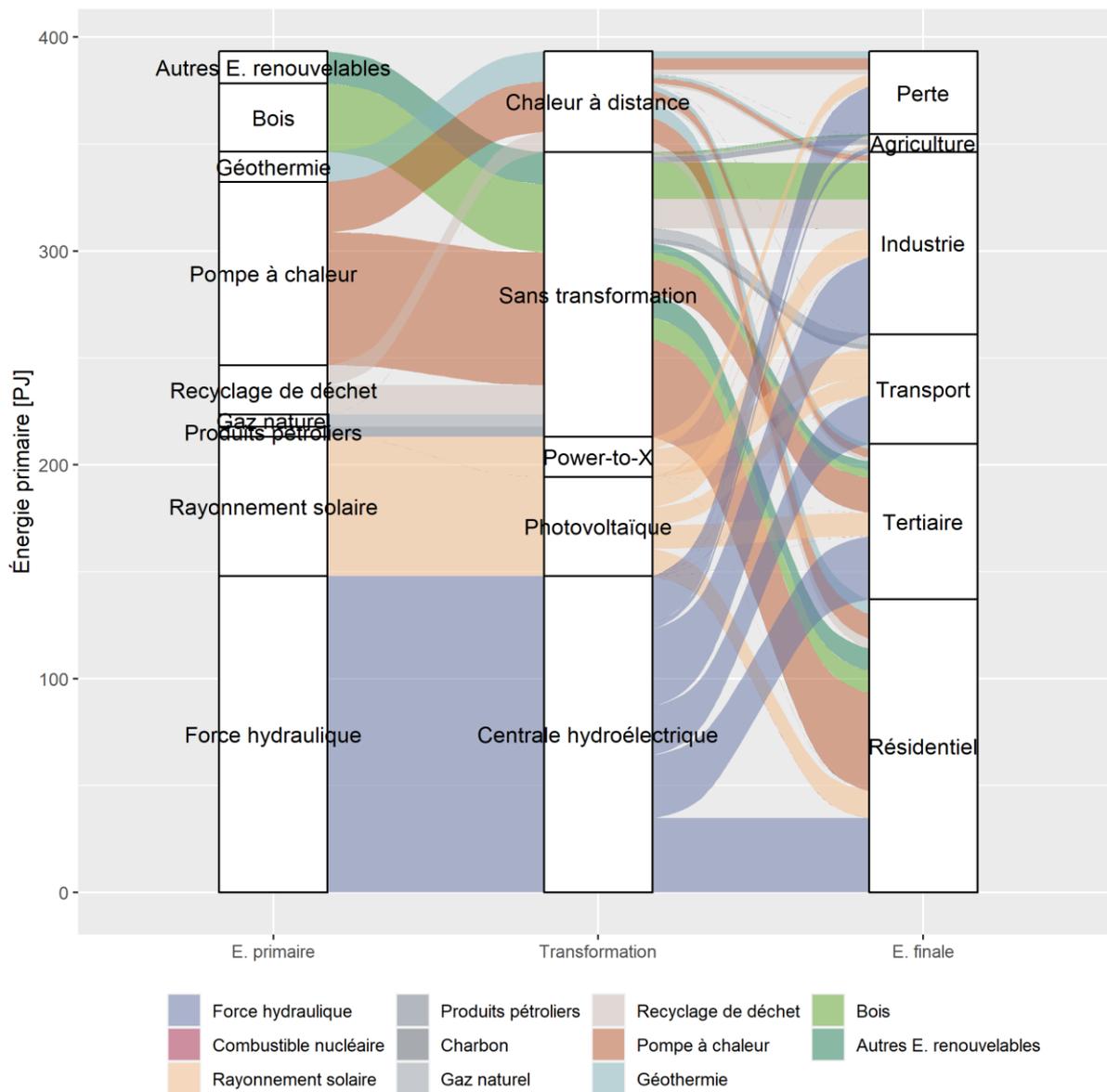


Figure 19 Flux énergétiques des vecteurs primaires par secteur de consommation en 2050.

Enfin, les émissions de CO₂ sont calculées à partir de la consommation énergétique par vecteur primaire (Figure 20). En 2050, 2.8 MtCO₂ sont émises dont 2.1 MtCO₂ par l'incinération de déchets pour la production d'énergie. Précisons qu'il s'agit d'une quantité de CO₂ et non d'équivalent CO₂. Cette dernière pourrait être déterminée à partir des secteurs de l'industrie et de l'agriculture.

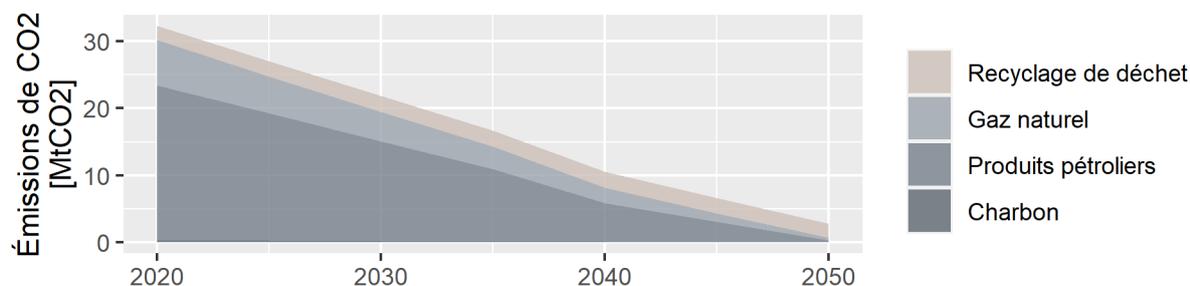


Figure 20 Émission de CO₂ par vecteurs énergétiques primaires, 2.8 MtCO₂ sont émises en 2050 dont 2.1 MtCO₂ sont due au recyclage de déchets pour la production d'énergie.

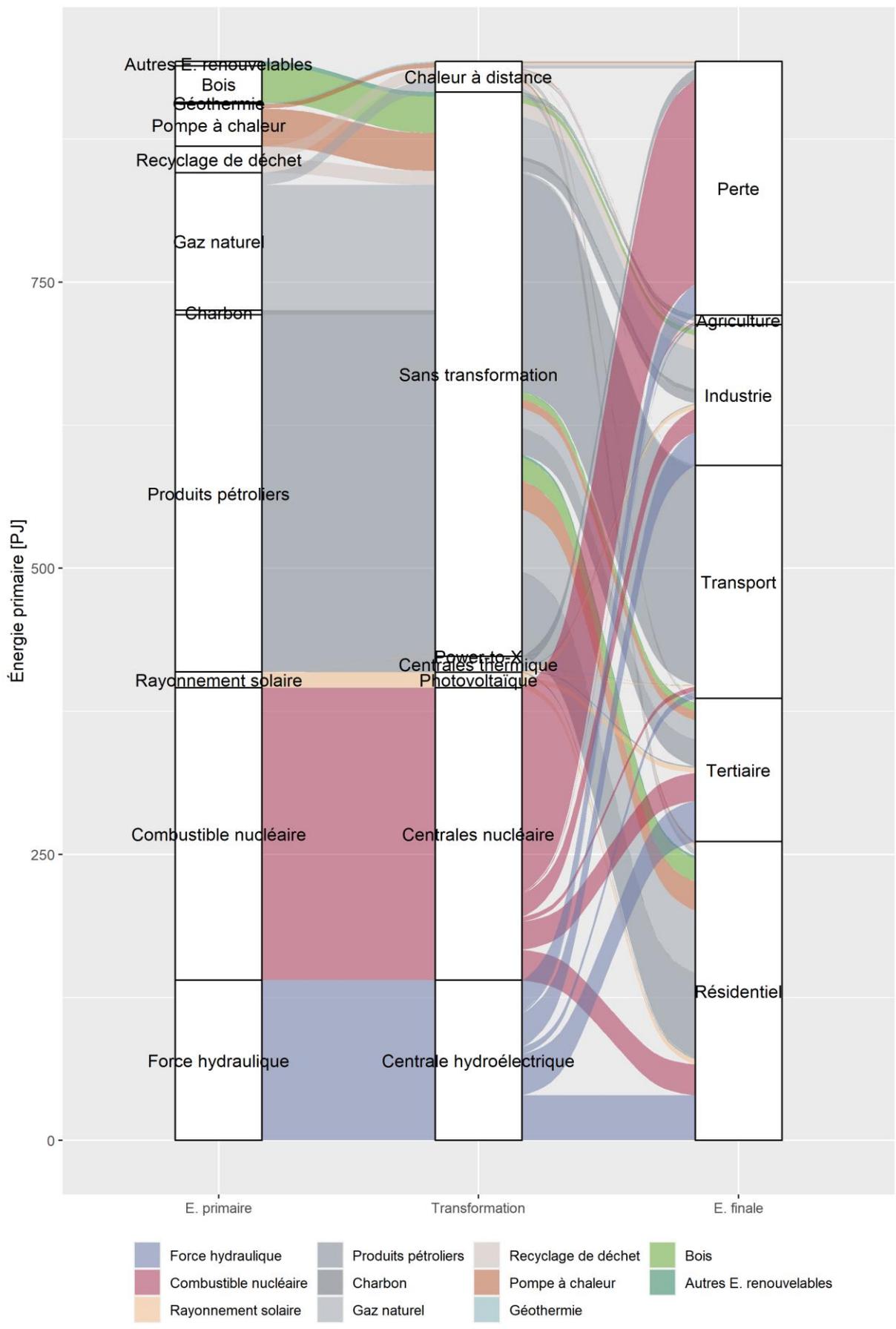


Figure 21 Flux énergétiques des vecteurs primaires par secteur de consommation en 2050.

8 Comparaison du scénario négaWatt avec les statistiques et les perspectives énergétiques de l'OFEN

En 2020, la modélisation négaWatt est proche des statistiques globales et des perspectives énergétiques de 2050+ (Figure 22). La différence dans le secteur des transports est due à la non prise en compte des engins de chantiers et agricoles. Celle dans le secteur de l'industrie s'explique par la prise en compte des statistiques sectorielles (OFEN, 2020b) et non globales (OFEN, 2020a).

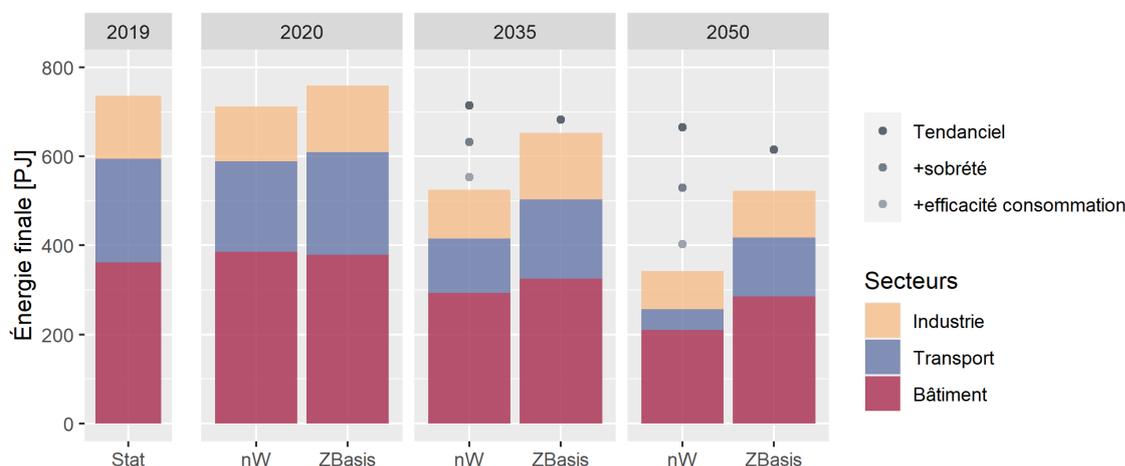


Figure 22 Consommation finale par secteur selon les différents scénarios.

La consommation finale totale estimée par l'OFEN en 2050 est atteinte par le scénario négaWatt en 2035, année de sortie du nucléaire de la Suisse. Lors de cette période, l'approvisionnement énergétique sera probablement plus difficile de par la fermeture récente des centrales nucléaires dont la production devra être compensée. En ce sens, la démarche négaWatt – sobriété, efficacité et renouvelable – présente un avantage conséquent car une consommation moindre pourra plus facilement être satisfaite par des énergies renouvelables, sans être dépendant des énergies fossiles ou des importations.

9 Discussion et conclusion

La modèle de production d'énergie proposé par négaWatt est simple et permet d'évaluer la faisabilité du scénario dans son ensemble consommation-production. Il est presque neutre en CO₂ en 2050 (l'incinération des déchets continue d'émettre du CO₂), atteint la consommation finale estimée par l'OFEN dès 2035 et n'inclut pas de stockage de CO₂. Les importations ne sont pas directement estimées, hormis pour la production d'hydrogène à partir des technologies P2X qui est locale dans le scénario négaWatt au lieu d'en importer 49 PJ comme dans le scénario de l'OFEN. Cela est rendu possible par une consommation moindre qui permet d'utiliser le surplus d'énergie pour produire de l'hydrogène localement au lieu d'en importer.

La validation des consommations brutes a été réalisée par comparaison aux valeurs du scénario ZERO Basis en proposant systématiquement des valeurs inférieures. Cette option méthodologique gagnerait à être associée à une étude détaillée des possibilités de développement des différents vecteurs énergétiques. En parallèle, plusieurs points de cette modélisation pourraient être améliorés, notamment avec une étude plus poussée des capacités en proposant un équilibre en hiver et en été, par une modélisation des années intermédiaires (2025-2045) et en tenant compte des importations et exportations.

Au-delà de ces quelques éléments, cette modélisation vient conclure le premier scénario énergétique de négaWatt qui pourra être exploité dès maintenant pour illustrer les avantages des trois piliers négaWatt à savoir la sobriété, l'efficacité et les renouvelables.

10 Références

- Greenpeace. (2013). *Révolution énergétique—Greenpeace*.
<https://www.greenpeace.ch/fr/publication/4944/revolution-energetique/>
- Institut Paul Scherrer. (2019, juillet 3). *Le système énergétique du futur et le Power-to-X*.
<https://www.psi.ch/fr/media/actualites-recherche/le-systeme-energetique-du-futur-et-le-power-to-x>
- OFEN. (2012). *Perspectives énergétiques 2050*.
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politique/strategie-energetique-2050/documentation/perspectives-energetiques-2050.html>
- OFEN. (2020a). *Consommation énergétique en fonction de l'application*.
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/statistiques-et-geodonnees/statistiques-de-lenergie/consommation-energetique-en-fonction-de-lapplication.html>
- OFEN. (2020b). *Perspectives énergétiques 2050+*.
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politique/perspectives-energetiques-2050-plus.html>
- OFEN. (2020c). *Statistique de l'électricité*.
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/statistiques-et-geodonnees/statistiques-de-lenergie/statistique-de-l-electricite.html/>
- OFEN. (2020d). *Statistique globale de l'énergie*.
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/statistiques-et-geodonnees/statistiques-de-lenergie/statistique-globale-de-l-energie.html>
- OFEN. (2020e). *Statistiques sectorielles de l'énergie*.
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/statistiques-et-geodonnees/statistiques-de-lenergie/statistiques-sectorielles.html>
- OFEV. (2019). *Statistique sur le CO₂ : Émissions des combustibles et des carburants*.
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/donnees-indicateurs-cartes/donnees/statistique-sur-le-co2.html>
- Swisscleantech. (2014). *Stratégie énergétique cleantech, version 4*.
<https://www.swisscleantech.ch/files/swisscleantech-Strategie-Energetique-Cleantech-4.0.pdf>

11 Annexes

11.1 Bilan énergétique pour la Suisse en 2019 (OFEN, 2020a)

Energiebilanz der Schweiz für das Jahr 2019 (in TJ)
Bilan énergétique de la Suisse pour 2019 (en TJ)

Tabelle 4
Tableau 4

	Holzenergie	Kohle	Müll und Industrieabfälle	Rohöl	Erdölprodukte	Gas	Wasserkraft	Kernbrennstoffe	übrige erneuerbare Energien	Elektrizität	Fernwärme	Total
	Energie du bois	Charbon	Ord.mén.et déchets ind.	Pétrole brut	Produits pétroliers	Gaz	Energie hydraulique	Combustibles nucléaires	Autres énergies renouvelables	Electricité	Chaleur à distance	Total
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Inlandproduktion	42 330		60 720				146 000		35 020			284 070
+ Import	1 790	3 360		119 770	347 850	122 610		275 780	7 370	106 220		984 750
+ Export	-110	-10			-20 010					-128 750		-148 880
+ Lagerveränderung ¹		460		-330	-17 050							-16 920
= Bruttoverbrauch	44 010	3 810	60 720	119 440	310 790	122 610	146 000	275 780	42 390	-22 530	0	1 103 020
+ Energieumwandlung:												
• Wasserkraftwerke							-146 000			146 000		0
• Kernkraftwerke								-275 780		91 010	1 420	-183 350
• konventionell-thermische Kraft-, Fernheiz- und Fernheizkraftwerke										10 980	22 150	-28 010
• Gaswerke	-3 310		-49 050		-450	-8 330						0
• Raffinerien				-119 440	119 440							0
• Diverse Erneuerbare						1 300						0
• Renouvelables div.	-1 660								-12 040	10 830		-1 570
+ Eigenverbrauch des Energiesektors, Netzverluste, Verbrauch der Speicherungen												
+ Nichtenergetischer Verbrauch												
= Endverbrauch	39 040	3 810	11 670	0	406 670	115 200	0	0	30 350	205 910	21 560	834 210
Haushalte	18 340	100			66 740	47 730			16 650	68 730	8 580	226 870
Industrie	11 330	3 710	11 670		12 770	39 470			1 810	62 170	7 390	150 320
Dienstleistungen	8 540	0			30 210	25 810			3 590	60 660	5 590	134 400
Verkehr					294 360	1 180			7 800	10 950	0	314 290
Statistische Differenz inkl. Landwirtschaft	830	0			2 590	1 010			500	3 400	0	8 330

¹ + Lagerabnahme
- Lagerzunahme

¹ + diminution de stock
- augmentation de stock

Bundesamt für Energie BFE, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2019
Office fédéral de l'énergie OFEN, Statistique globale suisse de l'énergie 2019
Auskunft/Informations: Giulia Lechthaler-Feiber, 058 461 40 49, giulia.lechthaler@bfe.admin.ch

Figure 23 Bilan énergétique pour la Suisse en 2019 (OFEN, 2020a).