

PROSPECTIF

ÉTUDE THÉMATIQUE

www.vd.ch/statvd

Juin 2023



Transition énergétique dans le canton de Vaud à l'horizon 2050

Cette étude est publiée sous la responsabilité éditoriale de Statistique Vaud.
Les éventuelles opinions exprimées engagent ses auteurs et n'ont pas vocation
à refléter la position de l'Etat de Vaud

Transition énergétique dans le canton de Vaud à l'horizon 2050

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Préface | 5 |
| Synthèse | 6 |
| 1. Introduction | 11 |
| 2. Dynamiques du système énergétique et émissions de gaz à effet de serre | 17 |
| 2.1. Principaux traits de la consommation et de l’approvisionnement en énergie | 18 |
| 2.2. Dynamique du système énergétique : le virage de la transition énergétique a commencé | 21 |
| 2.3. Emissions de gaz à effet de serre : une baisse majeure nécessaire pour limiter les changements climatiques | 24 |
| 3. Imaginer des futurs possibles | 29 |
| 3.1. Principaux résultats | 30 |
| 3.2. Descriptif des scénarios | 39 |
| 3.3. Toile de fond commune aux scénarios | 45 |
| 4. Résultats sectoriels et approvisionnement | 47 |
| 4.1. Habitations et appareils domestiques | 48 |
| 4.2. Transports | 53 |
| 4.3. Production de biens et services | 60 |
| 4.4. Approvisionnement énergétique | 66 |
| 5. Enseignements et conclusions | 75 |
| 5.1. Enseignements en lien avec le système énergétique | 76 |
| 5.2. Constats en lien avec le chemin vers la neutralité carbone | 82 |
| Bibliographie | 84 |
| Acronymes | 88 |
| Glossaire | 89 |

Préface

Le 18 juin 2023, la population suisse et vaudoise a confié aux autorités un mandat clair : accélérer la transition énergétique et atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Les Vaudoises et les Vaudois ont été encore plus déterminés que le reste de la Suisse, avec 69,5 % de oui à la loi fédérale sur le climat et l'innovation. Ce même jour, la protection du climat et de la biodiversité a également fait son entrée dans la constitution vaudoise.

Pour mener à bien cette mission, la Confédération, les cantons et les communes ont besoin d'un état des lieux précis et de jalons pour contrôler et valider l'avancée des mesures prises en matière de transition énergétique.

C'est précisément la contribution de cette étude réalisée par la section prospective de Statistique Vaud en collaboration étroite avec la Direction générale de l'environnement ainsi qu'avec la participation de l'EPFL. Développant trois scénarios des évolutions possibles du système énergétique du canton d'ici 2050, entre continuité et sobriété, l'étude démontre que la transition énergétique a déjà commencé et qu'il est possible d'agir. Les trois scénarios étudiés indiquent que le mouvement devra toutefois s'accélérer significativement pour atteindre les objectifs.

L'Etat peut fixer un cadre légal, se montrer exemplaire, donner des impulsions et accorder des subventions. Si la volonté politique est un facteur décisif, elle ne suffira pas à elle seule. Comme le souligne bien cette étude, la transition vers les énergies renouvelables et l'abandon des ressources fossiles devra s'accompagner de la volonté des entreprises, des propriétaires de bâtiments, de l'engagement du monde agricole, des consommatrices et consommateurs, bref, de toutes et tous.

C'est donc à un public très large, celui de tous les actrices et acteurs de la transition, que s'adresse cette étude qui définit les possibles énergétiques du Canton de Vaud. Nous vous invitons à la découvrir et remercions ses auteurs-es.

Bonne lecture.

Valérie Dittli

*Conseillère d'Etat,
Cheffe du département en charge
de la statistique publique*

Vassilis Venizelos

*Conseiller d'Etat,
Chef du département en charge
de l'environnement et de l'énergie*

Synthèse

La transition énergétique en cours consiste à modifier en profondeur le système énergétique actuel, reposant sur l'utilisation de ressources fossiles et nucléaires, pour passer à un mix énergétique basé sur des ressources renouvelables produites localement. L'objectif de cette étude est de mettre en lumière les enjeux, leviers d'action et obstacles en lien avec cette transition énergétique, ainsi que de prendre la mesure des changements à réaliser pour atteindre la neutralité carbone. Dans ce but, nous avons modélisé plusieurs trajectoires que pourrait suivre la transition énergétique vaudoise d'ici à 2050. Chacune de ces trajectoires s'inscrit dans des scénarios prospectifs qui représentent autant de réalités contrastées face aux questions énergétiques et climatiques de la société vaudoise.

Leviers d'action liés au système énergétique



Assainir

La réduction de la demande d'énergie repose fortement sur la rénovation du bâti visant l'assainissement énergétique des logements et locaux commerciaux. Les travaux d'isolation ainsi que le remplacement des installations de chauffage fossile par des solutions renouvelables en sont le fer de lance.



Electrifier

Les besoins en électricité dans le canton vont rapidement s'accroître. Cette hausse découlera principalement de l'électrification des véhicules ainsi que du recours marqué aux pompes à chaleur. La pose de panneaux solaires photovoltaïques permettra une réponse adéquate à cette nouvelle donne.



Produire

La production d'énergie se veut renouvelable et locale. La rapidité de mise en place ainsi que la vitesse de déploiement détermineront le niveau de dépendance aux importations et à la captation de gaz à effet de serre pour atteindre la neutralité carbone territoriale. Or, les capacités d'importation et de mise en place de techniques de captation restent hautement incertaines.



Encadrer

La trajectoire de la transition énergétique est fortement dépendante des régulations mises en place pour en dessiner le contour. La coordination de la multiplicité des acteurs tant au niveau international, fédéral, cantonal que communal, ainsi que les dynamiques intrinsèques du système sont un défi.



Sensibiliser

L'atteinte de la neutralité carbone requiert l'adhésion de tous les pans de la société. L'information ainsi que la formation sont centrales. La prise en compte des différents acteurs liés à l'énergie, mais également de la population et de ses aspirations sera indispensable.



Financer

Le financement ainsi que la répartition des investissements de la transition énergétique est une question cruciale. L'équilibre doit être trouvé pour ne pas grever le budget des ménages tout en conservant la prospérité économique cantonale.



Connecter

Le profil des acteurs liés au système énergétique va se transformer à l'avenir, avec notamment la décentralisation de la production énergétique découlant du développement des énergies renouvelables. Cette modification des usages amène un besoin de connexion plus important. Les réseaux devront gagner en flexibilité notamment pour s'ajuster à l'intermittence de certaines productions renouvelables.



Employer

Les modifications profondes du système énergétique requièrent un savoir-faire et une main-d'œuvre qualifiée. Dans un contexte de pénurie déjà présent, la formation, le recrutement et la valorisation des emplois dans ce domaine sont primordiaux.



Conserver

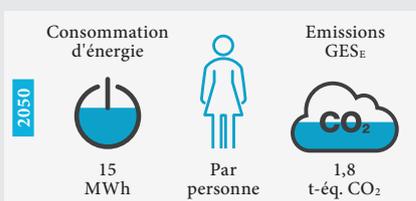
La capacité d'adaptation aux changements climatiques du canton, et de toute autre région, est intrinsèquement liée à la qualité de ses écosystèmes naturels, ces derniers représentant notamment d'importants puits de carbone. La conservation des milieux naturels doit continuer à peser à sa juste valeur dans la balance lors des arbitrages liés à la transition énergétique.

Constats en lien avec les chemins vers la neutralité carbone

- Atteindre l'objectif fixé par le canton de Vaud de neutralité carbone territoriale à l'horizon 2050 est un défi considérable.
- L'atteinte de cet objectif est possible pour autant que les cadences de déploiement du renouvelable et des mesures d'efficacité énergétique soient accélérées au plus tôt. Elle passera également par des mesures de réduction des émissions hors du système énergétique et le déploiement de solutions de captation pour retirer l'équivalent des GES résiduels.
- Réaliser la transition énergétique ne sera vraisemblablement possible qu'avec des changements de pratiques et davantage de sobriété, car les solutions techniques seules ne devraient pas suffire.
- Les émissions vaudoises de CO₂ ne s'inscriront dans une trajectoire compatible avec l'objectif de contenir le réchauffement climatique en dessous de 1,5 °C que si elles sont durablement négatives après 2050.
- La contribution vaudoise à la lutte globale pour le climat et l'environnement gagnerait à prendre également en considération les émissions de gaz à effet de serre (GES) occasionnées hors de son territoire.

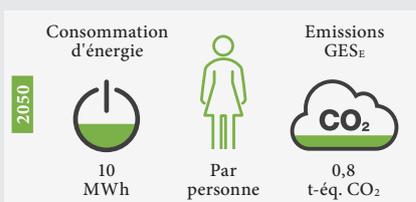
Descriptifs des scénarios élaborés

La transition énergétique est actuellement sur le devant de la scène et de nombreuses impulsions pour en accélérer le rythme sont données. Nos projections relèvent le fait que le résultat de ces premières impulsions pourrait varier selon le soutien et le relais qu'elles recevront des différents acteurs de la société et il en découle plusieurs trajectoires possibles d'ici à 2050.



Dans le scénario n°1 *continuité*, les tendances actuelles se poursuivent et sont même renforcées ce qui conduit à une légère accélération de la transition énergétique, tandis que la société reste énergivore. Ce scénario ne permettrait pas d'atteindre la neutralité carbone.

Dans le scénario n°2 *changement de cadence*, toutes les actions et les investissements stimulant la transition énergétique sont massivement renforcés. Un puissant coup d'accélérateur est donné au rythme des rénovations des bâtiments et au développement des énergies renouvelables, tandis que les pratiques et les modes de vie s'adaptent, tout en restant consommateurs. Ce scénario pourrait être compatible avec la neutralité carbone, si la captation de GES requise hors et dans le canton s'avère possible.



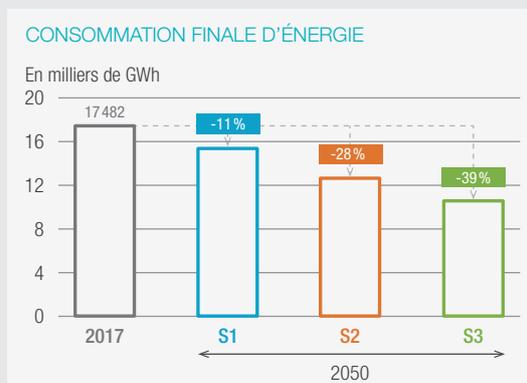
Dans le scénario n°3 *basculement vers un nouveau paradigme*, les actions et les investissements réalisés sont nettement plus rapides. De surcroît, la société vaudoise se tourne progressivement vers des habitudes plus sobres. Les actions pour réaliser la transition énergétique sont ainsi démultipliées, ce qui marque une rupture tant sur l'intensité des démarches déjà existantes que sur l'élargissement de la palette des changements mis en œuvre. Ce scénario serait compatible avec la neutralité carbone moyennant la captation durable de GES.

1 L'indicateur GES_E, signifie que l'on traite des gaz à effet de serre liés au système énergétique. Les GES_E représentent environ deux tiers des émissions de GES territoriales en 2017.

2 Les équivalents CO₂ (éq. CO₂) sont une unité de mesure visant à uniformiser l'effet climatique des différents gaz à effet de serre (GES).

Principaux résultats relatifs à l'année 2017 et à l'horizon 2050

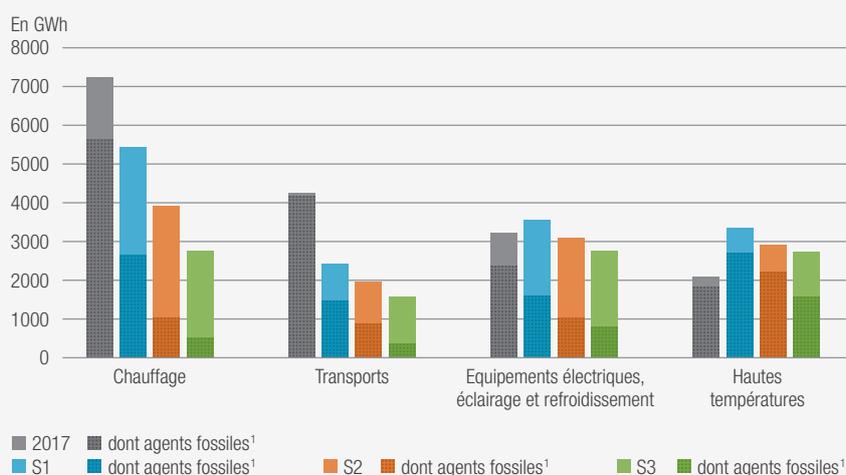
- La transition énergétique prend place dans un contexte de croissance démographique et économique, deux facteurs qui font augmenter le nombre de personnes et d'entreprises consommant de l'énergie.
- Sans nouvelles impulsions marquées, la baisse de la consommation énergétique cantonale serait de 11 % (scénario 1), tandis qu'elle serait plus conséquente dans les deux autres scénarios, avec une réduction qui pourrait atteindre 28 % à 39 % si les actions en faveur de la transition énergétique étaient davantage renforcées, voire démultipliées.



Secteurs de consommation d'énergie

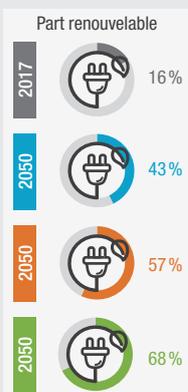
- Dans le secteur des habitations et appareils domestiques et des services, dominé en 2017 par la consommation énergétique des installations de chauffage, la substitution par des énergies renouvelables et les gains d'efficacité (par des rénovations surtout) permettraient de diminuer substantiellement les quantités d'énergie nécessaires pour chauffer les locaux d'habitation et commerciaux à l'horizon 2050.
- La consommation finale d'énergie du domaine de la production de biens est dominée, en 2017, par des processus nécessitant de la chaleur à haute température qui sont difficilement substituables par des énergies renouvelables. Cette dominance fossile perdurerait jusqu'en 2050.
- Le baisse de la consommation finale d'énergie dans le secteur des transports découlerait majoritairement de l'électrification – plus efficace énergétiquement – du parc de véhicules individuels qui permet également d'éviter une grande partie des émissions territoriales de gaz à effet de serre.

CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE SELON LES SERVICES ÉNERGÉTIQUES, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050



¹ Cette valeur prend en compte la part non-renouvelable des déchets ainsi que la part non-renouvelable de l'électricité produite sur le territoire vaudois. La part de l'électricité produite de manière non-renouvelable (nucléaire, fossile, etc.) en Suisse et à l'étranger n'est pas comptabilisée dans cette catégorie.

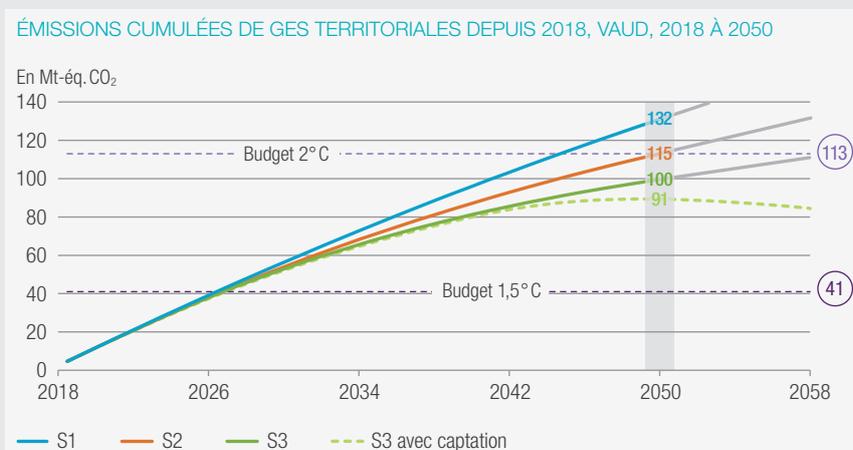
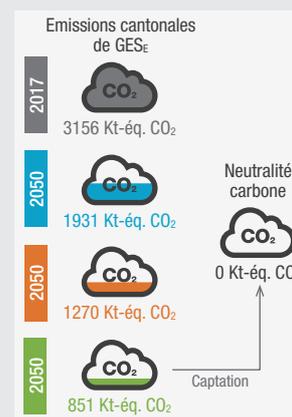
Production renouvelable indigène



- La substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables provoquera une augmentation marquée de la consommation électrique. Loin d'être anodine, cette hausse implique un fort accroissement des capacités de production électrique dans le canton, au moment où la possibilité d'approvisionnement auprès des pays voisins n'est plus garantie.
- La production locale d'énergies renouvelables dites « conventionnelles » (hydraulique, bois et part renouvelable des déchets), déjà bien implantées dans le canton, devrait augmenter de 11% à 26% à l'horizon 2050 selon les scénarios.
- Les énergies renouvelables dites « nouvelles », comme le solaire, la biomasse, l'éolien, la chaleur de l'environnement et la géothermie, devraient augmenter beaucoup plus fortement. Leur production seraient de 9 à 11 fois plus importantes en 2050 qu'elles ne le sont en 2017.
- Les imports d'électricité pourraient baisser de plus de la moitié en 2050 dans le scénario le plus sobre augmentant de ce fait la souveraineté énergétique cantonale.

Emissions de gaz à effet de serre et neutralité carbone

- La baisse de la consommation énergétique, due à une meilleure efficacité et à des comportements moins gourmands en énergie couplée à de la substitution des ressources fossiles par des renouvelables, simulée dans nos 3 scénarios, ne suffirait pas à atteindre la neutralité carbone sans mesure de captation.
- Dans le scénario 1, le canton de Vaud émettrait 39% de moins de gaz à effet de serre liés au système énergétique (GES_E) en 2050 qu'en 2017. Les émissions baisseraient de 60% dans le scénario 2 et de 73% dans le scénario 3. Cela représente 850 kt. CO₂¹ émis sur sol vaudois en 2050 pour notre scénario le plus sobre¹.
- A l'horizon 2050, le système énergétique vaudois serait sollicité pour répondre aux besoins en énergie nécessaires pour capter le CO₂ encore émis dans le canton, afin d'atteindre la neutralité carbone. Ce défi d'approvisionnement, ainsi que ceux des coûts et des incertitudes au niveau politique, constituent des véritables limitations au déploiement de techniques de captation à large échelle en Suisse et dans le canton.
- Les gaz à effet de serre territoriaux cumulés émis dans chacun de nos scénarios dépasseraient nettement le seuil compatible avec un réchauffement planétaire de 1,5°C, ce qui s'inscrit dans la ligne des résultats mondiaux. Le scénario 3 permettrait uniquement de respecter le budget compatible avec un réchauffement de 2°C.



¹ Les pourcentages de réduction sont exprimés ici par rapport à 2017, tandis que les objectifs du Conseil d'Etat vaudois, validés dans le Plan climat, ont pour année de référence 1990 comme dans l'accord de Paris.



1. Introduction

L'énergie est l'une des thématiques les plus traitées de ces dernières années, tant dans les médias, que dans le monde politique, économique ou scientifique. Elle est même particulièrement sous les projecteurs depuis l'invasion de l'Ukraine par la Russie en février 2022. Cet hiver-là, le prix du gaz naturel a bondi, tout comme celui du mazout, de l'électricité et du pétrole, ce qui a mis à mal le pouvoir d'achat des personnes et la compétitivité des entreprises. La réduction des livraisons de gaz russe a de surcroît fait rapidement ressurgir les craintes qu'un blackout survienne l'hiver suivant. Ces circonstances exceptionnelles ont conduit à la mise en œuvre dès août 2022, en Suisse et en Europe, de mesures d'économie d'énergie difficilement imaginables quelques mois auparavant¹. De même, l'attaque de la Russie a provoqué une accélération notable des investissements dans les énergies renouvelables en Europe et dans le monde. Assurément, les périodes de crises jouent le rôle de catalyseur, la pandémie de Covid-19 en avait fait la démonstration récemment.

Cette étude sur l'énergie est publiée au moment où l'attention portée sur le thème de l'énergie est exacerbée. Toutefois, les événements actuels ne constituent pas le motif de la réalisation de cette étude, qui s'inscrit dans une temporalité plus longue. Dans les faits, elle s'inscrit dans les travaux effectués par l'Etat de Vaud pour conduire ses politiques publiques dans un contexte de transition énergétique à l'échelle planétaire. Cette transition consiste à modifier en profondeur le système énergétique actuel reposant sur l'utilisation de ressources fossiles et fissibles (produits pétroliers, gaz naturel, uranium, etc.). Outre le remplacement des équipements fonctionnant aux énergies fossiles, cela implique de réduire, par l'utilisation

d'équipements plus efficaces et/ou par des changements de pratiques, la consommation d'énergie à un niveau suffisamment bas pour qu'il soit possible d'y répondre avec des énergies renouvelables produites principalement localement.

La transition énergétique concerne l'ensemble des activités de nos sociétés, puisque les activités humaines sont intrinsèquement liées aux ressources énergétiques disponibles, que ce soit pour s'éclairer, se chauffer, se déplacer ou simplement se nourrir². De ce fait, la transition énergétique n'est pas qu'une affaire technique et dépend aussi des modes de vie, des moyens financiers consacrés ainsi que des réglementations et incitations en place.

Fondamentalement, la transition énergétique en cours dans le pays et le canton est motivée par trois raisons:

1. La protection du climat et l'environnement: les émissions de gaz à effet de serre (GES), découlant principalement de la combustion des énergies fossiles, sont notamment la cause de dérèglements climatiques majeurs. Or, les conséquences délétères de ces changements s'accroissent et vont devenir toujours plus palpables au cours des prochaines décennies. Dès lors, de nombreuses initiatives sont prises afin de limiter les émissions de GES dans le but d'atteindre la neutralité carbone.
2. La diminution de la dépendance énergétique: les énergies fossiles, tout comme l'énergie nucléaire, sont issues de ressources extraites à l'étranger et ne sont disponibles que dans certaines régions du globe. Elles nous rendent vulnérables à la hausse des prix, aux ruptures des chaînes d'approvisionnement ou à des blocages de nature géostratégique comme l'ont dévoilé les répercussions de l'invasion de l'Ukraine.

¹ Finalement, la douceur de l'hiver et les économies d'énergie ont permis d'éviter que la pénurie ne se produise à l'hiver 2022-2023. Il n'empêche que les prix du gaz naturel (+75% en février 2023), du bois de chauffage (+26%) et de l'électricité (+29%) ont atteint des niveaux particulièrement élevés à ce moment-là, par rapport à décembre 2021.

² Cette place centrale de l'énergie n'est pas nouvelle, de tout temps les êtres humains ont utilisé différentes sources d'énergie pour leurs activités, qu'elles proviennent de la force animale au début de leur Histoire ou de la force mécanique après la première révolution industrielle. L'évolution de l'humanité a été rythmée par les modifications du système énergétique (Cipolla, 1961 ; Ben Yitzhak, 2015).

Energies renouvelables

Les énergies renouvelables proviennent de sources d'énergie dont le rythme de renouvellement naturel est supérieur à celui de leur consommation. Le fait qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine dépend donc fortement de la manière dont elles sont exploitées et de l'impact de cette exploitation sur les ressources initiales¹.

En Suisse, elles comprennent les forces hydrauliques et éoliennes, la chaleur de l'environnement, la géothermie ainsi que l'énergie solaire. La biomasse (bois et déchets agricoles) et la part organique des déchets industriels et ordures ménagères sont également des sources d'énergies renouvelables.

¹ Renouvelables ne veut pas dire sans effet sur la nature. L'exploitation de telles sources d'énergie touche l'environnement et la biodiversité plus ou moins fortement selon la manière dont elles sont gérées et selon leur lieu d'implantation.

Or la Suisse a couvert 70 % de ses besoins énergétiques par des importations selon les derniers chiffres connus de 2021 (OFS, 2022). Dans un contexte de rivalité grandissante pour l'usage des ressources naturelles, réduire cette vulnérabilité constituera un avantage stratégique certain.

3. La garantie de l'approvisionnement à long terme : les ressources fossiles sont de nature non-renouvelables, car elle se reconstituent moins vite que nous les consommons. En effet, la transformation naturelle de matières organiques en mélanges d'hydrocarbures dure des millions d'années. Une telle échelle ne peut mener qu'à leur épuisement rapide, si leur consommation n'est pas freinée³.

De plus, le canton de Vaud va adapter sa politique énergétique aux contextes nationaux et internationaux. En effet, l'approvisionnement énergétique devra s'ajuster à la sortie progressive de la Suisse du nucléaire entre 2020 et 2044, ainsi qu'à la probable moindre disponibilité d'électricité pouvant être importée depuis nos pays voisins ces prochaines années⁴. Or, ces deux filières couvrent une partie importante de la consommation finale d'électricité du pays, surtout en hiver. Elles représentaient par exemple 56 % de la consommation finale d'électricité durant le 4^e trimestre 2021. Dès lors, des sources alternatives d'approvisionnement d'énergie devront être trouvées et/ou des économies d'énergie réalisées.

Buts et travaux réalisés

Le but de cette étude est de mettre en lumière les enjeux, leviers d'action et obstacles en lien avec la transition énergétique, ainsi que de prendre la mesure des changements à réaliser pour atteindre différents objectifs liés à cette transition. Pour le canton de Vaud (Conseil d'Etat, 2023), ces objectifs comprennent :

- la neutralité carbone territoriale vaudoise à l'horizon 2050 ;
- un approvisionnement énergétique durable ;
- une prospérité durable et partagée.

Dans ce but, nous avons tracé plusieurs trajectoires que pourrait suivre la transition énergétique vaudoise d'ici à 2050. Pour les construire, nous avons opté pour une démarche d'exploration des possibles, plutôt que pour une démarche normative conduisant à la neutralité carbone. Deux raisons expliquent ce choix.

D'une part, l'avenir est incertain et rien ne garantit que cet objectif soit atteint, tout aussi désirable qu'il puisse l'être. D'autre part, il ne nous appartient pas de dicter l'un ou l'autre des cheminements possibles pour atteindre cet objectif, mais de proposer différentes alternatives et de rendre visibles les efforts nécessaires pour qu'ils se réalisent. A ce propos, la comparaison des trajectoires établies entre elles et avec la situation actuelle

³ Selon les prévisions de British petroleum, les réserves actuellement connues de gaz naturel devraient pouvoir couvrir les besoins mondiaux pendant encore environ 55 ans, celles de pétrole pendant plus 53 ans et celles de charbon pendant environ 100 ans. Ces prévisions ont été réalisées en 2015 et se basent sur une consommation d'énergie fossile stable dans le temps.

⁴ Il n'est par exemple pas certain que l'Allemagne puisse produire assez d'énergie pour continuer à vendre de l'électricité à la Suisse en hiver, suite à son renoncement au nucléaire et au charbon.

permet d'estimer les effets de nombreux leviers d'action et constitue de ce fait un apport pour la conduite de la transition énergétique cantonale. Il s'agit par exemple de leviers tels que les rénovations de bâtiments ou le développement des énergies renouvelables.

Pour quantifier les évolutions du système énergétique d'ici à 2050, nous avons créé trois scénarios prospectifs qui représentent autant de réalités contrastées face aux questions énergétiques et climatiques de la société vaudoise. Dans le premier scénario, les tendances actuelles sont renforcées, tandis que dans les deux autres des ruptures s'opèrent :

1. Dans le scénario *continuité*, les tendances actuelles se poursuivent et sont même renforcées ce qui conduit à une légère accélération de la transition énergétique, tandis que la société reste énergivore.
2. Dans le scénario *changement de cadence*, toutes les actions et les investissements stimulant la transition énergétique sont massivement renforcés. Un réel coup d'accélérateur est donné au rythme des rénovations et au développement des énergies renouvelables, tandis que les pratiques et les modes de vie s'adaptent, tout en restant consuméristes.
3. Dans le scénario *basculé vers un nouveau paradigme*, les actions et les investissements réalisés sont également nettement plus rapides. De surcroît, la société vaudoise se tourne progressivement vers des habitudes de consommation plus sobres. Les actions pour réaliser la transition énergétique sont ainsi démultipliées, ce qui marque une rupture tant sur l'intensité des démarches déjà existantes que sur l'élargissement de la palette des changements mis en œuvre.

Par exemple, pour la mobilité des personnes le premier scénario prévoit dans un premier temps une diffusion plus forte des voitures hybrides puis un rapide passage à l'électrique. Le deuxième scénario table sur une adoption directe des voitures électriques et accentue l'usage des transports publics, tout comme le troisième scénario. Ce dernier prévoit en plus que la population vaudoise pratique plus souvent des loisirs de proximité pouvant ainsi réduire les distances parcourues en voiture, alors qu'en parallèle elle multiplie les déplacements à vélo électrique.

Fort de ce travail de scénarisation, nous avons ensuite effectué un travail de modélisation (**Fig. 1**). Plus précisément, nous avons créé et adapté des modèles de projection en nous basant sur les données à disposition ainsi que sur des informations puisées dans des expertises. Concrètement, nous avons établi des projections caractérisant la demande en services énergétiques et la « réponse » apportée par le système énergétique dans le canton de Vaud en termes de disponibilité des ressources et de capacités de transformation et d'importation d'énergie permettant d'obtenir les vecteurs énergétiques à même de combler cette demande en énergie (voir définitions en page 68). Deux types d'outils ont été utilisés ; premièrement des outils de projection de demandes énergétiques et deuxièmement l'outil Energyscope⁵ qui permet de modéliser le système de production énergétique vaudois pour des demandes énergétiques données.

Le système ainsi constitué combine plusieurs centaines de variables dont les regroupements sont représentés dans la **figure 1**. Afin de réaliser des trajectoires, différents paramètres viennent moduler les besoins en énergie, la disponibilité des ressources, les technologies de transformation ou les vecteurs énergétiques utilisés (électricité, gaz, etc.). Chaque scénario voit les paramètres clés associés à la chaîne de production-consommation d'énergie se modifier selon des hypothèses différentes. Ces hypothèses ont été élaborées en se basant sur la littérature scientifique et la consultation de spécialistes. Un travail de cohérence a été réalisé entre les différents secteurs et la plausibilité des résultats a ensuite été vérifiée en les comparant à différentes études, notamment les perspectives énergétiques Suisse 2050+.

Les résultats en termes de production et de consommation d'énergie se déclinent selon trois secteurs couvrant l'ensemble des activités dans le canton : les habitations et appareils domestiques, les transports et la production de biens et services. Ces secteurs sont eux-mêmes déclinés en domaine (transport de personnes et transport de marchandise par exemple). Il en va de même pour les émissions de gaz à effet de serre (GES) qui y sont associées.

5 Energyscope est un optimisateur qui va chercher à créer le système énergétique permettant de minimiser les émissions de CO₂ territoriales puis les coûts tout en répondant à une demande en énergie donnée. Ce mode de fonctionnement crée parfois des solutions qui font sens dans la théorie, mais qui sont quelque peu déconnectées de la réalité. Afin d'orienter le modèle vers des solutions plausibles, des ensembles de contraintes ont été imposées de sorte que, par exemple, le rythme de sortie des énergies fossiles ou les quantités d'électricité importables s'inscrivent dans des limites cohérentes avec les scénarios retenus.

Cette étude se focalise ainsi sur les émissions de GES et les techniques de captation liées au système énergétique vaudois (voir **encadré** ci-dessous). Toutefois, elle tient également compte des émissions territoriales hors systèmes énergétiques, car le canton de Vaud s'est donné pour objectif d'atteindre la neutralité carbone.

Encadré 1 Gaz à effet de serre directement liés au système énergétique vaudois et cohérence avec le bilan carbone cantonal

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) peuvent être abordées sous plusieurs angles. Par exemple, on peut s'intéresser aux émissions émises sur un territoire ou aux émissions émises par un domaine particulier tel que les bâtiments. En conséquence, il n'existe pas un indicateur unique «émissions GES» mais plusieurs indicateurs, chacun ayant leur utilité et périmètre spécifique. Les périmètres des indicateurs estimés à l'échelle vaudoise sont résumés ci-dessous et représentés dans la figure ci-après :

- **Les émissions territoriales de GES_E liées à l'énergie**, notées GES_E dans cette étude, sont les émissions liées à la consommation d'énergie à l'intérieur des frontières cantonales. Elles permettent de suivre les effets de la transition énergétique. Il s'agit par exemple des émissions liées à la combustion de combustibles ou de carburants sur le territoire. Elles incluent de ce fait les émissions liées à la production indigène d'électricité à partir de combustibles fossiles, mais pas celles liées à l'électricité qui y est importée depuis la Suisse ou l'étranger.
- **Les émissions territoriales de GES** sont les émissions GES émises directement sur un territoire qu'elles soient liées au système énergétique ou qu'elles proviennent d'autres activités comme l'agriculture ou la fabrication de ciment. Les objectifs climatiques sont généralement fixés et monitorés à cette échelle (voir **encadré 4** en page 26).
- **Les émissions GES totales (territoriales et extra-territoriales)** permettent le suivi des émissions GES liées à notre mode de vie et de produire de biens et services, indépendamment du lieu de leur émission. Par exemple, les GES totales du canton de Vaud comprennent ses émissions territoriales ainsi que celles découlant de la production à l'étranger de biens qui sont importés dans le canton pour notre consommation ou nos activités économiques. Elles comprennent aussi les émissions liées à nos déplacements à l'étranger.

Dans ce rapport, l'indicateur émissions GES liées à l'énergie (GES_E) est utilisé sauf précision contraire. Ces émissions représentaient environ 67 % des émissions territoriales en 2019¹.

INDICATEURS D'ÉMISSION DE GES, VAUD

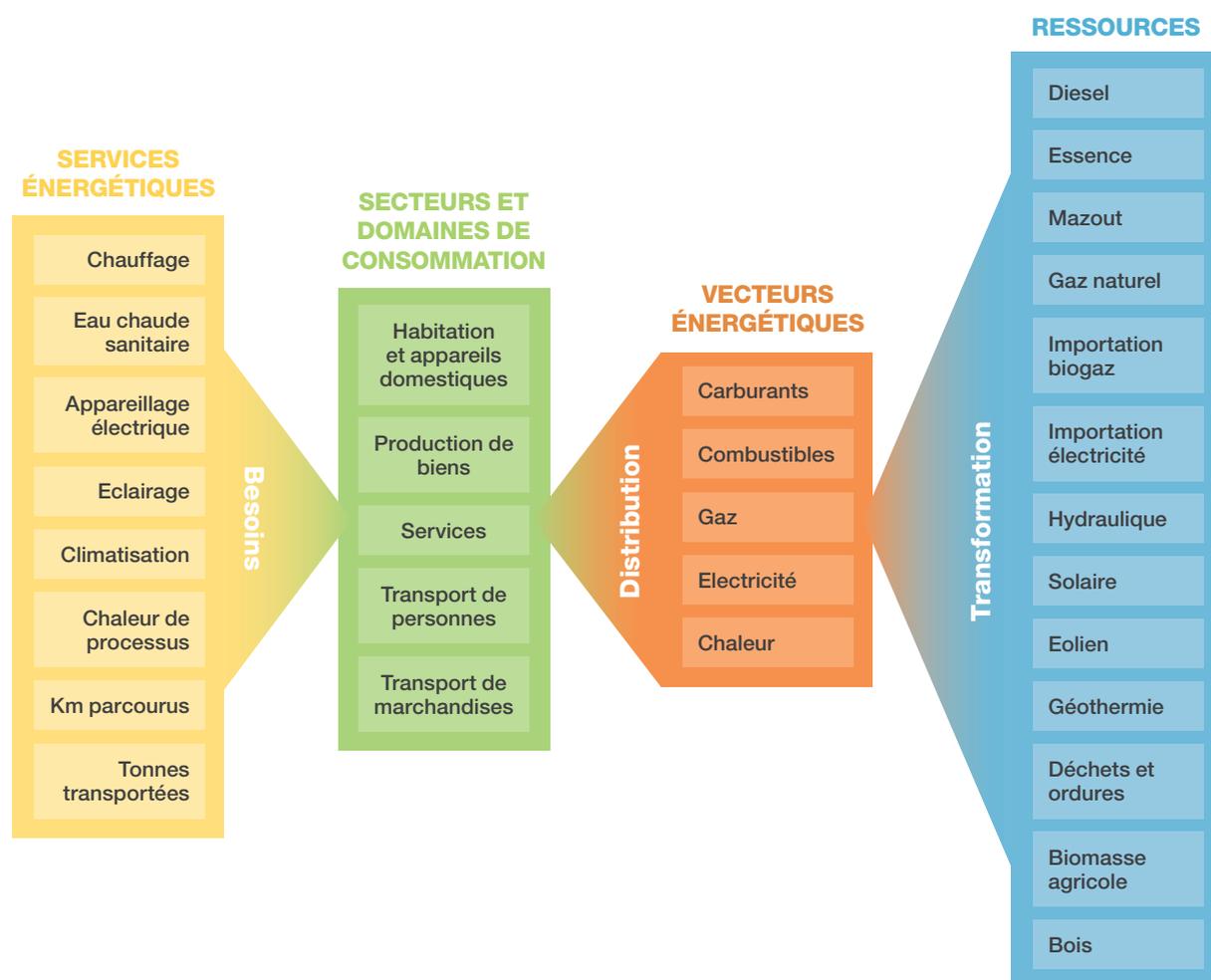


Source: propres calculs, Quantis (2017, 2021).

1 L'année de référence du bilan carbone cantonal est 2019, l'année de référence de cette étude est 2017. L'évolution entre ces deux années est toutefois minimale et cette différence peut être ignorée pour la comparaison faite ici.

2 Les équivalents CO₂ (ék. CO₂) sont une unité de mesure visant à uniformiser l'effet climatique des différents gaz à effet de serre (GES).

FIG. 1 CONCEPT DE MODÉLISATION



Modélisation de la demande en services énergétiques

Modélisation (R programming) par StatVD et paramétrage par StatVD, la DGMR et la DGE.

Modélisation de la réponse du système énergétique

Modélisation par l'EPFL avec l'outil Energyscope (Python programming) et calibrage par la DGE, StatVD et la DGMR.



Des compléments techniques expliquant le fonctionnement des modèles utilisés ainsi que les hypothèses retenues pour faire évoluer la demande et la production énergétique vaudoise sont disponibles en ligne.

<https://www.vd.ch/themes/etat-droit-finances/statistique/publications/prospective>



2. Dynamiques du système énergétique et émissions de gaz à effet de serre

2.1. Principaux traits de la consommation et de l’approvisionnement en énergie

Le canton de Vaud présente un profil similaire à celui de la Suisse tant pour la consommation d’énergie que pour les ressources exploitées pour y répondre. Le canton représente ainsi 8 % à 9 % de la consommation finale d’énergie du pays, soit une part à la hauteur de sa taille démographique ou économique. La différence est toutefois notable du côté de la production énergétique, car le territoire vaudois n’abrite pas de centrale nucléaire qui représente 29 % de l’électricité produite dans le pays en 2021.

La consommation finale du canton de Vaud s’est élevée à 18 300 Gigawattheure (GWh) en 2021 dont près de la moitié (45 %) a été utilisée pour la production de biens et services.

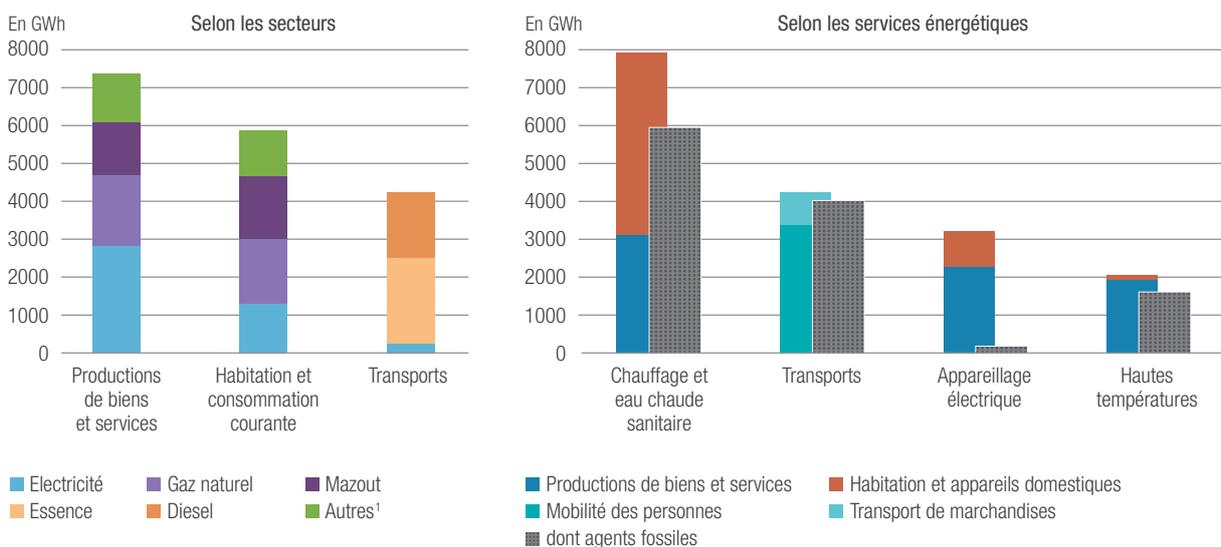
En 2017, année de référence de cette étude (voir **enca-dré 2**, page 20), la part de ce secteur s’élevait à 42 %. Tous

secteurs confondus (**Fig.2**), les agents énergétiques les plus consommés étaient l’électricité (25 %), le gaz naturel (20 %) et le mazout (18 %). Pour l’essentiel, la consommation énergétique du canton a été dédiée au chauffage des bâtiments (41 %) et aux transports (24 %). **Ainsi, le chauffage des bâtiments et les transports représentent ensemble 81 % de la consommation d’énergie fossile dans le canton.**

Un système énergétique fortement dépendant de l’approvisionnement fossile extérieur

Le canton de Vaud n’extraite pas directement de ressources fossiles qui couvrent pourtant l’essentiel de sa consommation énergétique, avec 66 % en 2017. D’autre part, le canton est un importateur net d’électricité sur le marché helvétique⁶. Toutes ressources confondues, le

Fig. 2 CONSOMMATION FINALE D’ÉNERGIE, VAUD, 2017



¹ Bois, chauffage à distance, déchets, solaire thermique et chaleur ambiante.

⁶ En Suisse, la production domestique ne parvient pas à couvrir la consommation finale d’électricité durant les mois hivernaux. La part des importations dans la consommation finale d’électricité s’est par exemple élevée à 21 % durant le premier trimestre 2022. Or, l’électricité importée pour combler les besoins est souvent produite de manière non-renouvelable par nos voisins européens.

canton de Vaud couvre ainsi 84% de ses besoins par des ressources extérieures à son territoire. Autrement dit, **seulement 16% des besoins énergétiques sur le territoire vaudois sont couverts avec des ressources renouvelables produites localement.**

Une variabilité saisonnière et journalière des besoins énergétiques et de la production d'énergie renouvelable

Les besoins énergétiques varient au fil des saisons et de la journée. Ils sont ainsi plus importants en hiver qu'en été à cause du froid et des journées plus courtes. Hiver comme été, ces besoins fluctuent par ailleurs selon les heures de la journée, avec une consommation plus basse pendant les périodes d'inactivité de la société, et particulièrement élevée en fin de journée.

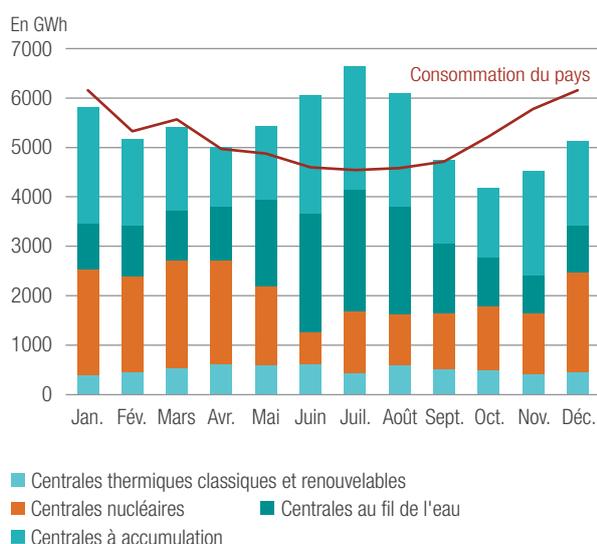
Pour répondre à ces fluctuations ainsi qu'aux pics de besoins qui apparaissent ponctuellement au gré des conditions météorologiques et des circonstances, le système énergétique gagne à avoir une production flexible afin d'éviter des pénuries lors de ces pics, mais également une production excessive aux périodes creuses. Or, la production d'énergie renouvelable est spécialement dépendante des conditions météorologiques



saisonniers et du cycle jour/nuit, et est également bien souvent non-pilotable (c'est-à-dire qu'on ne peut pas faire varier sa puissance). Cette variation se manifeste à des échelles de temps différentes selon les ressources considérées. La courbe de production du solaire par exemple varie au cours de la journée, notamment en fonction des conditions météorologiques mais également de la saison. La courbe de production éolienne présentera un profil généralement inversé à celui du solaire, plus de vent la nuit et en hiver. Pour sa part, la grande hydraulique (notamment les barrages), bien que pilotable, présente des capacités de production moindres durant les mois d'hiver. Actuellement, la Suisse importe de l'électricité des pays voisins durant les périodes hivernales pour combler ses besoins énergétiques accrus lors de la saison froide (Fig. 3), elle est donc fortement dépendante de l'étranger durant cette période.

C'est donc le foisonnement des sources d'énergie renouvelables, la maximisation des complémentarités ainsi que la multiplication des installations qui permettraient un lissage de cette variabilité au niveau régional.

Fig. 3 PARTS MENSUELLES DE LA PRODUCTION ET DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE, SUISSE, 2021



Source: OFEN.

Encadré 2 Données sur l'énergie: statistiques disponibles, estimées et année de référence de projection

L'essentiel des données sur l'énergie exploitées dans cette étude sont issues des trois sources suivantes :

1. **Les données mises à disposition par l'Office fédéral de l'énergie** (source : OFEN). Assurément, cette source est la plus riche en termes d'historique disponible et des caractères traités (finesse des agents énergétiques considérés, répartitions sectorielles, etc.). Ces données n'étant disponibles qu'à l'échelle helvétique, nous avons adopté plusieurs stratégies pour éclairer la situation vaudoise. D'une part, nous avons utilisé les données nationales directement afin d'exposer les tendances générales concernant l'énergie. D'autre part, nous les avons utilisées pour estimer des valeurs vaudoises.
2. **Les données annuellement diffusées par Statistique Vaud** (source : StatVD). Ces données portent pour l'essentiel sur la consommation d'énergie dans le canton. Dans la mesure du possible, elles proviennent de relevés établis dans le canton de Vaud, mais reposent parfois sur la régionalisation de données nationales.
3. **Les données spécifiquement diffusées dans ce rapport** (sources possibles : DGE, EPFL ou propres calculs). Ces données proviennent pour une partie de relevés établis par la Direction générale de l'environnement (DGE) du canton de Vaud. Elles proviennent pour une autre partie d'estimations ou/et de modélisations réalisées par l'équipe de projet et l'EPFL¹. Les figures présentées dans ce rapport sans mention particulière de la source sont issues de cette dernière catégorie de données.

L'année de référence de projection. L'année de référence pour établir nos projections est 2017. Le choix de ce point de référence est le fruit d'un compromis entre la complétude des données, la stabilité de cette année (pas de crise sanitaire ou économique), le début des travaux et le temps pour les traiter. Cela dit et dans la mesure du possible, les données les plus récentes ont été utilisées afin de tenir compte des trajectoires effectives. Fondamentalement, cela n'a que peu d'influence sur les enseignements qui peuvent être tirés à partir d'un exercice de projections à un horizon de 30 ans.

¹ Les résultats découlant de modélisation sont proches de ceux établis par StatVD, mais ne correspondent pas exactement, car les méthodes d'estimation ne sont pas identiques et les périmètres sont légèrement différents.

2.2. Dynamique du système énergétique: le virage de la transition énergétique a commencé

En Suisse, comme dans la plupart des pays développés, l'évolution de la consommation d'énergie a été profondément façonnée par les changements économiques et sociaux majeurs qui ont marqué le passage en Europe à une société de consommation au cours des trois décennies suivant la fin de la deuxième guerre mondiale (Fig. 4). Cette évolution a été favorisée par l'abondance du pétrole, dont la consommation a été multipliée par 13 en Suisse entre 1950 et 1970, avec l'augmentation du parc de véhicules, la généralisation du chauffage à mazout et la production en masse de biens, souvent en matière plastique.

Depuis 1973 et jusqu'en 1990, la consommation finale d'énergie a continué de croître, mais à un rythme significativement moins rapide: cette fois, elle a crû 2 fois plus vite que la population, alors qu'elle avait été 5 fois plus rapide auparavant. Ce changement de rythme découle

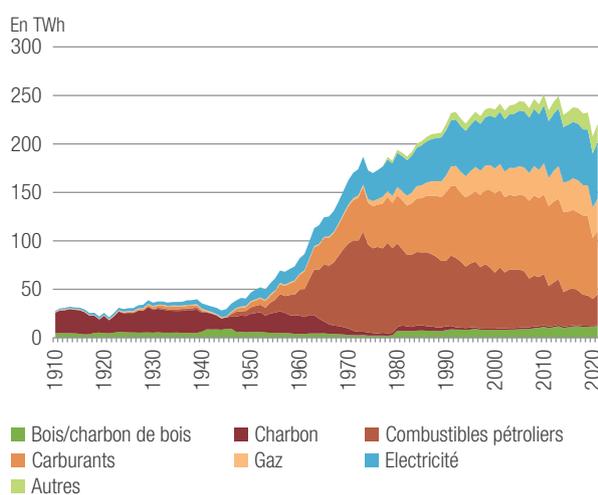
notamment d'une crise économique, provoquée par un choc pétrolier en 1973, qui a réduit les besoins énergétiques tant pour la production de biens et services que pour les ménages pendant près d'une décennie⁷. Elle découle aussi d'une attention plus grande portée à l'efficacité énergétique motivée par la volonté d'éviter de nouvelles périodes de rationnement ou de pénurie analogues à celle provoquée par le choc pétrolier, ainsi que par une attention grandissante portée à l'environnement avec la naissance de l'écologie politique (Meyer, 2020).

Une consommation d'énergie qui pointe désormais à la baisse

Depuis les années nonante, l'augmentation de la consommation finale d'énergie a continué à être rapide à l'échelle planétaire, tandis qu'elle a encore ralenti en Suisse jusqu'au milieu des années 2010 (+0,7% par an entre 1990 et 2010 en Suisse, contre +1,7% par an dans le monde). Ensuite, la consommation d'énergie finale dans le pays a même commencé à baisser, alors que la démographie et les activités économiques ont continué à croître tendanciellement.

Ainsi, depuis les années nonante, la consommation finale d'énergie par habitant ou par rapport à l'activité économique (mesurée par le PIB) tend à diminuer, faisant de ce fait apparaître un découplage relatif entre la croissance et la consommation d'énergie (Fig. 5). Ce découplage s'explique en partie par les gains d'efficacité énergétique découlant des progrès technologiques et organisationnels. Il s'explique aussi par la mondialisation de l'économie qui s'est notamment manifestée par la délocalisation de la production industrielle dans des pays en développement. La production particulièrement énergivore de matériaux comme l'acier et l'aluminium a, par exemple, pratiquement disparu en Suisse. Sans ces délocalisations, la croissance de la consommation d'énergie aurait donc été plus soutenue de 1990 à 2010 et sa baisse moins rapide depuis lors⁸.

Fig. 4 CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE PAR AGENT ÉNERGÉTIQUE, SUISSE, 1910-2021



Source: OFEN.

7 Le choc pétrolier est une crise mondiale des prix du pétrole qui a débuté en 1971 et a atteint son pic fin 1973. Durant ces derniers mois, le prix du baril a quadruplé.

8 Moreau & Vuille (2018) montrent qu'en prenant en compte les émissions indirectes dues aux services et produits importés ainsi que l'énergie grise, le découplage entre le développement économique en Suisse et la consommation d'énergie découlait surtout des délocalisations.

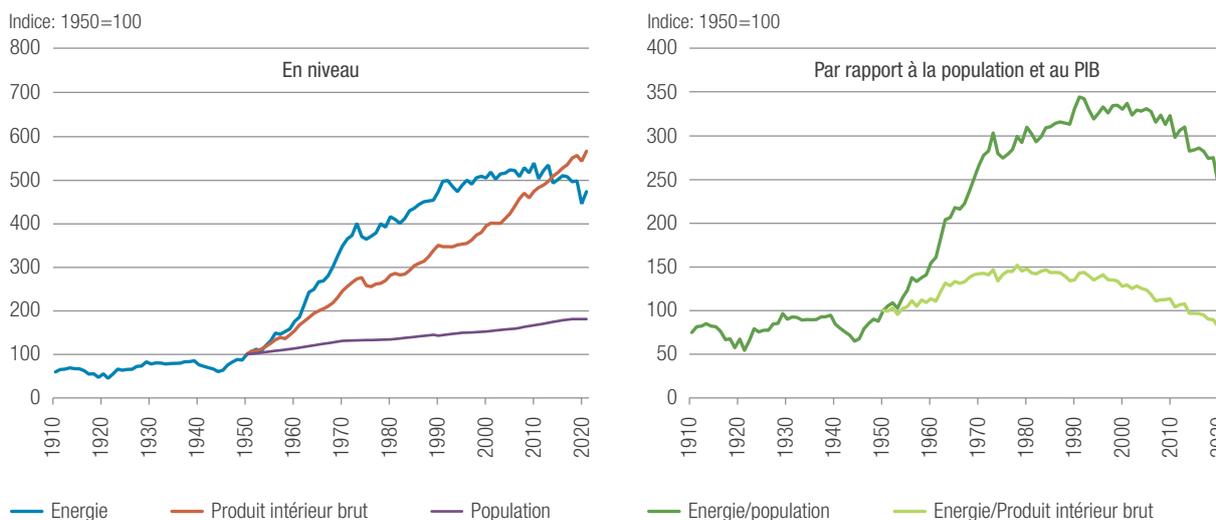
Une consommation d'énergie qui provient plus souvent de l'exploitation de ressources renouvelables et locales

Depuis le milieu des années 2000, de nouvelles formes d'agents et de technologies énergétiques renouvelables ont été développées. Ainsi, les installations photovoltaïques et, marginalement, les éoliennes sont venues accroître la production d'électricité en Suisse, tandis que l'utilisation du bois et les pompes à chaleur ont pris de l'importance dans le domaine du chauffage. Ensemble, les énergies renouvelables ont augmenté de 50 % depuis 2005, avec une hausse de 21,0 TWh en 16 ans (encadré 3).

En 2021, les énergies renouvelables couvraient 28 % de la consommation finale d'énergie dans le pays, contre 17 % en 2005. Cette forte hausse est l'expression chiffrée de la transition énergétique en cours dans le pays.



Fig. 5 ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE, DE LA POPULATION ET DU PRODUIT INTÉRIEUR BRUT (PIB), SUISSE, 1910-2021

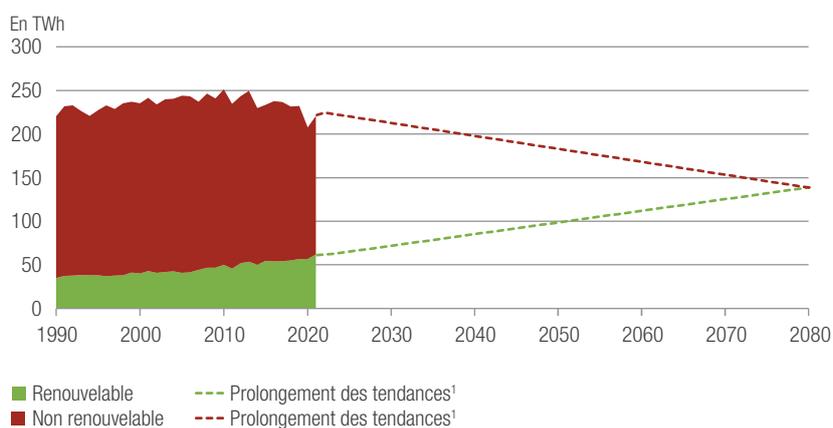


Source: OFEN, OFS.

Encadré 3 Aux rythmes actuels, la substitution de l'énergie fossile par du renouvelable serait pleinement achevée en 2080

Prolonger les tendances actuelles pour estimer le temps qu'il faudrait pour se passer des énergies fossiles est un exercice peu réaliste, car de nombreuses évolutions susceptibles d'accélérer la transition énergétique se dessinent. Il est toutefois indicatif, car la durée ainsi obtenue - 60 ans - est suffisamment longue pour conclure que les changements à opérer pour se passer rapidement des énergies fossiles devront être démultipliés. En effet, aux rythmes actuels de baisse des énergies non-renouvelables et de développement des énergies renouvelables, la substitution de l'énergie fossile par du renouvelable serait pleinement achevée en 2080 (figure ci-dessous).

CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE, SUISSE, 1990-2021, 2022-2080 PROLONGEMENT DES TENDANCES



1 Identifiées sur la période 2005 à 2021. Source: OFEN.

Parmi les actions permettant d'accélérer le remplacement des énergies fossiles, certaines paraissent particulièrement adéquates, car elles exercent des effets sur toutes les facettes du système. Par exemple, le remplacement des chaudières à mazout par des pompes à chaleur ou le raccordement à un chauffage à distance permettent à la fois une réduction des énergies fossiles consommées, une hausse du renouvelable et une baisse de la consommation, car ces nouvelles technologies sont souvent énergétiquement plus efficaces.

2.3. Emissions de gaz à effet de serre : une baisse majeure nécessaire pour limiter les changements climatiques

Se joignant à l'effort mondial, le canton de Vaud, tout comme la Suisse, s'est donné pour objectif d'atteindre la neutralité carbone sur son territoire d'ici à 2050. Concrètement, l'atteinte de ce qui est également appelé le « zéro émission nette », consiste à réduire de manière considérable les émissions de gaz à effet de serre et à retirer activement de l'atmosphère celles que l'on ne peut que (très) difficilement éviter (voir **encadré 5** en page 27). Pour l'essentiel, ces dernières – qui sont désignées comme des émissions résiduelles – proviennent de l'élevage de ruminants, de la fabrication de ciment ou de l'élimination des déchets. Le système énergétique, et plus précisément l'utilisation d'énergie fossile, est responsable à ce jour de la majeure partie des émissions de GES dans le canton (environ deux tiers en 2017). Les politiques énergétiques et climatiques sont d'autant plus liées que la plupart des GES liés au système énergétique sont évitables.

Pour le canton de Vaud comme pour les autres régions du monde, atteindre la neutralité carbone territoriale implique une réduction massive des émissions de GES territoriales. L'ampleur exacte de la réduction nécessaire dépendra des capacités de captation naturelle et technologique au niveau national et international. Elle reste donc incertaine aujourd'hui. Une réduction des émissions de GES territoriales d'un ordre de grandeur de 75 % à 85 % par rapport à 1990 était visée dans le plan climat première génération (Conseil d'Etat, 2020b), les émissions restantes devant être neutralisées par la captation naturelle ou technologique. Même si cet objectif ne concerne que les émissions territoriales, il implique une baisse conséquente, si l'on considère l'ampleur du chemin à parcourir (**Fig. 6**).

En comparaison, la « mise à l'arrêt » temporaire provoquée par la pandémie a occasionné une baisse des émissions de GES d'une ampleur qui n'avait jamais été mesurée jusque-là en une année dans le pays en 2020, avec -6 % (OFEV, 2022). Or, il s'agit d'atteindre une réduction des émissions de 12 à 13 fois plus importante d'ici à 2050, dans un contexte de croissance démographique

Equivalents CO₂

Les équivalents CO₂ (éq.CO₂) sont une unité de mesure visant à uniformiser l'effet climatique des différents gaz à effet de serre (GES). Chaque GES (CO₂, CH₄, etc.) a un potentiel de réchauffement global (PRG) spécifique. Cet indice exprime la contribution au réchauffement climatique d'une certaine quantité de gaz à effet de serre sur une période définie (en général 100 ans) par rapport à celle du CO₂. Afin de comptabiliser l'effet de l'ensemble des émissions de GES, celles-ci sont converties en équivalent CO₂.

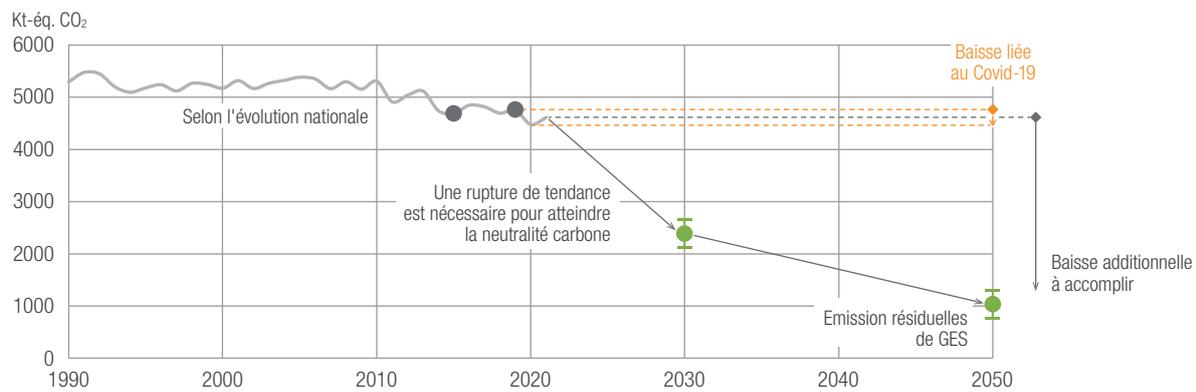
et économique. Assurément, l'ampleur de la réduction additionnelle à réaliser est le signe que la mobilisation devra être large et de longue haleine.

Bien que les émissions de GES aient partiellement retrouvé leur niveau d'avant crise en 2021, leur chute en 2020 constitue un signal positif, si l'on fait abstraction des conséquences dramatiques qui l'ont occasionnée. En effet, elle a démontré que des changements inimaginables jusque-là étaient possibles.

A l'avenir, les émissions liées aux activités humaines vont vraisemblablement diminuer, sous l'impulsion des engagements climatiques dans le monde et en Suisse, l'incertitude portant plutôt sur l'ampleur de la baisse et sa vitesse. Face à l'ampleur des actions à entreprendre, le gouvernement vaudois a lancé en 2020 le premier volet d'une stratégie climatique à long terme, le Plan climat vaudois (Conseil d'Etat, 2020a). Le déploiement de ce plan est en cours et devrait permettre d'amorcer la baisse des émissions de GES ces prochaines années⁹. D'ailleurs, pour accélérer et renforcer son action, le Conseil d'Etat a réaffirmé dans son Programme de législature 2022-2027 les objectifs du Plan climat. Faisant de la préservation du climat un axe structurant de

⁹ Selon les résultats d'un audit, les mesures déployées dans le premier plan climat permettraient d'atteindre une baisse des émissions de GES d'un ordre de grandeur de 8 % à l'horizon 2030 par rapport à au niveau de 1990 (Nick & Thalmann, 2022). Cet audit ne tient pas compte des renforcements et mesures postérieures à 2020.

Fig. 6 ÉMISSIONS TERRITORIALES DE GES, VAUD, 2015, 2019 ET VALEURS INDICATIVES POUR LES AUTRES ANNÉES



● 2015 et 2019¹ 🌱 Objectifs de réduction selon la stratégie du Conseil d'Etat vaudois pour la protection du climat²

1 Bilan carbone, Quantis (2020, 2022)

2 Pour 2030, réduction de 50 % à 60 % par rapport à 1990 selon les objectifs du Conseil d'Etat vaudois pour le respect de l'Accord de Paris (plan climat) et pour 2050, réduction de 75 % à 85 %.

Encadré 4 Accords climatiques et émissions de gaz à effet de serre

Les objectifs climatiques sont généralement fixés et monitorés à l'échelle territoriale comme c'est le cas pour l'accord de Paris qui vise à limiter la hausse de la température planétaire à 1,5°C au-dessus des niveaux de l'ère préindustrielle (1850-1900). Cet accord lie de nombreux pays dont la Suisse, qui s'est engagée en 2019 à atteindre la neutralité carbone territoriale à l'horizon 2050.

Plusieurs raisons expliquent que l'approche territoriale ait été favorisée. D'une part, il est plus aisé de les comptabiliser. De plus, si chaque pays atteint la neutralité carbone à l'échelle de son territoire, alors elle le sera aussi au niveau global. D'autre part, les gouvernements peuvent agir plus directement sur leur territoire. Cela dit, il existe d'après négociations concernant la répartition de la prise en charge des efforts entre les pays : les pays producteurs de matières premières, de biens et services souhaitant que la répartition se fasse plutôt selon une logique globale, tandis que les pays consommateurs voudraient qu'elles suivent une logique territoriale. D'autres considérations liées aux moyens à disposition et à la responsabilité historique des émissions de GES sont également mises sur la table de ces négociations : de nombreux pays consommateurs ont réalisé leur développement à partir de l'exploitation intensive d'énergie fossile.

son action gouvernementale, il a décidé d'investir un montant supplémentaire de l'ordre de 200 millions dans les politiques publiques liées au Plan climat cantonal (Conseil d'Etat, 2022) en plus des 200 millions déjà prévus pour la transition énergétique. L'adoption du Plan climat renforcé est prévu à l'horizon 2024.

Des modes de vie intensifs en carbone

La Suisse est un pays riche et développé présentant une bonne efficacité énergétique en comparaison internationale. Ses émissions de GES territoriales se situent ainsi dans la moyenne mondiale par habitant, malgré un niveau de vie élevé et une économie fortement exportatrice. Toutefois, si l'on considère l'ensemble des émissions induites par la consommation et les activités économiques dans le pays (hors production de biens pour l'exportation), les modes de vie en Suisse et dans le canton de Vaud s'avèrent particulièrement intensifs en carbone en comparaison internationale. En effet, l'empreinte carbone place la Suisse parmi les pays les plus émetteurs par personne dans le monde, pas loin derrière les pays du Golfe et les Etats-Unis. Plus précisément, ses émissions globales sont 2,8 fois supérieures à la moyenne mondiale en 2019, avec 13,5 tonnes d'équivalent CO₂ par personne, dont seulement 5,6 tonnes au niveau territorial, selon les estimations du Global carbon project (2021) qui sont en ligne avec celle de l'OFEV (2023).

Pour sa part, le canton de Vaud se place dans la moyenne nationale avec des émissions territoriales de 5,9 tonnes de GES par personne en 2019, selon le dernier inventaire cantonal (Quantis, 2021). Ces émissions sont majoritairement issues des transports (43 %) et du chauffage des bâtiments (35 %). En tenant compte des émissions GES extra-territoriales, les émissions totales du canton de Vaud s'élèvent à 15,2 tonnes par personne en 2019 (Quantis, 2021). L'essentiel de ces émissions sont issues de la consommation de biens produits à l'étranger (41 %), tandis que les transports en représentent 28 % dont 8 % pour les seuls déplacements des personnes en avion à l'étranger¹⁰.

¹⁰ En réalité, les émissions des voyages en avion des Vaudois-es sont deux fois plus importantes, car le protocole de mesure standard des émissions extraterritoriales considère que seul 50 % de ces émissions en avion sont à retenir dans le bilan d'une région. Par ailleurs, les émissions GES liées au système financier ne sont pas incluses dans cette analyse, les premières estimations du bilan cantonal font état d'émissions supplémentaires de l'ordre de 3 t-éq. CO₂/hab., avec un fort risque de double comptage de certaines émissions GES selon l'UPCL.

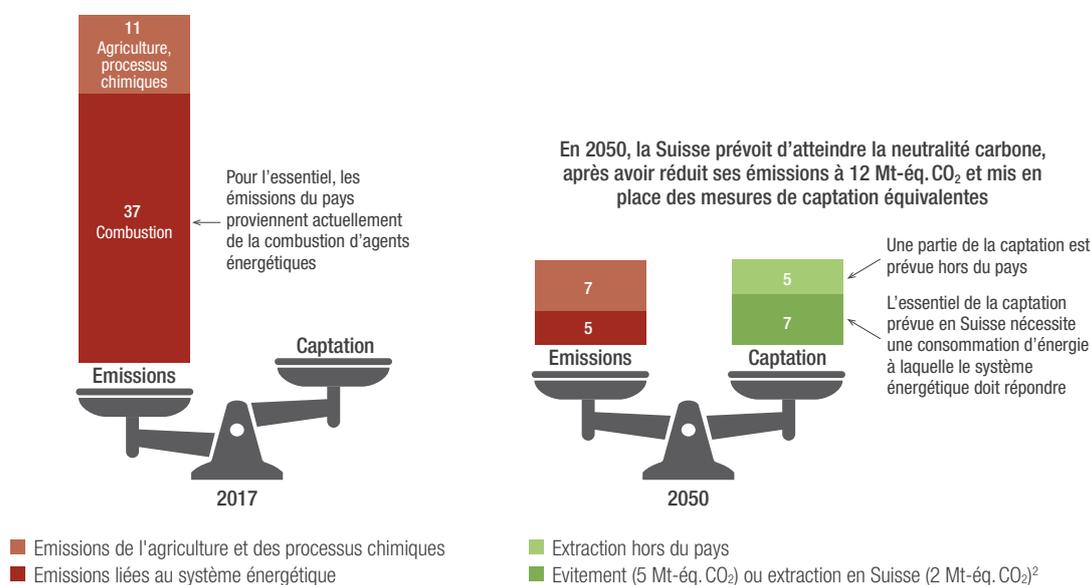
Encadré 5 Neutralité carbone, captation et lien avec le système énergétique

La neutralité carbone n'implique pas d'éliminer toutes les émissions de gaz à effet de serre (GES) provoquées par les activités humaines, mais à assurer un équilibre entre les émissions qu'elles génèrent et celles qui peuvent être captées avant qu'elles ne se diffusent dans l'atmosphère (évitement) ou qui peuvent en être retirées (extraction). Les procédés qui permettent de capter durablement du carbone de l'atmosphère permettent de générer ce que l'on appelle des « émissions négatives ».

Actuellement, aucune technique de captation de GES à large échelle n'est déployée en Suisse, d'ailleurs très peu le sont au niveau mondial. Ainsi, la quasi-totalité des émissions du pays viennent s'ajouter au cycle naturel du carbone. En 2050, la Suisse prévoit d'atteindre la neutralité carbone territoriale, soit de capter autant de carbone qu'elle en émettra sur son territoire (« zéro émission nette »). Comme le volume d'émissions pouvant être captées et stockées dans le pays est limité par les ressources naturelles et économiques nécessaires à leur mise en œuvre (Conseil fédéral, 2022), la stratégie suivie par la Confédération consiste à réduire l'essentiel de ses émissions de GES et à capter celles qui ne peuvent que (très) difficilement être évitées.

Par rapport à 2017 (figure ci-dessous), cette stratégie consiste à réduire les émissions de trois quarts pour les porter à 12 Mt-éq. CO₂ en 2050 et à capter la quantité équivalente, soit en Suisse (7 Mt-éq. CO₂), soit hors du pays (5 Mt-éq. CO₂). Parmi les émissions qui resteraient en Suisse en 2050, certaines proviennent d'activités qui ne sont pas liées directement au système énergétique (7 Mt-éq. CO₂) telles que l'élevage de ruminants et la fabrication de ciment. Les autres découlent de la combustion d'agents énergétiques par exemple, afin de produire de la chaleur à haute température pour les processus industriels (5 Mt-éq. CO₂)¹. A terme, la part des émissions GES territoriales non liées au système énergétique devrait ainsi augmenter, du fait de la baisse des émissions de GES_E résultant d'efforts de réduction dans les domaines liés à l'énergie.

En 2017, la Suisse a émis 48 Mt-éq. CO₂ et mis en place des mesures de captation équivalentes



1 Générer des chaleurs de processus sans recourir aux énergies fossiles est considéré comme économiquement prohibitif à partir de 800°C, voire techniquement impossible pour les plus élevées.

2 Les techniques d'évitement sont des procédés chimiques nécessitant beaucoup d'énergie et qui occasionneront donc une demande d'approvisionnement supplémentaire à laquelle devra répondre le système énergétique de demain. Les techniques d'extraction peuvent être des procédés chimiques nécessitant beaucoup d'énergie ou des procédés naturels (extension des forêts et gestion des sols notamment). Le potentiel de captation de ces derniers étant limité par l'exiguïté du territoire helvétique, la majorité de l'extraction prévue par la Confédération en 2050 passera par des procédés chimiques.



3. Imaginer des futurs possibles

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux résultats de projection de la consommation finale d'énergie dans le canton de Vaud d'ici à 2050, du déploiement des techniques de production et des émissions de gaz à effet de serre qui y sont associées (section 3.1). Ces projections sont établies selon trois scénarios prospectifs distincts dont les éléments constitutifs sont présentés à la section 3.2. Leur narratif permet de contextualiser les trajectoires énergétiques plus techniques qui sont détaillées dans la suite de l'étude.

3.1. Principaux résultats

Chaque trajectoire établie s'inscrit dans un monde qui a évolué différemment jusqu'en 2050 et que nous avons retranscrit dans des scénarios. Ces scénarios se distinguent principalement par l'intensité des investissements dans les équipements et technologies (dimension technique) ainsi que par l'étendue des changements de pratiques et comportements (dimension comportementale). **Nos trois scénarios présentent des avancées dans ces deux directions, ainsi que les évolutions du système énergétique qui en découlent. Imaginer un scénario exclusivement technique ou comportemental n'aurait que peu de sens tant ces deux dimensions sont liées.** En effet, l'adoption plus ou moins large de solutions techniques n'est pas déconnectée de l'intensité des changements d'aspiration. De même, les changements dans les pratiques se répercutent sur la manière de penser et d'utiliser la technologie. Par exemple, les premières constructions faiblement consommatrices en énergie sont des initiatives privées, premier pas vers la mise en place du label Minergie qui est maintenant devenu une référence au niveau suisse et tire vers le haut les standards des nouvelles constructions (SIPaL, 2018).

Dans les trois scénarios, les avancées esquissées peuvent être plus prononcées dans une dimension que dans l'autre, mais elles sont le plus souvent effectuées conjointement (Fig. 7).

1. Dans le scénario *continuité*, les tendances actuelles se poursuivent et sont même renforcées. Ainsi, la consommation finale d'énergie par habitant baisserait de 32 % par rapport à 2017 et les émissions de GES liées au système énergétique par habitant diminueraient de moitié.
2. Dans le scénario *changement de cadence*, toutes les actions et les investissements stimulant la transition énergétique sont massivement renforcés, et les pratiques sont plus attentives à la consommation d'énergie. La consommation finale d'énergie par habitant diminuerait de 45 % et les émissions de GES liées au système énergétique par habitant de 70 %.
3. Dans le scénario *basculement vers un nouveau paradigme*, les investissements et les actions réalisés sont considérables mais également nettement plus rapides. De surcroît, les pratiques se font progressivement plus

sobres. La consommation finale d'énergie par habitant serait réduite de 54 % et les émissions de GES liées au système énergétique par habitant de 80 %.

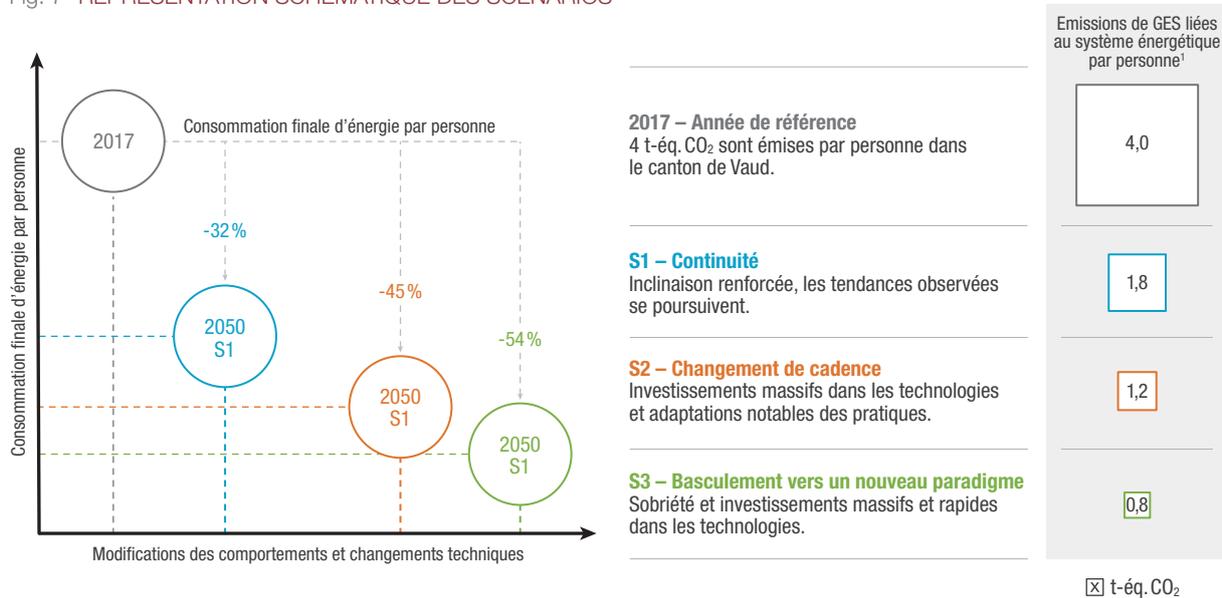
Le canton de Vaud consomme moins d'énergie à l'horizon 2050

La transition énergétique est actuellement sur le devant de la scène et de nombreuses impulsions pour en accélérer le rythme sont données. Nos projections relèvent le fait que le résultat de ces premières impulsions pourrait varier selon le soutien et le relais qu'elles recevront des différents acteurs de la société (cf. section 2.2) et il en découle plusieurs trajectoires possibles.

Dans chacun de ces futurs possibles, la consommation finale d'énergie cantonale baisserait en 2050 par rapport à 2017. Cette baisse se limiterait à 11 % sans nouvelles impulsions marquées (scénario 1), tandis qu'elle serait plus conséquente dans les deux autres scénarios, avec une réduction qui pourrait atteindre 28 % à 39 % si les actions en faveur de la transition énergétique étaient davantage renforcées, voire démultipliées (Fig. 8). Au regard des évolutions récentes, ces diminutions apparaissent comme importantes. En effet, même le scénario 1 prévoit une réduction de la consommation finale d'énergie vaudoise sur la période (-11 %) deux fois plus forte qu'en 2020 (-7,5 %), lors des semi-confinements liés à la pandémie de Covid-19. La nature de la baisse imaginée dans les scénarios est bien sûr différente de celle subie pendant la pandémie. Cette baisse découle d'un gain d'efficacité énergétique, du recours à des énergies de substitution ainsi qu'au développement de la sobriété: le dosage de ces axes définissant le chemin de transition de chaque alternative.

Qui plus est, ces réductions s'inscrivent dans un contexte de croissance démographique et économique (respectivement +0,8 % et +1,9 % par an entre 2017 et 2050) menant de facto à une hausse des besoins énergétiques. Contrebalancer l'augmentation de la population, qui atteint 1 044 510 habitants en 2050, implique une baisse importante de la consommation d'énergie par personne. Elle serait de -32 % dans le scénario 1, -45 % dans le scénario 2 et -54 % dans le scénario 3 d'ici à 2050 (Fig. 7).

Fig. 7 REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES SCÉNARIOS



1 Voir encadré p. 14 pour la définition du périmètre des émissions GES liées au système énergétique.

FIG. 8 CONSOMMATION D'ÉNERGIE FINALE SELON LES SECTEURS, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050

| | 2017 | 2050 | | | | | |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | S1 | S2 | | S3 | | |
| | GWh | GWh | GWh | GWh | GWh | GWh | GWh |
| Ménages | 5855 | 5267 | 3887 | 2619 | Différence avec 2017: -10% | Différence avec 2017: -34% | Différence avec 2017: -55% |
| Transports | 4245 | 2433 | 1953 | 1587 | Différence avec 2017: -43% | Différence avec 2017: -54% | Différence avec 2017: -63% |
| Production de biens | 3706 | 5039 | 4321 | 4013 | Différence avec 2017: 36% | Différence avec 2017: 17% | Différence avec 2017: 8% |
| Production de services | 3676 | 2905 | 2507 | 2369 | Différence avec 2017: -21% | Différence avec 2017: -32% | Différence avec 2017: -36% |
| Total | 17482 | 15644 | 12668 | 10587 | -11% | -28% | -39% |

Le chauffage et les transports fortement décarbonés en 2050

Au niveau des secteurs et des domaines, les habitations et les appareils domestiques, les transports et les services devraient voir leur consommation finale d'énergie se réduire dans tous les scénarios (Fig. 9). L'inertie et les impulsions déjà émises dans ces trois secteurs sont cependant différentes; le scénario 1 montre que si les tendances actuelles se poursuivent, les transports enregistreraient une baisse de -43% de leur consommation tandis que les habitations et leurs appareils domestiques ne verraient leur consommation diminuer que de -10%. En revanche, un renforcement majeur des impulsions aboutirait dans ces deux secteurs à une baisse de -55% et -63%. L'amplitude de la baisse dans le domaine des services est plus restreinte, passant de -21% en S1 à -36% en S3. La hausse de la consommation d'énergie découlant de la croissance économique cantonale ne pourrait quant à elle pas être compensée entièrement dans le domaine de la production de biens, compte tenu des contraintes technologiques et économiques. Le renforcement marqué des mesures technologiques et de sobriété permettrait uniquement de contenir le besoin grandissant d'énergie de ce domaine dans le S3, mais pas de les faire diminuer.

La consommation énergétique du domaine de la production de biens est dominée, en 2017, par des proces-

sus nécessitant de la chaleur à haute température (pharmaceutique, cimenterie, etc.). Souvent, les températures nécessaires font qu'il est difficile d'utiliser des énergies renouvelables à grande échelle impliquant de facto une dominance fossile perdurant dans le temps (Fig. 10). Le constat est tout autre pour les secteurs des ménages et des services, dominés en 2017 par la consommation énergétique des installations de chauffage. La substitution par des énergies renouvelables et les gains d'efficacité (par des rénovations surtout) permettraient de diminuer substantiellement les quantités d'énergie nécessaires pour chauffer les locaux d'habitation et commerciaux à l'horizon 2050. Il en va de même pour le secteur des transports qui enregistrerait une baisse considérable en 33 ans. Cette baisse découlerait majoritairement - de l'électrification - plus efficace énergétiquement du parc de véhicules routiers qui permet également d'éviter une grande partie des émissions territoriales de GES.

Développement de la production d'énergie renouvelable dans le canton

A l'avenir, la substitution des énergies fossiles par du renouvelable devrait s'accélérer. Ainsi, l'utilisation de l'énergie fossile diminuerait de -40% dans le scénario 1. Cette diminution serait plus marquée dans le scénario 2 avec -67% d'utilisation et jusqu'à -82% d'utilisation dans le scénario 3. Dans ce dernier, il ne persisterait

Fig. 9 CONSOMMATION D'ÉNERGIE FINALE SELON LES DOMAINES ÉNERGÉTIQUES, VAUD 2017 ET PROJECTIONS 2050

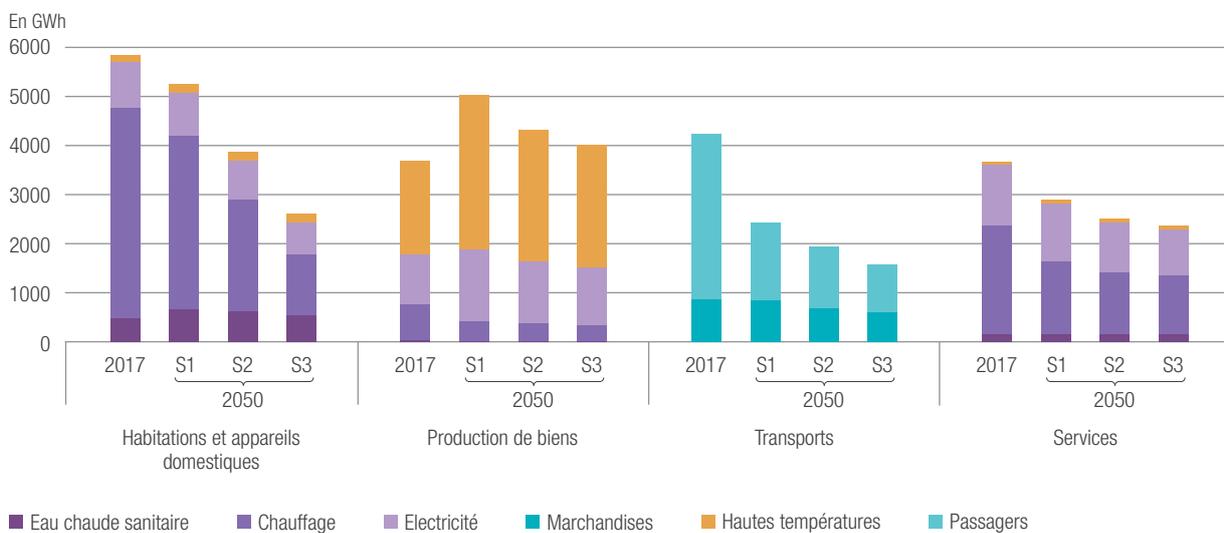
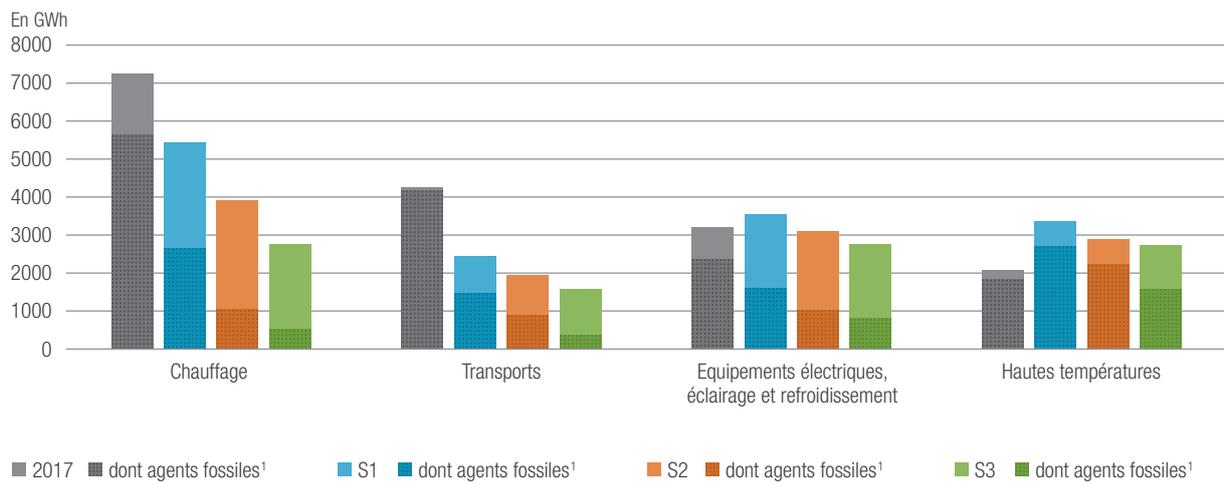


Fig. 10 CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE SELON LES SERVICES ÉNERGÉTIQUES, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050



¹ Cette valeur prend en compte la part non-renouvelable des déchets ainsi que la part non-renouvelable de l'électricité produite sur le territoire vaudois. La part de l'électricité produite de manière non-renouvelable (nucléaire, fossile, etc.) en Suisse et à l'étranger n'est pas comptabilisée dans cette catégorie.

que 20 % de fossile, principalement du gaz naturel et des déchets non-renouvelables, dans le mix énergétique utilisé, contre 67 % actuellement (**Fig. 11**).

La substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables résultera en une augmentation marquée de la consommation électrique. Cette dernière pourrait atteindre +23 % par rapport à 2017 dans le scénario 1 et +12 % dans le scénario 3. Loin d'être anodine, cette hausse implique un fort accroissement des capacités de production électrique dans le canton, au moment où la possibilité d'approvisionnement auprès des pays voisins n'est plus garantie.

Concrètement, la production locale d'énergies renouvelables dites « conventionnelles » (hydraulique, bois et part renouvelable des déchets), déjà bien implantées sur le territoire vaudois, augmenterait de 11 % à 26 % à l'horizon 2050. Les énergies renouvelables dites « nou-

velles », comme le solaire, la biomasse, l'éolien ou encore la chaleur de l'environnement et la géothermie, augmenteraient beaucoup plus fortement. Leurs productions seraient 9 à 11 fois plus importantes en 2050 qu'elles ne le sont en 2017. Ainsi, la part d'énergie verte (16 % en 2017) atteindrait entre 43 % dans le scénario 1 et 68 % dans le scénario 3 en 2050. Pour leur part, les importations totales d'électricité pourraient baisser de 3341 GWh en 2017 à 1480 GWh en 2050. De ce fait, le scénario 3 possède une plus grande indépendance énergétique que les deux autres scénarios.

Les émissions de gaz à effet de serre persistent

La baisse de la consommation, due à une meilleure efficacité énergétique et à des comportements moins gourmands en énergie couplés à de la substitution, simulée dans nos 3 scénarios, ne suffirait toutefois pas à atteindre la neutralité carbone. Dans le scénario 1, le canton de Vaud émet 39 % moins de GES_E (liés au système énergétique) qu'en 2017. Les émissions baisseraient de 60 % dans le scénario 2 et de 73 % dans le scénario 3. Cela représente 850 Kt-éq. CO₂ émis sur sol vaudois en lien avec le système énergétique en 2050 pour notre scénario le plus sobre. Dans ce 3^e scénario, ces émissions s'élèveraient à 0,8 t-éq. CO₂ par personne en 2050 (**Fig. 12**).

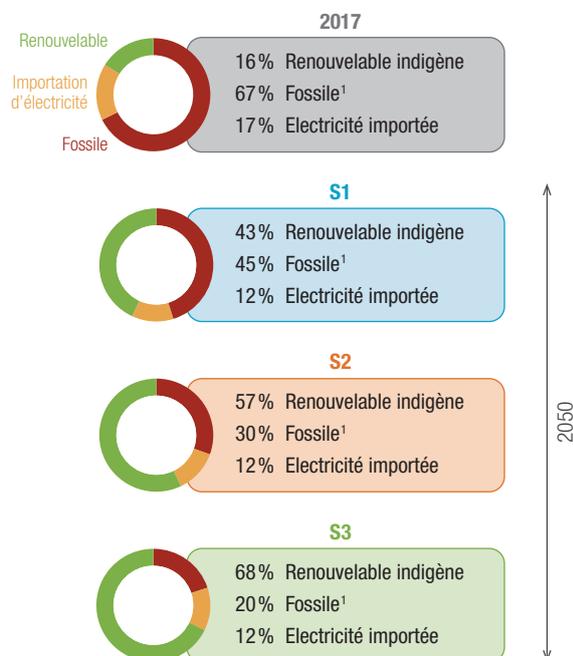
Autrement dit, pour atteindre la neutralité carbone en 2050, il conviendrait de réduire d'autant les émissions de GES en recourant à des techniques de captation et d'émissions négatives (voir **encadré 6** en page 38).

La captation de carbone comme solution ?

La captation et la séquestration de carbone, tout comme les techniques d'émissions négatives, sont des composantes nécessaires pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5°C selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2022). Actuellement toute une gamme de concepts sont à l'étude, allant de la reforestation à la capture directe de CO₂ dans l'air à l'aide de ventilateurs.

Les techniques dont le potentiel est le plus élevé en Suisse requièrent beaucoup d'énergie thermique ou électrique pour fonctionner (Prognos AG et al., 2021b). C'est notamment le cas des solutions de capture et stockage de carbone (CCS) mises en place près des lieux de forte émission, ou encore des solutions de capture directe du

Fig. 11 CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE, VAUD 2017 ET PROJECTIONS 2050



¹ Cette valeur prend également en compte la part non-renouvelable des déchets ainsi que la part non-renouvelable de l'électricité produite sur le territoire vaudois. La part de l'électricité produite de manière non-renouvelable (nucléaire, fossile, etc.) en Suisse et à l'étranger n'est pas comptabilisée dans cette catégorie.

CO₂ et stockage (DACCS) qui seraient implémentées sur le territoire vaudois dans nos scénarios.

A l'horizon 2050, le système énergétique vaudois serait en effet sollicité pour répondre aux besoins en énergie nécessaires pour capter le CO₂ encore émis dans le canton, afin d'atteindre la neutralité carbone. Le surplus d'énergie consommé pour l'utilisation de ce type de technique est illustré dans la **figure 13**. Ainsi, le recours à la captation nécessiterait une quantité d'énergie équivalente à 2178 GWh dans le scénario de continuité, ce qui peut être considéré comme démesuré dans un contexte où le développement des capacités de production d'énergie n'aurait que faiblement accéléré tel que supposé dans le scénario. A titre indicatif, la captation du CO₂ résiduel émis en 2050 dans ce scénario reviendrait à utiliser toute l'énergie produite en une année par le barrage de la Grande Dixence uniquement dans ce but. Dans le scénario 2, les besoins en captation seraient plus modérés mais resteraient très importants. Dans ce scénario, il faudrait presque utiliser les trois-quarts de l'énergie produite en une année par la Grande Dixence, uniquement pour faire tourner les systèmes de captation vaudois en 2050. Les systèmes nécessaires à la captation du CO₂ résiduel du scénario 3 serait plus mesuré. En 2050, cette captation représenterait 956 GWh, soit 5% de la consommation actuelle, soit un peu moins de la moitié de la production annuelle de la Grande Dixence. Ce besoin supplémen-

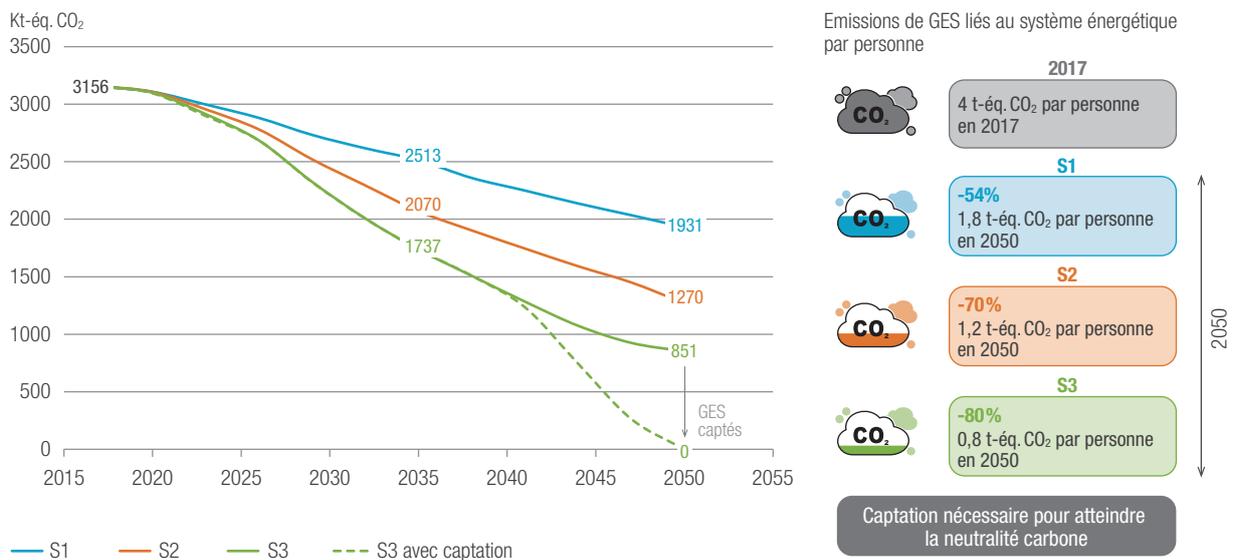
taire, évidemment plus prononcé dans les autres scénarios, constituerait un défi d'approvisionnement auquel il faudrait répondre (cf. **encadré 6** en page 38).

Ce défi d'approvisionnement, ainsi que ceux des coûts et des incertitudes au niveau technique et politique, constituent des véritables limitations à leur déploiement à large échelle en Suisse et dans le canton. Des accords devront notamment être négociés afin que la Suisse puisse exporter et stocker son CO₂ à l'étranger. Elle ne dispose en effet que de capacités très limitées de stockage selon les conditions légales actuelles. Ces incertitudes ne font pas de la captation un allié miraculeux de la transition énergétique. Il est important de le souligner, car il existe un risque de diminuer l'intensité des efforts permettant de maîtriser la consommation et d'encourager le renouvelable si ces technologies sont vues comme trop salvatrices. Ainsi, la réduction des émissions de GES, via la baisse de la consommation et la substitution par de l'énergie renouvelable devrait rester la priorité, tandis que la captation ne peut être envisagée autrement que pour contrebalancer les émissions difficilement réductibles.

La neutralité carbone, et après ?

Atteindre la neutralité carbone territoriale à l'horizon 2050 est une étape indispensable pour contenir le réchauffement climatique en dessous de 1,5°C, confor-

Fig. 12 ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE GES_E DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE, VAUD, 2017-2050



mément aux engagements pris par la Suisse dans l'accord de Paris. Toutefois, ne plus émettre de GES en 2050 ne suffit pas. Il faut également réduire les émissions à temps pour que les quantités cumulées émises demeurent sous le seuil du budget carbone restant à l'échelle planétaire. En effet, les GES émis tendent à durablement s'accumuler dans l'atmosphère et il a été montré qu'il existe une relation linéaire entre cette accumulation et le réchauffement global (GIEC, 2021). Pour contenir un réchauffement planétaire à 1,5°C, les émissions mondiales de CO₂ devront suivre une trajectoire négative nette significative après le milieu du siècle et ce jusqu'à la fin de celui-ci. Autrement dit, il faudra continuer à extraire de l'atmosphère bien plus de CO₂ qu'il n'en sera émis encore longtemps après 2050. A ce sujet, le Conseil fédéral (2022) signale que la Suisse en tant que partie à l'accord sur le climat devra également apporter une contribution appropriée.

Le budget carbone restant au canton de Vaud (calculé en procédant à une répartition du budget mondial par habitant) serait de 41 Mt-éq.CO₂ au seuil de 1,5°C de réchauffement planétaire et 113 au seuil de 2°C. Au rythme actuel, le budget vaudois correspondant au seuil de 1,5°C serait épuisé en 9 ans, soit un horizon dans la ligne de celui obtenu à l'échelle planétaire (GIEC, 2022).

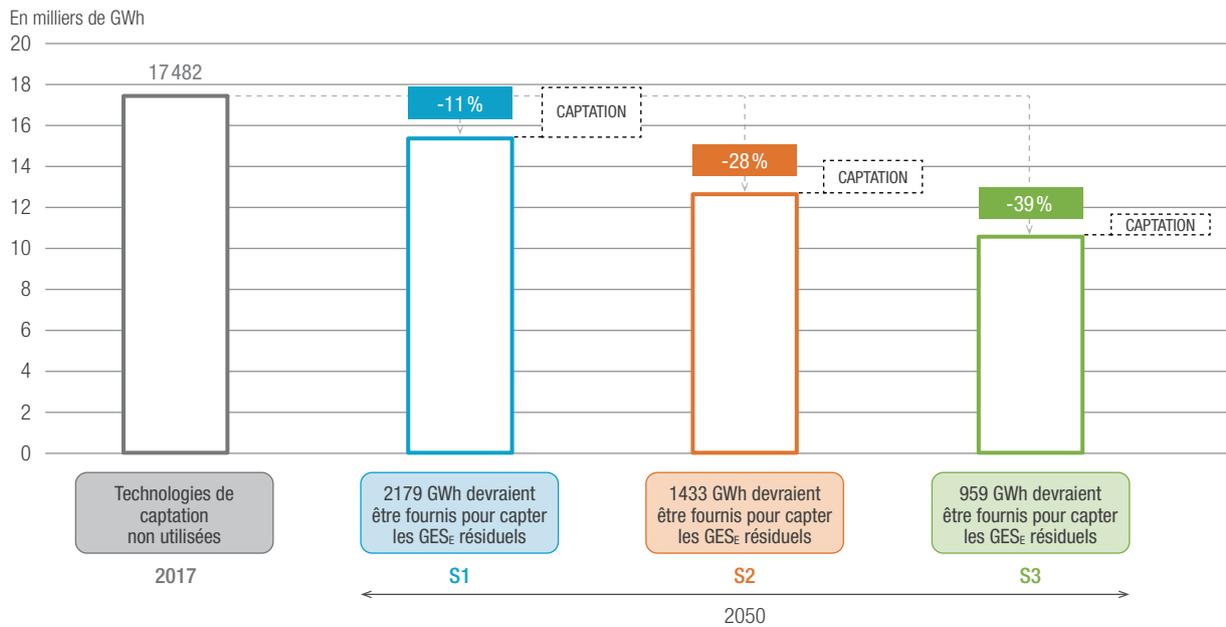
Les GES territoriaux cumulés émis dans chacun de nos scénarios sur la période 2018 à 2050 dépassent nettement le seuil compatible avec un réchauffement de 1,5°C (**Fig. 14**), seul le scénario 3 permettrait de respecter le budget carbone compatible avec un réchauffement de 2°C. Ce dépassement s'explique principalement par le temps nécessaire pour modifier le système énergétique

(déploiement du renouvelable et des mesures d'efficacité énergétique) et pour changer nos habitudes¹¹. Ce temps est tel que la moitié des émissions cumulées du scénario 3 seraient émises avant 2029 déjà. Autrement dit, le canton de Vaud ne rejoindra une trajectoire compatible avec un réchauffement de 1,5°C que s'il présente des émissions nettes de GES durablement négatives sur le long terme, soit bien après 2050. Il disposera pour cela des éventuelles mesures d'efficacité énergétique et de sobriété qui n'auront pas été pleinement exploitées jusque-là, ainsi que de potentielles solutions de captation à large échelle. A titre indicatif, les émissions territoriales nettes dans le canton devraient être négatives pendant près de 54 ans encore, soit jusqu'en 2104 et ce, si les GES émis dans le canton étaient abaissés d'un tiers supplémentaire entre 2050 et 2060 et les capacités de captation envisagées dans le scénario 3 étaient augmentées d'un tiers sur cette même période (sans autres modifications ultérieures).

D'une manière plus générale, ces résultats confirment que le calendrier de mise en œuvre des mesures d'atténuation du réchauffement climatique (utilisation du renouvelable, efficacité énergétique, sobriété et captation) est un des enjeux centraux, car plus il est rapide et moins l'accumulation excédentaire de GES à éliminer sera élevée.

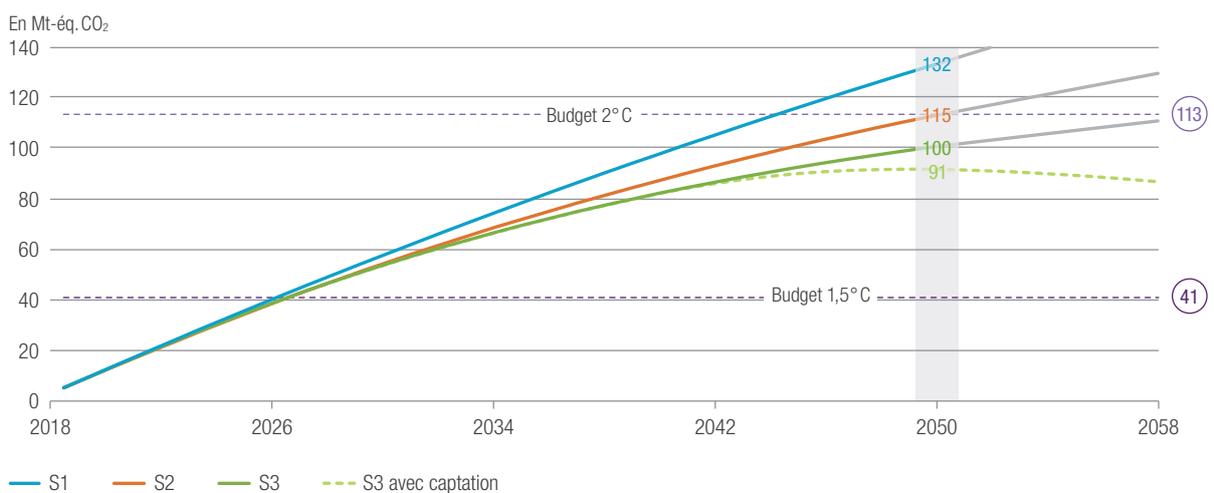
11 A l'instar de ce qui ressort des scénarios du GIEC, nos projections indiquent que seule une rupture immédiate et profonde des modes de vie permettrait de réduire suffisamment rapidement les GES pour que leur cumul ne dépasse pas le budget correspondant au seuil de 1,5°C à l'horizon 2050.

Fig. 13 CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE DU CANTON ET DE LA CAPTATION DES GES^{e1}, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050



1 L'énergie nécessaire au transport ainsi qu'au stockage de ces GES_e n'a pas été estimée dans le cadre de cette étude, la localisation ainsi que le type de séquestration pouvant varier trop fortement (par exemple, utilisation sur sol suisse versus stockage géologique dans les complexes norvégiens).

FIG. 14 ÉMISSIONS CUMULÉES DE GES TERRITORIALES DEPUIS 2018, VAUD, 2018 À 2050



Encadré 6 Coûts et approvisionnement de la captation

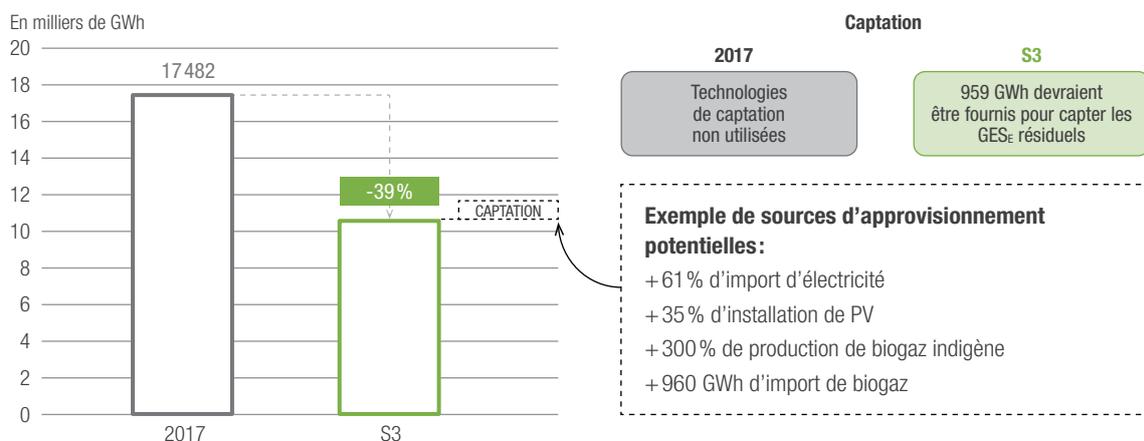
Outre la question de l'autonomie énergétique du canton, le développement des énergies renouvelables devrait permettre de réduire l'incertitude quant aux possibilités de développement de la captation : plus le canton tardera à mettre en place un approvisionnement renouvelable, plus la quantité de GES qu'il devra capturer pour respecter son budget carbone sera important (voir figure 12 et 13).

Un des grands défis de la mise en place de techniques de captation est leur approvisionnement énergétique. En effet, les quantités d'énergie que le canton devrait fournir en plus à cet effet seraient notables dans un contexte de production déjà tendu. La figure ci-dessous illustre plusieurs alternatives possibles permettant de produire les quantités d'énergie nécessaires pour capter les GESE encore émis en 2050 dans le scénario 3 afin d'atteindre la neutralité carbone¹. Toutes ces mesures doivent être ajoutées à celles déjà mises en place dans ce scénario.

A titre illustratif également et en se basant sur les évolutions possibles des prix des techniques de captation estimées par la Confédération (2021), il faudrait investir entre 1,8 milliard et 5,4 milliards de francs² supplémentaires pour mettre en place dans le canton la captation nécessaire de 2040 à 2050 dans ce même scénario 3. Les coûts additionnels cumulés de captation, de transport et stockage pour atteindre une trajectoire compatible avec le seuil de 1,5°C s'élèveraient eux de 18 à 54 milliards de francs² selon les techniques utilisées pour ce même scénario (voir figure) et ce, uniquement pour le canton de Vaud.

Pour l'estimation des quantités de GES à capter dans le scénario 3, nous avons suivi la logique de la stratégie énergétique 2050+ qui postule que les GES émis hors du système énergétique sont captés soit par des puits de carbone naturels, soit captés à l'étranger. Or dans le canton de Vaud, une grande part de ces GES émis hors du système énergétique sont le fait de processus chimiques, notamment liés aux cimenteries. Il serait donc plus sensé de capter ces émissions directement à la source plutôt que de les capter à l'étranger. Pour ce faire, il faudrait toutefois accroître encore les quantités d'énergie à produire pour alimenter ces technologies et les coûts en seraient également augmentés. A titre illustratif, ce type de processus a émis 509 Kt-éq. CO₂ en 2017 (ce qui équivaut à la moitié de ce qui est encore émis en 2050 dans le scénario 3). Il faudrait investir entre 100 et 300 millions de francs² en 2050 pour capter cette quantité et parallèlement produire 570 GWh en plus. Les possibilités de réduction des émissions étant limitées pour ce type de processus, les chiffres calculés pour 2017 sont donc relativement proches de ce qu'ils pourraient être en 2050.

COÛTS ET APPROVISIONNEMENT DE LA CAPTATION



1 Ces alternatives reposent sur l'hypothèse d'un rendement constant des différentes technologies de captation
 2 Les coûts varient en fonction des techniques de captation, de transport et de stockage possibles.

3.2. Descriptif des scénarios

Cette section expose les grandes lignes des narratifs entourant les trajectoires présentées et apporte des compléments d'information ciblée pour chacune d'entre-elles (Fig. 15). Pour leur part, les hypothèses et les paramètres utilisés pour modéliser nos trajectoires de demandes énergétiques et de production pour y répondre, sous-jacents aux scénarios décrits ici, sont développés dans les annexes. Par ailleurs, il s'agit de garder à l'esprit que l'avenir, tel qu'il se produira réellement, se révélera vraisemblablement être un panachage des éléments caractérisant ces trajectoires.

Scénario 1 Continuité

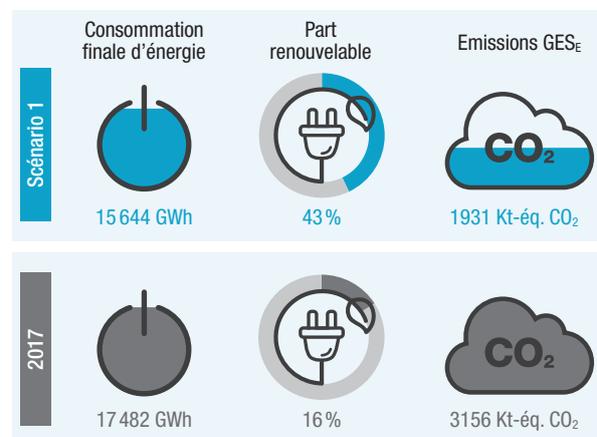
Les tendances se poursuivent sans renforcement majeur des impulsions de l'Etat, des citoyen·nes et des entreprises. Les comportements de consommation se modifient de manière marginale et la sortie des énergies fossiles ne pourra se faire que bien après 2050.

Ce scénario se base sur les tendances actuelles: il s'articule dans le cadre législatif en place et table sur son renforcement graduel. Il représente l'évolution progressive de la transition énergétique, avec un renforcement modéré des impulsions de la part des autorités publiques, du privé et des citoyens. Dans ce scénario, les mesures, principalement intérieures, liées à la transition énergétique envisagées au début des années 2020 ne sont finalement pas toutes mises en œuvre.

Dans un contexte global secoué par plusieurs crises successives (Covid-19, guerre en Ukraine), la prise de conscience des enjeux environnementaux va grandissante au cours des années 2020. Toutefois, les modes de vie carbonés actuels évoluent lentement. La population, fragilisée par les crises sanitaires et économiques récentes, ne concède que quelques modifications de ses modes de vie et habitudes, limitant les possibilités de réduction des émissions de GES. L'impulsion donnée par la crainte de pénurie d'électricité liée à la situation en Ukraine s'est essouffée, la succession d'hivers chauds ayant permis d'éviter le pire.

Ainsi et jusqu'en 2030-2035, des progrès dans l'efficacité énergétique, notamment au sein des entreprises, et pour la production d'énergie renouvelable locale sont accomplis, mais à un rythme moindre que celui escompté dans les nouveaux plans pour le climat et l'énergie. Ce retard,

couplé à la baisse importante de la production d'électricité d'origine nucléaire nationale et européenne, pousse la Confédération et le canton à investir dans une centrale à gaz naturel. Cette centrale, émettrice de GES, comble une partie du besoin de capacité pouvant être piloté sur le territoire helvétique. Elle permet ainsi de garantir la stabilité du réseau en attendant que les énergies renouvelables puissent être développées en suffisance.



La hausse des températures continue cependant et les conséquences des changements climatiques deviennent toujours plus manifestes. Face à cette situation qui se dégrade, les autorités publiques interviennent à nouveau en renforçant leur politique énergétique et en intégrant des mesures d'adaptation aux changements climatiques. La substitution d'agents fossiles par de l'électricité s'accélère, mais sans aboutir aux vitesses nécessaires pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Il en va de même pour le développement des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Scénario 2 Changement de cadence

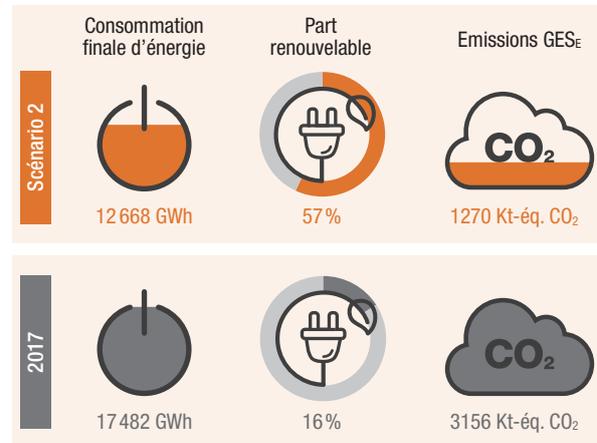
Sous l'impulsion des entreprises et de l'Etat ainsi que de l'appui des citoyen·nes, le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique accélère de plusieurs vitesses. Les comportements de consommation se font plus modérés.

Les Etats lient leur relance économique post-Covid-19 aux politiques climatiques et énergétiques. Une harmonisation des mesures au niveau international se dessine. Dans ce scénario, les politiques énergétiques et climatiques vaudoises ont été mises en œuvre de manière complète. Les autorités publiques ont résolument renforcé par la suite leur soutien à l'innovation ainsi que les mesures dans le domaine de l'efficacité énergétique telles que la rénovation des bâtiments, l'électrification du parc de véhicules ainsi que le développement des infrastructures des transports publics.

Rapidement, la fragilité du secteur gazier et pétrolier n'a plus pu être niée. La guerre en Ukraine avait d'ailleurs mis en exergue ce fait. On assiste à un transfert massif des investissements vers les énergies renouvelables et le développement des nouvelles technologies de captation de carbone. Les entreprises privées ainsi que le milieu académique accélèrent la recherche et le développement dans le domaine de l'efficacité énergétique et des techniques de production.

L'impulsion donnée par la peur de pénuries hivernales se traduit chez les citoyen·nes par une modération dans leurs comportements de consommation. En complément, la baisse du prix des technologies d'efficacité énergétique permet de davantage d'habitant·es du canton de faire baisser leur consommation énergétique. Le numérique permet également une maîtrise plus fine de leur consommation, et cela sans changer leurs habitudes. Le domaine du travail évolue de manière similaire, avec en plus une pratique plus fréquente du télétravail.

C'est une transition énergétique basée sur la technique avec des adaptations partielles des pratiques et des modes de vie qui émergent, tandis que la défossilisation devient un objectif majeur. Les autorités publiques facilitant la mise en place des technologies vertes, le rythme de développement du renouvelable et de l'efficacité énergétique accélère fortement. Toutefois, en 2040, le chemin à parcourir pour atteindre la neutralité carbone est



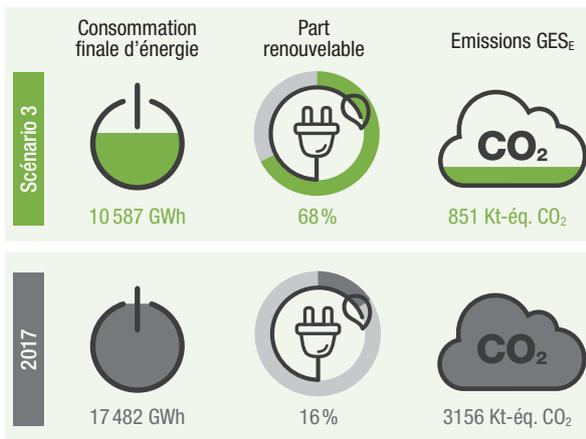
encore long, le constat est tel que le déploiement massif de solutions de captation de carbone devient inévitable pour atteindre cet objectif. Les investissements financiers pour ce déploiement, en partie dans le canton et en partie à l'étranger, étant considérables, des réorientations budgétaires sont nécessaires. Les quantités d'énergie à fournir pour alimenter ces solutions de captations sont importantes et des contrats d'importation sont négociés avec des pays producteurs. L'indépendance énergétique acquise jusqu'alors grâce au déploiement du renouvelable indigène s'évapore.

En 2050, les techniques de captation déployées pour compenser les émissions de GES qui persistent mobilisent des moyens importants. L'atteinte de la neutralité carbone cette année-là ainsi que pour les années suivantes est largement tributaire de partenaires extérieures, tant pour les importations d'énergie que pour la captation hors du pays.

Scénario 3 Basculement vers un nouveau paradigme

Le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique accélère fortement sous l'impulsion et le concours de tous les acteurs de la société. La sobriété devient un modus operandi des manières de vivre et de travailler.

La baisse des émissions de gaz à effet de serre en 2021 en Suisse par rapport à leur niveau d'avant Covid-19 est le signe qu'un point de bascule est atteint. Cela traduit les impulsions données par des acteurs étatiques et privés ainsi que par des pans de la population depuis plusieurs années. La spirale du succès est amorcée. Certes lente et encore fragile au début, cette dernière se renforce au fil des années, parfois par nécessité. Ainsi, la hausse des prix de l'énergie, suite à l'invasion de



l'Ukraine par la Russie, fait prendre conscience de l'intérêt de produire des énergies renouvelables localement, tandis que les gestes d'économie d'énergie adoptés durant les premiers hivers vécus sous risque de pénurie d'énergie à partir de 2023 s'ancrent progressivement dans la société. Pour leur part, les répercussions des dérèglements climatiques, dont les intempéries de 2021 et la sécheresse de l'été 2022 ne sont que les prémices, font grandir le soutien accordé aux avertissements du monde scientifique sur les conséquences à venir du réchauffement climatique. Au début des années 2030, les progrès vers la neutralité carbone se révèlent certes considérables, mais moins rapides qu'espérés en Suisse et plus encore à l'échelle planétaire. Fortement médiatisé, ce constat renforce l'élan en faveur de la transition

énergétique. La conviction, selon laquelle les impacts financiers, environnementaux et sociétaux du maintien de comportements carbonés sont trop élevés, se diffuse plus largement dans la société et une sobriété volontaire apparaît. Les réflexions initiées par des citoyen-nes et poursuivies par l'Etat quant à la manière de consommer, amènent une modification profonde des modes de vie : un nouveau paradigme prend place. La mise en œuvre de mesures décisives pour la transition énergétique est désormais beaucoup plus rapide et acceptée. Dans ce scénario, les politiques énergétiques et climatiques annoncées sont fortement renforcées et les initiatives citoyennes sont soutenues, dans un contexte de préservation de l'environnement marqué. Les investissements dans l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables sont massifs tant dans le secteur privé que public. Ce changement de paradigme se répercute également dans la manière de travailler, les entreprises cherchent à être en phase avec les nouvelles aspirations sociales. Cela se traduit notamment par des processus de production optimisés au niveau énergétique et pensés de manière sobre.

Le rythme de déploiement des énergies renouvelables et des techniques d'efficacité énergétique accélère massivement. Préalablement balisée, cette accélération peut se construire de façon à optimiser les complémentarités entre type de production, tout en évitant d'augmenter la pression sur les écosystèmes naturels. Les réseaux thermiques se multiplient et les réseaux électriques s'interconnectent pour gérer la diversité géographique et temporelle des productions décentralisées. La société se dirige vers une neutralité carbone qui, pour être atteinte en 2050, implique toutefois le renforcement des puits naturels de carbone, le déploiement de la captation sur certains processus de production aux émissions incompressibles, ainsi que la production de biogaz.

FIG. 15 LE CANTON DE VAUD ET SON SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE EN 2050 SELON LES SCÉNARIOS

| | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
|--------------------|--|--|--|
| Société | <ul style="list-style-type: none"> - Modes de vie carbonés évoluent lentement et peu. | <ul style="list-style-type: none"> - Modes de vie évoluent vers plus de modération dans la manière de consommer.  | <ul style="list-style-type: none"> - Modes de vie évoluent de manière profonde et sobriété volontaire apparaît. |
| Gouvernance | <ul style="list-style-type: none"> - Faible impulsion de tous les acteurs de la société. - Politiques énergétiques et climatiques annoncées modérément renforcées. - Soutien étatique modéré à l'innovation et aux mesures dans le domaine de l'efficacité et des énergies renouvelables. | <ul style="list-style-type: none"> - Forte impulsion des entreprises privées et de l'Etat suivie par les citoyen·nes. - Politiques énergétiques et climatiques annoncées renforcées. - Soutien étatique à l'innovation et mesures fortes dans le domaine de l'efficacité et des énergies renouvelables. | <ul style="list-style-type: none"> - Forte impulsion des citoyen·nes, de l'Etat et des entreprises. - Politiques énergétiques et climatiques annoncées fortement renforcées. - Soutien étatique à l'innovation, mesures fortes dans le domaine de l'efficacité, des énergies renouvelables et de la sobriété. |
| Habitat | <ul style="list-style-type: none"> - Peu d'évolution des manières d'habiter.  <ul style="list-style-type: none"> - Départs des centres urbains en faveur des villes moyennes et zones rurales. - Rénovations augmentent légèrement mais ne varient pas dans leur efficacité. - Le chauffage consomme 20% de moins en 2050. - Pompes à chaleur et réseaux de chaleurs largement déployés. - L'efficacité des appareils électriques augmente et leur nombre par ménage également. | <ul style="list-style-type: none"> - Evolution vers des manières d'habiter plus connectées et optimisées. <ul style="list-style-type: none"> - Départs marqués des centres urbains en faveur des villes moyennes et zones rurales. - Rénovations augmentent et gagnent en efficacité. - Le chauffage consomme 49% de moins en 2050. - Pompes à chaleur et réseaux de chaleurs largement déployés. - L'efficacité des appareils électriques augmente résolument, mais leur nombre par ménage également. | <ul style="list-style-type: none"> - Evolution graduelle vers des manières d'habiter plus durable (mutualisation, cohabitation, <i>low tech</i>). <ul style="list-style-type: none"> - Revalorisation de la vie en zone urbaine. - Rénovations massives et efficaces. - Le chauffage consomme 73% de moins en 2050. - Réseaux de chaleurs fortement déployés. - L'efficacité des appareils électriques augmente résolument, et leur nombre par ménage diminue.  |

| | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
|-------------------|---|---|--|
| Transports | <p>Transport de personnes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Multimodalité et forte pénularité. <hr/> <ul style="list-style-type: none"> - Voitures s'électrifient, tandis que leur profil reste parmi les plus lourd d'Europe, baisse de 16 % des km parcourus par personnes en voiture. - Développement des transports publics (TP), la part du train passe à 21 % (contre 17 % selon nos estimations en 2017). - Forte hausse des vélos électriques. <p>Transport de marchandises</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le volume croît légèrement, moins rapidement que la population (moins de carburants et combustibles pétroliers transportés). - Les processus logistiques sont optimisés techniquement, report modal développé: la part du train passe à 35 % contre 30 % en 2017. | <p>Transport de personnes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Multimodalité davantage tournée vers les transports publics. <hr/> <ul style="list-style-type: none"> - Voitures s'électrifient et leur poids moyen n'évolue que peu, baisse de 23 % des km par personne. - Développement plus marqué des TP, la part du train s'élève à 23 %. - Forte hausse des vélos électriques. <p>Transport de marchandises</p> <ul style="list-style-type: none"> - La prolongation du cycle de vie des produits réduit la croissance du transport de marchandises. - Les processus logistiques sont optimisés techniquement et le report modal est davantage développé: la part du train passe à 48 %. | <p>Transport de personnes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Multimodalité davantage tournée vers les transports publics et réappropriation de l'espace « local ». <hr/> <ul style="list-style-type: none"> - Voitures s'électrifient et leur poids moyen diminue, baisse de 35 % km par personne. - Développement plus marqué des TP, la part du train s'élève à 25 %. - Développement de la mobilité active, dont explosion des vélos électriques. <p>Transport de marchandises</p> <ul style="list-style-type: none"> - La prolongation du cycle de vie des produits et la sobriété amènent un ralentissement de la croissance du transport de marchandises. - Les processus logistiques sont optimisés techniquement, la mutualisation des transports de marchandises augmente à travers un usage encore accru du rail: la part du train passe à 50 %. |
| Economie | <ul style="list-style-type: none"> - Pas de modification du paradigme économique actuel. - Investissement dans l'efficacité énergétique, le renouvelable et les infrastructures. - Gain d'efficacité des processus de production de biens de 31 % sur la période. - Taux de rénovation des locaux légèrement supérieur au niveau actuel. | <ul style="list-style-type: none"> - Bascule vers économie plus durable mais toujours linéaire. - Investissements massifs dans l'efficacité énergétique, le renouvelable et les infrastructures. - Optimisation technique des processus de production de biens et gain d'efficacité de 41 %. - Taux de rénovation des locaux supérieur au niveau actuel. | <ul style="list-style-type: none"> - Bascule vers économie plus durable et circulaire. - Investissements massifs dans l'efficacité énergétique, le renouvelable et les infrastructures. - Optimisation autant organisationnelle que technique de la production de biens, gain d'efficacité de 45 %. - Taux de rénovation des locaux supérieur au niveau actuel. |

| | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
|----------------------------|--|--|--|
| Système énergétique | <ul style="list-style-type: none"> - Production des « nouvelles » énergies renouvelables locales multipliée par 8,5. | <ul style="list-style-type: none"> - Production des « nouvelles » énergies renouvelables locales multipliée par 9,5. | <ul style="list-style-type: none"> - Production des « nouvelles » énergies renouvelables locales multipliée par 11.  |
| | <ul style="list-style-type: none"> - 45 % des ressources énergétiques utilisées sont du fossile. | <ul style="list-style-type: none"> - 30 % des ressources énergétiques utilisées sont du fossile. | <ul style="list-style-type: none"> - 20 % des ressources énergétiques utilisées sont du fossile. |
| | <ul style="list-style-type: none"> - Utilisation du gaz naturel comme énergie de transition. | <ul style="list-style-type: none"> - Utilisation gaz naturel pour combler pic de demande, ses autres utilisations diminuent progressivement. | <ul style="list-style-type: none"> - Utilisation du gaz naturel pour combler pic de demande uniquement. |
| | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Mix</i> électrique dominé par les imports domestiques et étrangers.  | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Mix</i> électrique dominé conjointement par le solaire local et les imports. | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Mix</i> électrique dominé par le solaire local. |
| GES et captation | <ul style="list-style-type: none"> - Transition énergétique ne permettant pas d'atteindre la neutralité carbone. | <ul style="list-style-type: none"> - Transition énergétique compatible avec la neutralité carbone atteinte, si 1270 Kt-éq. CO₂ liés au système énergétique sont captés. | <ul style="list-style-type: none"> - Transition énergétique compatible avec la neutralité carbone, si 851 Kt-éq. CO₂ liés au système énergétique sont captés. |
| | <ul style="list-style-type: none"> - Pas de développement de la captation. | <ul style="list-style-type: none"> - Développement massif de solutions de captation. | <ul style="list-style-type: none"> - Déploiement de la captation sur certains processus aux émissions difficilement évitables. |
| | <ul style="list-style-type: none"> - Emissions nettes hors système énergétique: les actions mises en œuvre¹ permettent de les infléchir (-12 %²), malgré les effets de la croissance. | <ul style="list-style-type: none"> - Emissions nettes hors système énergétique: 1011 Kt-éq. CO₂¹, dont la captation à l'étranger est négociée.  | <ul style="list-style-type: none"> - Emissions nettes hors système énergétique: 674 Kt-éq. CO₂¹ dont la captation à l'étranger est négociée. |
| | <p>¹ Il s'agit à la fois d'une adaptation des pratiques et des modes de vie (usage moindre du ciment notamment) et du renforcement des puits naturels de carbone (gestion du sol et des forêts). Ces changements sont plus prononcés dans le S2 que dans le S1 et davantage encore dans le S3.</p> <p>² En 2050, la part vaudoise dans les émissions nationales, hors système énergétique (14% en 2017), reste stable dans le S1 (par rapport au scénario de continuité de la Confédération) et dans le S2 (par rapport au scénario neutralité nationale – «zéro-basis»). La part vaudoise baisse à 10% par rapport au scénario neutralité de la Confédération. Elle atteint ainsi deux tiers du niveau de S2 en 2050.</p> | | |

3.3. Toile de fond commune aux scénarios

Les trois scénarios dessinés dans cette étude partagent certaines composantes communes afin de rendre leur comparaison plus aisée. Il s'agit de composantes dont l'évolution suit une tendance lourde et/ou externe au système énergétique.

| Composante | Description et source | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|------------------------------------|------------------|------|---------------------------|--|--|--|------|--|------|--|---------------------------|--------|------|--------|------|----------|---------|----|---------|----|------|-----------|---------|----|---------|----|------|---------|---------|----|---------|----|------|--------------|----------------|--|------------------|--|-------------|
| Evolution du climat | <p>La température annuelle moyenne augmente de +0,7 à +1,9°C en Suisse d'ici 2060 par rapport à la période de référence de 1981 à 2010. Il s'agit de l'évolution de température associée au scénario le plus optimiste réalisé par le GIEC. Cette même évolution a été utilisée dans nos trois scénarios (pour faire évoluer les besoins de chauffage) dans un souci de comparaison. Selon toute vraisemblance, les scénarios 1 (surtout) et 2 devraient se voir appliquer une évolution du climat moins favorable sans ce choix méthodologique, étant donné les évolutions récentes en cours.</p> <p><i>Source: Scénario d'émissions RCP 2.6 du GIEC, adapté à la Suisse et au canton de Vaud par l'Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse.</i></p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Population | <p>La croissance démographique du canton se poursuit à un rythme plus soutenu qu'au niveau Suisse, mais ralentie par rapport à ces dernières années, avec +0,8% par an entre 2017 et 2050 (+32%) contre 1,2% entre 1990 et 2017.</p> <p>La croissance absolue de la population devrait concerner tous les âges, mais son intensité relative sera nettement plus forte pour les plus âgés, tandis que la croissance des personnes potentiellement actives va ralentir de moitié par rapport aux tendances passées. Ainsi, la population vaudoise connaîtra un vieillissement marqué, avec l'arrivée à l'âge de la retraite des générations nombreuses du baby-boom.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">POPULATION PAR GROUPE D'ÂGES, VAUD</th> </tr> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">2017</th> <th colspan="2">2050</th> <th rowspan="2">2017-2050 Par an, en %</th> </tr> <tr> <th>Nombre</th> <th>En %</th> <th>Nombre</th> <th>En %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-19 ans</td> <td>171 513</td> <td>22</td> <td>211 990</td> <td>20</td> <td>0,64</td> </tr> <tr> <td>20-64 ans</td> <td>489 395</td> <td>62</td> <td>593 400</td> <td>57</td> <td>0,59</td> </tr> <tr> <td>65+ ans</td> <td>129 816</td> <td>16</td> <td>239 120</td> <td>23</td> <td>1,87</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>790 724</td> <td></td> <td>1 044 510</td> <td></td> <td>0,85</td> </tr> </tbody> </table> <p><i>Source: StatVD, statistique de la population permanente et perspectives démographiques, scénario moyen, de juin 2021.</i></p> | POPULATION PAR GROUPE D'ÂGES, VAUD | | | | | | | 2017 | | 2050 | | 2017-2050 Par an, en % | Nombre | En % | Nombre | En % | 0-19 ans | 171 513 | 22 | 211 990 | 20 | 0,64 | 20-64 ans | 489 395 | 62 | 593 400 | 57 | 0,59 | 65+ ans | 129 816 | 16 | 239 120 | 23 | 1,87 | Total | 790 724 | | 1 044 510 | | 0,85 |
| POPULATION PAR GROUPE D'ÂGES, VAUD | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2017 | | 2050 | | 2017-2050 Par an, en % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Nombre | En % | Nombre | En % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-19 ans | 171 513 | 22 | 211 990 | 20 | 0,64 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20-64 ans | 489 395 | 62 | 593 400 | 57 | 0,59 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 65+ ans | 129 816 | 16 | 239 120 | 23 | 1,87 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total | 790 724 | | 1 044 510 | | 0,85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Activités économiques, valeurs ajoutées | <p>La croissance économique du canton se poursuit à un rythme plus soutenu qu'au niveau Suisse, mais ralentie par rapport à ces dernières années, avec +1,9% par an entre 2017 et 2050 (+87% sur la période) contre +2,3% par an entre 1997 et 2017¹.</p> <p>Ce ralentissement découlerait de la baisse de la population active, qui serait partiellement compensée par davantage d'automatisation. Cette automatisation concernerait à présent également les services avec l'avènement du numérique et de l'usage courant des techniques (dites) de l'intelligence artificielle.</p> <p>¹ A titre indicatif, la stratégie énergétique de la Confédération a été établie avec une croissance annuelle moyenne de +1,2% entre 2017 et 2050.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Composante | Description et source | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|------|----------------|------|--------------|--|-----------|--------|------|--------|------|--------------|----------|------|---|------|---|------|------------|--------|----|-------|----|-----|-----------|---------|----|---------|----|-----|--------------|----------------|--|----------------|--|------------|
| Activités économiques, valeurs ajoutées | <p style="text-align: center;">VALEURS AJOUTÉES PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE¹, VAUD</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">2017</th> <th colspan="2">2050</th> <th>2017-2050</th> </tr> <tr> <th>Nombre</th> <th>En %</th> <th>Nombre</th> <th>En %</th> <th>Par an, en %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Primaire</td> <td>560</td> <td>1</td> <td>727</td> <td>1</td> <td>0,8</td> </tr> <tr> <td>Secondaire</td> <td>10545</td> <td>20</td> <td>24333</td> <td>24</td> <td>2,6</td> </tr> <tr> <td>Tertiaire</td> <td>42693</td> <td>79</td> <td>75538</td> <td>75</td> <td>1,7</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>53798</td> <td></td> <td>100598</td> <td></td> <td>1,9</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>1 En millions de francs, prix chaînés de l'année précédente, année de référence 2017.</small></p> <hr style="border-top: 1px dashed #000;"/> <p><i>Source : Créa, données observées, estimées et prédites jusqu'en 2023 (données de janvier 2022). Ecoplan-KPMG (2020), application des taux de croissance par branche de 2024-2050, scénario Combo¹.</i></p> <p><small>1 Il s'agit d'un scénario combinant accélération technologique et conscience écologique. Les effets des dérèglements climatiques qui se manifesteraient sur la croissance économique d'ici à 2050 ne sont pas directement modélisés dans ce scénario.</small></p> | | 2017 | | 2050 | | 2017-2050 | Nombre | En % | Nombre | En % | Par an, en % | Primaire | 560 | 1 | 727 | 1 | 0,8 | Secondaire | 10545 | 20 | 24333 | 24 | 2,6 | Tertiaire | 42693 | 79 | 75538 | 75 | 1,7 | Total | 53798 | | 100598 | | 1,9 |
| | 2017 | | 2050 | | 2017-2050 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Nombre | En % | Nombre | En % | Par an, en % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Primaire | 560 | 1 | 727 | 1 | 0,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Secondaire | 10545 | 20 | 24333 | 24 | 2,6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tertiaire | 42693 | 79 | 75538 | 75 | 1,7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total | 53798 | | 100598 | | 1,9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Activités économiques, emplois | <p>Les tendances récentes se poursuivent pour les secteurs primaire (-0,3% par an de 2017 à 2050) et secondaire (+0,5% par an). La croissance du secteur tertiaire reste plus élevée, mais ralentie nettement par rapport à ces dernières années pour atteindre +0,7% par an entre 2017 et 2050. Au total, la croissance serait de +0,7% par an sur cette période (+24%)¹ alors qu'elle était de +1,9% de 2011 à 2017. Ce ralentissement découlerait d'une baisse de la population active, des premiers effets de l'automatisation des activités de services ainsi que d'un ralentissement global de l'économie mondiale.</p> <p><small>1. A titre indicatif, la stratégie énergétique de la Confédération a été établie avec une croissance annuelle moyenne de +0,3% entre 2017 et 2050.</small></p> <p style="text-align: center;">EMPLOIS PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE¹, VAUD</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">2017</th> <th colspan="2">2050</th> <th>2017-2050</th> </tr> <tr> <th>Nombre</th> <th>En %</th> <th>Nombre</th> <th>En %</th> <th>Par an, en %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Primaire</td> <td>9359</td> <td>3</td> <td>8498</td> <td>2</td> <td>-0,3</td> </tr> <tr> <td>Secondaire</td> <td>67 129</td> <td>19</td> <td>79546</td> <td>18</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>Tertiaire</td> <td>279 232</td> <td>78</td> <td>352 932</td> <td>80</td> <td>0,7</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>355 719</td> <td></td> <td>440 976</td> <td></td> <td>0,7</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>1 Equivalent plein-temps.</small></p> <hr style="border-top: 1px dashed #000;"/> <p><i>Source : OFS, données observées jusqu'en 2020, application des taux de croissance par branche de Ecoplan-KPMG (2020), scénario Combo¹.</i></p> <p><small>1 Il s'agit d'un scénario combinant accélération technologique et conscience écologique.</small></p> | | 2017 | | 2050 | | 2017-2050 | Nombre | En % | Nombre | En % | Par an, en % | Primaire | 9359 | 3 | 8498 | 2 | -0,3 | Secondaire | 67 129 | 19 | 79546 | 18 | 0,5 | Tertiaire | 279 232 | 78 | 352 932 | 80 | 0,7 | Total | 355 719 | | 440 976 | | 0,7 |
| | 2017 | | 2050 | | 2017-2050 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Nombre | En % | Nombre | En % | Par an, en % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Primaire | 9359 | 3 | 8498 | 2 | -0,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Secondaire | 67 129 | 19 | 79546 | 18 | 0,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tertiaire | 279 232 | 78 | 352 932 | 80 | 0,7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total | 355 719 | | 440 976 | | 0,7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sortie du nucléaire et du mazout | <p>La Suisse sort progressivement du nucléaire. La durée de vie d'exploitation possible de 60 ans établie par l'OFEN ainsi que le calendrier de mise hors service projeté par l'AES (Marti et al., 2022) servent de boussole pour la prise en considération de l'arrêt successif des réacteurs.</p> <p>Les chaudières à mazout sont entièrement remplacées par d'autres technologies d'ici à 2035. Le durcissement des législations en matière de nouvelles constructions et de rénovations ainsi que l'augmentation des coûts d'exploitation (notamment par les taxes sur les combustibles) rendent le chauffage à mazout de moins en moins attractif.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

4. Résultats sectoriels et approvisionnement

4.1. Habitations et appareils domestiques

Le secteur des habitations et appareils domestiques est caractérisé par deux composantes principales : les logements et les habitant-es qui y vivent. La consommation d'énergie de ce secteur est en effet étroitement liée au nombre de bâtiments dans le parc immobilier vaudois, à leurs caractéristiques comme leur âge ou leur système de chauffage, ainsi qu'aux modes de vie de leurs occupant-es. Ces derniers influencent notamment les appareils et équipements présents dans les logements ainsi que les services énergétiques à satisfaire (chauffage, éclairage, etc.) pour garantir un certain confort de vie.

Les scénarios construits dans cette étude ont cherché à moduler des facteurs liés à ces deux composantes afin de décrire des trajectoires de besoin énergétique et d'approvisionnement distinct. Cela en gardant en tête deux limitations majeures inhérentes à ce secteur ; le temps de vie conséquent des installations de chauffage (15 à 20 ans pour une chaudière à mazout) et la marge de manœuvre relativement restreinte au niveau du bâti, le parc immobilier de 2050 étant en grande partie déjà construit.

Le secteur des habitations et appareils domestiques en 2017

Consommation

- 33 % de la consommation finale d'énergie vaudoise (5855 GWh)
- Evolution : stable depuis les années 80.

Emissions de GES_E

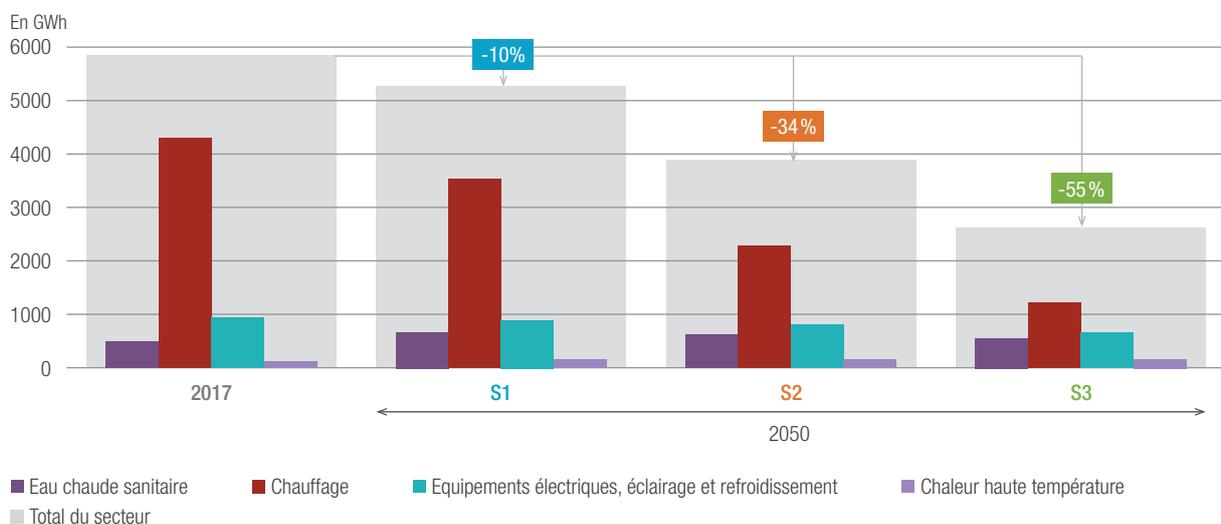
- 966 Kt-éq.CO₂, soit 31 % des émissions vaudoises.

Chiffres-clefs

- Dépendance au fossile à 63 %.
- Le chauffage représente 73 % des besoins énergétiques du secteur.
- 75 % du parc immobilier de 2050 est déjà construit.

Selon nos projections, le secteur des habitations et appareils domestiques vaudois pourrait connaître des baisses de consommation se situant entre -10 % et -55 % à l'horizon 2050 (**Fig. 16**). Ces baisses viennent à la fois de la diminution des besoins en énergie et des gains

Fig. 16 CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE, SECTEUR HABITATIONS ET APPAREILS DOMESTIQUES, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050



Les évolutions en cours

- La taille du parc immobilier vaudois est en hausse constante. La construction de nouveaux logements est largement déterminée par l'évolution démographique découlant de l'immigration liée aux besoins en main-d'œuvre.
- L'évolution des normes de construction permet aux bâtiments modernes d'être plus économes en énergie et moins émetteurs de GES.
- Les logements modernes sont légèrement plus spacieux que les logements anciens, faisant augmenter les espaces à chauffer.
- Le réchauffement climatique tend à faire baisser les besoins en chauffage et augmenter les besoins en climatisation.

d'efficacité liés aux remplacements des équipements utilisés. Il en ressort que, dans une optique de limitation des émissions de GES_E de ce secteur, la cible prioritaire est la consommation d'énergie liée au chauffage des logements, plus gros poste d'émission du secteur.

Réduire les besoins énergétiques : rénovation et optimisation vont de paire

Pour décarboner le secteur des ménages, il convient de baisser la demande en énergie pour qu'elle puisse être comblée par des énergies renouvelables. Les anciens bâtiments sont souvent qualifiés de passoires thermiques pour une bonne raison : les besoins en chauffage dans ce type de logements peuvent y être jusqu'à 7 fois plus élevés que dans un logement identique de nouvelle génération (Streicher et al., 2019). Bien que le nombre de logements rénovés augmente depuis quelques années, les rénovations partielles ou totales sont souvent insuffisantes du point de vue énergétique, car conduites sans réelle planification stratégique (OFEN, 2019a). Or, le potentiel de gain en efficacité est énorme à ce niveau-là car 67 % du parc immobilier actuel a été construit avant 1990.

Si le scénario tendanciel, qui fait légèrement augmenter le taux de rénovation actuel (0,8 % du parc rénové en 2017), se réalise, alors 46 % des logements construits

avant les années 90 seraient rénovés en 2050. Si le scénario 2 se réalise, 62 % de ces logements seraient assainis et si c'est le scénario 3, qui voit son taux de rénovation plus que doubler sur la période, 73 % de ces anciens logements seraient rénovés. Dans ce dernier scénario, les rénovations permettraient à elles seules de diminuer les besoins énergétiques liés au chauffage de plus de 20 % par rapport à leur niveau de 2050¹².

Dans tous nos scénarios, les rénovations sont faites parallèlement à une optimisation plus ou moins marquée des usages et de l'exploitation des systèmes de chauffage, permettant de consolider la baisse de la demande en énergie. Notre scénario de continuité correspond à un futur dans lequel les ménages ne modifieraient que légèrement leurs pratiques quant à l'utilisation de l'énergie. Dans ce scénario, l'ensemble des mesures mises en place permettraient de faire baisser les besoins énergétiques du secteur de -12 % à l'horizon 2050 par rapport à 2017.

Dans le scénario 2, les ménages utiliseraient l'énergie de manière plus parcimonieuse et continueraient à s'équiper, mais avec des appareils moins gourmands en énergie. Ils chaufferaient également moins leur logement et exploiteraient les systèmes de chauffage de manière plus efficace, notamment grâce à des capteurs connectés. Dans un tel cas, les besoins diminueraient de -36 %.

Habitations et appareils domestiques en 2050, par scénario

Continuité

- 5267 GWh consommés (34 % du total vaudois) et 498 Kt-éq. CO₂ émis (26 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 41 %.

Changement de cadence

- 3887 GWh consommés (31 % du total vaudois) et 256 Kt-éq. CO₂ émis (20 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 21 %.

Nouveau paradigme

- 2619 GWh consommés (25 % du total vaudois) et 159 Kt-éq. CO₂ (19 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 15 %.

¹² Les besoins énergétiques correspondent à l'énergie nécessaire pour remplir un service énergétique comme chauffer une pièce ou l'éclairer. Ils diffèrent de la consommation finale d'énergie car cette dernière dépend de l'efficacité du dispositif nécessaire pour satisfaire le service. Il s'agit par exemple du type de cuisinière utilisé pour apprêter un repas. Elle peut être à gaz naturel ou électrique et peut consommer plus ou moins d'énergie.

Encadré 7 Consommation électrique des équipements et usages quotidiens

Les ménages peuvent réduire leur consommation d'électricité en se dotant d'équipements plus efficaces, en adaptant leurs pratiques ou simplement en s'en passant partiellement ou complètement.

Ainsi, économies d'énergie ne riment pas forcément avec restrictions. Par exemple, la consommation annuelle d'électricité d'une box internet d'une puissance de 10,5 W est de 92,2 kWh. Si on allume ce type d'appareil uniquement pour nos besoins (8 heures par jour), sa consommation électrique chute à 30,7 kWh, soit moins d'1/3 de sa consommation actuelle¹

Par ailleurs, adapter ses pratiques peut aussi consister à réduire la fréquence d'utilisation d'un équipement. Les sèche-linges pourraient par exemple n'être utilisés que pour une partie du linge. L'économie serait importante, car la consommation moyenne d'un sèche-linge est d'environ 350 kWh par an (Dupret M. et al., 2021), ce qui en fait l'un des plus gros postes de dépenses électriques des ménages.

¹ Propres calculs sur la base de données trouvées sur le site de Swisscom.

Le scénario 3 illustre une sobriété volontaire et une optimisation des infrastructures de chauffage qui se fait dès leur planification et tout au long de leur cycle de vie. Le pilotage du chauffage (soit sa modulation en fonction des besoins) et son utilisation mesurée ainsi que la modération dans la manière de s'équiper permettraient aux besoins énergétiques de baisser de -57 % dans ce scénario (voir **encadré 7** ci-dessus et **encadré 8** en page 52).

Répondre aux besoins énergétiques avec du renouvelable et devenir énergétiquement plus autonome

Réduire les besoins en énergie des ménages est une chose, combler ces besoins par des énergies renouvelables en est une autre. Actuellement ce secteur consomme 63 % d'énergie fossile. Leur utilisation baisserait de 40 % dans le scénario 1 sur la période faisant passer leur part dans la consommation finale à 41 % en 2050, et à 21 % dans le scénario 2. Le scénario 3 illustre une indépendance plus marquée du fossile, leur consommation diminuant de 90 % pour ne représenter plus que 15 % de la consommation énergétique du secteur.

Cette indépendance s'acquerrait principalement au niveau du chauffage. En effet, le canton se chauffe actuellement à 76 % avec du fossile, pour moitié avec du gaz et pour l'autre moitié avec du mazout. Dès lors, ces derniers sont la cause de la majorité des émissions de GES du secteur. Nos trois scénarios voient l'utilisation de mazout progressivement descendre à zéro. L'utilisation du gaz naturel resterait quant à elle plus contrastée. Elle ne baisserait que de 13 % dans le scénario de continuité durant

la période (**Fig. 17**). Dans ce scénario, 50 % des ressources consommées pour le chauffage seraient encore du gaz naturel en 2050. Les besoins en chauffage, toujours très importants à l'horizon 2050, ne permettraient pas, en effet, de se passer d'énergie fossile. Cela malgré une mise en place conséquente de solutions de chauffages renouvelables, avec une multiplication par 5 de l'énergie produite par les panneaux solaires thermiques par rapport à 2017, un triplement de l'énergie fournie par des pompes à chaleur (PAC) individuelles et une utilisation marquée des chauffages à distance (CAD), majoritairement alimentés par du renouvelable.



Les besoins en chauffage étant plus restreints si les scénarios 2 et 3 se réalisaient, la substitution des agents énergétiques fossiles par du renouvelable deviendrait plus atteignable. En effet, en 2050, les besoins énergétiques pour le chauffage dans le scénario 1 correspondraient à 82% des besoins actuels, alors qu'ils ne correspondraient qu'à 53% dans le scénario 2 et à seulement 29% dans le scénario 3. La part de gaz naturel utilisé pour chauffer les logements illustre cette plus grande facilité de substitution; elle descendrait à 18% dans le S2 et à 5% dans le S3.

Cette substitution partielle ou complète par du renouvelable serait faite dans tous les scénarios par le rythme soutenu d'installations de dispositifs de production de chaleur et d'électricité individuels et/ou centralisés. Cependant, dans le scénario 1 cette montée en puissance ne suffirait pas à combler une demande toujours élevée en énergie dans le canton. Dans le scénario 2, la demande aurait suffisamment baissé pour que les énergies renouvelables se substituent partiellement au fossile. Dans le 3^e scénario, la baisse de besoins énergétiques est telle que le renouvelable pourrait en combler une grande partie.

Prosommateur

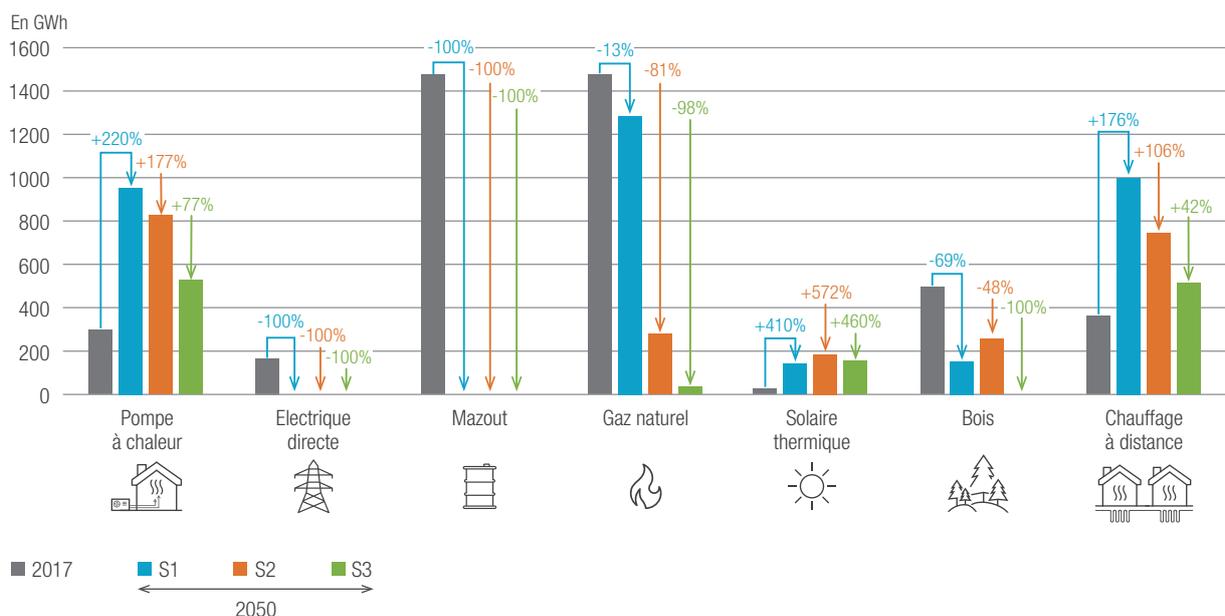
Le terme **prosommateur**, encore inconnu il y a quelque temps, est de plus en plus utilisé pour désigner cette nouvelle catégorie d'acteurs qui a fait son entrée sur la scène de l'énergie: les consommateurs d'énergie qui sont également producteurs d'énergie renouvelable.

Par exemple, un propriétaire de panneaux photovoltaïques qui autoconsomme sa production d'électricité et en injecte une partie sur le réseau est un prosommateur.

Autoconsommation et mutualisation deviennent essentielles avec les énergies renouvelables

Avec le développement des énergies renouvelables, la production d'énergie va sortir de la logique centralisée et de silo qui la caractérise actuellement (voir section 5.1 pour un approfondissement). Par exemple, l'électricité produite par les panneaux solaires photovoltaïques (PV) installés sur le toit sert à alimenter les équipements (dont les PAC) et véhicules des occupants. Cette électricité

Fig. 17 CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE POUR LE CHAUFFAGE, SECTEUR HABITATIONS ET APPAREILS DOMESTIQUES, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050



Encadré 8 Ventilateur ou climatiseur

En raison de l'augmentation du niveau de vie, de l'accroissement de la population mondiale et du réchauffement climatique, le nombre de climatiseurs installés dans le monde pourrait augmenter de 40 % d'ici 2030 (Jorio, 2022).

Si, aujourd'hui, la Suisse compte 10% des ménages équipés en climatiseurs, l'accroissement de leur demande devrait suivre la tendance mondiale. En effet, le changement climatique se fait particulièrement sentir sur le territoire national, avec une augmentation des températures d'environ +2°C depuis 1864 et une augmentation parallèle des jours de chaleur dépassant les 30°C (NCCS, 2021).

Bien que la législation helvétique impose l'instruction d'un permis de construire pour l'installation d'une climatisation fixe, elle n'encadre pas directement l'achat des autres climatiseurs, or ces derniers sont de gros consommateurs électriques. Pour un climatiseur d'une puissance nominale de 2500 W (soit la puissance nécessaire pour rafraîchir une surface de 25 m²) et une utilisation journalière de 8 heures, sa consommation électrique est alors de 20 kWh par jour. Pour une surface similaire, les ventilateurs ont une puissance moyenne de 50 W, leur consommation électrique est alors de 0,4 kWh/jour, soit 50 fois moins que les climatiseurs¹.

1 Propres calculs sur la base de CODA Stratégies (2021)

pourrait également servir pour ceux de l'entreprise voisine et le surplus pourrait être injectée sur le réseau. C'est l'avènement de l'ère des « prosommateurs ».

Le développement de la valorisation des énergies renouvelables est central dans la poursuite d'une stratégie de réduction des émissions du secteur des ménages. Notre scénario de continuité (scénario 1) souligne l'impulsion déjà existante à ce niveau-là. Dans ce scénario, le mix électrique compte 23 % d'électricité provenant de PV, contre 3 % actuellement. Notre scénario changement de cadence (scénario 2) voit la part d'électricité provenant du solaire augmenter à 30 % et elle atteint 39 % dans le scénario 3.

Les scénarios illustrent également un autre changement de paradigme essentiel à la transition énergétique : la mutualisation. Elle se retrouve à plusieurs échelles, mais le changement le plus marquant se voit au niveau du chauffage. Actuellement, le chauffage est pensé de manière décentralisée. Chaque bâtiment possède sa propre chaudière. Les installations de chauffage à distance (CAD) ne représentent que 8 % de la consommation de chauffage en 2017. Or, dans le scénario 2, cette part grimpe à 32 % en 2050 et la consommation provenant des CAD s'approcherait de la majorité dans le 3^e scénario (42 %).

Le dernier scénario illustre un monde où la chaleur nécessaire à chauffer les logements est produite pour

presque la moitié par des CAD en 2050. Ces derniers sont alimentés à presque 60 % par la chaleur de l'environnement (centrale de chauffe avec PAC, rejets de chaleur et géothermie profonde) et par les déchets à 31 %. Le reste de la chaleur nécessaire (hors CAD) est produit par les consommateurs eux-mêmes via des PAC individuelles et du solaire thermique, voir des chauffages individuels à bois dans les régions de montagne disposant de peu d'alternative. Ces prosommateurs s'organisent en communautés pouvant se revendre leur propre énergie (électricité en particulier). La mutualisation se fait également sentir dans la manière d'utiliser les espaces et les infrastructures. Cette mixité des usages et des fonctions est une manière efficace de faire diminuer les besoins en ressources, quelles qu'elles soient. Cela nécessite néanmoins une planification et une collaboration importante entre les différents acteurs.

L'intégration de cette production renouvelable intermittente et non centralisée ainsi que la convergence des réseaux provenant de systèmes centralisés met au défi les systèmes de distribution actuels. Ces derniers n'ont pas été planifiés pour une telle gestion de ces flux et ils devront dès lors être repensés afin de répondre aux besoins grandissants d'interconnexion et de flexibilité. L'utilisation du numérique (*smart-grid*, *smart-meters*, etc.) faciliterait le pilotage intelligent de l'offre et de la demande dans le scénario 3 (voir chapitre 3.2 pour plus de précisions) (**encadré 8**).

4.2. Transports

Le secteur des transports comprend la mobilité des personnes et le transport de marchandises. **La mobilité des personnes représente l'essentiel de l'énergie consommée et des émissions de GES rejetées par les transports sur le territoire vaudois**, avec 80 % et 79 % des totaux respectifs en 2017 selon nos estimations (voir **encadré 9** en page 59).

Ces domaines obéissant à des dynamiques différentes sont traités séparément, même si fondamentalement leur consommation d'énergie dépend des mêmes composantes à savoir :

1. des distances parcourues,
2. du mode de transport adopté (voiture, etc.),
3. de la consommation et des émissions des véhicules utilisés (source d'énergie et efficacité).

Pour le transport de marchandises, la consommation dépend aussi du poids du chargement transporté.

Loin d'être mécanique et seulement technique, l'évolution de ces composantes est le fruit de changements liés notamment à la démographie, aux modes de vie, à l'aménagement du territoire, aux choix individuels et à l'offre de transports.

Le secteur des transports en 2017

Consommation

- 24 % de la consommation finale d'énergie vaudoise, avec 4245 GWh, dont 3378 pour la mobilité des personnes et 867 pour le transport de marchandises.
- Evolution: Baisse maquée en lien avec la pandémie du Covid-19, reprise en 2021.

Chiffres-clefs

- Dépendance au fossile à 94 %
- 10718 mios de personnes-km par an¹ dont 72 % en voiture.
- 2279 mios de tonnes-km¹ par an dont 70 % sur route.

Emissions de GES_E

- 33 % des émissions vaudoises, avec 1040 Kt-éq. CO₂ dont 826 pour la mobilité des personnes et 214 pour les marchandises.

¹ Unité de mesure correspondant au déplacement d'une personne ou d'une tonne sur un kilomètre.

Evolutions en cours sur le territoire vaudois

Mobilité des personnes

- Stabilisation des distances quotidiennes parcourues par personne depuis 2000, après 50 ans de hausse.
- Usage plus fréquent des transports publics et du train en particulier par les pendulaires depuis les années 2000, en bonne partie dû au développement de l'offre et aux comportements des jeunes adultes.
- Motorisation des voitures : chute des moteurs diesel, baisse des moteurs à essence, hausse des hybrides et électriques.
- La diffusion du télétravail exerce un effet net à la baisse sur les distances journalières parcourues.
- Forte hausse de l'usage du vélo depuis l'apparition des vélos électriques.

Transport de marchandises

- Croissance du commerce soutenue et utilisation plus fréquente pour les livraisons à domicile de véhicules utilitaires légers, de plus en plus souvent électriques.
- Camions diesel dominants, alternatives en développement (électricité, biocarburants et hydrogène).
- Transport par le train encouragé et démarches pour optimiser la logistique urbaine.

Mobilité des personnes

Actuellement, la rencontre de l'offre et de la demande de mobilité se manifeste par un usage prépondérant de la voiture sur le territoire vaudois. En effet, elle représente le moyen de locomotion pour 72 % des distances qui y sont parcourues en 2017, tandis que les transports publics en représentent 20 % dont l'essentiel est parcouru en train.

Caractérisées par une très forte dépendance au pétrole, les voitures ont occasionné 98 % des GES émis par la mobilité des personnes en 2017, alors qu'elles ne représentent que 77 % des distances parcourues. Il en va de même à ce jour, car les voitures thermiques constituent encore la très grande majorité du parc automobile vaudois (91 % en 2022).

A terme, l'électrification de l'essentiel du parc automobile semble toutefois inéluctable. D'une part, les véhicules thermiques ne seront bientôt plus disponibles sur le marché: l'Union européenne, principal producteur des véhi-

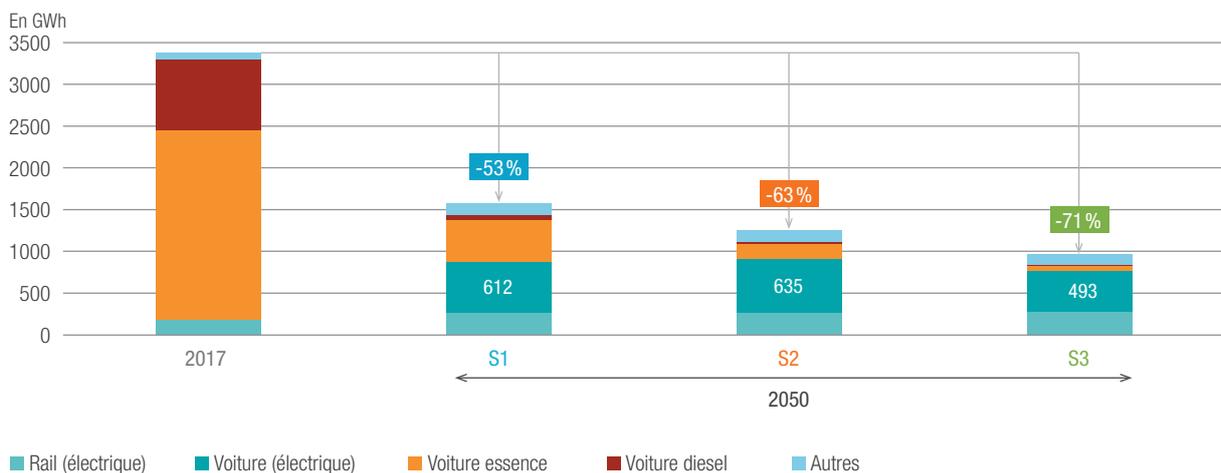
cules utilisés en Suisse, a par exemple décidé d'interdire la commercialisation de telles voitures neuves à l'horizon 2035. D'autre part, les voitures électriques devraient être privilégiées, car il s'agit d'une technologie dont le potentiel de développement est nettement plus large que l'hydrogène ou les biocarburants (voir **encadré 11** en page 73) et qui est plus performante énergétiquement sur l'ensemble du cycle de vie (voir définition en page 68).

D'ici à 2050, la consommation finale d'énergie pour la mobilité va baisser de moitié voire de 70 % (**Fig. 18**), malgré une hausse attendue des distances totales parcourues dans le canton sous l'impulsion de la croissance démographique (voir **encart** en page suivante)¹³.

L'électrification massive du parc soulève la question de son approvisionnement énergétique

Pour le système énergétique, l'électrification massive du parc automobile n'est pas une simple substitution de technologie, mais une mutation profonde qui pose un double défi d'approvisionnement:

Fig. 18 MOBILITÉ DES PERSONNES: CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050



13 Entre le moment de l'établissement des résultats et la rédaction de cette étude, l'Union européenne a décidé de réduire à zéro les émissions de CO₂ des voitures neuves en Europe à partir de 2035. Cela équivaut à l'arrêt des ventes de voitures et véhicules utilitaires légers neufs à essence, diesel et hybrides. Or, les résultats présentés dans l'étude ont été établis en supposant qu'une partie des voitures en circulation dans le canton de Vaud en 2050 seraient des voitures hybrides pour les scénarios 1 et 2. En supposant qu'il s'agisse plutôt de véhicules électriques, l'effet ne change toutefois que marginalement les constats généraux.

Avec des voitures électriques, la consommation finale de carburant dans le canton estimée pour le S1 devrait vraisemblablement être plus basse de 293 GWh, mais celle d'électricité plus élevée de 122 GWh. Pour le S2, la consommation de carburant estimée serait plus basse de 159 GWh et celle d'électricité plus élevée de 61. Pour les GES, il en résulterait une baisse des estimations de 76 t-éq.CO₂ dans le S1 et 41 dans le S2.

1. Le premier défi est celui de l'approvisionnement électrique lui-même. En effet, **la seule électrification du parc automobile occasionnera une hausse de la consommation finale d'électricité** qui pourrait être comprise dans une fourchette allant de 491 à 632 GWh à l'horizon 2050 dans le canton de Vaud, soit l'équivalent de 11 % à 14 % de la consommation d'électricité cantonale en 2017. Une telle augmentation appelle un renforcement massif des capacités de production pour éviter une pénurie, alors que les besoins en électricité vont également augmenter dans les autres secteurs. A titre indicatif, au rythme moyen d'installation du photovoltaïque de ces cinq dernières années, il faudrait 16 à 21 ans pour disposer de suffisamment d'électricité, pour répondre uniquement à ce besoin, et ce sans considérer la problématique de la saisonnalité de ce type de production.
2. Le deuxième défi posé par l'électrification du parc automobile est celui du déploiement de l'infrastructure de charge des véhicules. Concrètement, le temps de charge plus élevé des véhicules électriques (minimum 10 à 15 minutes pour les plus rapides) nécessite que le réseau de bornes de recharge soit principalement déployé à domicile, mais aussi en complément dans des parkings publics et sur les sites des entreprises. Au-delà de la question des coûts de ces installations, cette mise en place nécessite que le réseau électrique dans son entier gagne en souplesse et en puissance pour pouvoir assurer la charge des batteries en plus de répondre aux besoins énergétiques habituels des ménages dans les habitations¹⁴. Au niveau de la facturation aussi, le système devra gagner en souplesse pour facturer chaque consommateur de manière personnalisée.

Développer les transports publics pour gagner en efficacité énergétique

Selon toute vraisemblance, l'usage du train va être plus fréquent à l'avenir. En effet, les jeunes générations (les 20-30 ans) sont plus enclines à le prendre, d'une part, et un rabattement plus efficace vers les gares, d'autre part, devrait favoriser son usage (utilisation du vélo électrique, développement des interfaces de transport de voyageurs et développement des bus). De plus,

Mobilité des personnes en 2050, par scénario

Continuité

- 1578 GWh consommés (10 % du total vaudois) et 140 Kt-éq. CO₂ émis (7 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 41 %.
- 13 732 mios personnes-km¹ dont 62 % en voiture.

Changement de cadence

- 1255 GWh consommés (10 % du total vaudois) et 51 Kt-éq. CO₂ émis (4 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 18 %.
- 13 498 mios personnes-km¹ dont 58 % en voiture

Nouveau paradigme

- 970 GWh consommés (9 % du total vaudois) et 1 Kt-éq. CO₂ (0 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 2 %.
- 12 924 mios personnes-km¹ dont 51 % en voiture.

1 Unité de mesure correspondant au déplacement d'une personne sur un kilomètre.

l'usage du train devrait aussi être favorisé par l'avènement des applications facilitant l'utilisation combinée de plusieurs moyens de transports, soit une meilleure complémentarité entre les modes, ainsi que par de probables politiques publiques de soutien tarifaire, voire par des contraintes sur l'usage des voitures (stationnement, péages urbains par exemple).

Ainsi, la part du « rail » dans les déplacements pourrait atteindre entre 21 % et 25 % à l'horizon 2050, contre 17 % en 2017. Combinée à la croissance démographique (+32 % sur la période), cet usage accru du rail impliquerait une augmentation de ses prestations kilométriques allant de +65 % à +83 % entre 2017 et 2050. Si des hausses de cet ordre représentent une augmentation de la consommation finale d'énergie pour le rail comprise entre 88 et 95 GWh entre 2017 et 2050, elles permettent en contrepartie d'éviter une consommation plus élevée des voitures (141 à 176 GWh), avec une économie d'énergie à la clef. **Ainsi, l'usage du train constitue un levier important pour répondre à la demande de mobilité et atteindre les objectifs**

¹⁴ Dans des réseaux de type *smart-grids*, appelés à être mis en place pour gérer cette complexité, les batteries des véhicules électriques devraient à terme jouer un rôle de stockage quotidien d'énergie. Ainsi, l'usage des batteries serait bidirectionnel et servirait à pouvoir restituer de l'énergie chargée aux heures creuses vers le réseau, voire les maisons lorsque la demande générale d'électricité est élevée (« *Vehicle-to-grid* (V2G) » et « *Vehicle-to-home* (V2H) »). Ce stockage pourrait également être assuré par des batteries trop usagées pour permettre de faire rouler un véhicule, mais pouvant toujours fonctionner dans des systèmes de stockage stationnaires (second life batteries).

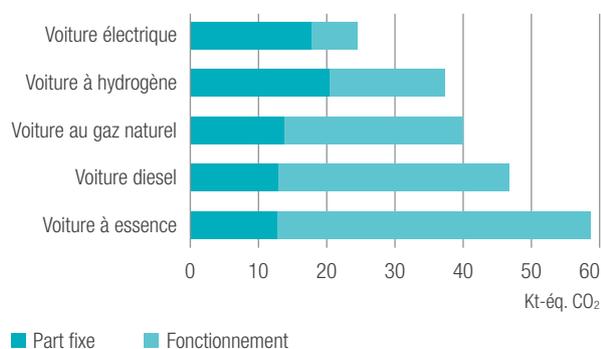
climatiques, tout en limitant les besoins de production d'électricité supplémentaire et donc les risques de pénurie.

Cela étant, **le défi concernant l'augmentation de l'usage du rail n'est pas la croissance de sa consommation d'énergie qui se dessine, mais plutôt de la rendre possible.** Le défi est de taille, car il implique que les capacités de transport soient augmentées de manière conséquente et donc que des investissements ferroviaires très importants soient effectués, afin de se doter de l'offre et des infrastructures ferroviaires nécessaires y compris l'achat de matériel roulant et l'agrandissement de certaines gares. En effet, les capacités des principaux axes de transports sont actuellement presque saturées aux heures de pointe, ce qui implique qu'une hausse des personnes transportées ne pourra être possible que si le nombre et la taille des trains augmentent. A titre indicatif, les capacités de l'offre ferroviaire devraient globalement augmenter dans un ordre de grandeur de 50 %, mais bien au-delà sur certains axes, pour pouvoir absorber la hausse des prestations de transport prévue d'ici à 2050 dans nos scénarios, étant entendu que les rames seraient par ailleurs davantage occupées.

Se modérer, un levier complémentaire encore plus rapide et gratuit

Dans le contexte de besoin accru d'électricité, la modération volontaire (soit la sobriété) constitue un levier

Fig. 19 EMPREINTE CARBONE DES VOITURES DE CLASSE MOYENNE PAR TYPE DE MOTORISATION¹



¹ Pour une utilisation de 200000 km.

Source: adapté de PSI (2020).



d'action important, gratuit et rapide pour réduire la consommation d'énergie. A titre indicatif, les éléments de sobriété intégrés dans notre scénario 3 permettraient une économie d'énergie équivalent à 106 GWh. Evidemment, cette économie pourrait être beaucoup plus importante selon l'ampleur des changements de comportements et de modes de vie que pourraient adopter les Vaudoises et les Vaudois.

Cette sobriété peut prendre plusieurs formes. Du point de vue des comportements de mobilité, elle comprend le choix de privilégier des activités de proximité nécessitant de se déplacer sur des distances plus courtes et permettant l'usage facilité de la mobilité active, ainsi que le fait de renoncer à certains déplacements. Du point de vue de la sobriété énergétique, elle comprend aussi l'utilisation de véhicules moins lourds et moins puissants, une réduction des vitesses, le partage de leur usage (covoiturage) ou de leur propriété (*carsharing*).

Ne pas perdre de vue les émissions totales de GES

Du point de vue de la consommation directe d'énergie, la substitution des voitures thermiques par des voitures électriques apparaît comme un levier efficace, puisqu'elle permet de réduire considérablement l'énergie finale consommée tout en n'émettant pas directement de GES. Toutefois, ce constat gagne à être nuancé à la lumière du bilan carbone des véhicules sur l'ensemble de leur cycle de vie.

Calculer un tel bilan pour une voiture permet de comprendre son impact climatique général et implique d'élargir la réflexion au-delà de la consommation nécessaire pour la faire rouler. Ainsi, il convient :

- Premièrement de tenir compte des émissions générées par la fabrication et l'élimination de la voiture et de ses composants. Cela correspond à la part fixe de son impact climatique. Cette part est plus élevée pour les voitures électriques, car la fabrication des batteries provoque des émissions non existantes pour les autres types de véhicule (**Fig. 19**).
- Deuxièmement de tenir compte des émissions découlant de son utilisation et d'inclure celles dues à la production de l'agent énergétique utilisé pour la faire rouler. Cela correspond à la part de fonctionnement de son impact climatique. Pour les voitures à essence, il s'agit notamment de l'extraction du pétrole et son raffinage, tandis que pour les voitures électriques de la production de courant. De ce point de vue, les voitures électriques sont plus favorables.

Au final, comparer un tel bilan pour des voitures thermiques et électriques donne un résultat net : **dans le domaine des véhicules individuels, si nous voulons protéger le climat, nous devons miser sur la propulsion électrique à batterie (PSI, 2020)**.

Les GES supplémentaires découlant de la part fixe des voitures électriques¹⁵ améliorent l'attrait des autres leviers à mettre en place : modération de la mobilité (sobriété et proximobilité), report modal vers les transports publics et mobilité active.

Le transport de marchandises

Le transport de marchandises dans le canton de Vaud concerne le déplacement de matières premières et de déchets (47 % des prestations en 2018), de produits et de métaux semi-finis (12 %), ainsi que de biens et denrées de consommation (41 %). Pour l'essentiel, les marchandises déplacées l'ont été par la route, avec 70 % de tonnes-km effectués, contre 30 % pour le rail en 2018.

15 Cette part fixe supplémentaire équivaut à 13 % de la part de fonctionnement économisée en utilisant une voiture électrique plutôt qu'une voiture à essence si l'on considère les voitures de classe moyenne et un usage de 200 000 km.

16 La hausse des prestations kilométriques de transport sera contenue par la nette diminution des agents énergétiques transportés (carburant, mazout, etc.) qui se dessine suite à leur substitution par de l'électricité ou de la chaleur ambiante notamment. En 2018, ils avaient occasionné 6 % des prestations de transport de marchandises dans le canton. Elle pourrait également être contenue par une éventuelle modération des habitudes de consommation comme l'illustre en particulier le scénario 3.

Transport de marchandises en 2050, par scénario

Continuité

- 855 GWh consommés (5 % du total vaudois) et 114 Kt-éq. CO₂ émis (6 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 55 %.
- 2938 mios personnes-km¹ dont 2 % en train.

Changement de cadence

- 699 GWh consommés (6 % du total vaudois) et 74 Kt-éq. CO₂ émis (6 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 43 %.
- 2827 mios personnes-km¹ dont 36 % en voiture

Nouveau paradigme

- 617 GWh consommés (6 % du total vaudois) et 18 Kt-éq. CO₂ (2 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 13 %.
- 2606 mios personnes-km¹ dont 40 % en voiture.

1 Unité de mesure correspondant au déplacement d'une personne sur un kilomètre.

A l'horizon 2050, la consommation finale d'énergie pour le transport de marchandises sur le territoire vaudois pourrait baisser de -1 % à -29 % entre 2017 et 2050 (**Fig. 20**). L'économie d'énergie en vue est ainsi nettement inférieure à celle qui se dessine pour la mobilité des personnes (-53 % à -71 %). Elle est toutefois notable dans la mesure où les prestations kilométriques vont assurément augmenter sur la période (de +15 % à +30 % tonnes-km)¹⁶, sous l'effet de la croissance économique et démographique.

Cette différence de dynamique découle de la moindre efficacité des vecteurs énergétiques pouvant être utilisés pour défossiliser le transport de marchandises par rapport à l'électricité qui reste le principal vecteur pour la mobilité des personnes. Cette dernière se prête moins bien au transport de marchandises, pour des raisons de charge de batteries, car le transport de marchandises implique des chargements lourds et/ou des trajets longs et souvent l'enchaînement de plusieurs trajets.

Transport en camion : assurer l'approvisionnement des nouveaux vecteurs énergétiques

La défossilisation du transport de marchandises passera par l'utilisation de biocarburants ou d'hydrogène vert, tandis que l'usage accru du gaz naturel et de l'électricité, pour les véhicules utilitaires légers, devrait aussi contribuer à réduire ses émissions de GES. A ce jour, les ressources disponibles dans le canton permettraient d'adopter la solution du biocarburant liquide ou gazeux, mais pas de l'hydrogène vert, tandis que le gaz naturel reste émetteur de GES. Toutefois, le recours au biocarburant implique qu'une part importante de la biomasse mobilisée (y compris des boues d'épuration) pour le secteur de l'énergie soit redirigée vers cette filière spécifiquement.

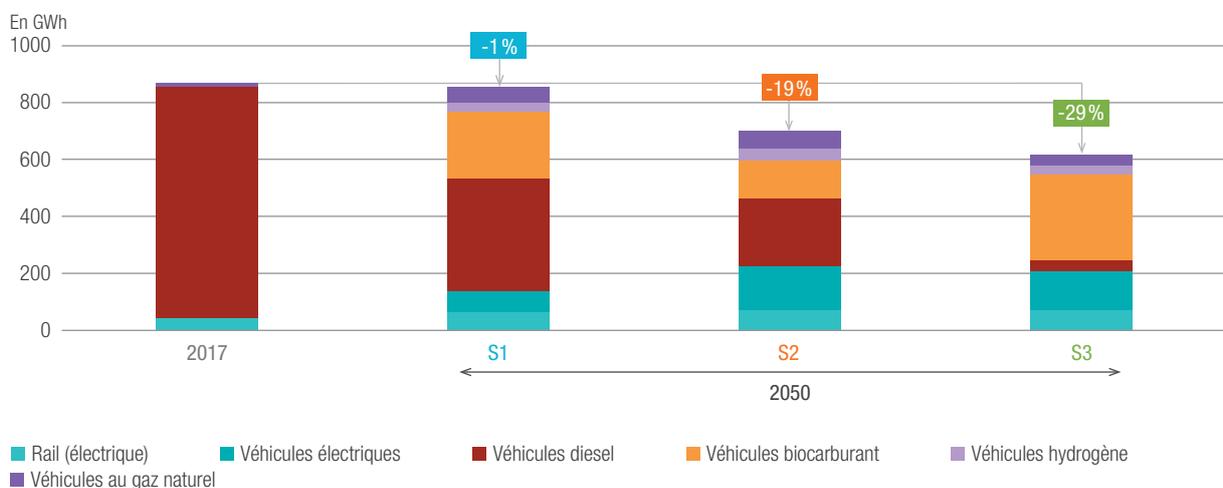
Une alternative serait l'utilisation d'hydrogène, même s'il devait rester trop coûteux pour être produit à large échelle en Suisse (Marti et al., 2022). En effet, il est possible qu'à l'avenir, la Suisse puisse se fournir auprès d'un réseau d'hydrogène prévu en Europe pour 2045. A ce stade, cet approvisionnement est incertain, puisque ce réseau doit encore être réalisé et que la Suisse devra négocier un accord pour s'y raccorder. Cette incertitude explique pourquoi le recours à l'hydrogène n'est pas illustré dans les scénarios retenus dans cette étude, mais n'en reste pas moins possible.

Favoriser l'usage du train, le développement de centres de distribution urbains ainsi que la sobriété

Plus efficient énergétiquement que le transport par camion ou camionnette, le transport de marchandises par le rail continuera à être favorisé au cours des prochaines décennies. L'utilisation accrue du train conduit à une mutualisation des échanges logistiques ce qui permet de globalement réduire les prestations kilométriques du transport de marchandises. Le potentiel de transfert est toutefois moindre que pour la mobilité individuelle, car le rail permet rarement de couvrir l'ensemble des kilomètres à parcourir. En outre, une augmentation du transport de marchandises par train nécessite également un développement des installations ferroviaires et des centres de distribution multimodaux.

Compte tenu des tendances en cours et des évolutions contrastées possibles, la consommation d'énergie pour le train pourrait augmenter de 20 à 27 GWh entre 2017 et 2050, ce qui est marginal par rapport à ce que sera la consommation d'électricité du canton. Comme pour la mobilité des personnes, la hausse du transport ferroviaire ne devrait pas poser de difficulté d'approvisionnement énergétique, mais au contraire contribuer à contenir la consommation d'énergie dans le canton.

Fig. 20 TRANSPORT DE MARCHANDISES, CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050



Encadré 9 Périmètre d'analyse pour les transports

Les résultats présentés couvrent en très large partie les déplacements de personnes et de marchandises réalisés sur le territoire vaudois. Tributaires des données disponibles et des outils à disposition, ils ne le font toutefois pas complètement. Plus concrètement, voici le périmètre pris en compte :

- **Les résultats se concentrent sur le trafic terrestre uniquement**¹. A l'échelle du canton et pour une analyse focalisée sur le territoire cantonal, cette limitation est modeste. En effet, si le trafic terrestre constitue l'essentiel de la consommation du secteur à l'échelle nationale (90 % de l'énergie consommée), la part est encore plus élevée à l'échelle du canton, avec 98 %.
- **Pour les personnes, les statistiques disponibles se limitent aux trajets réalisés sur le territoire dont le départ ou l'arrivée se situe dans le canton.** Autrement dit, elles ne comptent pas les déplacements traversant le territoire cantonal. De même, les statistiques n'intègrent pas les déplacements réalisés par des personnes venant de l'étranger pour des raisons touristiques, contrairement aux trajets réalisés par des frontaliers, des pendulaires ou des résidents suisses venant en séjour dans le canton².
- **Pour le transport de marchandises, les statistiques et les estimations utilisées comprennent le transit** de marchandises.

¹ Autrement dit, elles ne comprennent pas les transports en avion, en bateau et par oléoduc.

² Les déplacements occasionnels (voyages avec et sans nuitées, excursions) ne sont pas considérés dans leur totalité, pour les Vaudois-es à l'intérieur comme pour les « visiteurs » suisses du canton.

La réorganisation de la logistique urbaine, avec le développement de centres de distribution devrait également contribuer à réduire la consommation énergétique du transport de marchandises, grâce à une meilleure efficacité de la desserte des derniers kilomètres¹⁷.

Pour sa part, le passage à une société moins consumériste et favorisant la consommation locale permettrait de réduire la quantité de marchandises transportées. L'effet territorial d'une telle inclinaison à la modération (voire à la sobriété) resterait sans doute modeste du point de vue des besoins énergétiques à l'échelle cantonale, les biens et denrées de consommation ne représentant que 40 % des prestations de transport effectuées en 2017¹⁸. Néanmoins, son impact climatique

serait conséquent à l'échelle planétaire compte tenu de la consommation énergétique évitée au stade de la production de biens et de leur acheminement jusque dans le canton, puis de leur recyclage ou élimination également évitée.

¹⁷ Les centres de distribution permettent de regrouper les commandes, ainsi que le transfert vers des véhicules utilitaires légers ou des vélos-cargos.

¹⁸ Le gain serait de 80 GWh pour une baisse de 16 % des tonnes-km de biens et denrées alimentaires comme le suppose le scénario 3 par rapport au scénario 2, soit entre -0,7 % et -0,9 % de la consommation finale d'énergie du canton en 2050.

4.3. Production de biens et services

Le secteur de la production de biens et services est composé de deux domaines :

1. Le domaine de la production de biens regroupe l'industrie, la construction et l'agriculture. Il représentait 50 % de la consommation finale d'énergie de ce secteur et 56 % de ses rejets de gaz à effet de serre en lien avec le secteur énergétique (GES_E) en 2017, selon nos estimations.
2. Le domaine des services regroupe les entreprises privées du domaine ainsi que les administrations publiques et parapubliques. Moins dépendant des énergies fossiles, il occasionne la moitié de la consommation d'énergie du secteur et 43 % de ses GES_E.

Evolutions en cours

- Dynamique économique particulièrement soutenue depuis les années 2000, mais qui devrait progressivement ralentir, tout en restant positive.
- Numérisation et automatisation des processus productifs.
- Mise en œuvre d'économies d'énergie appuyées par des politiques publiques centrées sur les grands et moyens consommateurs¹.

¹ Les grands consommateurs sont des entités, localisées sur un site, qui ont une consommation d'énergie supérieure à 5 GWh pour la chaleur et/ou 0,5 GWh pour l'électricité. En 2018, ils représentaient 8 % de la consommation thermique vaudoise totale et 34 % de celle électrique.

Ces deux domaines présentent des besoins et donc des profils de consommation d'énergie très différents. **Par exemple, la consommation d'énergie du domaine des services sert majoritairement à chauffer les locaux, tandis que la consommation d'énergie de l'industrie sert avant tout à créer de la chaleur à haute température nécessaire aux processus de production.** Du fait de leurs profils spécifiques de consommation, ces deux domaines suivent des dynamiques différentes et sont, dès lors, présentés séparément.

Le secteur de la production de biens et services en 2017

Consommation

- 42 % de la consommation finale d'énergie vaudoise (7382 GWh dont 3706 pour la production de biens et 3676 pour la production de services.)
- Dépendance au fossile à 56 % pour les biens et 51 % pour les services.

Chiffres-clefs

- Services : 78 % des emplois du canton
- Construction : 10 % des emplois du canton
- Industrie : 9 % des emplois du canton
- Agriculture : 3 % des emplois du canton

Emissions de GES_E

- 34 % et 1069 Kt-éq. CO₂ dont 592 pour la production de biens et 477 pour les services.

La production de services

L'essentiel de la consommation finale d'énergie du domaine de la production de services sert à chauffer les locaux (59 % en 2017) et à les éclairer (14 %), tandis que le fonctionnement des appareils électriques n'en représente que 19 % et les autres usages 8 % (eau chaude sanitaire et cuisson notamment).

Tous usages confondus, la consommation d'énergie des branches du domaine est étroitement liée au nombre d'employés qu'elles occupent (**Fig. 21**). Toutefois, la consommation d'énergie de la branche de l'hôtellerie-restauration s'avère nettement supérieure à sa part dans l'emploi, en raison notamment de l'énergie nécessaire pour la cuisson, ainsi que dans une moindre mesure de l'espace intrinsèquement nécessaire à l'activité (salles et chambres). Autrement dit, cette branche présente une intensité énergétique – soit un rapport Energie/Emplois – nettement supérieure à celle des autres activités de services. De même, l'enseignement présente une intensité énergétique supérieure à la moyenne du secteur (salles de cours, cafétérias).

Fig. 21 DOMAINE DES SERVICES: CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE ET EMPLOIS, VAUD, 2017

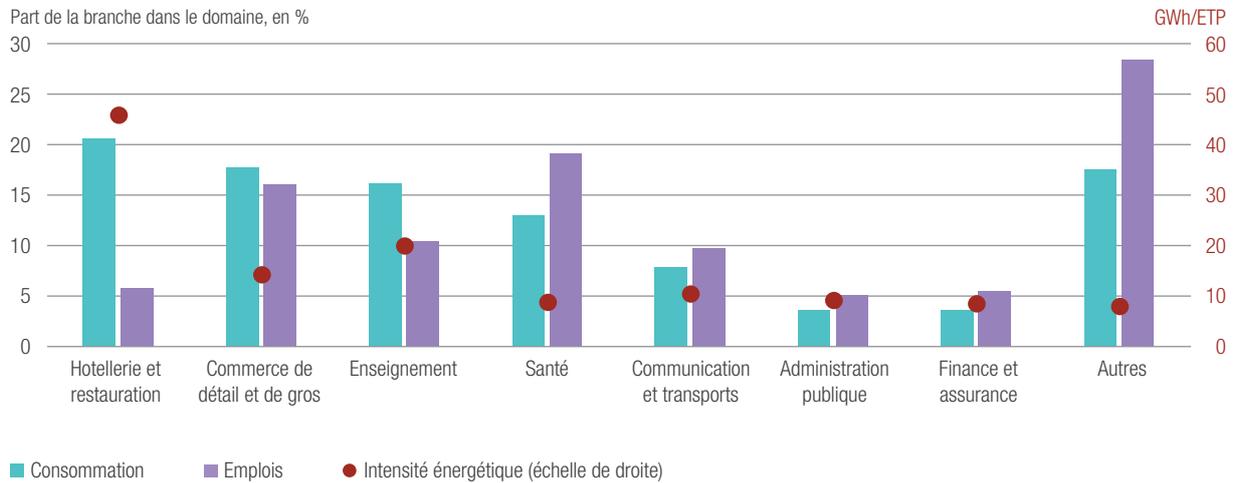
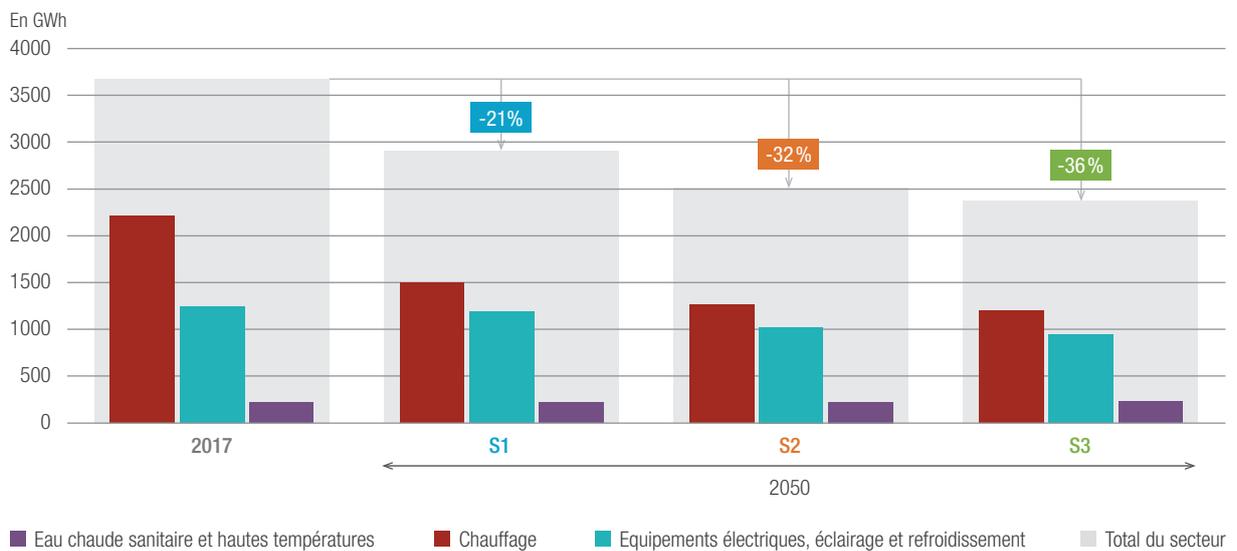


Fig. 22 DOMAINE DES SERVICES: CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE SELON LES SERVICES ÉNERGÉTIQUES, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050



La trajectoire à venir de la consommation d'énergie du domaine des services dépendra de l'évolution respective de ses branches, ainsi que de leur intensité énergétique. D'ici à 2050, les activités de services devraient continuer à croître, ce qui aurait pour effet de pousser la consommation d'énergie à la hausse. Cet effet devrait néanmoins être contrebalancé et dépassé par de substantiels gains d'efficacité énergétique. Ainsi, la consommation finale d'énergie pour le secteur des services vaudois pourrait afficher une baisse comprise entre -21 % et -36 % à l'horizon 2050 (Fig. 22).

Réduire les besoins énergétiques : rénover les bâtiments et adapter les pratiques

La baisse des intensités énergétiques du domaine des services passera pour l'essentiel par les éléments déterminant les besoins énergétiques de chauffage des bâtiments, étant donné la prépondérance de ce poste. Les dynamiques qui en ressortent sont donc analogues à celles présentées pour le secteur des habitations et appareils domestiques. Elles ont pour pilier l'assainissement des bâtiments énergétiquement les plus dispendieux¹⁹. Les économies d'énergie réalisées grâce aux rénovations seront vraisemblablement renforcées par un pilotage optimisé des systèmes de chauffages et d'éventuelles baisses des températures visées. De surcroît, la diffusion du télétravail pourrait occasionner une diminution des surfaces mobilisées par l'emploi. Globalement, le potentiel d'économie d'énergie liée au chauffage des bâtiments pour les services est important et se situe entre -711 et -1015 GWh à l'horizon 2050, soit un abaissement compris entre -32 % et -46 % de la consommation en 33 ans.

Par ailleurs, le domaine des services devrait parvenir à réduire sa consommation d'énergie pour l'éclairage des locaux et des façades, moyennant de légères rénovations et l'adaptation des pratiques. Il s'agit par exemple de remplacer le système manuel d'éclairage par un système automatique, régulant la période d'éclairage ou encore l'intensité en temps réel. La diminution pourrait aller de 239 à 300 GWh entre 2017 et 2050, ce qui représente un gain conséquent dans un contexte de renforcement notable de la demande d'électricité dans

Domaine des services en 2050, par scénario

Continuité

- 2905 GWh consommés (19 % du total vaudois) et 195 Kt-éq. CO₂ émis (10 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 33 %.

Changement de cadence

- 2507 GWh consommés (20 % du total vaudois) et 120 Kt-éq. CO₂ émis (9 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 16 %.

Nouveau paradigme

- 2369 GWh consommés (22 % du total vaudois) et 108 Kt-éq. CO₂ émis (13 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 11 %.

le canton (pour la mobilité et les pompes à chaleur notamment)²⁰.

Répondre aux besoins énergétiques : développer le renouvelable et adapter les systèmes de chauffage

Le domaine des services recourt au mazout et au gaz naturel pour couvrir 45 % de sa consommation finale d'énergie en 2017. Pour l'essentiel, ces énergies fossiles servent à chauffer les locaux et l'eau chaude sanitaire. A l'horizon 2050, l'adaptation complète des systèmes de chauffage, combinée aux rénovations des bâtiments, devrait permettre au domaine de se passer intégralement de mazout. Ces adaptations pourraient aussi permettre de consommer 24 % de moins de gaz naturel, si elles se poursuivent au rythme actuel (S1) et même jusqu'à 93 % de moins, si tous les anciens locaux sont rénovés (S3). Ces diminutions importantes impliquent une adaptation complète des systèmes de chauffage en remplaçant les chaudières à mazout et à gaz naturel par des dispositifs renouvelables et plus efficaces avec notamment des réseaux de chaleur à distance alimentés par des énergies renouvelables.

Comme pour les habitations, de tels remplacements permettraient au domaine des services de s'affranchir par-

¹⁹ Le potentiel d'économie par les rénovations est vraisemblablement moindre proportionnellement que pour les habitations, car seules 39 % des surfaces utilisées par le domaine des services sont abritées dans des bâtiments construits avant 1990, contre 67 % pour le secteur des ménages. Pour le domaine de la production de biens, le potentiel doit être encore moindre, avec une part des surfaces abritées dans des bâtiments anciens de 30 %.

²⁰ Les datacenters, en fort développement ces dernières années, consommaient un peu moins de 35 GWh d'électricité dans le canton de Vaud en 2020. A l'avenir, leur consommation pourrait être démultipliée selon les éventuelles nouvelles implantations.

tiellement, voire complètement, des énergies fossiles à l'horizon 2050.

La production de biens

L'essentiel de la consommation finale d'énergie du domaine de la production de biens sert à générer de la chaleur à haute température pour les processus de production (52 %) et à alimenter les machines et appareils électriques (26 %). Le chauffage des locaux représente quant à lui une part nettement inférieure que pour le secteur des habitations et appareils domestiques ainsi que pour le domaine des services (20 %). Cette différence s'explique surtout par les besoins spécifiques au processus de production de biens, plutôt que par une gestion peu économe des bâtiments. Il est vrai toutefois que les locaux industriels sont généralement moins chauffés et que les activités de construction se déroulent plus souvent à l'extérieur.

De par ces besoins spécifiques aux activités industrielles et de construction, le domaine de la production de biens affiche une intensité énergétique moyenne quatre fois supérieure à celle des services, avec de grandes disparités selon le type d'activité²¹.

Ces processus de production gourmands en énergie, combinés à une croissance économique, expliquent d'ailleurs pourquoi le domaine ne devrait pas présenter de diminution de sa consommation d'énergie à l'horizon 2050, contrairement au domaine des services et aux secteurs des habitations et appareils domestiques ainsi que des transports.

La consommation d'énergie du domaine de la production de biens devrait ainsi connaître une hausse allant de +8 % à +36 % entre 2017 et 2050 selon nos projections, et ce malgré des économies pour le chauffage proportionnellement analogues à celles projetées pour les activités de services et les habitations (Fig. 23).

21 Les activités liées aux minéraux et à la métallurgie présentent des intensités énergétiques de 7 à 8 fois supérieures à la moyenne du domaine. A l'opposé, la construction affiche une intensité dix fois plus basse que la moyenne du domaine, et ce, malgré l'importance des machines dans le processus de production. Ce niveau bien plus bas s'explique par des locaux comparativement restreints, les ouvriers travaillant sur les chantiers la plupart du temps.

22 Dans tous les scénarios, l'augmentation de l'utilisation des déchets pour la chaleur de processus provient de la croissance démographique et économique et d'un taux de recyclage plus élevé. Pour sa part, l'augmentation de l'usage du bois provient de l'intensification de l'exploitation des forêts ainsi que du renoncement à l'utiliser pour chauffer les locaux.

Dans le scénario Nouveau paradigme (S3), l'utilisation des déchets est moins élevée que dans les autres scénarios, car la production de déchets serait moindre s'il devait se réaliser.

Domaine de la production de biens en 2050, par scénario

Continuité

- 5039 GWh consommés (32 % du total vaudois) et 814 Kt-éq. CO₂ émis (42 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 35 %.

Changement de cadence

- 4321 GWh consommés (34 % du total vaudois) et 706 Kt-éq. CO₂ émis (56 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 29 %.

Nouveau paradigme

- 4013 GWh consommés (38 % du total vaudois) et 513 Kt-éq. CO₂ émis (60 % des GES_E vaudoises).
- Dépendance au fossile à 20 %.

Défossiliser au mieux la génération des hautes températures puis décarboner le reste

Les techniques utilisées pour générer de la chaleur à haute température passent majoritairement par la combustion de gaz naturel (40 % de l'énergie dédiée aux processus à haute température est du gaz naturel en 2017), de déchets (27 %) et de mazout (17 %). Pour sa part, l'électricité, qui apparaît économiquement peu adéquate pour produire de la chaleur (en particulier à haute température), est utilisée à hauteur de 17 %. Or, 60 % de ce besoin de chaleur de processus en Suisse concerne des températures de 800°C ou plus (Prognos AG et al., 2021a et b).

A l'horizon 2050, le domaine de la production de biens devrait davantage recourir à la combustion de déchets (entre +466 et +621 GWh) et de bois (entre +150 et +167 GWh) jusqu'à épuisement du potentiel mobilisable pour générer de la chaleur de processus²², tandis que l'usage de l'électricité restera minoritaire (Fig. 24). Si le mazout pouvait être remplacé, la combustion de gaz naturel devrait, quant à elle, rester courante.

Fig. 23 DOMAINE DES BIENS: CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE SELON LES SERVICES ÉNERGÉTIQUES, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050

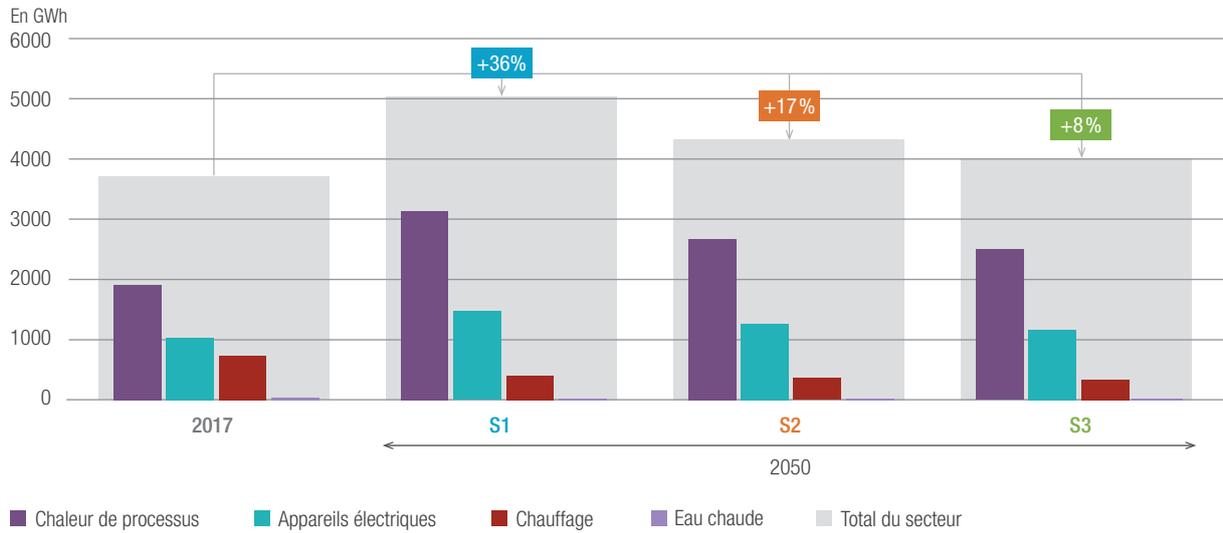
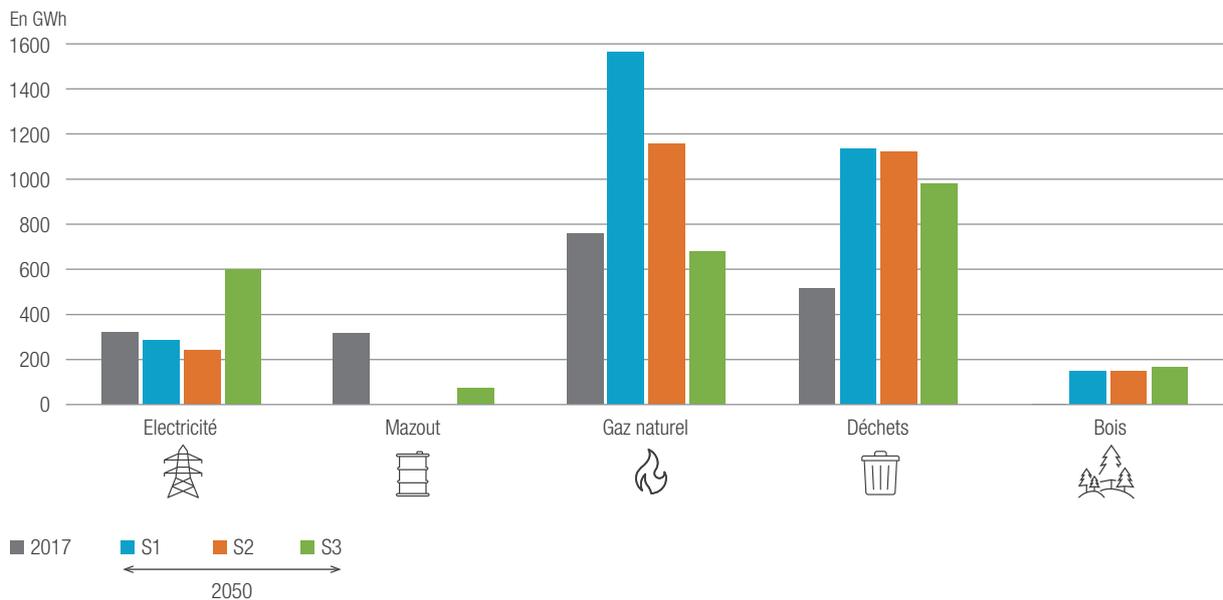


Fig. 24 DOMAINE DES BIENS: CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE POUR LA CHALEUR DE PROCESSUS, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050



La consommation de gaz naturel pour générer de la chaleur de processus, pourrait même s'accroître dans le canton de Vaud (S1 et S2), à moins de multiplier les actions pour limiter les émissions de GES (S3). La consommation d'énergie fossile pour générer de la chaleur de processus pourrait ainsi diminuer de -13 % entre 2017 et 2050, malgré une hausse de l'activité de production de biens dans le canton (voir annexe en ligne sur le domaine de la production de biens). Une telle réduction impliquerait la pleine exploitation du potentiel d'économie restant (remplacement des équipements anciens et isolation thermique supplémentaire notamment) ainsi que de recourir à des équipements électriques pour fournir des températures inférieures à 200°C (générateur de vapeur notamment). Cela marquerait un changement notable par rapport aux pratiques actuelles.

Comme le domaine de la production de biens ne devrait pas pouvoir être entièrement décarboné, atteindre la neutralité carbone impliquerait dans tous les cas d'installer des filtres permettant de capter les GES émis lors des processus de combustion. Paradoxalement, cela impliquerait de générer de la chaleur pour nettoyer les filtres ainsi qu'une augmentation de la consommation d'énergie.

Contenir la consommation d'électricité

Le fonctionnement des machines électriques (pompes, broyeurs, robots par exemple) ainsi que des dispositifs de ventilation et de climatisation constituent le deuxième poste de consommation du domaine de la production de biens. Dans un contexte d'accroissement de la demande d'électricité (pour la mobilité en particulier), les entreprises du domaine vont vraisemblablement chercher à réduire leur consommation d'électricité. Comme pour la chaleur de processus, l'usage de technologies plus efficaces devrait permettre d'atténuer la consommation d'électricité de ce poste, sans toutefois parvenir à compenser complètement la croissance des activités dans le domaine. La consommation d'électricité pour les équipements électriques et l'éclairage du domaine pourrait ainsi être comprise entre 1472 GWh (scénario 1) et 1162 (scénario 3) en 2050 contre 1028 en 2017, selon l'attention portée à l'optimisation énergétique. La différence entre ces trajectoires (310 GWh) n'est pas anodine, car elle correspond à la moitié ou plus des besoins énergétiques supplémentaires pour faire fonctionner les voitures électriques dans le canton à l'horizon 2050 (dans tous les scénarios).

Défossiliser le chauffage des bâtiments et récupérer la chaleur de processus

Une large part du tissu industriel vaudois actuel s'est développée après les années 2000. Le domaine de la production des biens dispose ainsi de locaux récents qui sont à priori énergétiquement plus efficaces que ceux du domaine des services et du secteur des habitations et appareils domestiques (voir note 19).

Les entreprises du domaine de la production de biens devraient néanmoins être en mesure de réaliser de substantielles économies pour le chauffage, avec une baisse allant de 339 à 415 GWh entre 2017 et 2050 (Fig. 23). En pourcentage, la baisse est importante et va de -44 % à -54 % sur la période. Pour parvenir à une telle performance, les entreprises du domaine devraient davantage exploiter la chaleur de processus pour chauffer les locaux (utilisation en cascade), en plus de procéder aux rénovations nécessaires. Concrètement, les rejets de chaleur liés à la chaleur de processus pourraient davantage être récupérés et être redirigés vers les locaux administratifs de l'entreprise ou vers des réseaux de chauffage à distance.

Par ailleurs, la défossilisation complète du chauffage des locaux devra passer, comme pour les autres secteurs, par le remplacement des chaudières fossiles par des dispositifs recourant à des énergies renouvelables, aux pompes à chaleur ou aux chauffages centralisés.

De telles substitutions permettraient au domaine de la production de biens de réduire le risque de ruptures d'approvisionnement (le gaz naturel étant aussi utilisé pour générer de la chaleur de processus) et de s'affranchir partiellement des énergies fossiles à l'horizon 2050.

4.4. Approvisionnement énergétique

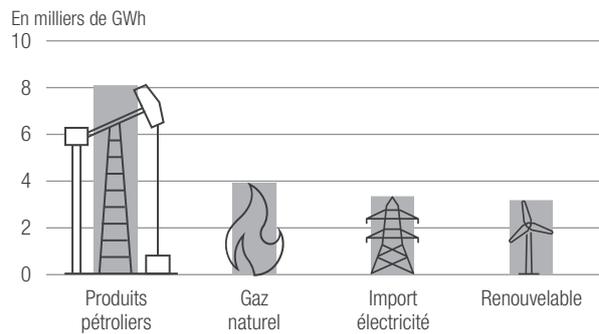
Sortie du fossile et avènement des énergies renouvelables

L'atteinte des objectifs qui jalonnent le parcours vers un monde sans émissions de GES met le système énergétique cantonal face à un défi de taille. En effet, les énergies fossiles représentent encore 67 % de la consommation d'énergie finale dans le canton de Vaud en 2017 (Fig. 25). Or, les évolutions qui se dessinent devraient se traduire par une diminution importante de l'utilisation de ces énergies pouvant aller de -40% à -82% entre 2017 et 2050 (Fig. 26).

Pour l'essentiel, cette baisse résulterait de la réduction importante de l'usage des carburants fossiles ainsi que de la diminution de l'usage du mazout pour chauffer les locaux et l'eau chaude sanitaire (ECS). Pour sa part, l'usage du gaz naturel devrait également baisser, mais dans une moindre mesure.

En 2050, la consommation finale d'électricité devrait ainsi surpasser celle des énergies fossiles, avec une augmentation qui pourrait aller de +23 % dans le scénario 1

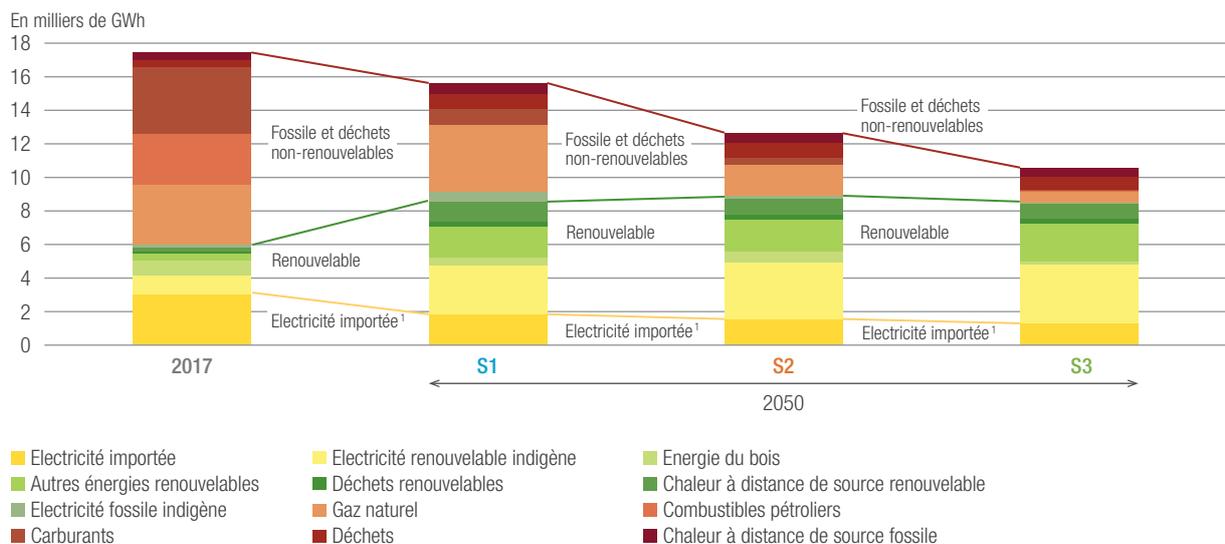
Fig. 25 RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES UTILISÉES PAR LE CANTON, VAUD, 2017



à +12% dans le scénario 3 en 33 ans, et ce essentiellement sous l'impulsion de l'électrification du parc de véhicules privés et de l'installation de pompes à chaleur.

Pour sa part, la production renouvelable vaudoise augmenterait de 136% à 155% pour répondre à une demande d'énergie certes en diminution mais toujours présente

Fig. 26 CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE SELON LES SCÉNARIOS, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050



1 Part des énergies renouvelables dans la production d'électricité, voir figure 27 en page 67.

en 2050. De manière générale, ces sources d'énergie devraient fortement augmenter afin de produire directement de la chaleur pour les locaux et de l'eau chaude sanitaire (en remplacement du mazout) ainsi que pour produire de l'électricité. En effet, le mix électrique suisse provenait à 32% de sources non-renouvelables en 2017 (Pronovo 2019).

Ce revirement profond proviendra d'actions visant à économiser l'énergie et à utiliser des alternatives d'origines renouvelables. Elle renforcera également les filières locales déjà bien en place sur le territoire.

En complément, la valorisation énergétique des déchets (ménagers, industriels, pneus usagés, etc.) restera un pilier de l'approvisionnement énergétique du canton.

L'augmentation des déchets due à la croissance démographique implique une légère progression de la disponibilité de cette ressource. Toutefois, le scénario 3, dans une optique de sobriété volontaire marquée, verrait la quantité de déchets augmenter moins fortement que dans les deux autres scénarios.

Explosion du solaire et baisse de la dépendance aux importations d'électricité

La transformation en profondeur du système de production d'énergie vaudois prendrait également appui sur un nouveau venu dans la cour des grands: le solaire. **Une explosion de la quantité d'électricité produite par des panneaux solaires** permettrait à cette ressource de produire un tiers d'énergie de plus que l'hydraulique vaudois

FIG. 27 CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE SELON LES SCÉNARIOS, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050

| | 2017 | 2050 | | |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | S1 | S2 | S3 |
| Produits pétroliers | 7 050 | 937 | 434 | 120 |
| dont: | | | | |
| Combustibles pétroliers | 3 068 | - | - | 80 |
| Carburants | 3 982 | 937 | 434 | 40 |
| dont: | | | | |
| Essence | 2 266 | 492 | 178 | - |
| Carburant diesel | 1 716 | 445 | 255 | 40 |
| Electricité¹ | 4 392 | 5 414 | 5 046 | 4 899 |
| Gaz naturel | 3 520 | 3 974 | 1 840 | 602 |
| Energie du bois² | 918 | 433 | 690 | 183 |
| Chaleur à distance | 668 | 1 779 | 1 530 | 1 461 |
| Déchets² | 561 | 1 220 | 1 220 | 1 073 |
| dont: | | | | |
| Part renouvelable des déchets | 140,24 | 304,88 | 304,88 | 268,16 |
| Autres énergies renouvelables | 374 | 1 887 | 1 909 | 2 249 |
| dont: | | | | |
| biogaz | 51 | 51 | 57 | 296 |
| Carburants biogènes | - | 260 | 149 | 347 |
| Solaire thermique | 51 | 250 | 380 | 439 |
| H2 | - | 107 | 105 | 93 |
| Chaleur ambiante | 272 | 1 218 | 1 218 | 1 075 |
| Total consommation finale | 17 482 | 15 644 | 12 668 | 10 587 |
| <i>Variation par rapport à 2017</i> | | -11 % | -28 % | -39 % |

1 Part des énergies renouvelables dans la production d'électricité, voir figure 29 en page 70.

2 Ces catégories comptabilisent uniquement les usages du bois pour la production de chaleur décentralisée et celle des déchets pour la production de chaleur haute température dans l'industrie. Par exemple, l'énergie provenant du bois utilisé pour produire de la chaleur à distance et de l'électricité via une installation de cogénération se retrouvera dans ces deux catégories (voir encadré à la page suivante).

Le cycle de l'énergie et autres termes associés

Les **ressources énergétiques**, également appelées **sources d'énergies primaires**, sont des matières qui contiennent de **l'énergie sous forme primaire**, c'est-à-dire dans son état naturel et sans avoir subi de transformation. Ces agents peuvent être exploités directement ou importés. Il s'agit par exemple de pétrole (brut), de gaz naturel, de bois, de la force du vent, de la biomasse ou encore de la chaleur ambiante.

La plupart de ces ressources doivent être **transformées** en un **vecteur énergétique** (ou **agent énergétique secondaire**), pour être transportables et utilisables¹. Ces transformations induisent des pertes d'énergie en fonction des rendements des techniques utilisées. Les vecteurs énergétiques secondaires sont par exemple l'essence, les pellets, l'électricité, le biogaz ou encore la chaleur à distance.

Ces derniers sont ensuite transportés, avec parfois des pertes liées aux réseaux, et distribués au **consommateur final**. Les consommateurs peuvent donc recevoir leur **énergie finale**, c'est-à-dire la forme exploitable d'un agent énergétique, d'un fournisseur d'énergie, de leur propre système de transformation (par exemple des PV) ou directement de la nature (bois). La quantité d'énergie livrée, produite sur site ou prélevée dans la nature pour ses propres besoins correspond à la **consommation finale d'énergie**. Par exemple la force hydraulique d'une chute d'eau (source d'énergie primaire) est transformée en énergie électrique (vecteur énergétique) puis transportée avec des pertes et finalement distribuée chez l'utilisateur qui pourra l'utiliser pour produire du froid, de la lumière ou encore du chauffage (consommation finale).

Les résultats en termes de consommation d'énergie sont donc différents selon si on s'exprime d'un point de vue des ressources ou de la consommation finale. En effet, les différentes étapes de transformation d'une ressource impliquent qu'une partie de la ressource puisse être comptabilisée sous une forme différente dans la consommation finale. C'est par exemple le cas d'une partie de la ressource bois qui ne figure pas exclusivement sous forme de bois dans la consommation finale d'énergie, mais également sous forme d'hydrogène (via la gazéification) ou de chaleur à distance.

¹ Si les ressources ne sont pas transportables, elles sont dites situationnelles. Leur valorisation ne peut se faire que là où elles se trouvent ou dans un périmètre proche. C'est par exemple le cas de la géothermie ou des rejets de chaleur industriels.

dans le scénario 1 et de devenir le poste de production le plus important dans le scénario 2 et plus encore dans le scénario 3 (**Fig. 28, Fig. 30, Fig. 31**). Dans ce dernier, cela correspond à l'installation de panneaux solaires aux performances actuelles sur une surface 12 fois plus importante qu'en 2017. Néanmoins, le rendement du solaire photovoltaïque devrait continuer d'augmenter (légèrement) à l'avenir, permettant de produire davantage d'énergie par surface couverte. Parallèlement, le prix des technologies devrait aussi continuer de baisser (Bauer et al., 2017) et le développement des systèmes de stockages, pour le moment peu accessible pour les privés, s'accroître.

Toutefois, le déploiement d'une force aussi importante de panneaux solaire ne se fera pas du jour au lendemain. Actuellement, environ 1,5 km² de toit sont couverts de panneaux solaires (PV) et 150 000 m² (0,15km²) sont installés par année. Une impulsion prononcée serait nécessaire pour couvrir les 18,5 km² qui facilitera le quasi- abandon du fossile en 2050 dans notre scénario 3.

Le rôle central du solaire permettrait en outre au mix électrique vaudois de se distancier des importations d'électricité (**Fig. 29**). En effet, les importations du canton devraient baisser tant du côté de l'électricité importée de Suisse que de l'étranger à l'avenir. Elles passeraient de 3025 GWh en 2017 à 1845 GWh dans le scénario 1 et 1299 GWh dans le scénario 3 en 2050. D'une part, la source d'approvisionnement suisse devrait progressivement s'affaiblir, à mesure que les centrales nucléaires du pays seront fermées (voir **encadré 10** en page 72). D'autre part, les sources d'approvisionnement de nos voisins devraient notablement diminuer, ces derniers cherchant également à s'affranchir des énergies fossiles et devraient donc voir leurs excédents de production électrique se réduire. En effet, il est peu probable que l'Allemagne puisse produire assez d'énergie pour continuer à en vendre à la Suisse en hiver, suite à son renoncement au nucléaire et au charbon. De même, il n'est pas sûr que la Suisse puisse rester dans le système d'échange énergétique européen,

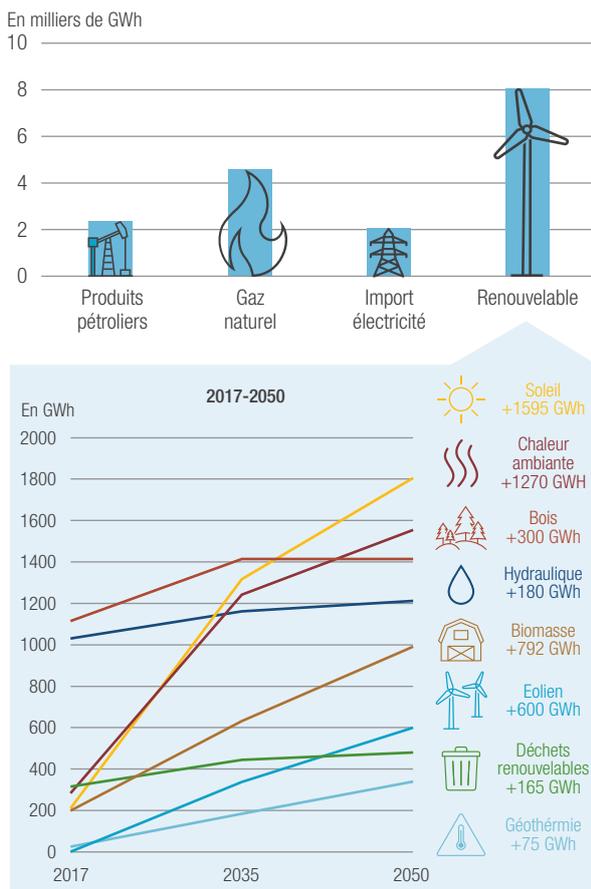
dont le fonctionnement va sensiblement évoluer à partir de 2025²³.

Le gaz naturel comme solution de transition ?

Dans nos trois scénarios, le gaz naturel est la ressource fossile la plus difficilement substituable ; c'est en effet la dernière à commencer sa décroissance dans le scénario 2 et le scénario 3. Plus le rythme de mise en place du renouvelable est rapide et soutenu, plus le gaz naturel

décroit rapidement. Dans le scénario 1, l'utilisation du gaz naturel irait même en augmentant, car il viendrait se substituer au mazout dont l'abandon ne pourrait pas être pleinement compensé par des énergies renouvelables. Il représenterait 26% de la consommation totale d'énergie en 2050 contre 20% en 2017 (Fig. 26). Ainsi, il se maintiendrait dans le secteur des ménages et pour les services et augmenterait pour la production de biens. Dans les autres scénarios, à moyen terme, l'utilisation du gaz naturel serait réduite dans le secteur des ménages et le domaine des services, exception faite de la couverture des pics de demande. Elle se maintiendrait pour la production de biens dans le scénario 2, principalement pour la chaleur haute température, alors qu'elle diminuerait dans le 3^e scénario. L'utilisation du gaz naturel augmenterait dans nos trois scénarios pour le transport de marchandises, son usage étant préférable à celui du diesel.

Fig. 28 RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES UTILISÉES PAR LE CANTON, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050, SCÉNARIO 1



Une question qui demeure est celle de la construction de centrales à gaz en Suisse pour produire de l'électricité à partir de gaz naturel importé. En effet, une centrale à gaz peut être mise en œuvre rapidement, produire une grande quantité d'électricité pilotable, mais elle augmente la dépendance aux importations et émet du CO₂. Notre scénario 1 a recourt à cette technologie car la Suisse et le canton tarderaient à diminuer leur niveau de consommation et à concrétiser leur potentiel d'électricité renouvelable. Dans le scénario 2, de plus petites centrales seraient installées pour couvrir des charges de pointe, notamment en hiver.

L'utilisation combinée de gaz naturel et de biogaz serait plébiscitée dans le scénario 3. En 2050, 33% du gaz utilisé proviendrait de la méthanisation de la biomasse vaudoise. Il est à noter que les ressources vaudoises et suisses ne permettront pas de produire assez de biogaz pour remplacer totalement le gaz naturel utilisé. Des importations sont envisagées, mais un système de certification devra être mis en place (OFEN, 2019b), pour autant qu'elles soient disponibles sur le marché. Ces importations pourraient, par exemple, servir à combler une partie des ressources renouvelables nécessaires en plus au scénario 3 pour capturer les GES émis en 2050, et ce conjointement avec une accélération encore plus marquée du renouvelable. (Fig. 31)

23 Les gestionnaires de réseaux de transport européens devront réserver au moins 70% des capacités transfrontalières pour les échanges entre les Etats membres de l'UE. Faute d'accord d'ici là, les flux avec des Etats tiers tels que la Suisse ne sont pas compris dans ces 70%, ce qui pourrait restreindre les capacités d'importation de la Suisse. Or, les négociations entamées en 2007 à ce sujet n'ont pas abouti à ce jour.

Le renouvelable amène de nécessaires pesées d'intérêts

La logique de silo s'estompe et la priorisation devient primordiale. La transition énergétique bouscule les codes et oblige le système énergétique à sortir d'une logique de silo qui préconisait un agent énergétique pour une utilisation. Cette modification serait principalement due, dans nos scénarios, à l'électrification de la société, et à la substitution des carburants et du mazout qui n'avaient qu'une seule utilité: faire rouler les véhicules pour le premier et chauffer les locaux et l'eau chaude sanitaire pour le deuxième. Toutefois, disposer d'options diverses pour l'utilisation des ressources amène également une contrainte non négligeable: la nécessité de prioriser ces utilisations.

Le bois est un bon exemple de ce besoin de priorisation. Aujourd'hui, il est majoritairement utilisé pour le chauffage décentralisé des bâtiments. Selon les scénarios, une partie de cet usage est redirigé vers les réseaux de chauffage à distance ainsi que pour la production de carburants synthétiques (diesel ou hydrogène). L'utilisation du bois pour satisfaire une partie de la demande en chaleur à haute température devrait également légèrement augmenter. De manière générale, son utilisation augmenterait de 27 % dans les scénarios 1 et 2. Elle se ferait plus parcimonieuse dans le scénario 3 avec une hausse de 13 % sur la période. En effet, le potentiel d'utilisation du bois n'est pas illimité; une gestion durable de cette ressource est nécessaire pour pérenniser son utilisation et préserver les écosystèmes forestiers ainsi que les services qu'ils rendent à la population. De plus, le bois peut être utilisé à d'autres fins qu'énergétiques, une utilisation

totale de cette ressource pour la production de biocarburant et chaleur pénaliserait ainsi d'autres marchés. Toutefois, la récolte du bois tend actuellement à diminuer à cause de la situation du marché, du coût élevé lié aux exploitations forestières et du fait que les propriétaires de forêt publique (70 % des forêts en Suisse) sont peu intéressés par la récolte (Thees, et al. 2017). Un changement dans la gestion des forêts ainsi que le développement de filières d'approvisionnement, de centrales à bois et de réseaux de distribution de chaleur seraient nécessaires pour développer son utilisation au niveau énergétique tout en préservant la biodiversité. Une utilisation aboutie de la ressource « bois » serait de l'utiliser en cascade: idéalement, le bois serait premièrement utilisé pour la construction, ensuite valorisé pour produire de la chaleur haute température, et finalement la chaleur résiduelle serait utilisée pour alimenter des réseaux de chaleur à distance. Ce type d'utilisation implique de nombreuses contraintes liées à la planification mais est exemplaire d'un point de vue énergétique et de gestion adéquate d'une ressource limitée.

Les mêmes questionnements se posent pour la biomasse agricole. Les trois scénarios quintupleraient l'utilisation de la biomasse agricole sur la période jusqu'à pleine exploitation du potentiel. Cette ressource présente l'avantage de pouvoir être stockée, elle pourrait donc servir de tampon pour contrebalancer les fluctuations des autres énergies renouvelables (Mourjane & Fosse, 2021). De plus, elle permet de produire aussi bien de la chaleur, de l'électricité que du gaz. Cet avantage nécessite également une pesée d'intérêts pour choisir le type de production et leurs quantités. Cette biomasse serait utilisée dans les scénarios 1 et 2 à 44 % pour produire de

FIG. 29 COMPOSITION DU MIX ÉLECTRIQUE VAUDOIS, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050

| | 2017 | 2050 | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | S1 | S2 | S3 |
| Imports CH et UE | 69% | 34% | 31% | 27% |
| Gaz naturel | 3% | 10% | 1% | 0% |
| Géothermie | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Energie hydraulique | 21% | 20% | 22% | 18% |
| Soleil | 3% | 23% | 30% | 39% |
| Energie éolienne | 0% | 10% | 14% | 13% |
| Ordures ménagère et déchets industriels | 3% | 2% | 2% | 2% |
| Bois | 1% | 1% | 1% | 1% |
| Total des ressources en GWh | 4851 | 6047 | 5536 | 5581 |



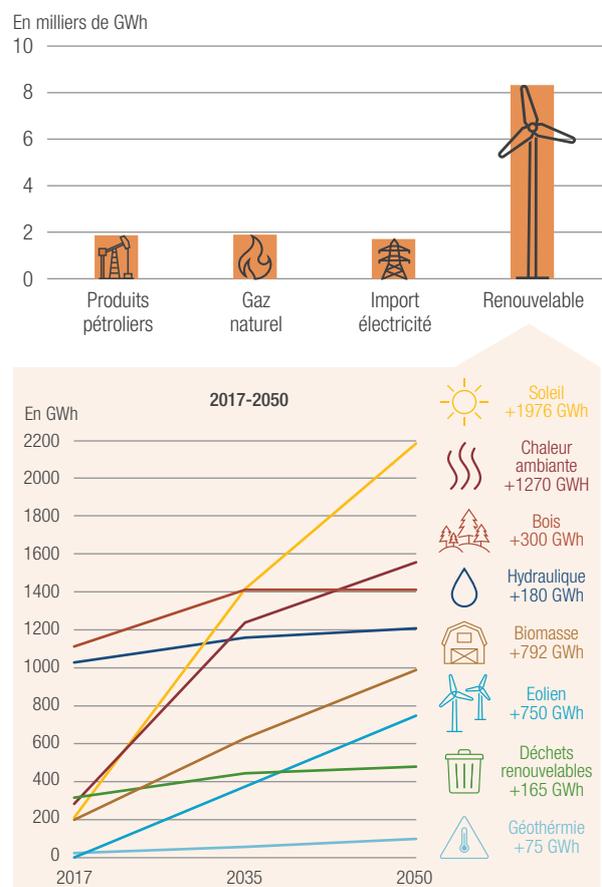
la chaleur à distance, 36 % d'électricité et 20 % de biogaz en 2050. Le scénario 3 verrait une réorientation apparaître avec la production uniquement de biogaz. Toutefois, les chaînes d'approvisionnement ainsi que les technologies convertissant la biomasse en énergie devraient être optimisées et développées pour atteindre cet objectif. L'utilisation de la biomasse agricole rencontre également des défis économiques, notamment car les petites exploitations doivent se rassembler pour permettre une production rentable. Actuellement, aucune installation vaudoise n'injecte son gaz dans le réseau car il est plus rémunérateur, grâce aux subventions, de produire de l'électricité. De plus, les quantités de co-substrats (de nos jours des déchets de laiterie) sont très réglementés quant à leur type et leur provenance, limitant la croissance de la production en l'état actuel.

La production se relocalise, tout comme son emprise territoriale. Actuellement, la majorité de l'énergie utilisée dans le canton est extraite et produite à l'étranger ou hors de son territoire. Cela a pour conséquence d'occulter l'impact de notre propre consommation d'énergie sur l'environnement et sur notre société en général. L'essor du renouvelable rapatrie cette production et ses effets sur le territoire vaudois, la rendant tangible par la population.

Au niveau du canton, 19 parcs éoliens, dont 151 machines, sont prévus dans le Plan directeur cantonal. La production de ces parcs pourrait potentiellement

couvrir 25 % de la consommation électrique actuelle du canton. Sept projets éoliens ont d'ores et déjà fait l'objet d'un dossier mis à l'enquête sur sol vaudois, ils font tous face à différentes oppositions et recours. Depuis janvier 2018, date d'entrée en vigueur au niveau fédéral de la nouvelle loi sur l'énergie, les arrêts des tribunaux en faveur des parcs éoliens se font cependant plus fréquents. Sur les dix décisions émises par les cours cantonales et fédérales, un seul a été en défaveur de l'énergéticien. Actuellement, deux projets sont toujours en attente des déterminations du tribunal fédéral. Cette accélération tendancielle se traduit par la création d'environ 10 parcs éoliens d'ici 2050 dans notre scénario 1. Trois de plus seraient construits dans les scénarios 2 et 3. La production d'électricité éolienne étant plus importante durant les mois d'hiver, elle constitue un complément

Fig. 30 RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES UTILISÉES PAR LE CANTON, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050, SCÉNARIO 2



Encadré 10 Le nucléaire suisse

De nos jours, le nucléaire sert à produire 32 % de l'électricité suisse. La législation en place ne fixe pas de durée de vie pour les centrales nucléaires, elles peuvent être exploitées tant qu'elles sont sûres. Depuis 2019, les exploitants, tout comme l'OFEN¹, tablent sur une possible durée d'exploitation de 60 ans, 10 ans de plus que les précédentes prévisions, voyant le développement des forces éoliennes, géothermiques et hydrauliques prendre du retard. Ce faisant, la centrale de Leibstadt pourrait rester en fonction jusqu'en 2044, renforçant l'écart avec la durée de vie moyenne des centrales européennes qui ne dépasse pas 31,4 années².

Les coûts post-exploitation et de désaffectation des cinq centrales sont estimés à 5,3 milliards de francs. Ceux liés à gestion des déchets à 19,2 milliards de francs. Ces dernières estimations datent de 2016, lorsque la durée d'exploitation des centrales était estimée à 50 ans.

1 RTS (2019a, 2 octobre) et RTS (2019b, 9 décembre).

2 Le Temps (2016, 25 novembre).

intéressant durant ces périodes de consommation plus élevée et de production renouvelable plus limitée (solaire et hydraulique). Néanmoins, les installations éoliennes font face à de grandes difficultés d'acceptation de la part de la population. C'est notamment le nombre des turbines et des parcs projetés, leur impact sur le paysage et les écosystèmes, ainsi que l'état de préservation de leurs zones d'implantations qui font obstacles (PNR 70; Balthasar & Schalcher, 2020). Une meilleure intégration des aspects sociaux et territoriaux, notamment en matière de communication, de participation de la population et de partage des plus-values, permettrait de favoriser le développement de ces projets éoliens (Cherqui, 2019).

Une autre production renouvelable qui a une forte emprise territoriale est l'hydraulique. Les projets de petite hydraulique sont complexes et font donc face à de nombreuses oppositions et difficultés. De plus, actuellement ils sont encore difficilement rentables sans subventions. Pour sa part, la grande hydraulique est fragilisée par les prix fluctuants de l'électricité, par l'incertitude de l'ouverture totale du marché et les changements climatiques (DGE, 2021). Au niveau cantonal, environ 75 % du potentiel hydraulique pour la production hydroélectrique est actuellement déjà exploité. Dans les scénarios 1 et 2, 90 % du potentiel hydraulique serait utilisé d'ici à 2050 grâce à des agrandissements et optimisation des installations déjà existantes ainsi que l'exploitation de nouveaux sites. Le scénario 3, tourné vers la sobriété et la durabilité, n'augmenterait pas la pression sur les écosystèmes aquatiques et se contenterait de maintenir les installations en place.

Le solaire, s'il n'est pas posé sur des infrastructures déjà existantes ou des zones déjà fortement exploitées par l'humain, peut également avoir un impact non négligeable sur son environnement. Le solaire photovoltaïque serait notamment installé dans les scénarios 1 et 2 sous forme de parcs solaires alpins. Cette solution, préconisée par les principaux acteurs de l'énergie, est moins sollicitée dans le scénario 3 qui place l'équilibre entre environnement et production énergétique de manière différente que les deux premiers scénarios, dans une démarche de protection des écosystèmes et de l'environnement.

La profonde modification des manières de produire l'énergie pousse le système d'approvisionnement à être repensé

L'augmentation de la production de renouvelable irait de pair, dans nos 3 scénarios, avec une décentralisation et une montée en puissance des producteurs. Un courant inverse de centralisation de production de la chaleur via des réseaux thermiques se mettrait également en place dans le scénario 3. Le cas des CAD a notamment été exemplifié dans le chapitre sur les ménages.

Les infrastructures du réseau électrique suisse ont été construites dans l'optique de transporter de l'électricité produite de manière constante par des centrales, par essence centralisées. La multiplication des producteurs décentralisés modifierait donc le profil des flux de charge et de tension du réseau. Cela ferait émerger un besoin d'interconnexion croissant, de renforcement et de flexibilité du réseau. Le réseau actuel aurait donc besoin

Encadré 11 Gaz et liquides de synthèse

Les gaz et liquides de synthèse renouvelables pourraient jouer un rôle dans la décarbonisation du système énergétique vaudois, notamment dans le secteur des transports et celui de l'industrie, ainsi que pour le stockage de l'énergie.

Prenons l'exemple de l'hydrogène (H₂). Ce dernier peut être produit par décomposition de l'eau via des techniques d'électrolyse (*power-to-gas*). Cet hydrogène peut ensuite servir à la fabrication de combustibles et carburants (méthane, hydrocarbures de synthèse) ou être stocké. A priori, l'hydrogène semble ne présenter que des atouts. Il serait une solution intéressante pour le stockage inter-saisonnier : l'électricité excédentaire en été servirait à produire cet hydrogène qui pourrait, après méthanisation, être gardé en réserve puis reconverti en électricité lors des périodes de plus faible production. De plus, son utilisation directe, via des piles à combustible, ou après transformation en carburant de synthèse, serait un bon complément à la voiture électrique pour décarboner le secteur des transports, l'électricité étant moins adaptée aux véhicules utilitaires. Finalement son développement pourrait être utilisé pour générer de la chaleur de haute température nécessaire à la production dans l'industrie.

Toutefois, des facteurs d'incertitudes majeurs demeurent quant à l'utilisation de l'hydrogène à large échelle dans le canton. En effet, plusieurs limitations entrent en jeu tout au long du parcours allant de sa production à son utilisation :

- Le rendement global lié à la production, au stockage et à l'utilisation de l'hydrogène est actuellement faible. Les multiples conversions sont autant de pertes d'énergie subies. L'ADEME (2021b) a calculé un rendement final de 22 % pour la chaîne allant de la production à l'utilisation finale de l'hydrogène.
- La chaîne de formation de l'H₂ requiert de l'électricité et de l'eau pour l'électrolyse, ainsi que du CO₂ en cas de méthanation. Dans le but d'utiliser ce vecteur pour la fabrication de carburant de synthèse ou pour l'utilisation à large échelle dans les piles à combustible, il faudrait produire un surplus massif d'électricité utilisable uniquement à cette fin. Or, la Suisse et le canton ne disposent pas de ressources électriques illimitées. Seule une explosion du solaire PV (via son extension sur toute structure pouvant l'accueillir) ou des importations permettraient de fournir en quantité suffisante et de manière régulière ces carburants de synthèse et cet hydrogène (OFEV, 2022).
- En cas de production de biométhane, la question de la disponibilité du CO₂ se pose également, il pourrait être capté directement lors de processus émettant ce type de gaz, ou extrait de l'atmosphère via des systèmes de capture directe dans l'air.
- Dans tous les cas, une certaine emprise territoriale est nécessaire et surtout les coûts liés à ces installations s'ajouteraient aux coûts déjà importants de transformation de l'hydrogène. Ce sont finalement ces coûts de transformation qui représentent la dernière limitation. Actuellement, les technologies liées à l'hydrogène sont onéreuses et peu compétitives par rapport à leur équivalent électrique. La production à bas prix ne pourrait se faire que dans des régions qui présentent des excédents importants d'électricité renouvelable. Les investissements pour permettre le stockage chimique longue durée sont également des freins au développement de ce vecteur énergétique (E-Cube, 2018).

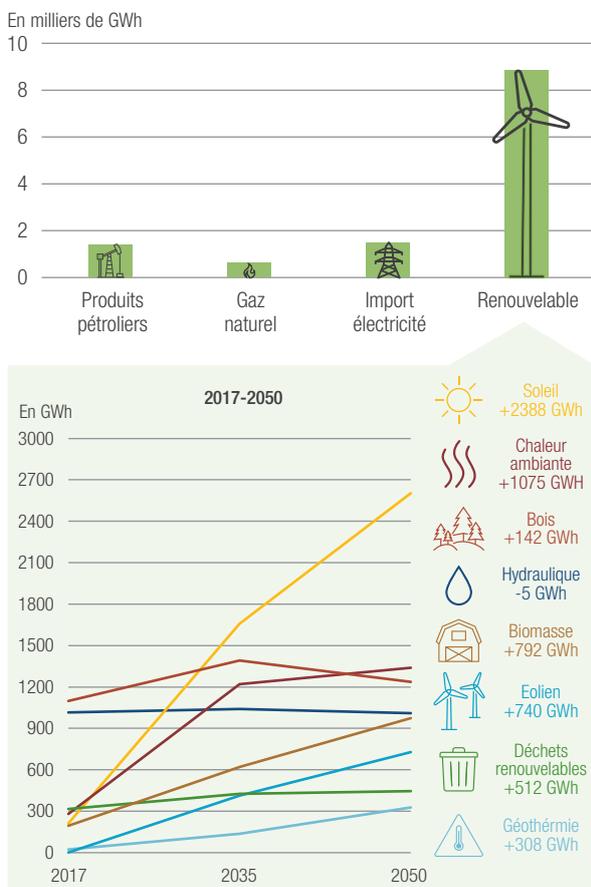
Au final, l'ampleur du rôle que jouera l'hydrogène et les autres gaz et liquides de synthèse dans la transition énergétique sera déterminée par plusieurs facteurs, dont le développement des alternatives électriques, les investissements initiaux dans ce type de technologie, la diminution des coûts, notamment liés à l'effet d'échelle, ainsi que les capacités et les prix d'importation de ces vecteurs énergétiques.

d’être modernisé afin de répondre aux changements du système énergétique. La convergence des différents vecteurs d’énergie, les micro-réseaux ainsi que l’utilisation du numérique (*smart-grid*, *smart-meters*) devraient se développer (E-Cube, 2018).

De nouveaux modèles d’entreprises commencent déjà à se développer actuellement. Par exemple, certaines entreprises installent des panneaux photovoltaïques «gratuitement» sur le toit des clients et en contre-partie deviennent leur fournisseur d’électricité. Ce modèle, appelé *contracting* énergétique, pourrait s’appliquer à d’autres formes d’énergie renouvelable à l’avenir. Certains fournisseurs évolueraient aussi vers un modèle plus participatif permettant aux clients d’acquérir des parts



Fig. 31 RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES UTILISÉES PAR LE CANTON, VAUD, 2017 ET PROJECTIONS 2050, SCÉNARIO 3



dans des installations de grandes ampleurs. Des coopératives énergétiques qui regroupent de petits investisseurs particuliers commencent également à émerger. La vente d’électricité entre particulier est la prochaine étape (Ebers Broughel, 2019). Les modèles d’économie de plateforme pourraient jouer un rôle à ce niveau-là avec par exemple la vente sur des plateformes de type «peer-to-peer» ou encore des contrats d’achats directs à long terme avec des producteurs d’énergie renouvelable. Ces différentes modifications seraient rendues possibles par la mise en place de systèmes multi-énergies décentralisés qui combindraient chaleur, électricité et gaz via des technologies de conversion pour répondre de manière locale à la demande des consommateurs (E-Cube, 2018; PNR 71; Balthasar & Schalcher, 2020). La mise en œuvre de l’ensemble de ces transformations va prendre du temps et nécessitera parfois des adaptations législatives et pratiques.

5. Enseignements et conclusions

Cette étude, centrée sur la transition énergétique du canton de Vaud à l'horizon 2050, aborde un large ensemble d'activités, car l'énergie se situe au cœur de tous les domaines de la vie quotidienne. Cet exercice prospectif traite ainsi des évolutions possibles de la consommation d'énergie des secteurs des habitations et appareils domestiques, des transports et de la production de biens et services. Il examine également l'approvisionnement nécessaire pour répondre à cette consommation.

Aborder un thème aussi vaste à un horizon aussi lointain, implique inévitablement d'opérer des simplifications et de renoncer à l'exhaustivité. C'est aussi se confronter à de nombreux futurs et bifurcations possibles. Malgré tout, les résultats qui ressortent de cette étude, bien qu'assortis d'incertitudes, permettent de tirer plusieurs enseignements spécifiquement en lien avec le système énergétique (section 5.1) ainsi que des constats éclairant la marche en cours de la transition énergétique dans le canton de Vaud (section 5.2). Par ailleurs, la section 5.1 met en lumière les leviers d'action en lien avec la transition énergétique.

5.1. Enseignements en lien avec le système énergétique

Reconstruire le système

La transition énergétique du canton nécessitera une modification profonde du système énergétique. **Il s'agira en effet de construire de nouveaux segments de ce système, en particulier pour produire et distribuer de l'énergie renouvelable, mais également pour capter le CO₂ toujours émis.** Ce système devra également être rénové, une bonne partie des équipements utilisés devraient être remplacés par des équivalents plus efficaces et/ou fonctionnant au renouvelable. L'ensemble de ces travaux nécessitera la mobilisation de montants d'investissements importants se chiffrant en milliards de francs par an à l'horizon 2050 (voir **encadré 12** en page 79), ces derniers seraient toutefois compensés notamment par de substantielles baisses des coûts de l'énergie dues à la diminution des importations de produits fossiles.

Plusieurs éléments vont conditionner la vitesse et l'ampleur de ces modifications. Nous pouvons citer par exemple le temps de vie des installations, les conditions cadres, l'adhésion des différents acteurs de la société, les modalités de financement, les habitudes et la disponibilité en main-d'œuvre. Ces trois derniers points sont étayés ci-dessous :

Arbitrage. La répartition des investissements liés à la transition énergétique touche tous les acteurs de la société vaudoise, elle impactera notamment l'économie, la cohésion sociale et également la compétitivité du canton. Plusieurs questions se posent : qui finance ? comment ? les investissements sont-ils répartis entre plusieurs acteurs ? quel horizon temporel est pris en compte ? comment lisser les investissements ? quel mécanisme financier pour lever la barrière de l'accès au capital ?

Les réponses à ces questions peuvent dicter la marche de la transition énergétique, mais également influencer de manière positive ou négative la rentabilité des entreprises, tout comme elles peuvent grever le budget des ménages.

Habitudes et connaissances. L'assainissement énergétique du bâti, véritable fer de lance de la réduction de consommation d'énergie des logements et locaux commerciaux, passe notamment par l'isolation thermique ainsi que le remplacement des installations de chauffage par des alternatives renouvelables. L'accélération de ces travaux sera premièrement tributaire du savoir-faire des différents acteurs du domaine. En effet, les pratiques sont fortement influencées par les technologies à disposition, mais également par les habitudes et connaissances des artisans ainsi que les réglementations en vigueur. L'information à disposition des propriétaires ainsi que leurs aspirations entrent également en jeu. Bien souvent, les rénovations n'ont pas comme objectif principal les économies d'énergie et leur planification ne permet ainsi pas de répondre pleinement à ce but perçu par ces derniers comme secondaire.



Assainir

La réduction de la demande d'énergie repose fortement sur la rénovation du bâti visant l'assainissement énergétique des logements et locaux commerciaux. Les travaux d'isolation ainsi que le remplacement des installations de chauffage fossile par des solutions renouvelables en sont le fer de lance.



Electrifier

Les besoins en électricité dans le canton vont rapidement s'accroître. Cette hausse découlera principalement de l'électrification des véhicules ainsi que du recours marqué aux pompes à chaleur. La pose de panneaux solaires photovoltaïques permettra une réponse adéquate à cette nouvelle donne.



Produire

La production d'énergie se veut renouvelable et locale. La rapidité de mise en place ainsi que la vitesse de déploiement détermineront le niveau de dépendance aux importations et à la captation de gaz à effet de serre pour atteindre la neutralité carbone territoriale. Or, les capacités d'importation et de mise en place de techniques de captation restent hautement incertaines.

Pénurie de main-d'œuvre. Le manque de connaissances est amplifié par une pénurie de main-d'œuvre qualifiée, qui va aller en s'aggravant au vu de la forte demande à venir. Le recrutement ainsi que la formation de personnel spécialisé dans les métiers liés à la transition énergétique est un défi, tout comme une opportunité pour le canton. En effet, cette augmentation de la demande aura une retombée économique intéressante si le canton arrive à y répondre avec des forces de travail indigènes.

Les moteurs de la transformation du système énergétique sont interdépendants. Favoriser la formation des jeunes dans les métiers liés à la transition énergétique requiert des investissements. Tout comme la sensibilisation des acteurs du domaine, cette dernière passera également par la formation initiale et continue. **Un des dénominateurs communs à ces leviers d'action est le besoin de prise de conscience pour passer à l'action: convaincre de la nécessité d'une transition énergétique profonde et rapide pour sécuriser l'avenir du canton.** Cette conviction, partagée par tous les acteurs de la société, permettra de construire le système énergétique de 2050.

Des modes de vie plus sobres

Les modifications structurelles du système énergétique ne suffiront pas à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Ce n'est que de concert avec des modes de vie et de travail plus sobres que la consommation d'énergie se réduira suffisamment pour que la production d'énergies renouvelables puisse être suffisante pour y répondre en 2050. Les changements de comportements sont donc de puissants leviers d'action, qu'ils soient pensés de manière individuelle ou collective.

Accompagner les changements de comportements. Cependant le poids des habitudes est lourd quand il s'agit de modifier des routines et des automatismes. Pour qu'un individu puisse changer son comportement en matière de consommation énergétique, il doit premièrement disposer de connaissances sur les impacts de sa consommation. Puis, il doit avoir la volonté de changer, et enfin trouver l'opportunité ainsi que les capacités de le faire. Les normes sociales et les pratiques sont les principaux déterminants des actions individuelles, car elles définissent le cadre de ce qui est vu comme souhaitable.

Or, des études ont montré qu'en 2020 les questions énergétiques ne faisaient pas partie des priorités des Suisses et Suissesses (PNR 71, 2020). La consommation énergétique est souvent impalpable et beaucoup ont l'impression de ne pas connaître les actions permettant d'économiser efficacement de l'énergie et se contentent de petits gestes à l'impact souvent anecdotique.

Cependant, les prémisses d'un changement de normes sociales se fait sentir. Les mouvements pour le climat montrent depuis déjà quelques années que les jeunes se soucient de l'avenir climatique. Plus récemment, la guerre en Ukraine a mis en exergue la dépendance massive du canton aux importations d'énergies (84%), et a rendu le peuple suisse plus conscient des limites du système énergétique actuel. Dans un avenir proche, l'augmentation de l'autoconsommation pourrait également permettre de ramener l'attention sur l'énergie. Les prosommateurs sont beaucoup plus au fait des pics de leur



Sensibiliser

L'atteinte de la neutralité carbone requiert l'adhésion de tous les pans de la société. L'information ainsi que la formation sont centrales. La prise en compte des différents acteurs liés à l'énergie, mais également de la population et de ses aspirations sera indispensable.



Encadrer

La trajectoire de la transition énergétique est fortement dépendante des régulations mises en place pour en dessiner le contour. La coordination de la multiplicité des acteurs tant au niveau international, fédéral, cantonal que communal, ainsi que les dynamiques intrinsèques du système sont un défi.



Financer

Le financement ainsi que la répartition des investissements de la transition énergétique est une question cruciale. L'équilibre doit être trouvé pour ne pas grever le budget des ménages tout en conservant la prospérité économique cantonale.

production photovoltaïque par exemple, ainsi que de la consommation de leur ménage.

Les pratiques actuelles pourraient tendre à davantage de sobriété si les tendances en cours sont favorisées et soutenues. Les changements individuels peuvent être renforcés par des incitations, des obligations, des interdictions (réglementation) mais également des informations, des changements de perception de la société (par exemple l'effet *flygskam* ou la honte de prendre l'avion) ou encore par l'éducation des plus jeunes.

L'acceptation de ces nouveaux modes de vie plus sobres énergétiquement doit se construire, elle gagnerait à se faire de manière plus inclusive des différents acteurs publics et privés.

Mutualiser. Dans une optique de limitation de l'utilisation des ressources énergétiques, tout en conservant un même confort de vie, la mutualisation est une piste intéressante. Elle peut se décrire comme le passage de la propriété à l'usage, du privé au commun. La mutualisation, et de manière plus générale la sobriété, pousse à réfléchir aux réels besoins, notamment en termes de manière de se chauffer, de surface de vie nécessaire ou encore de modes de déplacement et de distance parcourue. Puis d'adapter les usages pour se passer de ce qui n'est pas indispensable tout en conservant un confort de vie choisi.

Ce faisant, elle permet entre autres de raccourcir le temps d'amortissement des équipements et installations. La mutualisation se manifeste de manière croissante, elle permet de gérer la multiplication des usages et des acteurs à différents niveaux.

- Elle peut tout d'abord se mettre en place au niveau des espaces de vie pour limiter les m³ à construire puis à chauffer. Le partage d'une buanderie commune dans un immeuble est de la mutualisation, ce principe peut aussi s'appliquer pour des ateliers, des salles de réception, de jeux ou encore de bureau par exemple.
- Une autre dimension de la mutualisation qui permet de réduire la consommation d'énergie, est celle des transports. Le train, le bus ou encore le partage de véhicule (*car sharing*) en sont des exemples parlants.
- Un autre levier d'action de la mutualisation pour soutenir la transition énergétique est la mise en commun des infrastructures énergétiques et des ressources. Le développement de réseaux thermiques ainsi que la convergence des réseaux, mais également la potentielle mise en place de micro-réseaux permettant la création de coopératives d'auto-consommateurs en sont un aperçu.

La mise en commun d'infrastructures, de surfaces ou de gestion des flux nécessite un tissu territorial et social connecté. Des conditions cadres adaptées pourraient favoriser ce type de pratique. Souplesse et flexibilité deviendraient des maîtres mots.

Produire durablement pour se distancer des importations

L'objectif de sortie des énergies fossiles et du nucléaire rend l'accroissement de la production renouvelable indispensable. Celui de réduction de la



Connecter

Le profil des acteurs liés au système énergétique va se transformer à l'avenir, avec notamment la décentralisation de la production énergétique découlant du développement des énergies renouvelables. Cette modification des usages amène un besoin de connexion plus important. Les réseaux devront gagner en flexibilité notamment pour s'ajuster à l'intermittence de certaines productions renouvelables.



Employer

Les modifications profondes du système énergétique requièrent un savoir-faire et une main-d'œuvre qualifiée. Dans un contexte de pénurie déjà présent, la formation, le recrutement et la valorisation des emplois dans ce domaine sont primordiaux.



Conserver

La capacité d'adaptation aux changements climatiques du canton, et de toute autre région, est intrinsèquement liée à la qualité de ses écosystèmes naturels, ces derniers représentant notamment d'importants puits de carbone. La conservation des milieux naturels doit continuer à peser à sa juste valeur dans la balance lors des arbitrages liés à la transition énergétique.

Encadré 12 Enjeux financiers en lien avec le système énergétique de demain

L'estimation des montants concernés dans le canton dépasse largement le cadre de cette étude centrée sur les flux énergétiques. Toutefois, il nous est possible d'éclairer la question sur la base des éléments rassemblés pour cette étude.

La construction du nouveau système énergétique de 2050 requerra des investissements importants afin de développer la production d'énergies renouvelables et d'accroître l'efficacité énergétique des bâtiments, des transports et de l'industrie (rénovations, nouveaux appareils, etc.). Parallèlement, la facture énergétique baissera à mesure que la consommation des combustibles et des carburants fossiles diminuera.

Selon une estimation du Conseil fédéral (2021), les coûts supplémentaires nets pour atteindre la neutralité carbone territoriale s'élèveraient à l'échelle nationale à environ 73 milliards de francs entre 2020 et 2050, soit 2,4 milliards par an sur la période (2021)¹.

Toutefois, les montants en jeu sont beaucoup plus importants, car la transition énergétique passera par la mobilisation de montants dont l'essentiel serait de toute façon dépensé, étant donné la durée de vie des équipements. A titre indicatif, les investissements de ce type à l'échelle nationale s'élèveraient à 1400 milliards de francs d'ici à 2050. Cette somme permet de maintenir le système énergétique en fonction. Les 73 milliards supplémentaires (8 % des coûts de fonctionnement du système) permettraient de le rendre compatible avec les objectifs de neutralité carbone.

A la lumière de ces montants, il est indéniable que la transition énergétique présente des enjeux financiers importants. L'un d'entre eux est d'orienter le flux d'investissements vers les technologies énergétiquement souhaitées. Sur ce point, il s'agit en particulier de rendre possible des investissements pourtant rentables individuellement, mais qui ne seraient pas réalisés faute de moyens disponibles ou de rentabilité suffisamment rapide. Un autre enjeu est d'assurer collectivement le probable coût net supplémentaire de la transition énergétique ainsi que de répartir équitablement les montants en jeu.

¹ Ce montant correspond à la différence entre les coûts supplémentaires nécessaires (109 milliards pour les investissements et 14 pour l'exploitation) et les économies d'environ 50 milliards de francs sur les coûts évités pour l'importation d'énergie fossile ($109+14-50=73$).

Ce chiffrage se base pour l'essentiel sur une transition énergétique reposant sur des solutions techniques et n'impliquant pas de changements importants de modes de vie, ni un usage plus intensif des transports publics. Le coût mentionné n'inclut donc pas les coûts des équipements et des infrastructures qu'un tel usage pourrait impliquer.

dépendance énergétique implique que cette production soit mise en place localement.

D'ici à 2050, il est fort probable que le canton ne puisse pas se passer totalement des importations d'énergie. En effet, les activités cantonales ne seraient pas complètement affranchies des énergies fossiles, même dans le scénario 3, *Nouveau paradigme*, qui prévoit des investissements et des changements de comportement substantiels. De plus, l'importation d'électricité serait nécessaire pour combler les variations saisonnières des productions locales qui n'auraient pas encore atteint leur plein potentiel à l'horizon 2050. Or, les incertitudes sur les quantités d'énergie disponibles à l'étranger pour l'importation laissent planer le risque de pénurie durant les hivers, périodes de basse production d'énergies renouvelables et de besoins énergétiques élevés, notamment pour le chauffage.

D'une manière générale, l'intensité et la temporalité de mise en place du renouvelable indigène sera un facteur prépondérant pour déterminer combien de temps le canton devra continuer à importer massivement de l'énergie. Cette question est essentielle tant du point de vue de la neutralité carbone, des besoins de captations futurs que de la réduction des risques de pénurie.

Se départir des énergies fossiles. Au-delà, des considérations liées aux émissions de GES, se départir des énergies fossiles présente plusieurs autres avantages en termes d'approvisionnement énergétique. En effet, les questions de sécurité d'approvisionnement sont sous le feu des projecteurs depuis le début de la guerre en Ukraine. Les menaces de pénurie ainsi que la hausse des prix de l'énergie rendent tangibles les risques liés à un système basé fortement sur les importations de



ressources énergétiques. Or, les incertitudes quant à l'usage et la disponibilité des énergies fossiles pourraient croître ces prochaines décennies, en raison de la volonté globale de réduction des GES, de la montée des rivalités géostratégiques et de la croissance de la demande mondiale en énergie, alors que les ressources fossiles sont limitées (Van de Graaf, 2015). A priori, la production d'énergies renouvelables dans le canton devrait être rentable par rapport à la poursuite des importations, car les prix de l'électricité devraient augmenter. Cela dit, même si cela ne devait pas être le cas, l'éventuel coût supplémentaire peut être vu comme le prix de la garantie contre des flambées de prix, voire des risques de *blackout*, aux conséquences humaines et économiques supérieures (Auzanneau, 2021).

Importation d'électricité. En plus de permettre le remplacement des énergies fossiles, le développement rapide des énergies renouvelables a pour avantage de réduire la dépendance du canton aux importations d'électricité, qui devraient encore représenter 17 % de la consommation énergétique du canton en 2023 selon nos estimations. Or, réduire cette dépendance risque d'être nécessaire, car les quantités d'énergie qui pourront être importées dans le canton vont probablement diminuer.

Sur le plan helvétique, la sortie du nucléaire va en effet nécessiter de produire davantage d'électricité via les autres modes de production locale, cette filière produisant 29 % de l'électricité du pays en 2021. Sur le plan extérieur, les conditions d'un renchérissement voire

d'un tarissement partiel des importations d'électricité sont réunies.

A court et moyen terme, plusieurs facteurs se combinent. D'une part, les centrales nucléaires françaises en arrêt partiel depuis une année rencontrent de nouveaux problèmes techniques. D'autre part, l'Allemagne a décidé de sortir du nucléaire et voit en outre sa production d'électricité dans ses centrales à gaz diminuer en raison du tarissement des importations de gaz russe.

A plus long terme, la neutralité carbone étant un objectif planétaire, chaque pays va vraisemblablement d'abord chercher à remplacer sa consommation de fossile par sa propre production renouvelable avant de se tourner vers l'export (Hache et al., 2019). De plus, l'électrification généralisée des sociétés fera augmenter la demande en électricité dans les pays traditionnellement fournisseurs, réduisant d'autant leurs intérêts à exporter. A ce propos, les états de l'Union européenne (UE) sont à présent tenus de réserver 70 % des capacités de leurs réseaux à la disposition du négoce d'électricité interne à l'Union d'ici à 2025. Cette échéance s'approchant, l'incertitude quant aux capacités d'importation de la Suisse vont grandissantes, car les négociations, débutées en 2007, concernant l'accès de la Suisse au marché européen de l'électricité n'ont pas abouti à ce jour.

Importation de gaz renouvelables et de biocarburant. Certains vecteurs énergétiques, comme l'hydrogène, les

biocarburants liquides ou le biogaz pourraient être d'une grande utilité pour décarboner les transports de marchandises ou encore certains processus industriels. Toutefois, le potentiel de production de ces alternatives aux énergies fossiles étant limité sur le sol suisse, leur utilisation dépendra fortement des capacités d'importation. Or, la Suisse n'est pas la seule à se tourner vers ces solutions pour décarboner son secteur énergétique.

- Les quantités de biogaz produites durablement au niveau européen et disponibles pour l'export sont incertaines. Le biogaz étant injecté dans le même réseau que le gaz naturel, des certifications d'origines devront également être mises en place.
- Les importations d'hydrogène sont encore plus conditionnelles, la création de réseaux de distributions européens et la négociation d'accords pour pouvoir s'y raccorder reste une incertitude élevée quant à sa potentielle utilisation en Suisse.
- Le constat est différent pour le biocarburant: sa production à large échelle est sous le feu des projecteurs pour ses impacts sociaux et environnementaux. En effet, sa production intensive requiert de larges cultures de plantes nourricières. Ces plantes, qui pourraient servir à l'alimentation, servent plutôt à faire rouler les voitures des pays développés de manière verte. La production à partir de plantes non-nourricières à large échelle est encore en phase de développement. En Suisse, ce sont des plantes non-nourricières (principalement du bois) qui sont utilisées de manière durable, limitant les capacités de production indigène.

En outre, la Suisse cherche à accroître sa souveraineté énergétique. Dans ce contexte remplacer les importations de produits fossiles par des importations d'autres agents énergétiques, aussi durables fussent-ils, ne résoudrait pas cette problématique.

Produire localement et durablement. Les énergies renouvelables sont indéniablement moins polluantes que les énergies fossiles. Pour autant, leur production n'est pas neutre et peut dégrader les environnements naturels et humains dans lesquels elles prennent place. Cette production nécessite également des ressources naturelles et de l'espace. Or, les écosystèmes fournissent des «services» à l'humain qui sont à la base de son mode de vie actuel (nourriture, protection, etc.) et qui jouent un rôle majeur dans l'atténuation des changements climatiques en cours (puits de carbone, cycle de l'eau etc.).

Tenir compte des écosystèmes implique de réfléchir de manière systémique et de penser l'énergie de manière circulaire. Il s'agit par exemple de prioriser les lieux d'implantation de certaines productions dans des zones déjà fortement anthropisées et connectées, ou encore d'utiliser les différentes ressources énergétiques en cascade (ex. du bois au chapitre 3.2). Maximiser la complémentarité des sources renouvelables sera aussi un défi pour répondre à l'intermittence de la production de certaines énergies (solaire et éolien notamment) et aux difficultés de stockage. Ce type d'optimisation peut permettre d'atténuer une partie des impacts négatifs, mais pas de les éliminer totalement. De ce fait, les arbitrages nécessaires pour sortir des énergies fossiles devraient également comprendre une réflexion sur le niveau des besoins énergétiques auxquels il est souhaitable de répondre. Autrement dit, **il s'agit de prioriser notre consommation d'énergie et de tenter aussi de se passer de ce qui n'est pas indispensable: une unité supplémentaire d'énergie évitée est en principe à privilégier à une unité à produire en plus, même si elle est renouvelable** (DGE, 2021). La gestion future de l'énergie consistera donc à coordonner les besoins et les sources, non seulement en termes de quantités mais aussi d'horaires, à valoriser les complémentarités et à générer des synergies entre voisins, à différentes échelles (Maréchal, 2021), tout en préservant les écosystèmes et le bien-être humain. En résumé, il conviendra de concilier au mieux les défis énergétiques, écologiques, économiques et sociaux (PNR 70 & 71 ; Balthasar & Schalcher, 2020 ; ADEME, 2021a) pour aller vers un avenir soutenable.

5.2. Constats en lien avec le chemin vers la neutralité carbone

Cette section rassemble les principaux constats éclairant la marche en cours de la transition énergétique dans le canton. Ces derniers, en ligne avec ceux obtenus par le GIEC à l'échelle mondiale, sont les suivants :

- **Atteindre l'objectif fixé par le canton de Vaud de neutralité carbone territoriale à l'horizon 2050 est un défi considérable et possible.** Le défi est de taille, puisqu'il consiste à s'affranchir autant que possible des énergies fossiles en 29 ans, alors qu'elles devraient encore représenter entre 62 % et 64 % de la consommation d'énergie dans le canton en 2023 selon nos estimations (contre 66 % en 2017).

Le défi est néanmoins possible, car le potentiel de développement des énergies renouvelables dans le canton devrait permettre de répondre aux besoins énergétiques à l'horizon 2050, pour autant que de substantielles économies d'énergie aient pu être réalisées d'ici-là. Ces dernières s'obtiendraient par l'assainissement énergétique des bâtiments et des processus industriels, en se dotant d'équipements plus efficaces et par des changements de pratique allant de leur adaptation à la sobriété.

Différence notable par rapport à aujourd'hui, la production indigène et les importations devront également couvrir l'énergie nécessaire pour capter une partie des émissions de GES qui n'auraient pas pu être évitées. L'autre partie sera potentiellement captée à l'étranger ou par des moyens naturels (reforestation). L'atteinte de la neutralité carbone sera donc étroitement liée, d'une part et prioritairement, à notre capacité à réduire au maximum les émissions de gaz à effet de serre ainsi que, d'autre part, au développement de solutions de captation permettant d'atteindre le « zéro émission nette » ; ces dernières dépendant notamment des capacités d'importations d'énergie de l'étranger.

- **Se départir largement des énergies fossiles à l'horizon 2050 est possible pour autant que les cadences soient accélérées au plus tôt.** Du côté de la production, il faudrait notamment accroître la quantité d'énergie d'origine renouvelable produite dans le canton par un multiple compris entre 2,4 et 2,6 entre 2017 et 2050. De manière simultanée, il faudrait que la consommation d'énergie puisse être réduite de 30 %

à 40 % (scénarios 2 et 3), ce qui est 2,6 à 3,8 fois plus rapide que la baisse attendue sans nouvelles impulsions (scénario 1). Autrement dit, si les cadences de déploiement du renouvelable et des mesures d'efficacité énergétique ne s'intensifient pas rapidement, les évolutions souhaitées se matérialiseraient avec un « retard » mesuré en décennies.

De plus, si elles n'augmentent pas rapidement, alors le besoin d'accélérer le rythme deviendra plus criant. Par exemple, il faudrait installer 2 fois plus de panneaux photovoltaïques chaque année, si les cadences augmentent dès 2025 et 3,3 fois plus si elles n'augmentent qu'à partir de 2035. Dès lors, il convient d'agir au plus tôt, car pour qu'une telle accélération se produise, encore faut-il que les conditions physiques, financières et légales nécessaires soient réunies et mises en place (main-d'œuvre, aides ou taxes, etc.).

- **Réaliser la transition énergétique ne sera vraisemblablement possible qu'avec des changements de pratiques et davantage de sobriété, car les solutions techniques uniquement ne devraient pas suffire.** Le déploiement de solutions techniques prendrait trop de temps (en plus d'être plus coûteuses), si des changements de pratiques ne venaient pas renforcer la baisse de la consommation d'énergie. Ces changements peuvent être basés sur la modération, le renoncement mais également être liés à la volonté d'optimiser les moyens techniques disponibles (par exemple, avec l'essor du photovoltaïque, il vaudra mieux laver son linge le jour, plutôt que la nuit). A titre indicatif, les changements de pratiques liés à la modération (par exemple la baisse de la température de chauffage ou le choix de loisirs de proximité) prévus dans le scénario 3, *Nouveau paradigme*, permettraient une économie d'énergie de 820 GWh. Loin d'être anodine, cette quantité équivaut à 12 % de la diminution totale prévue sur la période. Sans ces comportements plus sobres, le canton aurait besoin de six années de croissance de production d'énergies renouvelables supplémentaires pour arriver au même résultat, ou alors il aurait fallu installer 34 % de panneaux photovoltaïques supplémentaires sur la période. Dès lors, sans changements de pratiques, les risques de pénuries seraient plus élevés.

- **Les émissions vaudoises de CO₂ ne s'inscriront dans une trajectoire compatible avec l'objectif de contenir le réchauffement climatique en dessous de 1,5 C° que si elles sont durablement négatives après 2050.** Les temps de mise en œuvre des changements nécessaires ne devraient pas permettre de réduire suffisamment vite les émissions de GES dans le canton pour être compatible avec ce but en 2050, quand bien même la neutralité carbone arriverait être atteinte à cet horizon. En effet, le cumul des émissions dans le canton dépasserait le budget carbone théorique compatible avec un tel réchauffement dès 2030, selon notre projection la plus ambitieuse, prévoyant pourtant une transformation importante du système énergétique ainsi que des changements notables de pratiques de consommation dans le canton. Dès lors, le canton et la Suisse gagneraient à renforcer au plus tôt leurs capacités de captation en favorisant autant que possible celles de type naturel. De même, ce résultat confirme que l'adaptation constitue un élément incontournable de l'enjeu climatique.

Outre ces constats territoriaux, il ressort implicitement de cette étude que **la contribution vaudoise à la lutte pour le climat et l'environnement gagnerait à prendre également en compte les émissions occasionnées hors de son territoire.** En effet, la difficulté de se passer des énergies fossiles pour la production de chaleur à haute température ne s'arrête pas aux frontières helvétiques. Elle concerne même tout particulièrement la transformation des minerais qui se retrouvent dans les composantes de nombreux biens fabriqués ou importés dans le canton. Or, il paraît peu probable que les pays en développement où se situe ce type de production puissent se départir des énergies fossiles aussi rapidement que les régions plus développées. Dès lors, l'attention portée aux émissions extraterritoriales prendra de l'importance dans le canton à mesure que la transition énergétique sera complétée.

A ce propos, les parties prenantes vaudoises peuvent agir sur ces émissions en actionnant différents leviers. Ces derniers vont d'une organisation plus circulaire de l'économie du canton, à des aides financières ou techniques pour réduire ou capter des émissions de GES. Ces leviers comprennent également la modération de la consommation de biens et services importés. D'une manière générale, de telles mesures pourraient avoir un effet multiplicateur par le signal positif qu'elles impulseraient. Il en va de même pour l'atteinte de la neutralité carbone territoriale par l'exemplarité qu'elle donnerait.



Bibliographie

- ADEME. (2021a).** *Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat.* Rapport. Angers: ADEME.
- ADEME. (2021b).** *Vecteur hydrogène dans la transition énergétique. Avis de l'ADEME.* Angers: ADEME.
URL : <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/1429-vecteur-hydrogene-dans-la-transition-energetique.html>
- Auzanneau, M. (2021).** L'inexorable déclin du pétrole: L'Union européenne, première victime de la pénurie?. *Futuribles*, 443, 65-74.
URL : <https://doi.org/10.3917/futur.443.0065>
- Balthasar, A. & Schalcher, H.R. (2020).** *Recherche pour l'avenir énergétique de la Suisse.* Résumé du Programme national de recherche «Énergie». Comités de direction des Programmes nationaux de recherche «Virage énergétique» (PNR 70) et «Gérer la consommation d'énergie» (PNR 71), Fonds national suisse.
URL : <https://nfp-energie.ch/fr/projects/1000/>
- Bauer, C. Hirschberg S. (eds.), Bäuerle, Y. Biollaz, S. Calbry-Muzyka, A. Cox, B. Heck, T. Lehnert, M. Meier, A. Prasser, H.-M. Schenler, W. Treyer, K. Vogel, F. Wieckert, H.C. Zhang, X. Zimmermann, M. Burg, V. Bowman, G. Erni, M. Saar, M. Tran, M.Q. (2017).** Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies. PSI, WSL, ETHZ, EPFL. [Mandant: OFEN]. Paul Scherrer Institut, Villigen PSI: Switzerland. Berne: Confédération Suisse.
URL : <https://www.psi.ch/sites/default/files/import/lea/HomeEN/Final-Report-BFE-Project.pdf>
- Ben Yitzhak, L. (2015).** La croissance, une affaire d'énergie. *CNRS le journal*.
URL : <https://lejournal.cnrs.fr/articles/la-croissance-une-affaire-denergie>
- Cherqui, A. (2019).** *La gouvernance des projets éoliens en Suisse occidentale. Analyses comparées de quatre controverses territoriales* [Thèse de doctorat, Université de Lausanne]
- Cipolla, C. (1961).** Sources d'énergie et histoire de l'humanité. *Annales. Economies, sociétés, civilisations*. 16^e année (3), 521-534.
URL : www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1961_num_16_3_420740
- CODA Stratégies. (2021).** *La climatisation dans le bâtiment. Etat des lieux et prospective 2050. Rapport final.* Angers: ADEME.
- Conseil d'Etat. (2020a).** *Stratégie du Conseil d'Etat vaudois pour la protection du climat. Plan climat vaudois – 1^{er} génération.* Vaud.
URL : https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/climat/fichiers_pdf/202006_Plan_climat.pdf
- Conseil d'Etat. (2020b).** *Stratégie du Conseil d'Etat vaudois pour la protection du climat. Plan climat vaudois – 1^{er} génération. Document de synthèse.* Vaud.
URL : https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/accueil/fichiers_pdf/2020_juin_actus/Strat%C3%A9gie_du_Conseil_d%E2%80%99%C3%89tat_vaudois_pour_la_protection_du_climat_-_Document_de_synth%C3%A8se.pdf
- Conseil d'Etat. (2022, 11 juillet).** Le Conseil d'Etat entend assurer l'avenir du canton en garantissant une société libre, durable et uni [Communiqué de presse]. Vaud.
URL : https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/organisation/ce/fichiers_pdf/221107Communiqu%C3%A9_programme_de_l%C3%A9gislation.pdf
- Conseil d'Etat. (2023).** *Programme de législature 2022-2027.* Vaud.
URL : https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/organisation/ce/fichiers_pdf/PL2022-2027_vFINAL-petit.pdf

Conseil fédéral. (2021). *Stratégie climatique à long terme de la Suisse* [Etat au 27 janvier]. Berne: Confédération Suisse.
URL : <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/klima/fachinfo-daten/langfristige-klimastrategie-der-schweiz.pdf.download.pdf/>
<https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/klima/fachinfo-daten/langfristige-klimastrategie-der-schweiz.pdf.download.pdf/Strat%C3%A9gie%20climatique%20%C3%A0%20long%20terme%20de%20la%20Suisse.pdf>

Conseil fédéral. (2022). *Captage et stockage du CO₂ (CSC) et technologies d'émission négative (NET)*. Rapport du Conseil fédéral. Berne: Confédération Suisse
URL : <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/71506.pdf>

DGE – Direction générale de l'environnement. (2021). *Conception cantonale de l'énergie - CoCEn*. [Adoptée par le Conseil d'Etat le 19 juin 2019]. Vaud. Lausanne: Canton de Vaud
URL : https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/energie/fichiers_pdf/1356.015_Publication_CoCEn_2021.08.06.pdf

Dupret M., Zimmermann J.-P., Andreau N., Guernevel M., Enertech. (2021). *Panel usages électrodomestiques – Consommations électrodomestiques françaises basées sur des mesures collectées en continu dans 100 logements. Rapport final*. Angers: ADEME

Ebers Broughel, A. Stauch, A., Schmid, B. & Vuichard, P. (2019). *Consumer (Co-) Ownership in Renewables in Switzerland*. in *Energy Transition* (451- 476), Cham: Palgrave Macmillan.

Ecoplan-KPMG. (2020). *Scénarios par branche et leur régionalisation*. [Mandants: ARE, OFEN et SECO].
URL: Rapport: <https://www.bk.admin.ch/dam/bk/de/dokumente/strategische-fuehrungsunterstuetzung/Wirtschaftsszenarien/branchenszenarien-2017-bis-2060.pdf.download.pdf/Branchenszenarien%202017%20bis%202060.pdf>
URL: Données: https://zenodo.org/record/4276987#.YbxrG9_gmUk

E-Cube. (2018). *Synthèse de l'étude sur les perspectives stratégiques dans le secteur de l'énergie*, France: Commission de régulation de l'énergie.
URL : http://fichiers.cre.fr/Etude-perspectives-strategiques/1SyntheseGenerale/Perspectives_Strategiques_du_secteur_de_l_energie_Synthese_generale_FR.pdf

GIEC – Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2021). *Climate Change 2021 The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Switzerland: IPCC.
URL : https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

GIEC - Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2022). *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Switzerland: IPCC.
URL : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf

Global Carbon Budget. (2021). *Global carbon budget 2021. Earth System Science Data Discussions*. [Data set téléchargé en décembre 2021]. Global Carbon Project.
URL : <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/>

Hache, E. Carcanague, S. Bonnet, C. Seck, G. & Simoën, M. (2019). *Vers une géopolitique de l'énergie plus complexe? Revue internationale et stratégique*, 113, 71-81.
URL : <https://doi.org/10.3917/ris.113.0071>

Jorio L. (2022, 26 07). *Quand l'air conditionné contribue au réchauffement de la planète*. *Swissinfo.ch*
URL : <https://www.swissinfo.ch/fre/economie/quand-l-air-conditionn%C3%A9-contribue-au-r%C3%A9chauffement-de-la-plan%C3%A8te/47746760>

Le Temps. (2016, 25 novembre). *Les centrales suisses sont plus âgées qu'ailleurs dans le monde*.

Maréchal, F. propos recueillis par J. Perret. (2021, 10 05). « *Coordonner les besoins et les sources pour optimiser la gestion de l'énergie* ». TRACES.
URL : <https://www.espazium.ch/fr/actualites/coordonner-les-besoins-et-les-sources-pour-optimiser-la-gestion-de-lenergie>

- Marti, T. Sulzer, M. Rüdüsüli, M. et al. (2022).** L'approvisionnement énergétique de la Suisse jusqu'en 2050. Synthèse des résultats et des bases. in AES - Association des entreprises électriques suisses (2022). « *Avenir énergétique 2050* ». Scénarios pour l'avenir énergétique et climatique. Aarau: AES.
URL : www.avenirenergetique2050.ch
- Meyer J.-H. (2020).** Idées, acteurs et pratiques politiques de l'histoire environnementale européenne. *Encyclopédie d'histoire numérique de l'Europe*, mis en ligne le 26/11/20, consulté le 21/01/2023.
URL : <https://ehne.fr/fr/node/21453>
- Moreau, V. & Vuille, F. (2018).** Decoupling energy use and economic growth: Counter evidence from structural effects and embodied energy. *Applied energy*, 215(C), 54-62.
- Mourjane, I. & Fosse, J. (2021).** *La biomasse agricole: quelles ressources pour quel potentiel énergétique ?*. Document de travail N°2021-03. Paris: France Stratégie.
URL : https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-dt_-_biomasse_agricole_-_quelles_ressources_pour_quel_potentiel_energetique_-_29-07-21.pdf
- NCCS – National Center for Climate Services & Météo Suisse – Office fédéral de la météorologie et de la climatologie. (2021).** *Changements climatiques dans le canton de Vaud – Ce que l'on sait et ce qui est attendu dans le futur*. (Version 1.0). Zurich: Confédération Suisse.
URL : <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/cantons/vaud.html>
- Nick, S. & Thalmann, P., EPFEL-ENAC-LEURE. (2022).** *Rapport d'audit du plan climat vaudois 1^{re} génération*. [Mandant: Etat de Vaud – Unité du Plan Climat].
- OFEN – Office fédéral de l'énergie. (2019a).** *Stratégie du programme SuisseEnergie 2021 à 2030*. Berne: Confédération Suisse.
URL : <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/office-federal-de-lenergie/le-programme-suisseenergie/strategie.html>
- OFEN - Office fédéral de l'énergie. (2019b).** *Rôle futur du gaz et de l'infrastructure gazière dans l'approvisionnement énergétique de la Suisse*. Berne: Confédération Suisse.
- OFEV – Office fédéral de l'environnement. MétéoSuisse – Office fédéral de météorologie et de climatologie & NCCS – National Center for Climate Services. (2020).** *Changements climatiques en Suisse. Indicateurs des causes, des effets et des mesures*. Berne: Confédération Suisse.
- OFEV – Office fédéral de l'environnement. (2023).** *Indicateurs de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en Suisse*. Berne: Confédération Suisse.
URL : https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/klima/fachinfo-daten/kenngroessen_thg_emissionen_schweiz.pdf.download.pdf/Kenngroessen_2022_FR.pdf
- OFS – Office fédéral de la statistique. (2022).** *Approvisionnement énergétique*. Berne: Confédération Suisse.
URL : <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/energie/approvisionnement.html>
- PNR 70 – Programme National de recherche 70.** *Virage Énergétique*.
- PNR 71 - Programme National de recherche 71.** *Gérer la consommation d'énergie*.
URL : <https://nfp-energie.ch/fr/program>
- Prognos AG. INFRAS AG. TEP Energy GmbH. & Ecoplan AG. (2021a).** *Perspectives énergétiques 2050+. Digression: Electricité hivernale. Approvisionnement en électricité de la Suisse au semestre d'hiver*. [Mandant: OFEN]. Berne: Confédération Suisse.
- Prognos AG. INFRAS AG. TEP Energy GmbH. & Ecoplan AG. (2021b).** *Energieperspektiven 2050+ Exkurs Negativemissionstechnologien und CCS Potenziale, Kosten und Einsatz*. [Mandant: OFEN]. Berne: Confédération Suisse.
- Pronovo. (2019).** *Cockpit du marquage de l'électricité*. [Mandant: OFEN]
URL : <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/56389.pdf>
- PSI – Paul Scherrer Institut. (2020).** *La mobilité de demain. Magazine de l'institut*. 2020(1),1-40.
URL : https://issuu.com/paul-scherrer-institute/docs/5232_1-2020_f?fr=sZml3MTMxNTM0NQ

- Quantis. (2017).** *Inventaire cantonal des émissions de gaz à effet de serre.* [Mandant: Etat de Vaud].
URL : https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/climat/fichiers_pdf/InventaireGES_20180425.pdf
- Quantis. (2021).** *Bilan des émissions de gaz à effet de serre du canton de Vaud.* [Mandant: Etat de Vaud].
URL : https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/accueil/fichiers_pdf/2022_juin_actus/Bilan_%C3%A9missions_gaz_%C3%A0_effet_de_serre_dans_le_canton_de_Vaud.pdf
- RTS. (2019a, 2 octobre).** *La durée de vie théorique des centrales nucléaires revue à la hausse.*
URL : <https://www.rts.ch/info/suisse/10753269-la-duree-de-vie-theorique-des-centrales-nucleaires-revue-a-la-hausse.html>
- RTS. (2019b, 9 décembre).** *Les exploitants visent 60 ans de vie pour les centrales nucléaires suisses.*
URL : <https://www.rts.ch/info/suisse/10932290-les-exploitants-visent-60-ans-de-vie-pour-les-centrales-nucleaires-suisses.html>
- Schumacher, R. Moreau, A. & Lacroix, J. (2021).** *Perspectives démographiques pour le canton de Vaud: scénarios cantonaux 2021-2050, scénarios régionaux 2021-2040.* Lausanne: Statistique Vaud.
- SIPaL. Groupe de travail «développement durable». (2018).** *Habiter demain. Jalons. 13.*
URL : https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/organisation/dinf/sipal/fichiers_pdf/Jalon_13_web.pdf
- Streicher, K. N. Padey, P. Parra, D. Bürer, M. C. Schneider, S. & Patel, M. K. (2019).** Analysis of space heating demand in the Swiss residential building stock : Element-based bottom-up model of archetype buildings. *Energy and Buildings*, 184, 300-322.
URL : <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.011>
- Thees, O. Burg, V. Erni, M. Bowman, G. & Lemm, R. (2017).** *Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung.* Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
URL : <https://www.wsl.ch/fr/news/2017/08/la-biomasse-un-pilier-important-de-la-transition-energetique.html>
- Union Pétrolière Suisse. (2018).** *Rapport annuel 2018.* Zurich: EV/UP.
- Van de Graaf, T., & Verbruggen, A. (2015).** The oil endgame: Strategies of oil exporters in a carbon-constrained world. *Environmental Science & Policy*, 54, 456-462.

Acronymes

Unité de mesure

| | |
|------------------------|--|
| CAD | Chauffage à distance |
| CCS | Captage et stockage du CO ₂ (Carbon Capture and Storage en anglais) |
| CH ₄ | Méthane |
| CO ₂ | Dioxyde de carbone |
| DACCS | Direct air carbon capture and storage |
| ECS | Eau chaude sanitaire |
| éq. CO ₂ | Equivalent CO ₂ |
| GES | Gaz à effet de serre |
| GES _E | Gaz à effet de serre en lien avec le système énergétique |
| GWh | Gigawattheure |
| H ₂ | Hydrogène |
| Kt-éq. CO ₂ | Milliers de tonnes d'équivalent CO ₂ |
| kWh | Kilowatttheure |
| Mt-éq. CO ₂ | Millions de tonnes d'équivalent CO ₂ |
| PAC | Pompe à chaleur |
| PIB | Produit intérieur brut |
| PRG | Potentiel de réchauffement climatique global |
| PV | Panneau solaire photovoltaïque |
| t-éq. CO ₂ | Tonnes d'équivalent CO ₂ |
| TP | Transports publics |
| TWh | Térawatttheure |
| W | Watt |

Entités institutionnelles et administratives, organisations ou entreprises

| | |
|--------|---|
| ADEME | Agence de la transition écologique (pour la France) |
| BP | British petroleum |
| DFA | Département des finances et de l'agriculture |
| DGE | Direction générale de l'environnement |
| DGIP | Direction générale des immeubles et du patrimoine |
| DGMR | Direction générale de la mobilité et des routes |
| DIREN | Direction de l'énergie |
| DCIRH | Département de la culture, des infrastructures et des ressources humaines |
| DJES | Département de la jeunesse, de l'environnement et de la sécurité |
| EPFL | Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne |
| GIEC | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat |
| NCCS | National Center for Climate Services |
| OFEN | Office fédéral de l'énergie |
| OFEV | Office fédéral de l'environnement |
| OFS | Office fédéral de la statistique |
| PSI | Paul Scherrer Institut |
| SIPaL | Service immeubles, patrimoine et logistique |
| StatVD | Statistique Vaud |
| TCS | Touring Club Suisse |
| TL | Transports publics lausannois |
| UNIGE | Université de Genève |
| UPCL | Unité du Plan climat |

Glossaire

| | |
|---|--|
| Accord de Paris | est un instrument juridiquement contraignant sous la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (Convention sur le climat, CCNUCC). Il comporte des éléments visant à réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre par étapes successives. |
| Adaptation | en biologie, l'adaptation correspond à l'ajustement fonctionnel des individus et espèces à leur environnement. Dans les systèmes humains, l'adaptation concerne également l'ajustement des systèmes économiques et sanitaires, notamment face aux changements climatiques. |
| Analyse du cycle de vie | méthode d'évaluation permettant de comparer les impacts environnementaux d'un système tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication à son traitement en fin de vie (mise en décharge, recyclage, etc.), en passant par ses phases d'usage, d'entretien et de transport. |
| Atténuation des changements climatiques | réduction des émissions de GES visant à atténuer les impacts climatiques. |
| Budget carbone | quantité totale de GES que l'on peut encore émettre dans l'atmosphère, tout en permettant de limiter le réchauffement climatique global sous un seuil défini. Par exemple 1,5°C ou 2°C au-dessus des niveaux de l'ère préindustrielle. |
| Captation de carbone | consiste à extraire le CO ₂ de l'atmosphère. Les techniques de captation peuvent être de nature chimique (tel que des filtres) ou naturelle (tel que reboisement). |
| Emissions GES totales | somme des émissions de GES territoriales et extra-territoriales. |
| Emissions territoriales de GES | émissions GES émises directement sur un territoire qu'elles soient liées au système énergétique ou qu'elles proviennent d'autres activités humaines. |
| Emissions territoriales de GES_E liées à l'énergie | émissions liées à la consommation d'énergie à l'intérieur des frontières cantonales. |
| Emissions extraterritoriales de GES | émissions des GES émises en dehors des frontières cantonales mais en lien avec les activités humaine du canton. Par exemple, les émissions produites par le procédé industriel pour la fabrication d'un produit manufacturé produit en dehors du canton et utilisé par la population vaudoise résidente. |
| Energie finale | ensemble des énergies délivrées prêtes à l'emploi à l'utilisateur final, comme le litre d'essence dans le réservoir, l'électricité disponible à sa prise, etc. Cette énergie finale n'est qu'une fraction de l'énergie primaire initiale, une fois que celle-ci a été transformée en énergie secondaire, stockée, transportée et enfin distribuée au consommateur final. |

| | |
|--|---|
| Energies renouvelables | énergies provenant de sources d'énergie dont le rythme de renouvellement naturel est supérieur à celui de leur consommation. Le fait qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine dépend donc fortement de la manière dont elles sont exploitées et de l'impact de cette exploitation sur les ressources initiales. |
| Gaz à effet de serre (GES) | gaz qui contribuent à l'effet de serre en absorbant le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et en le redistribuant. L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre est le principal facteur à l'origine du réchauffement climatique. |
| Neutralité carbone | équilibre entre les émissions de gaz à effet de serre provoquées par les activités humaines et le CO ₂ qui peut être capté avant qu'il ne se diffuse dans l'atmosphère (évitement) ou qui peut en être retiré (extraction). |
| Prosommateurs | consommateurs d'énergie qui sont également producteurs d'énergie renouvelable. |
| Ressources énergétiques | ressources également appelées sources d'énergies primaires, qui sont des matières contenant de l'énergie sous forme primaire, c'est-à-dire dans son état naturel et sans avoir subi de transformation. Ces agents peuvent être exploités directement ou importés. |
| Séquestration de carbone | captation du carbone atmosphérique (CO ₂) et immobilisation, par exemple dans les sols, par un phénomène physico-chimique naturel ou des procédés industriels. |
| Zéro émission nette ou neutralité carbone | est un état d'équilibre entre les émissions anthropiques de GES et leur retrait de l'atmosphère par l'humain ou de son fait. Pour atteindre la neutralité carbone (soit zéro émission nette), les émissions de GES produites par l'activité humaine doivent être réduites considérablement et celles que l'on ne peut que (très) difficilement éviter doivent être activement retirées de l'atmosphère. |

Remerciements

Nous remercions les spécialistes consultés dans le cadre de deux ateliers «micro-scénarios sectoriels» ayant servi à construire le présent rapport¹:

Atelier «Habitations et appareils domestiques»

- M. Alain Boccato, Responsable du groupe Bâtiments Durables – Arc Lémanique, Planair.
- M. Yves Golay, Adjoint au directeur général et responsable de la construction durable à la DGIP, Etat de Vaud.
- M. Luis Marcos, Responsable de l'unité Energétique du bâtiment, DGE-DIREN.
- Mme Marlyne Sahakian, Professeure assistante, UNIGE.

Atelier «Mobilité des personnes»

- M. Christophe Jemelin, Membre de la Direction, Responsable de l'unité Développement de l'Offre, TL
- M. Yves-Stéphane Kellenberger, Président Section Vaud, TCS
- M. Christian Liaudat, Responsable de domaine, DCIRH-DGMR, Etat de Vaud
- M. Emmanuel Ravalet, Associé-fondateur, Chef de projet, Mobil'homme

Nous remercions également les nombreuses et nombreux spécialistes de l'Administration cantonale vaudoise et fédérale pour leurs précieux apports. Les échanges furent particulièrement utiles avec celles et ceux de la DIREN, de la DGMR, de l'UPCL ainsi que de l'OFEN.

Nos remerciements vont également à tous les proches et collègues qui nous ont aidés et qu'il n'est hélas pas possible de citer nommément.

1 Les fonctions sont celles occupées lors du déroulement de ces ateliers en 2021.

Membres du comité de pilotage:

Aline Clerc, Directrice ad intérim, DIREN, DJES (depuis avril 2023)
Christian Liaudat, Responsable de domaine, DGMR, DCIRH
Carole Martin, Cheffe d'office, StatVD, DFA
Vincent Moreau, Chargé de cours, UNIGE
Alexandre Oettli, Responsable de section, StatVD, DFA
Marc Roulin, Directeur adjoint, DIREN, DJES (jusqu'en février 2023)
François Vuille, Délégué à la transition énergétique, DGE, DJES

Rédaction du rapport

Aline Buri, StatVD
Marc-Jean Martin, StatVD

Equipe de projet

Aline Buri, StatVD
Xiang Li, EPFL
Marc-Jean Martin, StatVD
Michaël Weber, DIREN

Participation

Ariane Bovet, StatVD
Sylviane Brandt, StatVD
Adeline Cherqui, StatVD
Steve Ducommun, DIREN
Cécile Hediger, StatVD
Reto Schumacher, StatVD

Responsable de publication

Carole Martin, StatVD

Mise en page

Statistique Vaud

Crédit photo

© Adobe Stock



STATISTIQUE VAUD
Département des finances
et de l'agriculture (DFA)

© Statistique Vaud
Rue de la Paix 6
1014 Lausanne
T +41 21 316 29 99
www.vd.ch/statvd
info.stat@vd.ch