



Scénario de transition énergétique 2050.

Transports des personnes

Rapport technique

janvier 2021

mo
hO
mobil'homme

nw
négaWatt
SUISSE



Ensemble pour l'avenir.
Grâce à sobriété, efficacité & énergies renouvelables.

Gemeinsam für die Zukunft.
Dank Suffizienz, Effizienz & erneuerbarer Energien.

Insieme per il futuro.
Grazie alla sufficienza, efficienza & energia rinnovabile.

Scénario de transition énergétique 2050.

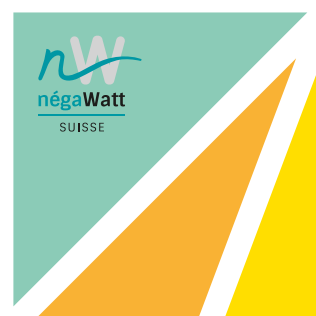
Transport de personnes

Rapport technique

Emmanuel Ravalet
David Moreau
Flavio Principi

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

Photo de couverture : Nils Ackermann



Ensemble pour l'avenir.

Grâce à sobriété, efficacité & énergies renouvelables.

Gemeinsam für die Zukunft.

Dank Suffizienz, Effizienz & erneuerbarer Energien.

Insieme per il futuro.

Grazie alla sufficienza, efficienza & energia rinnovabile.

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
Avenue de Sévelin 28
1004 Lausanne
Suisse

Impressum

Ravalet E., Moreau D., Principi F. (2021) Scénario de transition énergétique 2050, transport de personnes, modélisation et résultats. Mobil'homme Sàrl, Lausanne (Suisse)

Sommaire

1. INTRODUCTION	5
2. REVUE DE LITTÉRATURE	5
3. MODÉLISATION DES PRESTATIONS KILOMÉTRIQUES.	8
4. HYPOTHÈSES.....	10
5. FONCTIONNEMENT DU FICHIER EXCEL.....	13
5.1. Onglet input output principaux.....	13
5.2. Autres onglets	14
6. RÉSULTATS	15
7. CONCLUSION.....	18
8. BIBLIOGRAPHIE.....	19

1. Introduction

L'exercice de prospective énergétique en matière de transport de personnes, portant dans le cas présent sur le territoire Suisse à l'horizon 2050, passe par l'évaluation d'un certain nombre d'indicateurs qui, ensemble, doivent permettre de recomposer un niveau de consommation d'énergie total. Ces indicateurs, nombreux, sont les suivants :

- les parts modales (exprimées en pourcentage des trajets réalisés)
- le nombre moyen de trajets réalisés par personne et par an
- les distances moyennes par trajet
- la population du territoire
- le taux de remplissage des véhicules (voitures, 2*roues motorisés, véhicules de transports en commun)
- la structure du parc selon la motorisation (notamment électrique ou thermique) des véhicules
- la consommation moyenne au kilomètre par véhicule et par type de motorisation.

Les quatre premiers indicateurs permettent de déterminer les prestations kilométriques en matière de transport de personne. Elles correspondent à des « niveaux de consommation » de mobilité des personnes, ou des niveaux de demande de mobilité. Exprimés en personnes*kilomètres, les prestations kilométriques sont des quantités de kilomètres parcourus par toute la population. Ainsi, 10 personnes*kilomètres peut correspondre à 10 kilomètres parcourus par une personne ou 1 kilomètre parcouru par 10 personnes.

L'objectif de ce rapport est de présenter les principales étapes de la modélisation qui permet d'aboutir à une évaluation des consommations énergétiques du secteur du transport des personnes en 2050. Nous présentons donc l'architecture de la modélisation, qui intègre différentes dimensions jouant un rôle dans cette demande de mobilité. Elle doit être en phase avec les déterminants connus actuellement en matière de demande (localisation résidentielle, genre, âge, niveaux de revenus, etc.) mais doit permettre également de tenir compte des nombreuses innovations de services à la mobilité qui se déploient depuis plusieurs années et qui promettent de dessiner au moins partiellement le futur de la mobilité. Il s'agit notamment du covoiturage, de l'autopartage, des systèmes Mobilité as a Service (MaaS), des Véhicules de transport avec chauffeur (VTC) type Uber ou encore des téléactivités (télétravail, achats en ligne, etc.).

C'est l'ensemble de cette démarche que nous présentons ici, en débutant par quelques éléments de littérature important pour notre modélisation, puis en décrivant la structure de la modélisation, les hypothèses choisies et les résultats.

2. Revue de littérature

Pour préciser les éléments que nous avons intégrés à nos analyses, nous proposons ici une revue de littérature spécifique sur la question de la mobilité des personnes.

Rappelons tout d'abord qu'en Suisse, la part modale de la voiture baisse plus fortement dans les grandes agglomérations¹ que dans les autres territoires périphériques ou ruraux. Cette baisse des kilomètres parcourus, intervient après plusieurs décennies d'augmentation et illustrent une rupture tendancielle forte. Plus largement, c'est l'image même de la voiture qui change. Celle-ci est moins valorisée aujourd'hui qu'elle ne l'était hier, les jeunes ont tendance à passer leur permis de conduire plus tardivement et le nombre de voitures par ménage tend à diminuer (Rérat & Haldimann, 2020). Les raisons évoquées sont notamment les questions de pollution, mais aussi un retour en force de modes de vie urbains, tournés vers la proximité et la recherche d'urbanité (Munafò et al., 2015). Dans ce contexte, l'aspect économique joue également un rôle important. Les arbitrages économiques des jeunes ménages urbains changent et le budget réservé pour la mobilité quotidienne diminue au profit d'équipements de télécommunication (Klein et Smart, 2017). Il est fondamental ici de souligner l'importance de ces effets de génération. Ainsi, les personnes qui ont moins de 25 ans aujourd'hui ont des représentations et des pratiques en matière de mobilité qui sont différentes que celles des personnes qui avaient moins de 25 ans il y a 10 ans, ou il y a 20 ans. Ainsi, le passage du permis de conduire est de plus en plus tardif, l'usage des transports publics est croissant et le recours au vélo croît fortement dans les espaces les plus denses. Les effets de génération sont forts également pour les catégories d'âge les plus élevées. Les plus de 60 ans notamment ne se comportent pas non plus comme les personnes qui avaient cet âge il y a 10 ou 20 ans. Ils utilisent moins les technologies numériques et ont vécu les grandes heures de l'usage de la voiture. Pour eux, les changements sont donc plus lents et l'usage de la voiture continue à augmenter de génération en génération, bien que cette dynamique soit de moins en moins forte.

Aujourd'hui, après des décennies qui ont consacré la voiture comme le mode de déplacement principal et parfois indispensable, on observe des changements de dispositions à l'égard des modes de déplacements. Ces évolutions sont très variables dans leur ampleur et leur forme selon les générations. (Kuhnimhof et al., 2012). Pourtant et malgré les tendances évoquées précédemment, il reste que la voiture est très utilisée en Suisse aujourd'hui et restera dans le paysage de la mobilité de demain. L'explication renvoie aux qualités intrinsèques encore largement vérifiées de la voiture sur les plans de la praticité, de la rapidité, du confort, de la flexibilité, etc. Les variables sociodémographiques (notamment le genre, l'âge, le revenu) sont fortement structurantes de l'utilisation des différents moyens de transports.

Si la voiture en général souffre donc d'une remise en question dans les sociétés occidentales, c'est surtout pour certaines populations (les plus jeunes et les plus formés) et certains territoires (les plus denses). Au-delà, c'est de son usage individuel qu'il est question. Ainsi, le covoiturage vise non pas à remettre le véhicule mais à optimiser son usage pour que l'autosolisme (une seule personne par véhicule) baisse au profit d'un usage à plusieurs personnes. L'autopartage, quant à lui, vise également à proposer une alternative à l'usage habituel de la voiture, associé à la possession, pour proposer un usage partagé d'un unique véhicule entre plusieurs personnes selon leurs besoins. Les services de voitures de transports avec chauffeur (VTC) comme Uber complètent à leur manière également une offre de transport qui pourraient permettre de se passer de la possession et de cibler l'usage de la voiture aux situations (lieux, heures, affaires à transporter) où elle s'impose.

L'usage des deux-roues motorisés suit une dynamique un peu différente et tandis que les motos continuent d'attirer de nombreux adeptes, les plus petits véhicules sont de moins en moins présents sur les

1 OFS, 2017, Comportement de la population en matière de transports. Résultats du microrecensement mobilité et transports 2015, Neuchâtel.

routes. Certains territoires métropolitains, extrêmement engorgés sur le plan des circulations automobiles voient tout de même les deux-roues motorisés se maintenir au niveau des parts modales et même croître à niveau. Les deux-roues motorisés connaissent aujourd'hui un nouveau souffle grâce aux motorisations électriques (les vélos à assistance électrique qui sont bridés à 45 km/h en particulier), une tendance qui pourrait se développer plus encore à l'avenir.

Parmi d'autres facteurs déjà évoqués, la baisse de la part modale de la voiture a été rendue possible par le développement de l'offre en transports publics en termes de vitesse, de fréquence et de confort. La part modale des transports publics sur le total des déplacements est passée de 12% en 2005 à 13% en 2015 et leur part sur le total des distances parcourues est passée de 23% à 28% sur la même période. Aussi, l'image des transports publics s'est améliorée ces dernières années (Kaufmann et al., 2019). L'usage des transports publics a tendance à augmenter parce que l'offre augmente bien entendu, mais aussi parce que les facilités d'usage des transports publics évoluent. Ainsi, l'intégration tarifaire entre les opérateurs de transport publics sur un même territoire est bien meilleure aujourd'hui qu'elle ne l'était auparavant. Et le développement de systèmes de type MaaS (Mobility as a service) devrait participer également de cette même dynamique. Nous reviendrons plus loin dans les hypothèses sur ces services et leurs effets potentiels.

La marche quant à elle est assez largement utilisée pour des déplacements courts, en particulier dans les territoires urbains. Si les plus jeunes et les plus âgés sont les personnes pour qui la part modale de la marche est la plus forte, il est possible également de noter un effet revenu très important. Plus les ménages sont aisés, plus l'équipement automobile est important et moins ses membres ont tendance à marcher (Ravalet et al., 2014). Finalement, l'usage du vélo s'accroît fortement entre 2010 et 2015 notamment (OFS, 2017). De fait, cette tendance concerne la plupart des pays occidentaux et s'inscrit surtout dans les territoires urbains denses (Héran, 2015). Les investissements importants aujourd'hui consentis par les grandes villes mais également par des communes moins peuplées en faveur des équipements cyclables devraient permettre de participer au développement de ce mode, encore aujourd'hui largement considéré comme dangereux.

L'arrivée récente des vélos à assistance électrique (VAE) marque un tournant dans les usages du vélo en général. Les ventes sont en croissance très forte et les usagers sont plus âgés et moins urbains que pour le véhicule conventionnel (Marincek et al., 2020). A noter également que la distance moyenne des déplacements en vélo électrique est supérieure à celle des déplacements réalisés en vélo conventionnel (4.4 km en moyenne pour les premiers contre 3.3 kilomètres en moyenne pour les seconds) (Ravalet et al., 2020)².

² Voir également

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/catalogues-banques-donnees/communiqués-presse.assetdetail.1840421.html>

3. Modélisation des prestations kilométriques.

Le dashboard transmis par négaWatt France pour poser les bases d'une modélisation européenne commune repose sur une distinction des modes selon les catégories suivantes :

- Marche
- Vélo
- Voiture
- Deux-roues motorisés
- Car et bus
- Métro et tramway
- Train
- Avion
- Bateau

Nous nous reposons sur cette même catégorisation pour une homogénéité des approches. Les données utilisées sont issues de la base trajets des éditions 2005 et 2015 du Microrecensement Mobilité et Transport (MRMT). A noter cependant que compte-tenu des effectifs et des modalités de recueil des données du MRMT, nous considérons l'avion et le bateau de manière spécifique. Pour les autres modes, nous modélisons, grâce aux données brutes du MRMT 2015, les parts modales (sur l'ensemble des trajets réalisés), la distance moyenne de chaque trajet et pour chaque mode, et finalement le nombre moyen de trajets par personne. Nous avons construit des modèles différents pour les parts modales selon trois grands types de territoires : les territoires dits urbains, ruraux et de degré d'urbanisation intermédiaire. La variable utilisée pour faire cette distinction est le degré d'urbanisation (dite DEGURBA) issue d'Eurostat. 29 modèles ont été construits, un pour le nombre de trajets par personne et par jour, trois pour chaque mode et finalement un modèle d'évaluation de la distance moyenne par trajet pour chaque mode. Nous utilisons la population Suisse décrite dans le micromodèle démographique en 2015 et son extrapolation pour 2050 selon les perspectives énergétiques 2050+ de l'OFEN.

Ces modèles permettent d'évaluer ce que nous pouvons appeler une « structure générale des parts modales » aux années 2015 à 2050 (tous les 5 ans) selon la structure de la population ces années-là en termes de localisation résidentielle, revenus, genre et âge. Ainsi, il est important de considérer par exemple que le vieillissement de la population va « mécaniquement » générer une hausse de la marche, c'est ce que permet la construction de cette « structure générale des parts modales ». Comme dit précédemment, des hypothèses doivent être posées ensuite pour rendre compte des effets de génération et des transformations du « champ des possibles » en matière de mobilité. A cette fin, l'édition 2005 du MRMT est utilisée pour traduire des évolutions en matière de parts modales sur la période 2005-2015 et des hypothèses complémentaires sont ensuite posées pour exprimer des effets du développement d'offre de transport sur les plans infrastructurels et serviciels. Aussi, les possibilités d'usage de chaque mode ne seront pas les mêmes en 2050 qu'elles ne l'étaient en 2015.

La formule de calcul des prestations kilométrique (pkm) pour chaque mode i est fonction de la part modale ($partmod_i$), de la distance moyenne par trajet et par mode ($disttraj_i$), du nombre de trajet par personne ($ntraj$) et de la population totale ($poptot$) est donc la suivante :

$$pkm_i = 365 \cdot partmod_i \cdot disttraj_i \cdot ntraj \cdot poptot$$

Pour l'avion et le bateau, les prestations kilométriques ont été évaluées sur la base d'une observation rétrospective de la demande pour ces modes. Les données utilisées pour la construction du diagnostic

rétrospectif sont issues des bases de l'Office Fédéral de la Statistique³. Les tendances passées sont ensuite prolongées sur la base d'éléments de contexte issus de la littérature scientifique en matière d'évolution de l'offre et de la demande de transport pour ces deux modes.

Une fois ces prestations kilométriques évaluées pour les années à venir et jusqu'en 2050 pour tous les modes, nous devons évaluer les indicateurs suivants :

- Le taux de remplissage des véhicules (voiture, 2*roues motorisés, véhicules de transports en commun)
- La structure du parc selon la motorisation (notamment électrique ou thermique) des véhicules
- La consommation moyenne au kilomètre par véhicule et par type de motorisation.

Comme pour les prestations kilométriques avion et bateau, nous avons évalué ces éléments sur une double base : celle de l'observation des valeurs connues pour ces indicateurs sur les années passées (en général, l'observation a porté sur 20 années) et celle de la revue de littérature.

Aussi et sur la base de ces éléments, il devient possible de rendre compte de la consommation énergétique finale (E_{tot}) liée au transport de personne en calculant l'Energie E pour chaque mode i et pour chaque type de motorisation j et en appliquant les formules suivantes :

$$E_{i,j} = \frac{pkm_i}{txrempl_i} \cdot partmotor_{i,j} \cdot consomoy_{i,j}$$

$$E_{tot} = \sum_{i,j} E_{i,j}$$

Dans ces formules, l'énergie consommée pour chaque mode et chaque type de motorisation (E_(i,j)) est fonction des prestations kilométrique (pkm) pour chaque mode i, du taux de remplissage des véhicules pour chaque mode, de la part de chaque motorisation j dans le parc de chaque mode i (partmotor_{ij}), et de la consommation moyenne de chaque type de motorisation dans le parc de chaque mode (conso-moy_{ij}).

En guise de synthèse, la structure de la modélisation est la suivante :

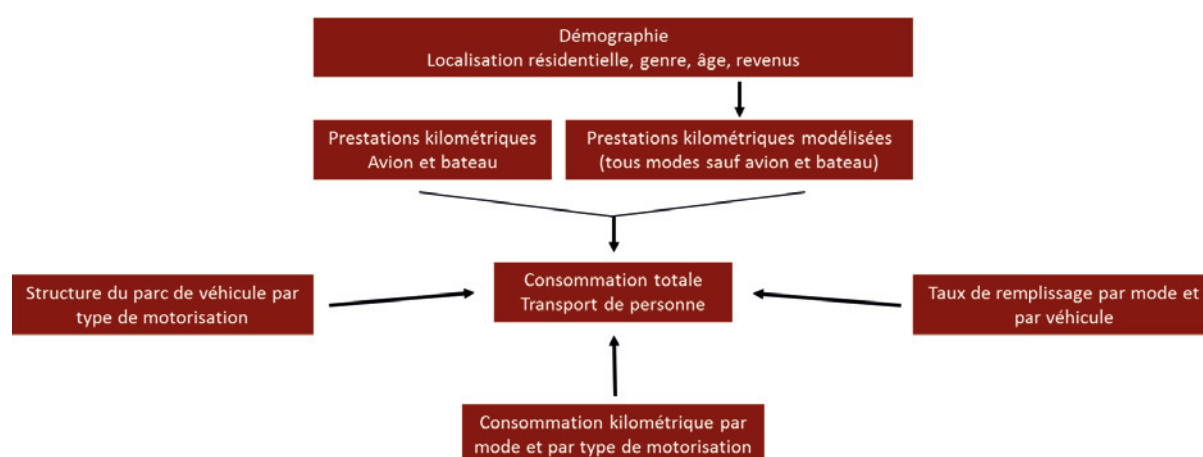


Figure 1 Schéma du processus de modélisation négaWatt du secteur des transports de personnes.

A noter finalement que les modélisations ont été réalisées à l'horizon 2050 mais avec une incrémentation systématique de 5 ans entre 2015 et 2050. Un double ensemble d'hypothèses a été posé (scénario tendanciel et scénario négaWatt) de manière à pouvoir ensuite spécifier les effets propres des dimensions liées à la sobriété, à l'efficacité et aux énergies renouvelables.

3 Pour l'avion : OFS, OFAC – Trafic aérien, Statistique de l'aviation civile (AVIA_ZL), pour le bateau : Prestations du transport de personnes (PV-L), Statistique des transports publics (TP)

4. Hypothèses

Nous ne décrivons pas ici les hypothèses réalisées en matière de prospective démographique qui sont reprises des perspectives énergétiques 2050+ de l'OFEN. À noter tout de même que les deux tendances principales qui peuvent être mentionnées concernent le vieillissement de la population Suisse et le caractère urbain croissant des territoires de vie.

A cette étape et en lien avec les tendances actuelles et les attendues en matière de planification de la mobilité dans les territoires (notamment en termes d'infrastructures), nous avons appliqué des hypothèses fortes d'évolution des parts modales du vélo et dans une moindre mesure du transport ferroviaire de personne. Nous faisons ainsi l'hypothèse que la part du vélo dans l'ensemble des trajets réalisés en ville va tripler d'ici à 2050. L'augmentation sera plus faible dans les territoires moins denses. La part des trajets réalisés en train devrait elle aussi augmenter ces prochaines années, compte tenu notamment des investissements importants consentis dans le développement du réseau et de la flexibilisation croissante des horaires de travail permettant l'étalement des pointes. Nous avons évalué cette augmentation à 20% pour les personnes qui résident dans les zones urbaines et les zones de degré d'urbanité intermédiaire. La part modale de la voiture devrait baisser dans les années à venir au fil de l'évolution déjà entamée des pratiques. En ville, la baisse de la part modale de la voiture est évaluée à 50% mais elle n'est que de 10% dans les zones les moins denses, qui resteront encore fortement dépendantes de ce mode. A noter que ces baisses concernent principalement les déplacements courts en voiture avec un report sur les modes actifs et les transports publics urbains. Les déplacements les plus longs en voiture ne sont reportés vers le train que lorsqu'une alternative existe sur une partie du trajet, avec une croissance de l'intermodalité le cas échéant. Si les évolutions en termes de pratiques modales devraient toucher l'ensemble des territoires suisses dans les années à venir, les territoires les plus denses devraient accueillir les changements les plus marquants, grâce à la diversité des offres modales et la contrainte forte d'usage de la voiture (en circulation et en stationnement).

Plusieurs autres hypothèses relatives au développement de certains services à la mobilité ont également été posées. Ces hypothèses sont les suivantes :

- Les innovations numériques en général et les pratiques de télétravail en particulier participent à limiter la quantité de déplacements moyen par personne et par jour dans le scénario négaWatt avec l'hypothèse qu'il y a bien une substitution partielle des déplacements physiques par des mobilités virtuelles. Toujours dans le scénario négaWatt et en lien avec la littérature (Ravalet & Rérat, 2019), cette baisse est considérée comme limitée et a été fixée à 2% du nombre de trajets. Cette baisse est évaluée sur la base d'un doublement du nombre de personnes actives ayant un recours au télétravail et une augmentation du nombre moyen de jours télétravaillés par semaine. La littérature nous montre par ailleurs que cette diminution du nombre de déplacements domicile-travail peut être partiellement compensée par des déplacements pour d'autres motifs réalisés les jours télétravaillés et par une croissance de la distance domicile-travail parcourue les jours télétravaillés notamment en train et en voiture, qui sont les modes les plus utilisés par les télétravailleurs (Ravalet & Rérat, 2019). Au-delà du télétravail, divers pratiques numériques actuellement en développement (visioconférence, achats en ligne, démarches administratives dématérialisées, etc.) nous incitent à diminuer les distances parcourues, pour tous les modes, en lien avec le développement du numérique dans son ensemble, de 5%. Cette baisse a été appliquée à l'ensemble des déplacements, quelle qu'en soit la distance. Nous ne l'avons pas réservée aux plus grandes distances uniquement dans la mesure où divers services numériques permettent de limiter des déplacements courts et que nous faisons l'hypothèse d'une diversification des profils d'actifs recourant au télétravail (voir la fiche sur le télétravail).
- L'autopartage permet bien entendu de limiter le nombre de voitures nécessaires pour un même service de mobilité rendu, mais il permet également de limiter l'usage de la voiture grâce à un usage plus ciblé de ce véhicule sur les déplacements qui l'imposent lorsqu'il est nécessaire de réserver la voiture en question. On peut également considérer que le développement de système de type Uber, mais

aussi les vélos en libre-service ou les trottinettes forment un ensemble multimodal qui permet de se passer de la possession d'une voiture et donc de cibler l'usage d'une voiture (qui sera alors partagée). Nous évaluons une baisse de 5% des distances parcourues en voiture en lien avec le développement fort de ces services. Pour évaluer cette part, nous nous sommes appuyés notamment sur l'étude menée par le bureau 6T qui montre que les usagers d'un service d'autopartage voient leur distance parcourue en voiture diminuer de 11%.

- Les systèmes de vélo en libre-service, mais aussi les systèmes de location de vélo à plus longue durée se sont développés rapidement ces dernières années dans les milieux les plus denses et devraient à l'avenir se déployer dans les zones plus périurbaines et les plus petites villes. L'ensemble de ces services support devraient permettre de soutenir plus encore le développement du vélo avec une augmentation supplémentaire de 5% de la part modale.
- Il ne s'agit pas à proprement parler d'un service de mobilité, mais le développement attendu de la part des vélos à assistance électrique (bridé à 25km/h) parmi l'ensemble des vélos donne des perspectives intéressantes en termes de distance moyenne par trajet pour le mode vélo. Nous avons appliqué un coefficient d'augmentation de 20% à ces distances en nous appuyant sur des résultats présentés par Ravalet et al. (2020) qui évalue à 36% l'augmentation relative des distances parcourues en vélo à assistance électrique par rapport aux distances en vélo conventionnel.
- Les systèmes de type Mobility as a Service (MaaS), qui devraient se mettre en place dans les années à venir à l'échelle des agglomérations mais potentiellement aussi à des échelles régionales voir nationales, devraient soutenir le développement de l'usage des transports publics. Les études menées dans les territoires qui ont vu ce type de service se mettre en place ont permis de mettre en évidence l'impact fort qu'ils peuvent avoir sur la hausse des parts modales des transports publics et la baisse de celles de la voiture (Karlsson et al., 2016 ; Hartikainen et al., 2019). Nous avons fait croître la part modale des transports publics urbains de 5% en lien avec le développement de ce type de système. Si l'usage du vélo s'appuie en partie sur des reports depuis la marche et les TP dans les grandes villes, les reports depuis la voiture pourraient être plus importants dans les territoires périurbains et les petites villes.

Au-delà de ces hypothèses, nous avons évalué beaucoup d'autres indicateurs en nous appuyant sur la littérature scientifique. Aussi, les taux de remplissage des véhicules de transports publics et de la voiture ont été fixés en différenciant les trajets réalisés selon les motifs qui justifient les déplacements (voire notamment Raux et al., 2020). Nos évaluations nous mènent, dans le scénario négaWatt, à un chiffre de 1.85 personne par voiture en moyenne en 2050 au mieux, sachant que le taux de remplissage moyen en 2015 était de 1.56 personnes par voiture.

Les taux de remplissage des véhicules de transports publics sont évalués à partir des publications de l'OFS pour la période passée et sont associés à des hypothèses à la hausse les concernant dans la mesure où le scénario négaWatt considère un usage globalement croissant des transports publics et donc une plus grande rentabilité des véhicules. Nous considérons que le taux de remplissage des bus et cars passera de 14 personnes par véhicule en 2015 à 21 personnes en 2050.

Sur le plan de l'efficacité des véhicules, nous nous sommes appuyés sur les hypothèses et les résultats de plusieurs autres travaux de prospective menés. En écho aux hypothèses réalisées par l'OFEN dans ses perspectives énergétiques 2050+ (2020), nous considérons que le mix énergétique voiture ne comporte plus de véhicules purement thermiques en 2050. Au-delà, nous avons également consulté et utilisé les informations décrites dans deux autres publications : Hacker (2014) et Krause et al. (2020). L'ensemble de ces sources nous a permis de nous positionner d'une part sur le mix énergétique et la vitesse de l'électrification du parc automobile, des deux-roues motorisés mais aussi des vélos et des bus, et d'autre part sur les niveaux de consommation unitaire qui peuvent être attendus dans les années à venir pour tous les véhicules selon leur type de motorisation.

Le dashboard de l'ensemble des indicateurs utilisés pour la modélisation négaWatt est joint ci-dessous (Figure 2).

Indicators	Unit	Indicator Code	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
Description of needs											
Total number of passenger-kilometres	Gpkm	plkm	174.174	177.27	176.39	175.53	174.66	173.80	172.95	170.654	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2005 et 2015
Total passenger traffic except air	Gpkm	plmetr	130.490	132.66	131.00	129.34	127.69	126.04	124.39	121.310	
Traffic broken down by transport mode											
Share of public transport in total land passenger traffic (except air)	%	peckpub	21.74%	22.38%	23.08%	25.01%	26.38%	27.78%	29.21%	31.05%	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2005 et 2015
Road travel											
Road passenger traffic	Gpkm	plmrou	100.09	100.50	97.08	93.67	90.25	86.83	83.41	79.988	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2005 et 2015
↳ Traffic: passenger-kilometres disaggregated by type of vehicle and fuel											
> Gentle mobility:											
passenger-kilometres travelled by non-motorized mode (bicycle, foot)	Gpkm	plmmnt	7.893	8.67	9.45	10.22	11.00	11.78	12.55	11.890	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2005 et 2015
pedestrian passenger-kilometres	Gpkm	plmped	5.440	5.50	5.55	5.61	5.67	5.73	5.78	5.840	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2005 et 2015
bicycle passenger-kilometres	Gpkm	plmcyb	2.453	3.17	3.89	4.61	5.33	6.05	6.77	7.490	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2015
Share of plm travelled by electric bikes	%	%lcyl	6.60%	10.35%	14.08%	17.79%	21.47%	25.11%	28.71%	32.26%	
> Car traffic											
Average number of people per vehicle	person/car	capvp	1.560	1.62	1.66	1.70	1.74	1.77	1.81	1.852	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2015
car passenger-kilometres	Gpkm	plmvpct	91.995	92.00	88.17	84.34	80.52	76.69	72.86	69.030	
passenger-kilometres travelled by liquid fuel cars	Gpkm	plmvpclqf	90.547	77.62	61.99	47.44	33.96	21.57	10.24	0.000	
passenger-kilometres travelled by cars running on LPG	Npkm	plmvpclpg	0.44	0.44	0.84	1.21	1.54	1.83	2.09	2.309	
passenger-kilometres travelled by cars running on NGV / biomethane	Npkm	plmvpclngv	0.36	0.51	1.01	1.58	1.65	1.56	1.56	1.338	
passenger-kilometres travelled by hydrogen cars	Npkm	plmvpclhyd	1.18	2.27	3.25	4.14	4.93	5.62	6.213	6.213	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2005 et 2015
passenger-kilometres travelled by electric cars	Npkm	plmvpclvgt	0.155	4.90	9.24	13.18	16.73	19.89	22.65	25.020	
passenger-kilometres travelled by plug-in gas hybrid cars	Npkm	plmvpclvgtg	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
passenger-kilometres travelled by plug-in diesel hybrid cars	Npkm	plmvpclvgtb	0.259	1.19	2.09	2.91	3.65	4.30	4.87	5.361	
passenger-kilometres travelled by plug-in petrol fuel hybrid cars	Npkm	plmvpclvgtbess	1.034	6.73	11.84	16.48	20.66	24.37	27.61	30.382	
share of plm travelled in electric mode for plug-in hybrid cars	%	%lcgchvib	0.62	0.63	0.63	0.66	0.69	0.71	0.72	0.720	Evaluations fournies par négaWatt France
> Motorcycle traffic											
passenger-kilometres travelled by motorcycles	Gpkm	plmmot	2.085	2.14	2.20	2.26	2.32	2.38	2.44	2.504	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2005 et 2015
> Bus traffic											
occupancy rate of buses and coaches	person/bus	capbus	14	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.000	Modélisation Mobil'homme à partir de https://www.bfs.admin.ch/asset/fr/f-11.04.01.01
passenger-kilometres travelled by buses and coaches	Gpkm	plmbus	6.010	6.36	6.71	7.06	7.41	7.76	8.10	8.454	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2005 et 2015
passenger-kilometres travelled by buses running on liquid fuels	Npkm	plmbuslqf	5.409	5.05	4.75	4.46	4.18	3.91	3.64	3.382	calculé à partir de "Buses and coaches (disaggregation by fuel)"
passenger-kilometres travelled by electric buses	Npkm	plmbusele	0.601	1.30	1.96	2.60	3.23	3.85	4.46	5.072	
↳ Stocks of vehicles by type and fuel											
> Car (disaggregation by fuel type):											
Shares of gasoline cars	%	nrvpccss	71.19%	61.02%	50.85%	40.68%	30.53%	20.34%	10.17%	0.00%	modélisation Mobil'homme à partir de https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/approvisionnement/statistiques-et-gedonnees/statistiques-des-vehicules/statistiques-des-motorisations-alternatives-des-vehicules-neuves.html
Shares of diesel cars	%	nrvpccld	27.23%	23.34%	19.45%	15.56%	11.67%	7.78%	3.89%	0.00%	et https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/politique/perspectives-energetiques-2050-plus.html
Shares of LPG cars	%	nrvpccpg	0.00%	0.48%	0.56%	1.43%	2.39%	2.87%	3.35%	3.625%	
Shares of electric cars	%	nrvpccel	0.17%	5.32%	10.48%	15.63%	20.78%	25.94%	31.09%	36.25%	
Shares of plug-in hybrid cars	%	nrvpccvib	1.41%	8.60%	15.85%	22.99%	30.19%	37.39%	44.58%	51.78%	
Shares of hydrogen cars	%	nrvpcchyd	0.00%	1.29%	2.57%	3.86%	5.14%	6.43%	7.71%	9.00%	
> Buses and coaches (disaggregation by fuel):											
Stock of buses/coaches	M	nrbus	0.0149	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.021	modélisation Mobil'homme à partir de https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/mobilite-transport-vehicules/vehicules-vehicules-routiers-parc-taux-motorisation.html
Stock of gasoline buses/coaches	M	nrbuses	0.0008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
Stock of diesel buses/coaches	M	nrbusld	0.0138	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.008	
Stock of electric buses/coaches	M	nrbusele	0.00149	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.013	
↳ Performance (energy efficiency), disaggregated by type of vehicles											
> Existing fleet											
energy efficiency of electric cycles	kWh/100 km	ecyclele	0.93	0.90	0.88	0.85	0.82	0.80	0.77	0.744	Evaluations fournies par négaWatt France
energy efficiency of electric cars	kWh/100 km	ecyclecar	16.3	15.27	14.24	13.21	12.19	11.16	10.13	9.100	Modélisation Mobil'homme à partir de Hader (2014) et Krause et al. (2020)
energy efficiency of electric buses	kWh/100 km	ecyclebus	65.2	61.09	56.97	52.86	48.74	44.63	40.51	36.400	Evaluation à partir de l'efficacité énergétique des voitures électriques
average specific consumption of gasoline cars	l/100km	csycopss	8.037	7.38	6.73	6.07	5.42	4.76	4.11	3.456	Modélisation Mobil'homme à partir de Hader (2014) et Krause et al. (2020)
average specific consumption of diesel cars	l/100km	csyopld	6.9745	6.55	6.13	5.71	5.29	4.87	4.45	4.028	Modélisation Mobil'homme à partir de Hader (2014) et Krause et al. (2020)
average specific consumption of motorcycles running on liquid fossil fuels	l/100km	csmotlqf	3.33	3.29	3.13	2.97	1.99	1.46	1.25	1.200	Modélisation Mobil'homme à partir de https://www.cairn.info/revue-transports-urbains-2017-2-page-14.html#219
average specific consumption of buses running on liquid fossil fuels	l/100km	csbuslqf	30	28.34	26.48	24.72	22.96	21.20	19.44	17.680	Modélisation Mobil'homme à partir de Hader (2014) et Krause et al. (2020)
↳ Rail travel											
passenger-kilometres travelled by trains	Gpkm	plmetr	21.202	22.12	23.04	23.96	24.88	25.79	26.71	27.630	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2005 et 2015
passenger-kilometres travelled by metros, tram	Gpkm	plmetrmet	1.153	1.21	1.28	1.34	1.40	1.46	1.52	1.580	Modélisation Mobil'homme à partir du MIMT 2005 et 2015
> Disaggregation by fuel type											
Share of electricity in rail passenger transport	%	peelcperkm	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	Evaluations fournies par négaWatt France
energy efficiency of passenger trains	kWh/100 pkm	eeferpkm	10.04	9.93	9.76	9.46	9.12	8.87	8.75	8.710	
↳ Air travel											
> Uses											
Domestic air passenger traffic	Gpkm	plkmadv	0.13	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.076	Modélisation Mobil'homme à partir de https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/mobilite-transport-themes-transports/aviation-civile.html
Passengers traffic in airplanes for international flights (Intra-UE (27/28))	Gpkm	plkmairint	19.03	18.68	18.33	17.97	17.62	17.27	16.92	16.574	
Passengers traffic in airplanes for international flights (Extra-UE (27/28))	Gpkm	plkmairint	24.66	25.81	26.95	28.10	29.25	30.40	31.55	32.694	
↳ Air travel performance (energy efficiency)											
energy efficiency of planes	kWh/100 pkm	eeairpkm	37.67	36.05	34.61	33.04	31.33	29.63	28.14	26.780	Evaluations fournies par négaWatt France
↳ Water travel											
> Uses											
passenger traffic by water	Npkm	plmwat	0.152	0.15	0.15	0.16	0.17	0.18	0.20	0.222	Modélisation Mobil'homme à partir de https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/mobilite-transport-personnes/prestations.html
↳ Performance (energy efficiency)											
energy efficiency of marine & over passenger transport	kWh/100 pkm	eeowatpkm	104	99.54	95.09	90.63	86.17	81.71	77.26	72.800	Modélisation Mobil'homme à partir des rapports de gestion de la CGN

Figure 2 Indicateurs négaWatt utilisés pour la modélisation.

5. Fonctionnement du fichier Excel

5.1. Onglet input output principaux

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 sept zones représentées par la Figure 3.

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



Figure 3 Onglet Input_output principaux constitué de 7 zones permettant de faire varier les principaux indicateurs de la modélisation négaWatt (provenant du modèle « industrie »)

5.2. Autres onglets

En plus de l'onglet principal commun à tous les micro-modèles, le fichier excel de l'informatique comprend les onglets suivants :

- **Graphes** : Présentation des résultats sous forme graphique.
- **Indicateurs négaWatt et tendanciel** : Présentation de l'ensemble des hypothèses et des données d'entrée aux modèles.
- **Données** : Evaluations annexes permettant le chiffrage et la modélisation d'indicateurs tels que la dynamique démographique, le taux de remplissage des véhicules, la part de VAE dans les déplacements cyclables, la structure du parc auto, etc.
- **Autres travaux prospectifs** : Résultats issus d'autres exercices de prospective.

6. Résultats

Sur la base de ces hypothèses et de notre travail de modélisation, nous présentons maintenant les parts modales obtenues en comparant les situations 2015 et 2050. Comme mentionné au préalable, deux scénarios sont considérés en 2050, un scénario tendanciel et le scénario négaWatt.

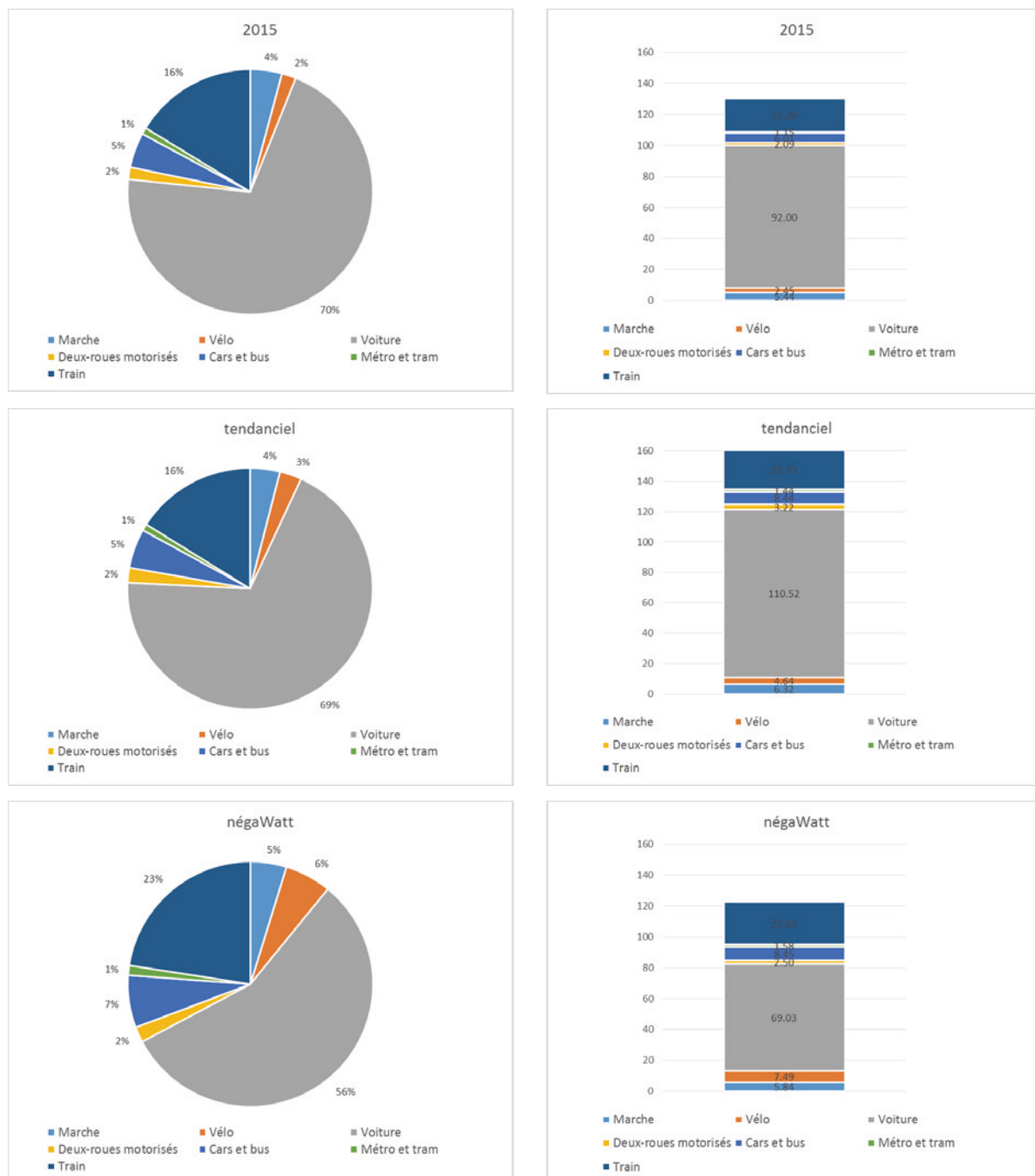


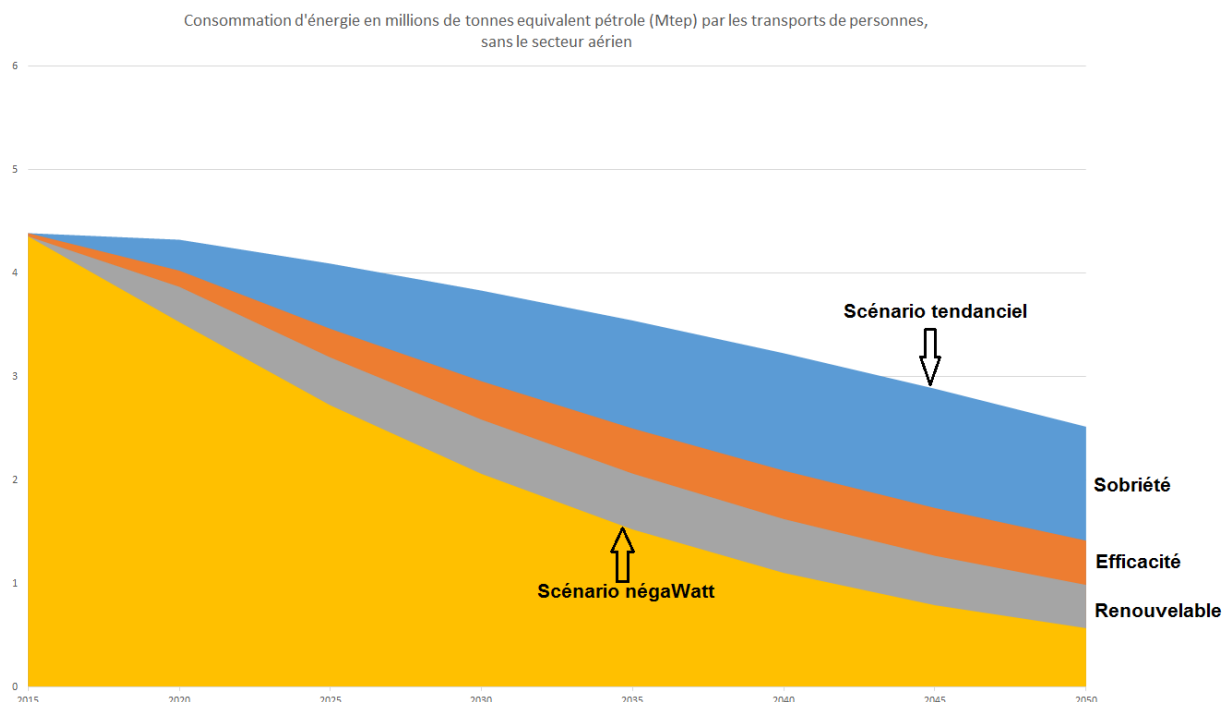
Figure 4 Parts modales kilométriques et prestations kilométriques de transport en 2015 et dans les scénarios tendanciel et négaWatt.

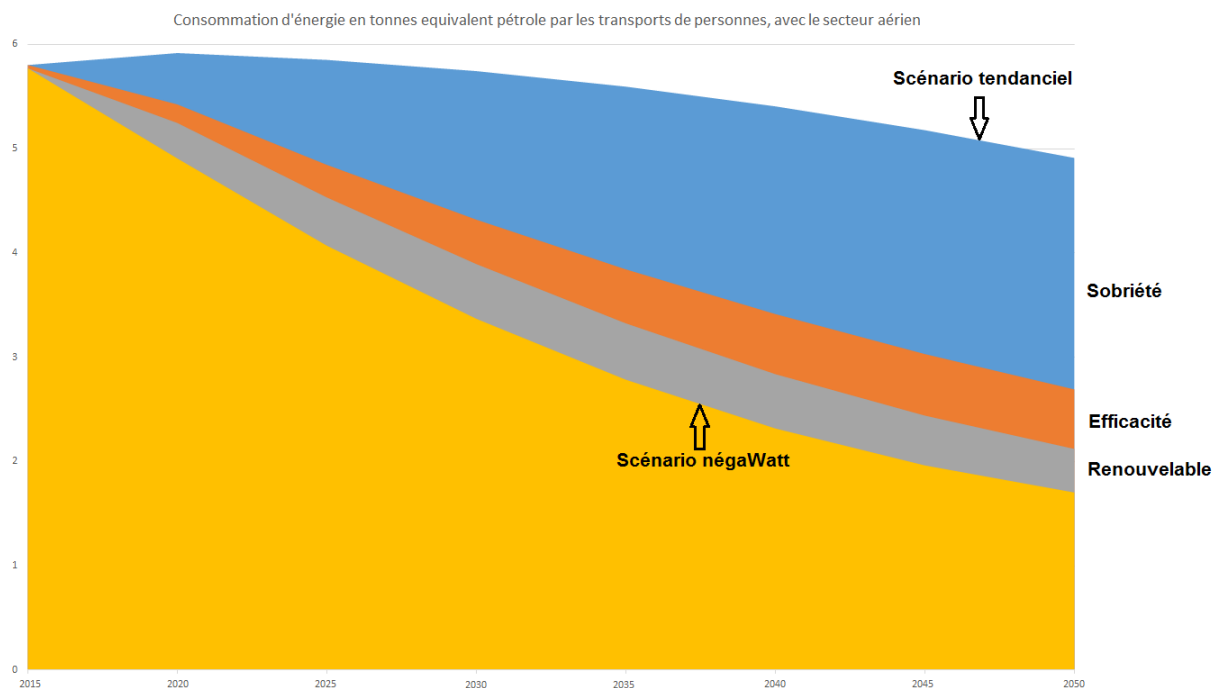
Il ressort des résultats présentés ci-dessus qu'au-delà d'une modification sensible des parts modales entre 2015 et 2050, notamment pour le scénario négaWatt, les prestations kilométriques totales diminuent également dans ce scénario. Ainsi, les populations se déplacent mieux (elles utilisent des modes moins consommateurs) et moins en 2050 qu'elles ne le font actuellement.

Les prestations kilométriques sont évaluées à la hausse entre 2015 et 2050 pour tous les modes sauf pour la voiture. Pour celles-ci, nous estimons à partir de notre travail de modélisation qu'elles devraient être amenées à baisser pour passer de 92 Mds de pkm en 2015 à 69.03 Mds de pkm en 2050 dans le scénario négaWatt. Cela correspond à une baisse de 24,9%. Une baisse équivalente ressort du travail de modélisation de négaWatt France si l'on associe les prestations kilométriques de la voiture individuelle hors urbain, de la voiture dite citadine et du taxico (un service à l'interface entre les taxis et les VTC type Uber). Nos évaluations sont donc très cohérentes de ce point de vue.

Des écarts plus importants peuvent être observés pour d'autres modes. Ainsi, négaWatt France prévoit une multiplication par 4 des prestations kilométrique liées au vélo, alors qu'elles ne sont multipliées que par 3 dans notre scénario négaWatt. Cette augmentation nous semble déjà extrêmement forte dans la mesure où elle repose sur un passage de la part modale de ce mode de 5,13% de l'ensemble des trajets à 10,12% de l'ensemble des trajets, un saut extrêmement ambitieux associé à une augmentation des distances moyennes des trajets en vélo permise par le développement des vélos à assistance électrique. L'augmentation des prestations kilométriques des deux-roues motorisés est limitée dans notre scénario négaWatt à 20% environ alors qu'elle augmente très fortement dans le scénario français.

Si l'on tient compte ensuite des taux de remplissage, des types de motorisation et des consommations unitaires, il devient possible d'évaluer les consommations énergétiques totales du secteur du transport de personnes. A noter ici que nous avons considéré comme renouvelable l'ensemble de l'énergie électrique.





Les résultats présentés ici permettent de mettre en évidence une grande importance des consommations énergétiques liées au secteur aérien pour les résidents suisses. Le premier graphique, en haut, rend compte des résultats obtenus sans tenir compte du secteur aérien et le second en tient compte. Mais au-delà de ces résultats, il ressort que malgré les hypothèses parfois très fortes réalisées sur les évolutions en matière de parts modales et de volume de déplacement, malgré les hypothèses très fortes également formulées relativement aux gains d'efficacité des différents véhicules, malgré encore l'électrification forte considérée ici, les consommations d'énergie totales ne sont divisées que par deux si l'on considère le transport aérien et par quatre si l'on ne tient pas compte de l'avion.

7. Conclusion

Les éléments présentés ici permettent de rendre compte de la démarche de modélisation mise en œuvre et des hypothèses choisies.

Il ressort de notre démarche que certaines des hypothèses réalisées ne se limitent pas à ce qui est constaté et constatable à l'avenir, mais vise également à rendre compte de ce qui est souhaitable sur le plan collectif pour une atteinte des engagements de la Confédération en matière de réduction des consommations énergétiques.

Les perspectives de baisse des consommations énergétiques en matière de transport s'appuient fortement sur la nécessaire sobriété des pratiques de mobilité. Le scénario négaWatt présenté ici s'appuie sur l'idée que les Suisses se déplacent moins et mieux dans les années à venir. L'électrification du parc automobile et les gains d'efficacité envisagés pour tous les véhicules sont des éléments qui permettront certainement de faire baisser les consommations d'énergie dans ce domaine, mais dans des proportions qui restent trop faibles pour que soient atteints les objectifs de la Confédération en la matière.

Dans le domaine des transports comme dans les autres domaines couverts par notre exercice de prospective, les évolutions décrites dans le modèle ne sont rendues possibles que par une intervention forte des pouvoirs publics pour accompagner la transition en matière de mobilité.

8. Bibliographie

- Hacker F., Blanck R., Hülsmann F., Kasten P., Lorek C., Ludig S., Mottschall M., Zimmer W. (2014). eMobile 2050. Szenarien zum möglichen Betrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz, Öko-Institut e.V., Berlin. <https://www.oeko.de/oekodoc/2114/2014-670-de.pdf>
- Hartikainen A., Pitkänen J.-P., Riihelä A., Räsänen J., Sacs I., Sirkiä A., Uteng A. (2019). Whimpace: Insights from the World's First Mobility as a Service Solution, Ramboll.
- Héran F. (2015). Le retour de la bicyclette: une histoire des déplacements urbains en Europe, de 1817 à 2050. La Découverte
- Karlsson I. M., Sochor J., Strömberg H. (2016). Developing the «Service» in Mobility as a Service: experiences from a field trial of an innovative travel brokerage. *Transportation Research Procedia*, 14, 3265-3273
- Kaufmann V., González J., Bernier E., Drevon G., Messer M.-E. (2019), Analyse prospective des logiques de choix modal auprès de la population active Suisse, Cahier du LaSUR.
- Klein N. J., & Smart M. J. (2017). Millennials and car ownership: Less money, fewer cars. *Transport Policy*, 53, 20-29.
- Krause J., Thiel C., Tsokolis D., Samaras Z., Rota C., Ward A., Verhoeve W. (2020). EU road vehicle energy consumption and CO2 emissions by 2050—Expert-based scenarios. *Energy Policy*, 138, 111224.
- Marincek D., Ravalet E., Rérat P. (2020). La pratique du vélo à assistance électrique à Lausanne. Synthèse du rapport final, Etudes Urbaines, No 5, Université de Lausanne.
- Munafò S., Kaufmann V., Christie D., Vincent-Geslin V., Ravalet E. (2015). « Dispositions et usages de l'automobile et des transports publics entre 1994 et 2011 ». *Revue d'Economie Régionale Urbaine* Décembre (5): 753-82.
- OFS (2017). Mobilité et transports Statistique de poche 2017.
- Raux C., Charmes E., Grassot L., Sévenet M., Maizia M. PERITHEL (2020). Formes (péri)urbaines, transport, habitat, énergie, environnement, localisation : un bilan prospectif.
- Ravalet E., Marincek D., Rérat P. (2020). Les vélos à assistance électrique : entre vélos conventionnels et deux-roues motorisés, Géoregards.
- Ravalet E., Rérat P. (2019). Teleworking: decreasing mobility or increasing tolerance of commuting distances? *Built Environment*, 45(4), 582-602.
- Ravalet E., Christie D. P., Munafò S., Kaufmann V. (2014). D'un quartier à l'autre: analyse quantitative de la marche dans la Suisse urbaine, In Cloutier M.-S., Auberlet, J.-M., Bruneau, J.-F., Dommes A., Granié M.-A., Paquin S., Saunier N., Serre T., Torres J. (dir.) *La ville sous nos pieds : Connaissances et pratiques favorables aux mobilités piétonnes*, Actes du 4e Colloque francophone international du GERIE COPIE. pp. 39-50. Institut National de la Recherche Scientifique.
- Rérat P., Haldimann L. (2020). Le permis de conduire chez les jeunes: qui ne le passe pas (encore) et pourquoi?. *Flux*, (1), 5-24.