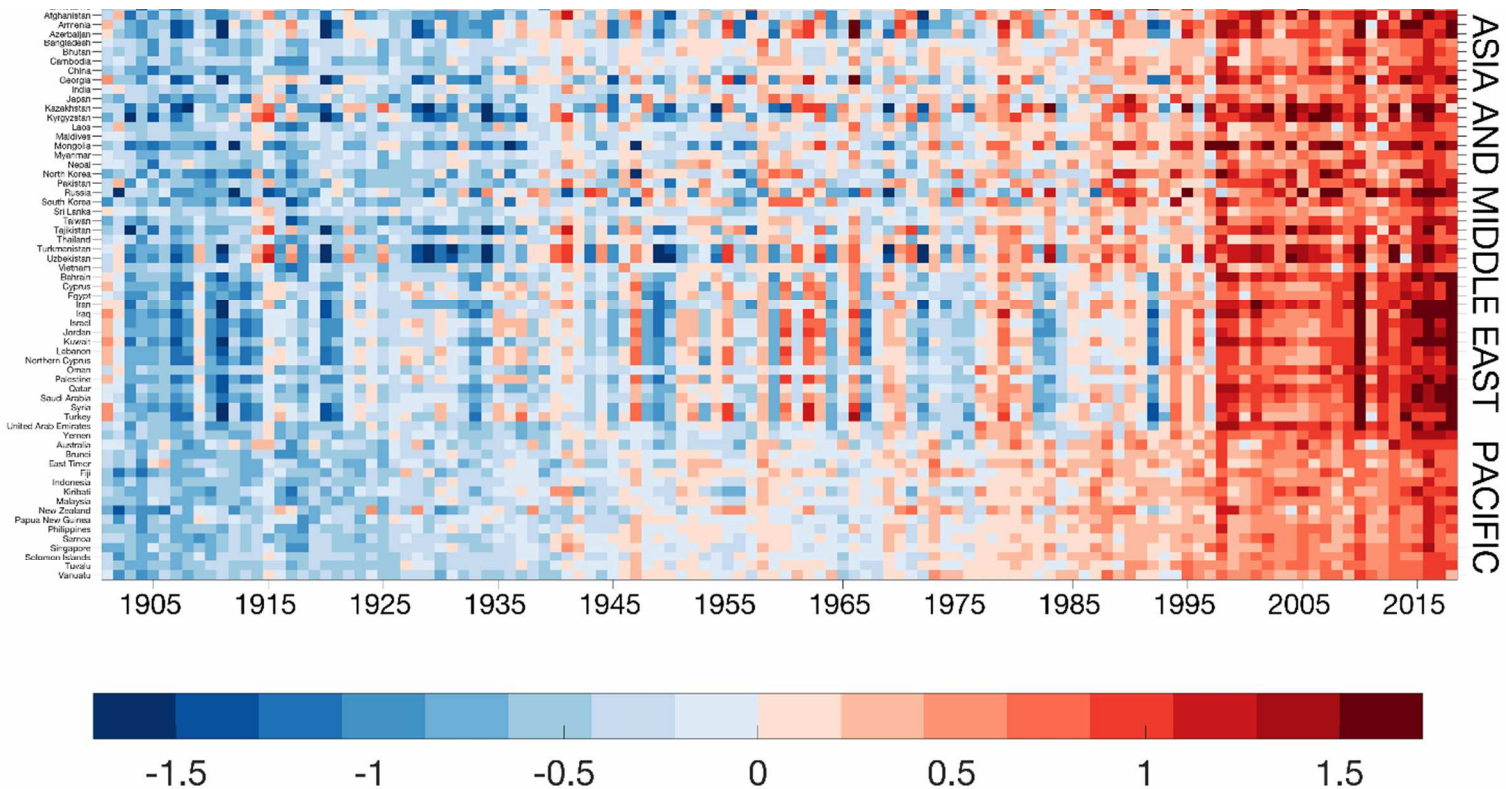


Rapport d'audit du Plan climat vaudois 1^{ère} génération

Confidentiel, réalisé pour UPCL Vaud, juillet 2022

LEURE @ EPFL

CO₂-monitor



Avant-propos

L'Audit du Plan climat vaudois (PCV) 2020 a été effectué en 2022 afin d'établir une projection des effets des mesures mises en œuvre dans le cadre du PCV et de leur capacité à atteindre les objectifs fixés à l'échelle territoriale : réduction des émissions de gaz à effet de serre de 50-60% en 2030 par rapport aux données de 1990 et neutralité carbone en 2050. Le rapport identifie également, dans le 2^e volet, les réductions requises par secteur pour permettre l'atteinte des objectifs en se basant sur la Stratégie climatique à long terme de la Confédération.

Le rapport a été fait sur la base des informations disponibles au moment de sa réalisation et ne tient pas compte des adaptations récentes de certaines mesures. Il ne tient en outre pas compte des renforcements.

Le mandataire a effectué l'Audit selon sa propre méthodologie, en se basant sur la littérature scientifique, l'analyse de documents publics et internes, ainsi que sur les orientations et informations fournies par l'Unité du Plan Climat et d'autres services cantonaux. Nous leur adressons ici nos remerciements.

Toutes les analyses ont été faites au niveau territorial, sans prendre en compte les émissions extraterritoriales générées par la consommation des Vaudoises et des Vaudois. Le rapport ne tient pas compte des renforcements et mesures postérieures à 2020, en particulier celles annoncées dans le Programme de législature 2022-2027 du Conseil d'Etat.

Le mandataire est seul responsable du contenu et des conclusions de ce rapport.

Le mandant, Unité du Plan climat

Table des matières

Table des matières	2
1. Résumé exécutif	3
2. Contexte, objectifs de l'audit	6
3. Méthodologie et hypothèses	7
3.1 Catégoriser les mesures opérationnelles par typologie de l'action climatique	7
3.2 Mesures stratégiques du PCV-1 étudiées en détail	9
4. Résultats - Évaluation des mesures PCV-1 opérationnelles et stratégiques	10
4.1 Point de départ et objectifs du PCV-1	10
4.2 Scénario de continuité (sans le PCV-1)	10
4.3 Résultats par secteur : Energie / Bâtiment / Industrie	11
4.4 Résultats par secteur : Agriculture	12
4.5 Résultats par secteur : Mobilité	13
4.6 Conclusion et recommandations de l'audit du PCV-1	14
4.7 Limites de l'analyse et prochaines étapes	15
5. Résultats - Réductions requises par secteur	16
5.1 Point de départ	16
5.2 Spécificités vaudoises et ajustements	17
5.3 Niveau d'ambition de la stratégie climatique fédérale	18
5.4 Estimation des objectifs sectoriels à partir de la réduction de la demande	19
5.5 Recommandations d'instruments de politique publique	22
Annexe 1 - Population, méthodologie, tableau de réductions	24
A1.1 Population cantonale Vaud	24
A1.2 Méthodologie détaillée et étapes d'analyse	24
A1.3 Tableau de réductions PCV-1 en 2030	26
Annexe 2 - Hypothèses et détails d'analyse Energie / Bâtiment / Industrie	27
Annexe 3 - Hypothèses et détails d'analyse Agriculture	34
Annexe 4 - Hypothèses et détails d'analyse Mobilité	45
Annexe 5 - Estimation des émissions GES territoriales vaudoises 1990	56
Annexe 6 - Estimation des réductions par secteur, approche "sobriété"	57

Auteurs : Sascha Nick, Philippe Thalmann, EPFL-ENAC-LEURE

Remerciements - cette étude n'aurait pas pu être réalisée sans le soutien et la confiance notamment de personnes suivantes, que nous remercions chaleureusement. Au Canton de Vaud : Tali Nyffeler-Sadras, Yvan Rytz, Brigitt Altwegg, Michaël Weber, Marc Roulin, Christian Liaudat, Sylvain Boéchat, François Füllemann, Marc-Jean Martin. A l'EPFL : Sixtine Guinard, Lucie Dross, et nos collègues du Laboratoire d'Economie Urbaine et de l'Environnement (LEURE).

Image de couverture : Ed Hawkins, données [Berkeley Earth](#), produit pour [BBC](#), 2019

1. Résumé exécutif

Entre janvier et juin 2022, le Laboratoire d'Économie Urbaine et de l'Environnement (LEURE) de l'EPFL a réalisé l'audit du Plan climat vaudois 1^{ère} génération (PCV-1), publié en juin 2020. L'évaluation a porté notamment sur la capacité des mesures du PCV-1 à atteindre les objectifs de réduction de la *Stratégie du Conseil d'État pour la protection du climat* - à savoir une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) territoriales vaudoises de 50-60% en 2030 par rapport à 1990 et permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050.

L'audit est basé sur l'analyse des documents publics et internes, vaudois et suisses, des échanges avec l'Unité du Plan Climat et d'autres services cantonaux, ainsi que la littérature scientifique. Les mesures stratégiques et opérationnelles du PCV-1, y compris les "Mesures acquises en lien avec le Plan climat" (Annexe du PCV-1), ont été analysées, classifiées, et leur impact en termes de réduction des émissions GES estimées. Les 9 mesures à plus fort impact ont été analysées en détail, et en grande partie modélisées. Un scénario de continuité correspondant à l'évolution prévisible (sans les mesures du PCV-1) a été défini et calculé. A partir de ce scénario, les effets du PCV-1 ont été calculés.

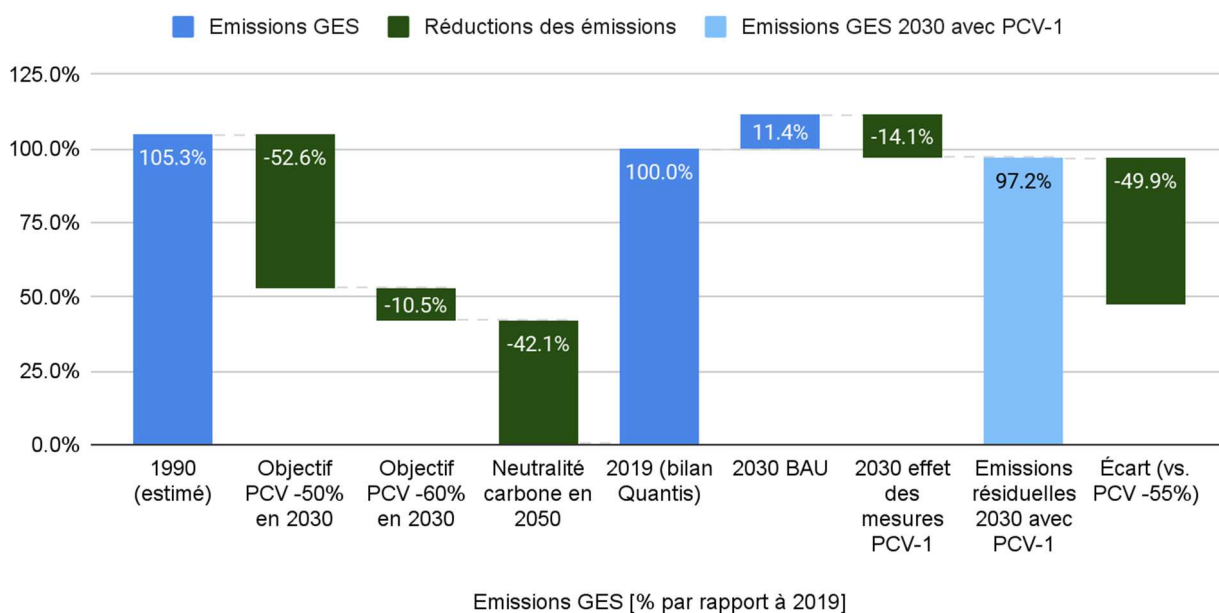
Les 9 mesures "à fort impact" retenues et analysées en détail, par domaine, sont les suivantes :

- **Energie / Bâtiment / Industrie** : Rénovation des bâtiments ; Conventions d'objectif d'entreprises ; Pompes à chaleur
- **Agriculture** : Séquestration du carbone dans le sol ; Production de biogaz
- **Mobilité** : Report modal ; Déplacements, covoiturage, télétravail ; Électrification du parc automobile ; Transport de marchandises.

Toutes les analyses ont été faites au niveau territorial, sans prendre en compte les émissions extraterritoriales ou "grises", émises lors de la production des importations.

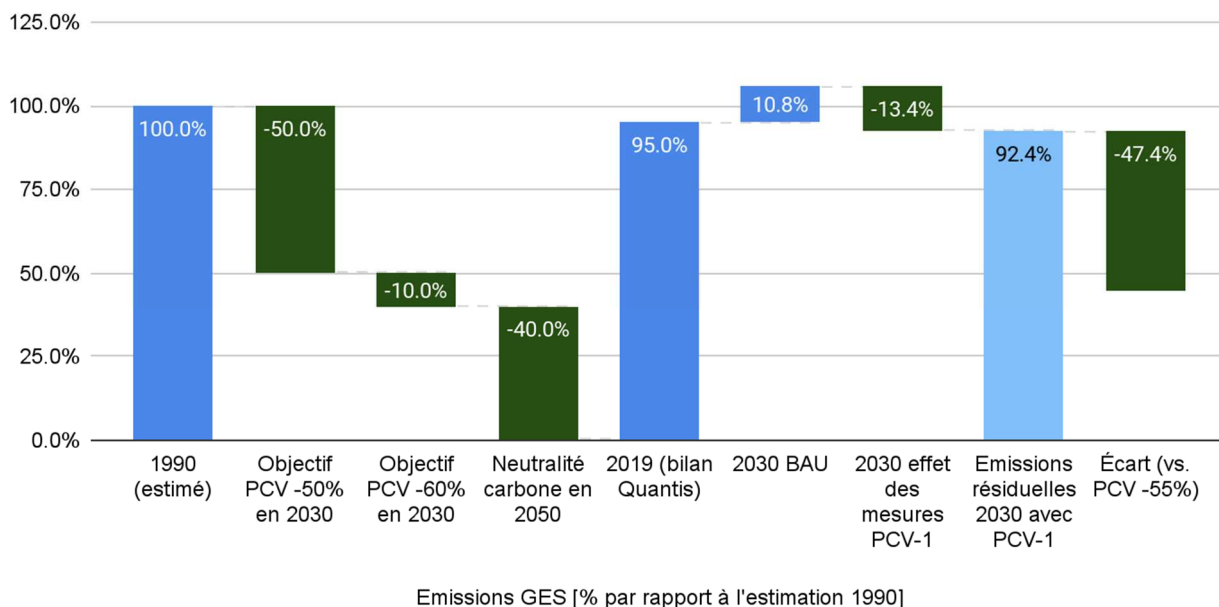
Dans le scénario de continuité (nommé "BAU"), les émissions territoriales vaudoises augmentent d'environ **11%** entre 2019 et 2030. Cette augmentation est fortement liée à la croissance démographique (+11.9%).

Notre analyse montre que les mesures du PCV-1 permettent d'inverser cette tendance à la hausse et de réaliser une (petite) réduction des émissions territoriales vaudoises d'environ **3%** entre 2019 et 2030, donc une amélioration totale d'environ **14%** au total par rapport au scénario de continuité :

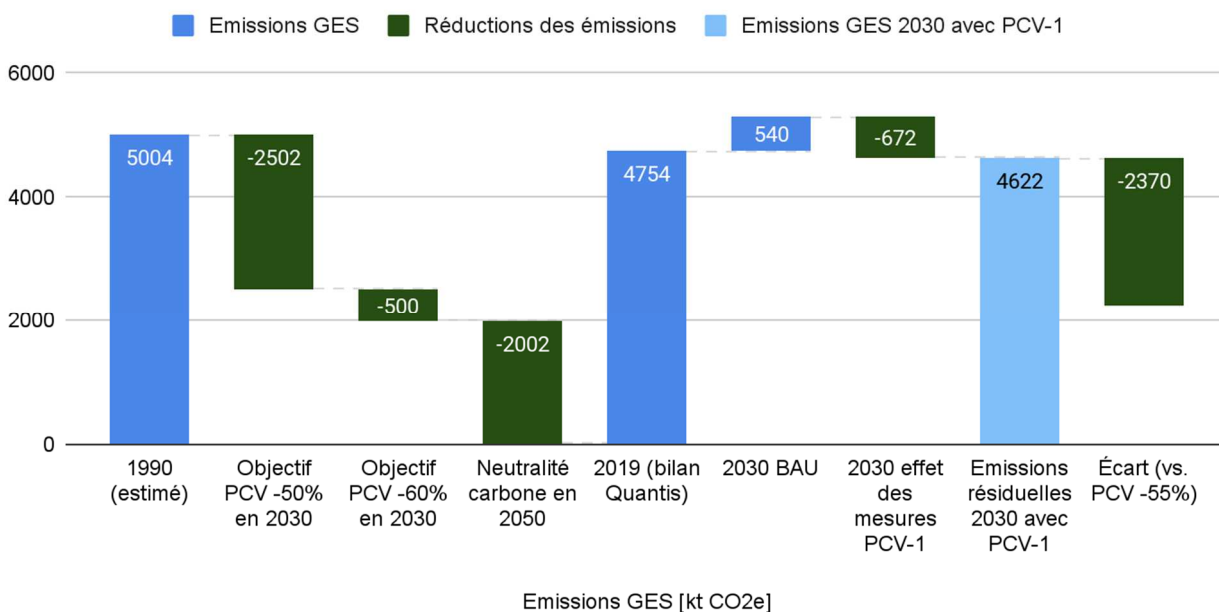


Une comparaison avec 1990 est plus difficile à réaliser, car les émissions GES vaudoises en 1990 sont inconnues (elles n'ont pas été chiffrées à l'époque) et doivent donc être estimées. Selon la NDC Suisse (nationally determined contribution, ou contribution déterminée au niveau national) de l'Accord de Paris, les objectifs fédéraux de réduction sont définis par rapport à 1990 ; cela s'applique aussi au niveau cantonal. Or la donnée nationale est

connue, en revanche la part vaudoise ne peut qu'être estimée. Ainsi dans le cadre de cet audit, il est proposé une estimation plus précise que celle selon le ratio de population. Par rapport à notre estimation pour 1990 (5'004 kt CO₂e), le PCV-1 inverse la tendance à la hausse et obtient une réduction d'environ **8%** entre 1990 et 2030 :



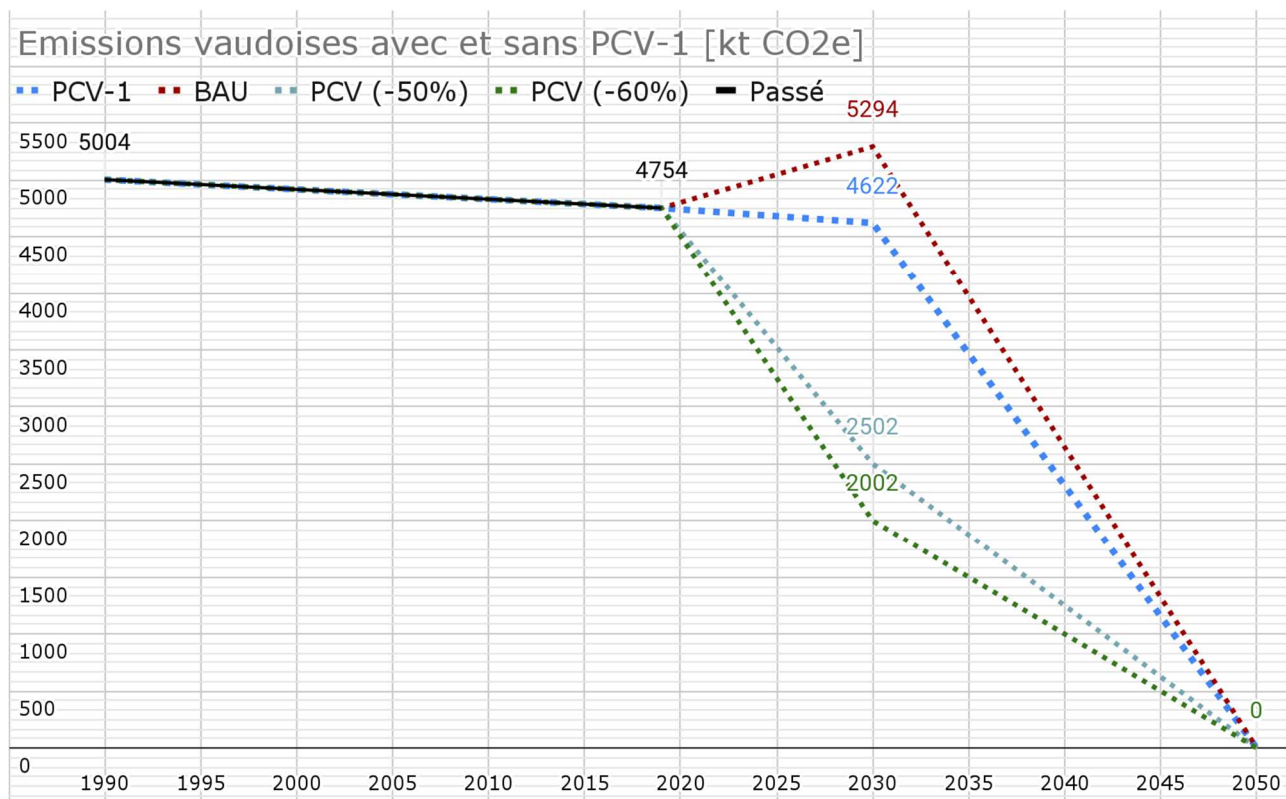
Le graphique suivant montre les émissions GES territoriales vaudoises en valeurs absolues, en kt CO₂e :



Il faut noter que l'objectif de réduction fixé par le PCV-1 pour le périmètre vaudois ne prend pas en compte la limite des leviers d'action cantonaux, de nombreuses mesures étant de la compétence de la Confédération ou des communes. A notre connaissance, à ce jour il n'existe pas d'analyse comparative des efforts de réduction respectifs requis selon les échelles territoriales.

Pour réussir, la mise en œuvre des mesures du PCV-1 nécessite des efforts soutenus, le succès est loin d'être automatiquement assuré. Notamment dans les domaines de mobilité, bâtiment, et agriculture, un changement significatif des tendances passées sera nécessaire.

En conclusion, le Plan climat vaudois 1^{ère} génération représente une amélioration nette par rapport au scénario de continuité, mais reste loin de ses propres objectifs de 50% à 60% de réduction des émissions de 1990 à 2030, ainsi que de l'ambition d'action nécessaire au vu de la crise climatique.



Quelles seraient les réductions requises par secteur et par échéance afin d'atteindre les objectifs du PCV-1, qui restent entièrement valides : moins 50% à 60% en 2030 et la neutralité carbone en 2050 ? Nous avons analysé la "Stratégie climatique à long terme 2050" du Conseil Fédéral, en l'adaptant aux spécificités vaudoises. Du fait de sa dépendance aux projets internationaux et l'ambition peu réaliste de transformation des bâtiments avant 2030, cette stratégie ne permet d'atteindre ni l'objectif 2030, ni celui de 2050.

Afin de trouver un chemin viable, nous nous appuyons sur des travaux scientifiques autour des besoins humains et des "Decent Living Standards", qui définissent les conditions matérielles et énergétiques du bien-être humain, et notamment une analyse récente de l'Université d'Oxford qui modélise la transition du Royaume-Uni, tout secteur, vers le net zéro (toujours tenant compte des spécificités vaudoises). Nous pouvons **conclure avec une confiance élevée que des mesures de réduction de la demande, ou sobriété, seront nécessaires pour toute action climatique réussie** et permettront d'atteindre plus de la moitié de l'effet total de la décarbonation requise.

Cette stratégie de sobriété se traduit en objectifs chiffrés de réduction de la demande, par exemple de la mobilité individuelle motorisée, de la surface par habitant, de la consommation de la viande, de l'utilisation du ciment, ou de production de déchets plastiques. Ces objectifs seraient ensuite réalisés par une combinaison de politiques publiques économiques (taxes et subventions, pour rendre les activités favorables pour le climat moins chères, et l'inverse), prescriptions (restreindre les activités défavorables), investissements publics (accompagner et aider les personnes en difficulté suite aux changements rapides de société), et de mesures volontaires.

Les objectifs sectoriels et les politiques publiques que nous recommandons permettraient d'atteindre une réduction de 53% en 2030 par rapport à 1990, -84% en 2040, et la neutralité climatique en 2050, tout en améliorant la qualité de vie des Vaudois. Nous espérons qu'elles puissent servir de point de départ pour l'élaboration du prochain Plan climat.

2. Contexte, objectifs de l'audit

Vu l'urgence climatique, soulignée par le GIEC ([AR6 WG3](#) : réductions significatives réalisées dès 2025) et reconnue par le Grand Conseil vaudois, [qui a déclaré l'urgence climatique le 19.03.2019](#), il est impératif que le Canton de Vaud renforce ses efforts pour la protection du climat.

La crise climatique est directement liée à la perte de biodiversité : c'était le principal message de la [séance parlementaire du 2 mai 2022 sur le climat et la biodiversité](#) (document de référence parlementaire, rapport [IPBES 2019](#)). La crise climatique impacte les humains directement, par exemple par les événements climatiques extrêmes, mais surtout indirectement, en réduisant la résilience des écosystèmes dont nous dépendons pour notre survie et bien-être, via les services écosystémiques.

Le Plan Climat Vaudois – 1^{ère} génération (PCV-1) était un objectif phare du Programme de législature 2017-2022. Le Conseil d'État a présenté in corpore sa "[Stratégie du Conseil d'État vaudois pour la protection du climat](#)" en juin 2020.

Ce rapport résume l'audit du PCV-1 et l'identification des réductions requises par secteur réalisé par EPFL-LEURE entre janvier et juin 2022.

Il comprend deux parties (selon l'Offre PCV-1 12-2021 Phase I) :

1. La première phase d'audit, a évalué notamment la capacité des mesures opérationnelles et stratégiques du PCV-1 à atteindre les objectifs de réduction du PCV-1 : réduction des émissions territoriales de 50-60% en 2030 relatif à 1990, permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050 (PCV-1, p.17) :
 - a. Catégoriser les mesures opérationnelles par typologie d'action climatique (sobriété, efficacité, énergie renouvelable, CCS+NET), et estimer l'effet dans chaque catégorie.
 - b. Évaluer le mécanisme et le calendrier de mise en œuvre pour toutes les mesures tel que prévu dans le PCV-1, avec une analyse plus détaillée pour les mesures identifiées "à fort impact", y compris les mesures difficilement chiffrables mais dont nous pouvons espérer une réduction significative.
 - c. Estimer l'effet des mesures du PCV-1 en utilisant des valeurs d'effet de mesures similaires mises en œuvre ailleurs, si cela existe. A défaut, l'estimation reposerait sur une simple prévision théorique exprimée en paramètres connus.
2. La deuxième phase a consisté à identifier les réductions requises par secteur (carburants, combustibles, agriculture, industrie) en 2030 et 2050, pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES territoriales vaudoises de -50% à -60% en 2030, net zéro en 2050, sur la base de la [Stratégie climatique à long terme 2050](#) de la Confédération.
 - a. Analyse des spécificités vaudoises
 - b. Proposer un sentier conceptuel de réduction, sur base de faisabilité technique, économique et sociale, par secteur.
 - c. Identifier les instruments de politique publique qui seraient nécessaires pour atteindre les objectifs 2030, 2040 et 2050, par type d'instruments (régulation, économique, volontaire, investissement public), et leur impact GES probable, sans analyser en détail la situation juridique ni les compétences cantonales par secteur.

Tous les documents non-publics sont traités de manière confidentielle.

L'audit est prospectif, estimant le *futur* effet des mesures opérationnelles et stratégiques du PCV-1, pour la période jusqu'à 2030. De ce fait, nous espérons qu'il contribuera à l'élaboration du plan climat 2^{ème} génération.

3. Méthodologie et hypothèses

En résumé, à partir d'une analyse de documents publics ou internes et confidentiels, nous avons catégorisé les mesures du PCV-1 selon la typologie d'action climatique (détails ci-après), et après une première estimation, modélisé les mesure à grand impact, validé les hypothèses avec les services cantonaux et la littérature scientifique, et finalement validé la cohérence de l'ensemble.

Les étapes décrivant la méthodologie pour l'évaluation des mesures opérationnelles et stratégiques du PCV-1 sont détaillées dans l'Annexe 1.

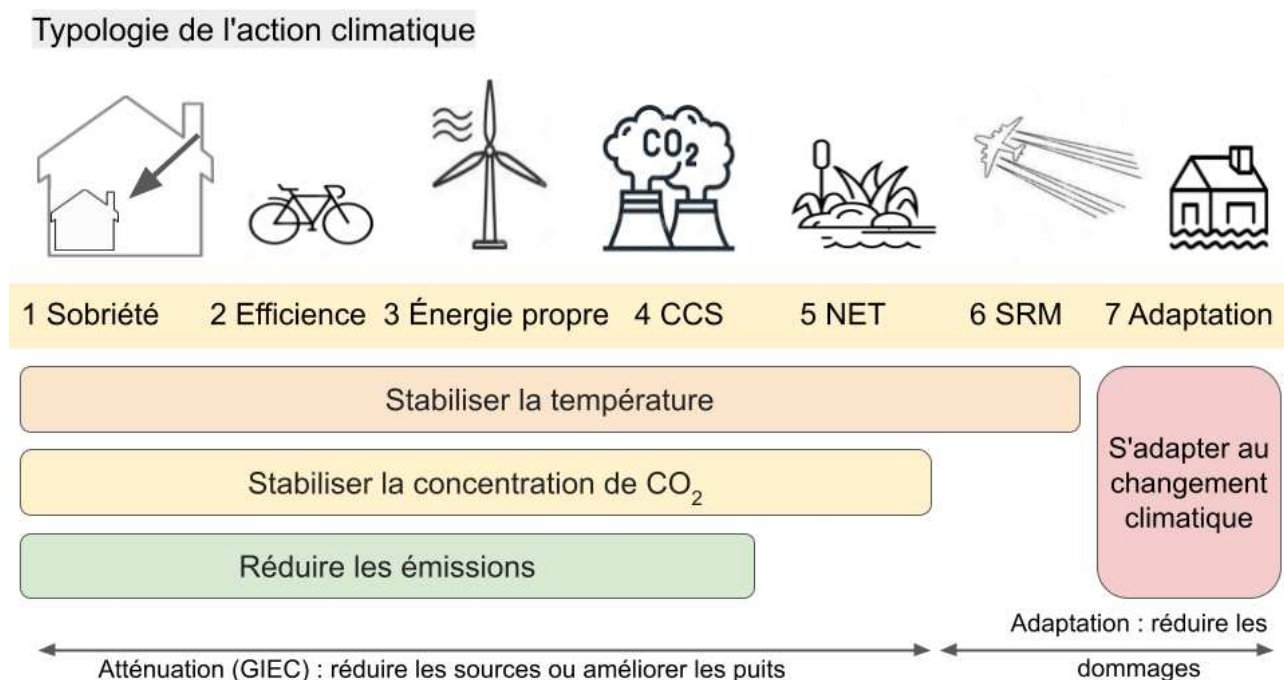
Les hypothèses par secteur (énergie-bâtiment-industrie, mobilité, agriculture) sont détaillées dans leur annexe respective.

3.1 Catégoriser les mesures opérationnelles par typologie de l'action climatique

Pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES, plusieurs actions sont possibles et relèvent de typologies différentes. L'action peut servir à :

- Diminuer les activités consommatrices d'énergie (fossile ou renouvelable), c'est ce qui est entendu par **sobriété**. Par exemple : moins de m² habitables par personne, moins de chauffage, moins de km de déplacements quotidiens ;
- Améliorer l'**efficience** - c'est-à-dire réduire la consommation énergétique pour la même activité. Par exemple : meilleure isolation, ou même distance de déplacement en train ou à vélo à la place de la voiture ;
- Remplacer l'énergie polluante (fossile) par l'**énergie propre** (renouvelable). Par exemple : mise en place de panneaux photovoltaïques, de la géothermie, de l'éolien etc. ;
- Retirer le carbone des sources d'émissions ou de l'air per les technologies de **captage et stockage du carbone** (CCS) ou d'**émissions négatives** (NET) ;
- Minimiser les **effets radiatifs solaires** par de la géo-ingénierie (SRM).

Le graphique ci-dessous résume les typologies de l'action climatique :



Source : Retrait du carbone, net zéro, et implications pour la Suisse, Nick & Thalmann, 2021

Concernant les typologies de l'action climatique, la **sobriété** montre un grand potentiel et peut être mise en œuvre rapidement, mais elle nécessite des changements de comportement. L'**efficacité** et la production d'**énergie propre** nécessitent de mettre en place des investissements technologiques, des changements dans l'affectation du territoire, et cela prend du temps. Enfin, le captage et stockage de carbone (CCS) se prête bien aux sources ponctuelles (cimenteries, incinération des déchets) à condition de disposer d'un stockage géologique à proximité. Les approches d'émissions négatives (NET), techniques ou biologiques, peuvent être très utiles et générer des co-bénéfices pour la biodiversité ou société, mais restent très limitées en quantité : en Suisse à environ 10% des émissions territoriales actuelles. De ce fait, la décarbonation réalisée par la sobriété, l'efficacité, et l'énergie propre doit atteindre 90% des émissions territoriales. Ce chapitre est le résumé d'une analyse détaillée qui peut être consultée ici : [Retrait du carbone, net zéro, et implications pour la Suisse](#), Nick & Thalmann, 2021.

Le **géo-ingénierie** (SRM - solar radiation management) peut avoir des effets imprévisibles graves, y compris rendre des pays entiers inhabitables, et par principe de précaution, doit être absolument évitée. Finalement, l'**adaptation** au changement climatique sera nécessaire et très utile, mais ne sera efficace qu'à condition d'un réchauffement limité à environ 1.5°C ([IPCC AR6, WG2 \(2022\)](#), SPM, C3, p.30).

A l'exception de la géo-ingénierie, tous les types d'action climatique seront nécessaires en Suisse et dans le canton de Vaud, chacun avec ses opportunités et limitations spécifiques. Par rapport à l'action climatique déjà engagée par la Confédération et les Cantons, un renforcement significatif sera nécessaire dans la sobriété, les émissions négatives favorisant la biodiversité, et le stockage géologique local de CO₂. De plus, les actions existantes en efficacité et énergie propre devront être accélérées.

3.2 Mesures stratégiques du PCV-1 étudiées en détail

Suite aux analyses des documents et une première estimation de l'effet de toutes les mesures stratégiques et opérationnelles visant la réduction des émissions, les 9 mesures à fort impact suivantes ont été identifiées en coordination avec les services ou entités concernés. Le seuil d'impact pour la modélisation était 1% des émissions GES territoriales vaudoises, afin de focaliser l'effort sur les principaux effets et obtenir l'estimation la plus précise possible. Pour chacune d'elles, des paramètres et hypothèses ont été définis, afin de permettre leur modélisation et assurer des résultats d'analyse les plus plausibles et probables possibles.

Energie / Bâtiment / Industrie : Dans ce domaine, les actions passées ont permis la plus grande réduction des émissions de GES. Les mesures du PCV-1 correspondent à celles de la CoCEn avec une mise en œuvre accélérée avançant tous les objectifs 2035 en 2030. Les mesures étudiées se focalisent sur les typologies efficacité énergétique et énergie renouvelable :

1. Rénovation des bâtiments
2. Energie : Conventions d'objectif d'entreprises
3. Pompes à chaleur

Agriculture : En termes d'adaptation, l'enjeu central de l'agriculture est d'améliorer la qualité des sols afin de préserver la biodiversité et la résilience de la production alimentaire. Le co-bénéfice de cette action est la séquestration de carbone dans les sols, avec un grand potentiel d'abord d'arrêter la dégradation des sols (et les émissions associées), et ensuite d'améliorer leur qualité, générant en même temps des émissions négatives. Pour notre analyse, le défi principal était de lier le potentiel avec les mesures PCV-1, qui sont toutes volontaires.

Les mesures à fort impact de ce domaine concernent les typologies de l'action climatiques suivantes :

4. Séquestration du carbone dans le sol (émissions négatives)
5. Production de biogaz (énergie renouvelable)

Mobilité : C'est le domaine avec la part des émissions la plus élevée et donc le plus grand potentiel de réduction. C'est aussi le domaine avec le plus grand nombre de mesures opérationnelles, par exemple 11 mesures opérationnelles pour la seule mesure stratégique "report modal". Dans ce cas, ces 11 mesures sont modélisées ensemble, car elles visent ensemble le même résultat (efficacité).

Les mesures à fort impact de ce domaine concernent les typologies de l'action climatiques suivantes :

6. Report modal (efficacité)
7. Déplacements, covoiturage, télétravail (sobriété)
8. Électrification du parc automobile (énergie propre, si électricité renouvelable)
9. Transport de marchandises (efficacité)

4. Résultats - Évaluation des mesures PCV-1 opérationnelles et stratégiques

4.1 Point de départ et objectifs du PCV-1

En **2019**, les émissions GES territoriales vaudoises, selon le bilan carbone Quantis (juin 2022, portant sur les émissions 2019), s'élevaient à **4'754 kt CO₂e**, ou 5.9 t CO₂e par habitant, dont 43% carburants, 35% combustibles, 15% agriculture, 11% industrie, et -4% l'affectation du sol et du territoire ([LULUCF](#), principalement due à la croissance des forêts).

Les émissions GES territoriales vaudoises pour 1990 sont inconnues, et une estimation précise est loin d'être simple. Notre estimation est détaillée dans l'Annexe 5 et s'élève à **5'004 kt CO₂e**

L'objectif **2030** du PCV-1 serait de réduire les 5'004 kt CO₂e de 50% à 60%, soit à **2'002 à 2'502 kt CO₂e** d'émissions GES territoriales vaudoises, ce qui correspond à une réduction de 47% à 58% par rapport à 2019.

4.2 Scénario de continuité (sans le PCV-1)

L'analyse évalue l'effet du PCV-1 par rapport à un scénario de continuité (BAU, "business as usual") sur la période 2019-2030. Pour établir ce scénario, plusieurs hypothèses ont été faites en concertation avec STAT VD. D'une manière générale, les ordres et la dynamique des émissions de GES du canton de Vaud concordent avec ceux de STAT VD. Il s'agit des hypothèses suivantes, qui tiennent compte d'effets structurels mais aussi de changements de comportements de la société, notamment :

- Augmentation de la population +11.9% (Annexe 1), induisant une augmentation des émissions GES d'environ **566 kt CO₂e** :
 - Population 2019 : 806'088
 - Population 2030 scénario moyen : 902'100
- Augmentation de la surface habitable par personne +5.1% (Annexe 2), induisant une augmentation des émissions GES d'environ **69 kt CO₂e** :
 - Surface habitable 2019 : 43.0 m²
 - Surface habitable 2030 : 45.2 m²
- Rénovation énergétique des bâtiments à la même vitesse que dans le passé, avec environ 0.8% des bâtiments rénovés par an, et une réduction des émissions d'environ **67 kt CO₂e** (Annexe 2).
- Changement des habitudes de mobilité, avec un effet cumulé d'une réduction des émissions GES de 25 kt CO₂e (Annexe 4), dont :
 - Plus de mobilité (km par personne) : **106 kt CO₂e** (augmentation)
 - Télétravail : **23 kt CO₂e** (réduction)
 - Report modal (effet covid) : **25 kt CO₂e** (augmentation)
 - Transport de marchandises plus efficace : **13 kt CO₂e** (réduction)
 - Électrification des voitures : **111 kt CO₂e** (réduction)
- Production industrielle territoriale : une augmentation estimée de 9% sur 11 ans (2019-2030) et des émissions GES de la production industrielle territoriale de 563 kt CO₂e en 2030. Comme les émissions de la production industrielle augmentent moins vite que la population, hors croissance démographique ce chiffre correspond à une réduction de **13.4 kt CO₂e** (Annexe 2).

En conclusion, le scénario de continuité conduit à une augmentation des émissions GES de **541 kt CO₂e** ou environ **11%** par rapport à 2019. Le principal moteur de cette augmentation étant la croissance de la population.

Toutes ces hypothèses restent inchangées dans le PCV-1, comme point de départ. Les mesures stratégiques et opérationnelles du PCV-1 s'y ajoutent, et les hypothèses nécessaires à leur calcul sont détaillées dans les Annexes 2-3-4.

4.3 Résultats par secteur : **Energie / Bâtiment / Industrie**

Ce secteur correspond aux actions définies dans la CoCEn, tous les objectifs 2035 avancés à 2030. L'ensemble des mesures NPE (nouvelle politique énergétique) de la CoCEn est considéré comme faisant partie du PCV-1.

En plus des hypothèses de continuité (BAU, §4.2), notamment pour l'évolution de la population, la continuité dans l'augmentation de la surface habitable par personne, la poursuite de l'assainissement des bâtiments au rythme actuel, et l'augmentation de la production industrielle territoriale, nous avons analysé l'effet du PCV-1 pour les mesures à fort impact suivantes : l'accélération de l'assainissement des bâtiments, les pompes à chaleur, et les conventions d'objectifs des entreprises.

La réduction visée par le PCV-1 (toutes les mesures du domaine Energie / Bâtiment / Industrie, tel que définie dans la CoCEn), est estimée à **292 kt CO₂e/an**, détails en Annexe 2.

A. Bâtiments

Notre estimation de l'effet réel du PCV-1 dans le **domaine des bâtiments** via le Programme Bâtiments combine trois méthodes :

- Comparaison entre le taux de rénovation du passé (0.8%) avec le taux visé x1.8, soit 1.44% (selon la CoCEn : un bâtiment est inclus dans ce taux dès lors qu'une subvention d'isolation, même mineure, est octroyée) ;
- Estimation à partir des montants d'investissement prévus (total CHF 550 mio en 11 ans) ;
- Validation de cohérence du calcul à partir de la contribution des pompes à chaleur, une des principales mesures de rénovation

Le résultat s'élève à **131.5 kt CO₂e**. Ce résultat tient compte de la continuité du Programme Bâtiments existant qui est estimé économiser **67.3 kt CO₂e**. La contribution nette du PCV-1 est donc de **64.2 kt CO₂e**, ou **1.35%** des émissions GES territoriales en 2019. Ce chiffre inclut la contribution des pompes à chaleur.

B. Pompes à chaleur

La réduction GES correspondant à la rénovation par PAC est de 85.2 kt CO₂e, et représente 66.7% des réductions du programme bâtiment, dont elle fait partie. Les pompes à chaleur représentaient 38.7% des rénovations suisses en 2020, et leur contribution de 66.7% semble élevée mais possible, car il s'agit de mesures qui sont particulièrement efficaces d'un point de vue CO₂.

C. Conventions d'objectifs des entreprises

Concernant les conventions d'objectifs des entreprises, ces mesures réalisent environ 4 kt CO₂e de réduction entre 2022 et 2030, mais comme la mesure n'est ni contraignante ni suivie, il n'y a pas de différence entre BAU et PCV-1 : selon notre analyse (Annexe 2), la grande majorité des entreprises (618 sur 659) choisit les conventions fédérales, avec des réductions moins ambitieuses que les conventions cantonales.

Les mesures CoCEn n'obligent pas les entreprises à passer aux conventions cantonales ni à se fixer des objectifs plus ambitieux pour les conventions fédérales, et de fait, n'auront pas d'effet accélérateur significatif.

4.4 Résultats par secteur : **Agriculture**

Le potentiel de réduction du secteur de l'agriculture, visé par les mesures agriculture du PCV-1, se situe dans les pratiques agricoles permettant de séquestrer plus de carbone dans les sols, d'une meilleure gestion des engrais de ferme permettant de produire plus de biogaz et réduire les émissions de méthane, d'une réduction des émissions de méthane de la fermentation entérique, et d'une augmentation d'efficacité liée à l'utilisation de l'énergie dans l'agriculture.

Comme le PCV-1 prévoit une participation aux mesures entièrement volontaire, il n'est pas possible de quantifier avec précision un objectif de réduction : la mise en œuvre des mesures dépend fortement de l'implication des agriculteurs. Les chiffres suivants sont une estimation, dont le détail de calcul se trouve dans l'Annexe 3.

La réduction des émissions GES visée par le PCV-1 (toutes les mesures) serait de **171 kt CO₂e/an**, dont 100 kt de séquestration de carbone dans les sols, 30 kt d'utilisation de biogaz pour éviter les émissions de méthane, 24 kt de compléments d'alimentation bovine afin de réduire la génération de méthane, et 17 kt de réduction de consommation d'énergie par les machines agricoles et combustibles.

Notre estimation s'élève à **86 kt CO₂e/an**, ce qui correspond à environ la moitié des objectifs visés par le PCV-1. L'estimation comprend 46.7 kt de séquestration de carbone dans les sols, 32.4 kt de biogaz, 4.2 kt d'affouragement et compléments d'alimentation bovine, et 2.5 kt de réduction de consommation d'énergie (uniquement pour la partie machines agricoles ; les serres et les bâtiments agricoles sont comptés dans "énergie").

A. Biogaz

Le potentiel de biogaz est entièrement réalisable avec des mesures ambitieuses (qui nécessitent tout de même une grande mobilisation).

B. séquestration de carbone dans les sols

Cet objectif nécessiterait d'aller bien au-delà des mesures volontaires et d'une amélioration incrémentale des pratiques agricoles existantes, mais serait en principe réalisable, vu son potentiel très élevé.

Attention à la nécessité de continuer le soutien aux bonnes pratiques agricoles pour maintenir le carbone dans les sols, car en absence de ces pratiques, la matière organique peut être rapidement perdue. Le monitoring continu des pratiques et du taux de matière organique dans les sols en font partie.

4.5 Résultats par secteur : **Mobilité**

Les principaux leviers du PCV-1 du secteur de la mobilité sont le report modal (efficacité), les pratiques de mobilité individuelle (sobriété), les réductions de vitesse (efficacité), l'efficacité du transport des marchandises (efficacité), et les voitures électriques et à faibles émissions (efficacité, énergie propre).

La réduction visée par le PCV-1 est estimée à **680 kt CO_{2e}/an**, dont 225 kt CO_{2e} de report modal et 455 kt CO_{2e} par l'électrification ou l'augmentation d'efficacité des voitures.

Notre estimation de l'effet total du PCV-1, y compris les tendances sous-jacentes, s'élève à **535 kt CO_{2e}/an**, dont **91 kt CO_{2e}** de report modal, et **460 kt CO_{2e}** par l'électrification ou l'augmentation d'efficacité des voitures, et **18 kt CO_{2e}** dans le transport de marchandises.

Notre méthodologie d'analyse se base sur quatre modèles simples : l'évolution des parts modales, le taux d'électrification, le covoiturage et le télétravail, et le transport des marchandises, détaillés dans l'Annexe 4.

La DGMR a par ailleurs développé son propre outil d'analyse et ses propres hypothèses pour l'élaboration des mesures du PCV-1. Par souci d'efficacité, il n'a pas été jugé utile de pousser l'analyse de l'audit en intégrant toutes les données de la DGMR (hors périmètre du mandat), partant du constat que les résultats de l'audit corroborent avec ceux de la DGMR. En effet les mesures du PCV-1 en matière de mobilité permettent de contrebalancer l'augmentation de la population et de commencer la réduction des émissions GES territoriales, mais ne suffisent pas à atteindre les objectifs fixés par le PCV-1. Du point de vue de la DGMR, ce résultat est à mettre en perspective avec le fait que l'évolution des pratiques de mobilité post-covid-19 n'est pas encore stabilisée, qu'il y ait ou pas de nouvelles vagues de covid.

A. Report modal

Le report modal pourrait atteindre un potentiel beaucoup plus élevé que nos estimations, mais cela nécessiterait des mesures plus fortes, surtout dans l'après-covid qui a fait perdre au moins 4 années précieuses de l'action de report modal. Covid-19 a également réduit les distances parcourues, même dans une mesure importante en 2020 ; cependant nous estimons un retour aux distances 2019 vers 2023 et augmentation ensuite. La tendance à l'augmentation généralisée de mobilité sur le territoire vaudois contribue à elle seule une augmentation d'environ 106 kt CO_{2e} que le PCV-1 doit surmonter, comme cela est précisé dans le rapport Quantis 2022.

B. Télétravail et covoiturage

Le télétravail n'est pas directement inclus dans les mesures du PCV-1 ; dans notre analyse nous l'avons groupé avec le covoiturage, car cette mesure est souvent liée dans la gestion de mobilité des entreprises ; ensemble, ces mesures permettent un gain GES de 48 kt CO_{2e}.

C. Electrification des voitures

Nous confirmons le grand potentiel lié à l'électrification, même légèrement supérieur à l'objectif du PCV-1 dans ce domaine, du fait d'une modélisation non-linéaire (courbe logistique ou courbe "S"), car nous sommes au début d'une accélération forte de cette tendance. Attention toutefois aux limites de système : d'une perspective territoriale vaudoise, les voitures électriques ont un excellent bilan, sans prendre en compte l'énergie, les émissions GES, et la pollution (ailleurs) liés à l'extraction des métaux et la fabrication. Une future analyse devra prendre en compte ces effets.

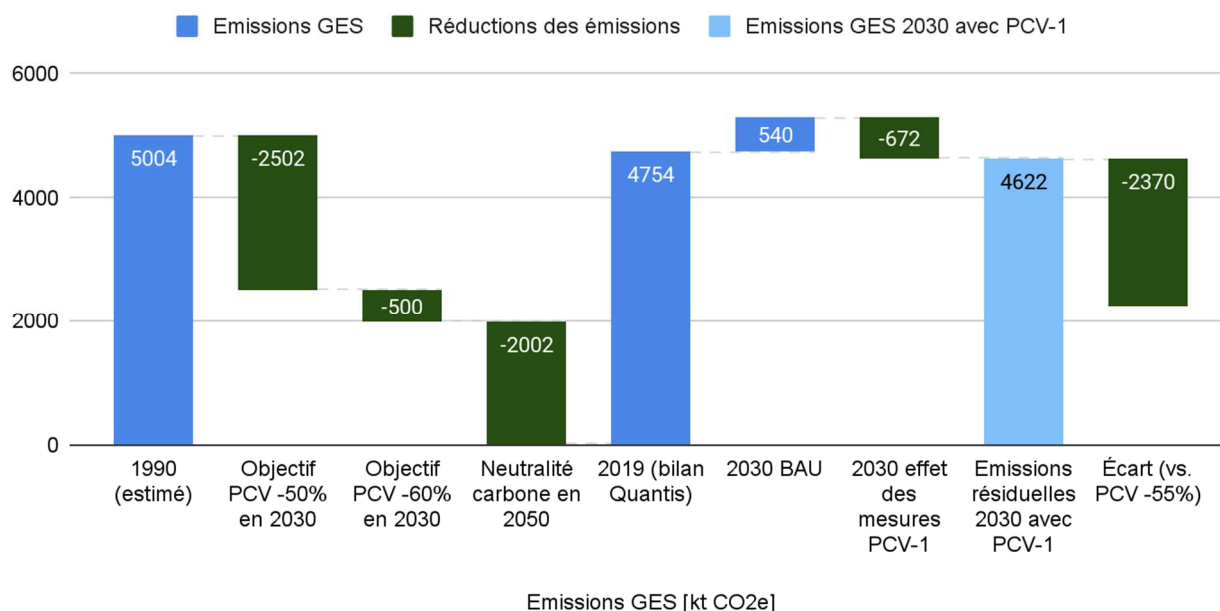
D. Transport des marchandises

La stratégie cantonale présentée dans le PCV-1 vise à améliorer l'efficacité du transport ferroviaire. Selon le scénario de base de la Confédération, la part modale du train dans le transport des marchandises augmente de 3% en 2030, ce qui représente y compris l'efficacité route un gain GES de 18 kt CO_{2e}.

4.6 Conclusion et recommandations de l'audit du PCV-1

Le contexte pour une politique de réduction des émissions est complexe. D'une part, l'augmentation de la population (+11.9% de 2019 à 2030) aura des effets directs sur les émissions de GES. S'ajoutent à cela des augmentations liées aux habitudes des personnes, comme par exemple une augmentation de la mobilité et de la surface habitable. Enfin, l'augmentation de la consommation induit des émissions de GES supérieures pour le transport de marchandises. On peut toutefois relever quelques tendances positives comme l'augmentation du covoiturage et l'électrification du parc automobile. Pour le secteur agricole, de meilleures pratiques se mettent en place et une tendance positive de séquestration de carbone dans les sols est observée depuis une vingtaine d'années.

Le point de départ, avant le PCV-1 et tenant compte du scénario de continuité, prévoit une augmentation des émissions territoriales vaudoises en 2030 d'environ 11%, par rapport à 2019. **Les mesures du PCV-1 vont très probablement compenser toutes ces tendances à l'augmentation des émissions et permettre une petite réduction d'environ 3% par rapport à 2019, ou près de 8% par rapport à 1990. Malheureusement, ces réductions sont loin de l'objectif du PCV-1 d'une réduction de -50% à -60%, par rapport à 1990.**



Conditions de succès : la mise en œuvre des mesures du PCV-1 nécessite des efforts soutenus, elle est loin d'être automatiquement assurée. Notamment l'accélération du report modal, de l'électrification des voitures, de la rénovation des bâtiments y compris les pompes à chaleur, ainsi que des pratiques agricoles liées à la séquestration de carbone dans les sols et la production de biogaz nécessitent un changement significatif dans leur mise en œuvre afin d'atteindre les objectifs fixés par le PCV-1, ce qui implique des nouvelles dispositions et des conditions cadres comme celles proposées au chapitre 5.

4.7 Limites de l'analyse et prochaines étapes

Notre analyse se base sur des modèles simples pour approximer la réalité vaudoise, et de ce fait reste une estimation. Cela ne remet absolument pas en cause les principales conclusions sur la portée du PCV-1. Pour la suite et notamment pour accompagner les futures versions du Plan climat vaudois, les améliorations méthodologiques suivantes pourraient être envisagées :

- Une perspective de consommation plutôt que territoriale, donc comprenant les émissions GES liées aux importations vaudoises. Le rapport Quantis 2022 montre (p.26) que les émissions extraterritoriales représentent 61% des émissions totales ; notre analyse, comme les objectifs du PCV-1, se limite aux 39% des émissions sur le territoire vaudois.
- L'analyse de l'impact sur la biodiversité : l'effondrement des services écosystémiques étant un des risques principaux de la crise climatique, il est impératif que toute action pour le climat n'ait aucun effet négatif sur la biodiversité, et contribue dans la mesure du possible à sa régénération. Par exemple, une réduction de 100 kt CO_{2e} d'émissions par la régénération des sols a un impact sur la biodiversité beaucoup plus favorable que les mêmes 100 kt CO_{2e} évités par l'électrification des voitures, qui génère des activités minières considérables.
- Une analyse dynamique des GES de courte durée de vie comme le méthane : toutes les sources citées utilisent les facteurs de conversion entre le méthane et le CO_{2e}-équivalent (CO_{2e}) statiques (GWP-100). Dans une transition rapide vers le net zéro devenue indispensable, un calcul dynamique (avec le facteur de conversion GWP*) serait beaucoup plus précis. Nous ne l'avons pas intégré dans notre analyse par nécessité de cohérence avec nos sources - sinon nous aurions dû recalculer les principaux chiffres Quantis, ce qui aurait été hors du cadre de la présente analyse.

En plus de ces limites, il convient de signaler que les résultats peuvent faire supposer qu'il existe une incohérence entre le scénario de continuité (BAU, population +12% et émissions +11%, de 2019 à 2030) et l'évolution historique des émissions GES de 1990 à 2019 (population +40% et émissions -5%). Cette incohérence apparente est même accentuée par les résultats du scénario PCV-1 qui semble plus dans la continuité de l'évolution historique (population +12%, émissions -3%, de 2019 à 2030).

Plusieurs explications peuvent être apportées :

- D'abord, il convient de rappeler que la période allant de 1990 aux années 2000 a été marquée par une délocalisation des activités les plus polluantes vers d'autres pays. Ce phénomène a externalisé nos émissions et de ce fait contrebalancé la hausse qui aurait été occasionnée par la croissance démographique et économique. Or, ce phénomène de délocalisation semble s'être stabilisé, voire s'être légèrement inversé. Dès lors, on peut s'attendre à ce que les émissions de GES repartent à la hausse avec la croissance démographique et économique, sans autres mesures.
- Ensuite, une série d'actions favorisant la baisse des émissions ont été prises depuis les années 2000 (rénovations, mesures d'efficacité, pratiques agricoles, taxe sur les combustibles, conventions d'entreprises etc.).
- De plus, il est difficile d'estimer le contrefactuel (le monde sans PCV-1) et il est très probable que d'autres mesures seraient mises en place, surtout avec l'urgence climatique croissante.
- Finalement, beaucoup de mesures actuelles et prévues ont été consolidées dans le plan climat ; il est probable qu'une partie existerait sans le PCV-1. D'ailleurs, le scénario BAU peut être vu comme un exercice un peu théorique ; ce qui est important, c'est l'accélération des réductions avec PCV-1, malheureusement insuffisante.

5. Résultats - Réductions requises par secteur

Quelles seraient les réductions requises par secteur et par échéance afin d'atteindre les objectifs du PCV-1, qui restent entièrement valides : moins 50% à 60% en 2030 et la neutralité carbone en 2050 ? En valeurs absolues, l'ambition du PCV-1 est d'atteindre 2'002 à 2'502 kt CO_{2e}, sur la base de notre estimation des émissions GES vaudoises pour 1990.

Dans ce chapitre, nous examinons cette question du chemin viable pour atteindre les objectifs climatiques de deux manières :

- A partir de la “Stratégie climatique à long terme 2050” du Conseil Fédéral, en l’adaptant aux spécificités vaudoises : §5.1, §5.2, §5.3
- A partir de la littérature scientifique des besoins humains et “Decent Living Standards”, qui définissent les conditions matérielles et énergétiques du bien-être humain, et plus spécifiquement d’une modélisation à l’échelle du pays pour le Royaume-Uni, réalisé par l’Université d’Oxford, dont nous adaptons les conclusions aux spécificités vaudoises : §5.4 et §5.5

5.1 Point de départ

Notre analyse commence avec les objectifs sectoriels suisses de la “[Stratégie climatique à long terme 2050](#)” du Conseil Fédéral, publiée le 28.01.2021 (elle-même basée sur les [Energieperspektiven 2050+](#), résumé en tableau 15, p.82), et affinée le 24.05.2022 : 21.501 | [Contre-projet indirect à l’initiative pour les glaciers. Zéro émission nette de gaz à effet de serre d’ici à 2050 ; texte intégral](#) (p.12). Les chiffres du tableau suivant sont repris des documents cités, avec une intrapolation des chiffres manquants, indiqués par (*). Notre tableau est un résumé, pour les détails, consulter les documents d’origine.

Tableau de réductions sectorielles **suisses** d’émissions de GES [% par rapport à 1990 ; NET en Mt]

Secteur	2030	2035	2040	2045	2050	Commentaires
Bâtiment- Energie	-54%	-74%	-82%	-90%	-100%	Accélération forte des mesures d’efficacité et d’énergie propre (rénovations, PAC ; TP, électrification)
Mobilité	-27%	-39%	-57%	-78%	-100%	La sobriété montre un grand potentiel, nécessitant de mesures contraignantes Potentiel de réduction territorial proche de 100%
Industrie, incl. CCS	-28%	-38%	-50%	-72%	-90%	Opportunités de sobriété et de CCS, relativement peu de potentiel d’efficacité (car déjà relativement efficace)
Agriculture	-20%*	-25%*	-30%	-35%*	-40%	Grand potentiel de changement de composition de l’alimentation, et de mise en place de bonnes pratiques agricoles et régénération de sols
NET	0	0	0.4 Mt	3.6 Mt*	6.8 Mt	
TOTAL	-50%	-62%	-75%	-87%	-100%	Réduction GES par rapport à 1990 y compris compensations internationales significatives

(*) notre estimation, aucun chiffre “officiel” disponible

Pour la perspective vaudoise, il est nécessaire de recalculer ce tableau par rapport à 2019 :

- L'évolution des émissions 1990-2019 diffèrent considérablement entre la Suisse (-14%) et le canton de Vaud (-5%), en grande partie expliqué par l'évolution démographique suisse (+27.4%) et vaudoise (+40.3%)
- Les émissions vaudoises 1990 sont inconnues et estimées uniquement au niveau global ; aucune estimation sectorielle fiable n'existe à notre connaissance

Ce tableau compare les objectifs fédéraux par secteur et échéance avec les émissions du secteur en 2019.

Tableau de réductions sectorielles **suisses** [% par rapport à 2019 ; NET en Mt]

Secteur	2030	2035	2040	2045	2050	Commentaires
Bâtiment-Energie	-38%	-65%	-76%	-87%	-100%	Excessivement ambitieux pour 2030, impossible à atteindre sans de fortes mesure sobriété
Mobilité	-28%	-40%	-58%	-78%	-100%	Très peu ambitieux pour 2030-2035
Industrie, incl. CCS	-30%	-40%	-52%	-73%	-90%	
Agriculture	-1%*	-7%*	-13%	-20%*	-26%	Peu ambitieux compte tenu des réductions passées
NET	0	0	0.4 Mt	3.6 Mt*	6.8 Mt	
TOTAL	-30%	-48%	-60%	-75%	-90%	Réduction GES par rapport à 2019 Avant compensations internationales

(*) notre estimation, aucun chiffre "officiel" disponible

5.2 Spécificités vaudoises et ajustements

Structurellement, dans la perspective de l'analyse de l'action pour le climat, le canton de Vaud ressemble à la Suisse dans la plupart des domaines :

- Les proportions des émissions GES territoriales des grands secteurs en 2019 : bâtiment, mobilité, agriculture, industrie
- Les impacts probables du changement climatique (source : NCCS et MétéoSuisse : [Changements climatiques dans le canton de Vaud](#), 2021)

Les principales différences sont résumées ici :

- Revenus par habitant : en moyenne plus faibles dans le canton de Vaud qu'en Suisse (87.9% en 2019), mais l'écart se réduit progressivement (86.7% en 1990).
- Densité plus élevée [personnes / km² en 2019] : VD : 251 ; CH : 217
- Croissance de la population plus élevée [Δ 2019/1990] : VD : +40.3% ; CH +27.7% (Annexe 1)
- Type d'exploitations agricoles : plus de terres ouvertes ("surfaces affectées à des cultures annuelles des champs, à la culture de légumes et de baies annuels ou à celle de plantes aromatiques et médicinales annuelles"), plus de cultures impactantes (pomme de terre, betterave, etc.), et en conséquence une mécanisation très intensive dans le canton de Vaud (OFS, [source](#)).
- Une différence structurelle d'intensité d'émissions GES par habitant, résumée par notre "correction structurelle empirique", détaillée en Annexe 5, de +15.72%, a été calculée en comparant les émissions GES (incl. LULUCF) par habitant vaudois et suisse en 2019. Ce paramètre tient compte de la taille et efficacité relative des maisons et des voitures, de la densité des agglomérations, du poids relatif des différents

secteurs industriels, et des habitudes culturelles de mobilité et de consommation - indiquant des émissions per capita plus élevées dans le canton de Vaud.

Ces différences entre le canton de Vaud et la Suisse sont plutôt positives pour le potentiel de l'action climatique cantonale, même si leur impact restera modeste, car la Suisse et le canton de Vaud restent très proches. Les principales opportunités sont :

- Les mesures d'efficacité dans la mobilité, telles que les transports en commun, le covoiturage et le transport de marchandises efficient, sont plus faciles à mettre en œuvre avec une densité plus élevée. Avec la croissance plus rapide de la population, cet avantage va encore s'accroître.
- Les exploitations agricoles intensives ont des effets plus néfastes pour le climat (et la biodiversité) ; dans la perspective de l'action climatique, les opportunités de sobriété, d'efficacité, d'énergie propre, et de séquestration de carbone dans les sols sont donc nombreuses et élevées.
- La "correction structurelle empirique vaudoise", précisée en Annex 5, suggère un grand potentiel de mesures de sobriété, non encore exploité dans le PCV-1.

Du fait de ces différences, nous estimons qu'une certaine accélération de la décarbonation vaudoise est possible dans les domaines du bâtiment, de la mobilité, et de l'agriculture y compris la partie NET de séquestration de carbone dans les sols.

Le tableau suivant ajuste les chiffres fédéraux 2019 en tenant compte des spécificités vaudoises décrites, notamment -2% par période de 5 ans dans la mobilité (effet densité et croissance démographique), des réductions bien plus ambitieuses dans l'agriculture en poursuivant les actions déjà engagées avec le PCV-1 sur le biogaz et la séquestration de carbone dans les sols, et des réductions bâtiment limitées à 200% du PCV-1 dans ce secteur, ce qui est certainement un niveau extrêmement ambitieux sans de mesures de sobriété.

Tableau de réductions sectorielles **vaudoises** [% par rapport à 2019]

Estimations plus ambitieuses pour le canton de Vaud, **en bleu**

Secteur	2030	2035	2040	2045	2050	Hypothèses
Bâtiment-Energie	-20%	-40%	-60%	-80%	-100%	[-20% par 5 ans, moins ambitieux que l'objectif CH car celui-ci est irréaliste sans réduction forte de la demande]
Mobilité	-28%	-42%	-62%	-86%	-100%	[-28% comme CH en 2030, ensuite -2% par période de 5 ans au-delà de l'objectif CH]
Industrie, incl. CCS	-30%	-40%	-52%	-73%	-90%	inchangé
Agriculture	-15%	-23%	-31%	-39%	-47%	[-15%, ensuite -8% par 5 ans, incl. C dans les sols, en poursuivant les action biogaz et carbone dans les sols]
TOTAL	-24%	-39%	-57%	-78%	-93%	Hors NET au-delà du carbone dans les sols

5.3 Niveau d'ambition de la stratégie climatique fédérale

En comparaison internationale, la stratégie climatique à long terme 2050 du Conseil Fédéral semble peu ambitieuse selon plusieurs indicateurs :

- Niveau très élevé des émissions dites "inévitables" en 2050, qui le sont uniquement si l'on ne veut pas les éviter : 22% des émissions de 1990 en Suisse, contre 3% en Allemagne ; ou au niveau absolu, 1'150 kg CO_{2e} par habitant en Suisse contre 465 kg CO_{2e} par habitant en Allemagne

- Niveau très élevé des émissions “grises” (contenues dans les produits importés), bien plus élevé que dans la plupart des pays européens - aucune décarbonation n’est prévue pour ces émissions
- Aucune remise en cause des pratiques très polluantes, comme une consommation élevée du béton et la croissance des déchets, déjà au niveau le plus haut par habitant en Europe
- Dépendance complète des compensations à l’étranger, ce qui est problématique pour plusieurs raisons :
 - La faible qualité et transparence des projets internationaux, avec un fort risque de double-comptage
 - La disponibilité limitée de projets, car tout pays doit atteindre son propre net zéro et n’aura pas de projets supplémentaires d’émissions négatives en quantité suffisante
 - L’augmentation des coûts de la décarbonation pour les pays hôtes, parce que les pays tiers se servent en premier des meilleurs projets de ces pays
 - L’incapacité à assumer sa responsabilité historique (comme tout autre pays riche) et à aider (par le financement, le savoir-faire, la technologie, etc.) les pays pauvres à atteindre leur propre net zéro, sans compter les réductions obtenues pour soi
- Aucun plan d’action crédible pour complètement sortir des énergies fossiles bien avant 2050

Une politique climatique plus ambitieuse décarbonerait la Suisse plus vite (net zéro en 2040 ou 2045 au plus tard, comme c’est le cas de plusieurs pays comme l’Allemagne), avec des émissions résiduelles très modestes et un plan de mise en œuvre des émissions négatives pour les absorber et atteindre le net zéro. Une analyse plus approfondie de l’ensemble de ces points est réalisée dans [“Fonds Suisse pour les Émissions Négatives - comment payer pour le Net Zéro”](#), Nick et Thalmann, 2022. Le modèle numérique du fonds pour les émissions négatives a montré qu’une décarbonation suisse achevée en 2040, avec un niveau résiduel correspondant à la moitié de la stratégie officielle (mais toujours plus élevé que d’autres pays) rendrait la décarbonation moins risquée, bien plus faisable, et significativement moins chère. Finalement, une exemplarité suisse pourrait accélérer l’action pour le climat bien au-delà de ses frontières.

5.4 Estimation des objectifs sectoriels à partir de la réduction de la demande

Afin d’établir une estimation d’un sentier conceptuel de réduction, sur base de faisabilité technique, économique et sociale, nous partons de la littérature scientifique autour de besoins d’énergie, et de services énergétiques.

Les principaux travaux scientifiques sur les besoins d’énergie sont basés sur les approches des besoins humains, qui sont universels, classifiables, finis, et satiabiles. Il y a une claire distinction entre les besoins (invariables) et les “satisfiers” ou moyens de satisfaction des besoins, qui sont culturellement spécifiques et changent dans le temps. Les principales approches scientifiques sont les “Besoins Fondamentaux Humains” de Manfred Max-Neef, et la “Théorie des Besoins Humains” de Len Doyal et Ian Gough, ainsi que l’approche de Capabilités d’Amartya Sen et Martha Nussbaum. Références principales : [“Human-Scale Development”](#), Manfred Max-Neef, 1990 ; [“A Theory of Human Need”](#), Len Doyan et Ian Gough, 1991 ; Capability Approach, une vingtaine de références, listées [ici](#)).

Sur ce fondement scientifique des besoins humains est construite l’approche “Decent Living Standards” (DLS), qui définit les fondements matériels minimaux pour la satisfaction “décente” de *tous* les besoins humains, notamment les travaux de Narasimha Rao, Arnulf Grubler, Julia Steinberger et autres. Les approches “Low Energy Demand” (LED) partent d’une perspective globale, régionale et par pays, et ont été introduits dans les conclusions de GIEC dès 2018 avec le [rapport SR15](#), notamment dans le sentier de réduction (pathway) P1. Références principales : [Rao et Baer 2012](#), [Grubler et al 2018](#), [Rao et al 2019](#), [Millward-Hopkins et al 2020](#), [Kikstra et al 2021](#).

Pour notre analyse, nous avons adapté au contexte vaudois les conclusions d’une étude récente et détaillée (tout secteur) du [Centre for Research into Energy Demand Solutions](#) (CREDS) de l’Université Oxford. Il s’agit du rapport [“The role of energy demand reduction in achieving net-zero in the UK”](#), publiée aussi dans Nature Energy [“Energy demand reduction options for meeting national zero-emission targets in the United Kingdom”](#) 06-2022, basé sur une modélisation très poussée du système énergétique UK. Ses principales conclusions :

- Les objectifs climatiques du Royaume-Uni, qui prévoit -78% en 2035 (CH : -62%) ne sont pas atteignables sans une réduction significative de la demande d'énergie, ce qui comprend notamment la sobriété, mais aussi l'efficacité
- Une réduction de la demande d'énergie aurait cinq effets notables :
 - Accélération de la décarbonation, car moindre utilisation d'énergie fossile
 - Nécessité d'un système énergétique renouvelable plus petit et donc plus faisable (Note : une [étude récente suisse](#), qui ne prend pas en compte la sobriété, montre qu'un remplacement complet des énergies fossiles n'est pas faisable, ce qui est 100% cohérent avec la conclusion de CREDS)
 - De ce fait, une réduction de coûts significative de la décarbonation
 - La possibilité d'une future politique climatique plus ambitieuse
 - Une moindre dépendance aux NET technologiques, coûteuses et incertaines
- Les politiques publiques requises dépassent largement le cadre de la politique énergétique et nécessitent de repenser toutes les politiques publiques de façon systémique
- Il est nécessaire d'évaluer toute politique publique en vue de sa valeur pour la société et sa contribution au net zéro, plutôt que de regarder son efficacité économique
- La légitimité sociétale est essentielle, y compris une large acceptation des changements nécessaires dans les modes de vie de l'ensemble de la population. Dans cet objectif, des méthodes délibératives comme celles employées pendant la [UK Climate Assembly](#) seront nécessaires

Sur cette base, l'étude CREDS développe ces recommandations principales par secteur :

- Agriculture et alimentation : promouvoir une alimentation saine et réduisant la viande et l'apport énergétique total, avec les ajustements nécessaires de la production
- Industrie : promouvoir surtout la sobriété, qui passe par une consommation réduite des produits industriels (l'efficacité énergétique est déjà élevée dans ce secteur)
- Bâtiments : une triple approche de généralisation de pompes à chaleur, de rénovation de bâtiments, et de réduction de la surface construite par personne
- Mobilité : surtout la sobriété (réduire des distances voyageées), en plus de l'électrification des voitures (qui ne doit pas être la mesure principale) et l'arrêt de l'expansion du réseau routier

Pour l'application de ces conclusions au contexte vaudois, il faut garder en tête les principales spécificités suisse et vaudoises suivantes :

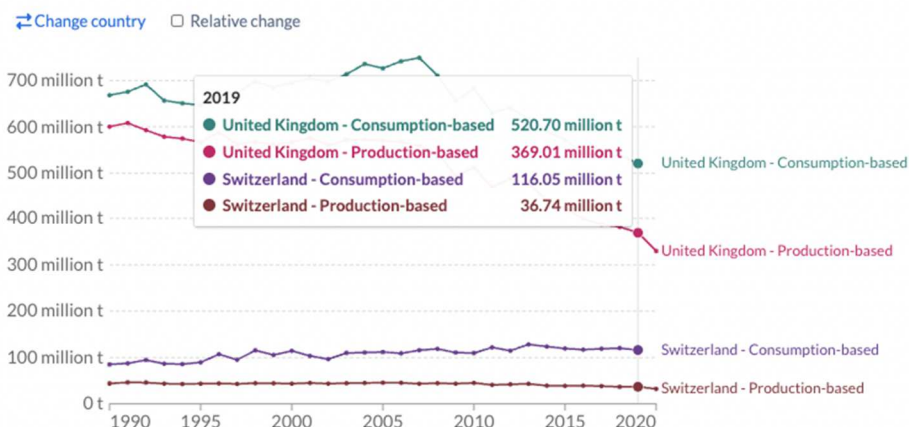
- La Suisse (et le canton de Vaud) a un revenu plus élevé de 58% (GDP/cap en PPP) que le Royaume-Uni, avec un taux de pauvreté significativement plus bas
- Le mix de génération de l'électricité au Royaume-Uni, malgré une décarbonation impressionnante divisant les émissions du secteur par 3 depuis 1990 et une presque complète sortie du charbon (-97.5%), continue à être basé à 35% sur le gaz naturel ([source](#)) (non utilisé pour générer l'électricité dans le canton de Vaud)
- La densité moyenne de la population du Royaume-Uni est légèrement plus élevée (271 vs. VD 251, CH 217) ; surtout il faut distinguer les grandes villes et les régions peu peuplées
- L'économie du Royaume-Uni est plus intégrée que l'économie suisse et vaudoise : en 2019, le ratio des émissions de CO₂ de consommation par rapport aux émissions territoriales ([source](#)) est deux fois plus élevé en Suisse car une plus grande part de la consommation est importée. De ce fait, une décarbonation

complète de l'économie du Royaume-Uni est beaucoup plus difficile, car la part de l'industrie, déjà efficace, est plus importante :

- UK : 141%
 - CH : 316%
 - VD : 296%
- (=11.325/3.821)

Production vs. consumption-based CO₂ emissions

Annual consumption-based emissions are domestic emissions adjusted for trade. If a country imports goods the CO₂ emissions needed to produce such goods are added to its domestic emissions; if it exports goods then this is subtracted.



Source: Global Carbon Project
 Note: This measures CO₂ emissions from fossil fuels and cement production only - land use change is not included.
 OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions/ • CC BY

En conclusion, pour le sentier conceptuel de réduction des émissions GES sectorielles du canton de Vaud, nous pouvons recommander d'adopter les grandes lignes identifiées par CREDS, lesquelles seraient encore plus faisables dans le canton de Vaud par rapport au Royaume-Uni du fait du moindre poids relatif de l'industrie, de l'électricité déjà décarbonée, et de la richesse du pays.

Concrètement, nous proposons ces mesures, au-delà des mesures déjà engagées par le PCV-1 :

- Réduire la consommation énergétique pour le chauffage des bâtiments d'au moins 38% en 2050 (10% en 2030, 20% en 2040, tous par rapport à 2019 ; CREDS p.84 indique 30% : en Suisse la qualité des rénovation peut être supérieure); significativement réduire les nouvelles constructions (et surface par habitant), et généraliser les chauffages zéro émissions comme les pompes à chaleur.
- Réduire les distances parcourues en voitures individuelles de 55% en 2030, de 62% en 2040, et de 70% en 2050 (tous par rapport à 2019), et aller vers un parc 100% électrique dès 2040, ce qui nécessite d'arrêter rapidement la vente des voitures fossiles (CREDS, p.83, scénario "Transform").
- Réduire la production de ciment, de manière cohérente avec la réduction significative de nouvelles constructions. Dans la mesure du possible, rendre le secteur du ciment neutre en carbone, avec CCS et altération améliorée. Éliminer sur 15-20 ans tous les déchets non-biogéniques et leur incinération ; de ce fait les usines d'incinération deviennent les installations BECCS, à condition de disposer d'un stockage de CO₂ géologique à proximité.
- Adapter la composition de l'alimentation et spécifiquement réduire la consommation de viande, comme proposé par [EAT-Lancet 2019](#), sur une période de 15-20 ans, et adopter de manière universelle les pratiques agricoles régénératrices. Généraliser les bonnes pratiques détaillées dans l'étude HEPIA.

Cette analyse ne prend pas en compte le cadre légal et les compétences cantonales et fédérales à ce jour, ni les modifications nécessaires pour atteindre ces objectifs ; une étude dédiée est à recommander.

Une telle transformation nécessiterait des changements significatifs dans tous les secteurs de la société et devrait être basée sur une large (mais pas forcément universelle) acceptation par la population. Nous réitérons la recommandation du CREDS d'employer des méthodes délibératives comme des assemblées citoyennes, permettant un apprentissage et une construction d'opinions socialement partagés, et donc de meilleures décisions, mieux acceptées par la population.

Le tableau suivant contient une estimation de l'impact possible de nos recommandations. Il s'agit d'ordres de grandeur et non de chiffres précis. La méthodologie de notre estimation est détaillée en Annexe 6.

Estimations du potentiel de réduction des émissions de GES pour le canton de Vaud à partir de la réduction de la demande inspirée de CREDS, **en bleu**, par rapport à 2019 et 1990

Secteur	2030	2035	2040	2045	2050	Commentaires et mesures
Bâtiment-	-34%	-54%	-71%	-87%	-100%	2019 : 15% PAC, 10% chauffage par bois/biomasse (BM)

Energie						2030 : -10% m ² /cap, 30% PAC, 10% BM, -18% énergie 2040 : -20% m ² /cap, 60% PAC, 10% BM, -28% énergie 2050 : -30% m ² /cap, 90% PAC, 10% BM, -38% énergie
Mobilité	-71%	-85%	-100%	-100%	-100%	2030 : -55% km-voiture, 35% électrique 2040 : -62% km-voiture, 100% électrique 2050 : -70% km-voiture, 100% électrique
Industrie, incl. CCS	-40%	-52%	-65%	-77%	-90%	2050 : -70% ciment, -100% déchets plastiques, incl. CCS+EW (altération améliorée))
Agriculture incl. LULUCF	-30%	-50%	-70%	-90%	-110%	2050 : -67% viande, -50% impact total, NET (renaturation + séquestration) pour atteindre net zéro
Total par rapport à 2019	-50%	-67%	-83%	-92%	-100%	Sans compensations internationales
Total par rapport à 1990	-53%	-69%	-84%	-92%	-100%	Sans compensations internationales

5.5 Recommandations d'instruments de politique publique

Aucune politique publique sectorielle et aucun instrument ne permettra d'atteindre à lui seul tous les objectifs nécessaires à l'atteinte du net zéro vaudois, par exemple les objectifs que nous proposons. Une combinaison de tous les types d'instruments (économique, régulation, volontaire, investissement public) sera requise. Sans analyser le cadre juridique cantonal et fédéral et son évolution, une possibilité de combinaison de politiques publiques pourrait être :

- Instruments économiques :
 - Introduire rapidement un paiement sur toute émission GES selon le principe pollueur-payeur, pour financer les futures émissions négatives (> [détails de la proposition](#))
 - Introduire des incitations (taxes + subventions) pour limiter la surface habitable par personne
 - Éliminer toute incitation fiscale favorisant les émissions
 - Rendre la fiscalité plus juste, par exemple une taxation plus progressive avec élimination des exceptions, afin de rendre l'action collective pour le climat plus acceptable
- Prescriptions :
 - Sortie complète des énergies fossiles échelonnée sur 15-20 ans, plus rapide au début, par exemple -80% en 10 ans
 - Interdiction immédiate de la vente de voitures fossiles, et au plus tard dès 2035 ou 2040 aussi leur utilisation
 - Restrictions d'utilisation de biomasse (ressource précieuse, à utiliser en cascade pour le plus grand bénéfice collectif)
 - Impératif de remplacement des chauffages pour les rendre zéro émissions (par exemple par les pompes à chaleur ou le CAD) ; restrictions sur l'achat de gaz et mazout pour chauffer
 - Moratoire sur la construction de bâtiments en attendant un plan directeur cantonal des constructions éco-responsables
 - Fin de toute construction hors des périmètres urbanisés
 - Plan d'action pour restaurer et renaturer rapidement les marais et sols organiques
 - Restrictions sur les voyages en avion pour réduire significativement le volume et assurer les principaux bénéfices pour la société
 - Interdiction des emballages à usage unique
 - Restrictions sur tous les plastiques ayant un impact négatif sur la biosphère
- Investissement public :
 - Éducation et sensibilisation dans les écoles, communes, entreprises, administrations sur le thème du bien vivre avec peu de ressources environnementales

- Aide aux personnes pour la transition vers les styles de vie à 1.5°C (“1.5°C lifestyles”), par exemple pour déménager, trouver un travail plus adapté, réduire les transports
- Aide à toute personne mise en difficulté par les changements rapides de société (amortissement social)
- Mesures d’adaptation au changement du climat, notamment pour les infrastructures et les services essentiels, ainsi qu’un renforcement pour l’agriculture
- Mise en place des processus de démocratie délibérative à tous les niveaux
- Mesures volontaires :
 - Au vu de la responsabilité historique des pays riches, aide aux autres pays à atteindre leur net zéro, par exemple par les financements, les garanties, l’annulation de dettes, le transfert de connaissance et technologies, le partage des meilleures pratiques, etc. sans compter les réductions obtenues dans le bilan du pays donateur
 - Mise en place de contrats de fournitures de services locaux inclusifs, accessibles, responsables et bien intégrés à la communauté (“Social licence”)

Annexe 1 - Population, méthodologie, tableau de réductions

A1.1 Population cantonale Vaud

Population Vaud au 31.12 :

- 1990 : **574'660**
- 2015 : 767'497
- 2019 : **806'088** (1990 +40.3%)
- 2020 : **815'300**
- 2022 scénario moyen : 832'500
- 2030 scénario moyen : **902'100** (2019 +11.9%)
- 2040 scénario moyen : **978'100** (2019 +21.3%)
- 2050 scénario moyen : **1'044'500** (2019 +29.6%)

Sources : [OFS population Suisse 1950-2020](#), [Perspectives démographiques Vaud](#)

Pour référence, la population Suisse au 31.12 s'élève à :

- 1990 : **6'751'000**
- 2015 : 8'327'000
- 2019 : **8'606'000** (1990 +27.4%)
- 2020 : 8'670'000

A1.2 Méthodologie détaillée et étapes d'analyse

Les étapes suivantes décrivent notre méthodologie pour les deux parties de l'étude.

A. Evaluation des mesures opérationnelles et stratégiques du PCV-1

1. Analyser des documents suivants mis à disposition, publics ou internes et confidentiels :
 - a. PCV-1 (rapport public),
 - b. PCV-1 Mesures opérationnelles (V0) 09.06.2020 (interne)
 - c. Conception cantonale de l'énergie 19.06.2019 (CoCEn) (public)
 - d. Bilan des émissions de gaz à effet de serre du canton de Vaud V2.0 (Quantis, 16.06.2022)
 - e. Quantis Bilan GES 2015 (public)
 - f. Outil prospectif d'évaluation des effets des mesures sur la mobilité des résidents ou des déplacements en lien avec un territoire vaudois (DGMR 2022, Outil_prospectif_mobilite_DGMR_v25_bilan_carbone_extrait), (interne)
 - g. Distance journalière par personne et part modale (DGMR 2022, MobilitéVD_2015_2020_DGMR_v12), (interne)
 - h. Emissions directes de gaz à effet de serre liées à l'énergie (DIREN 2022, IND_08.06.01.01_Emissions_CO2_directes) (interne)
 - i. Consommation d'énergie finale (DIREN 2022, IND_08.01.01.01_Consommation_finale_totale) (interne)
 - j. Investissement programme bâtiment Vaud (public)
 - k. Rapport Cantonal Plan Bâtiment (données 2019) (public)
 - l. HEPIA "Etude du déficit de carbone organique des sols vaudois, taux d'évolution et relation avec les pratiques agricoles", 11.02.2021 (public)
 - m. Qualité des sols et séquestration de carbone organique, Synthèse des études et recommandations pour le Plan climat vaudois, DGAV - DAGRI, 17.02.2021

- n. Estimation-Réduction-GES-AgriVD (interne)
 - o. Exposé des Motifs et Projet de Décret (EMPD) pour financement des mesures agricoles du PCV-1, Grand Conseil, 07.06.2022
 - p. Indicateurs de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en Suisse 1990–2020, OFEV 04-2022
 - q. Nombreuses statistiques de l'OFS sur la population, bâtiments, ménages, consommation d'énergie, consommation et production de viande, etc.
2. Catégoriser les mesures opérationnelles par typologie d'action climatique : sobriété, efficacité, énergie renouvelable, CCS+NET
 3. Estimer l'effet GES dans chaque secteur (carburants, combustibles, agriculture, industrie), par catégorie (sobriété, efficacité, énergie renouvelable, CCS+NET)
 4. Identifier les 10 mesures proposées avec le plus grand impact en termes de réduction des émissions de GES, à étudier en détail
 5. Formuler les hypothèses pour les mesures identifiées en §4 en coordination avec les services/entités concernés
 6. Développer un simple modèle (Excel) pour estimer les émissions §4 sur base des hypothèses §5
 7. Valider les hypothèses §5 et le simple modèle §6 avec l'Unité du Plan Climat et selon besoin se coordonner avec d'autres entités cantonales, notamment DIREN, DGMR, DGAV, STAT VD.
 8. Si possible, valider les hypothèses §5 et/ou le potentiel de chaque mesure sur base de la littérature scientifique
 9. Estimer les émissions GES vaudoises 1990 à partir des indicateurs vaudois et suisses, utilisant plusieurs méthodes, et valider les hypothèses utilisées ; choisir une approche cohérente pour l'"affectation du sol et du territoire" (LULUCF)
 10. Expliciter la cohérence des estimations et la compatibilité des mesures

B. Réductions requises par secteur

11. Analyser la Stratégie climatique à long terme 2050 de la Confédération, en identifiant et estimant les spécificités vaudoises
12. Valider les hypothèses avec UPCL et selon besoin se coordonner avec les entités DIREN, DGMR, DGAV, STAT VD.
13. Comparer avec la littérature scientifique, notamment les travaux dans les domaines suivants : Low Energy Demand (LED), Decent Living Standards (DLS), 1.5°C Lifestyles, ainsi que les rapports IPCC SR15 et IPCC AR6
14. Développer / adapter une méthodologie pour créer un sentier conceptuel de réduction, sur base de faisabilité (simplifié) technique, économique et sociale, par secteur (carburants, combustibles, agriculture, industrie)
15. Comparer avec l'évaluation des mesures opérationnelles et stratégiques du PCV-1

Les hypothèses par secteur (énergie-bâtiment-industrie, mobilité, agriculture) sont détaillées dans leur annexe respective.

A1.3 Tableau de réductions PCV-1 en 2030

Réduction PCV-1 en 2030			BAU	BAU %	Mesures opérationnelles	Objectif PCV-1	Estimation service cantonal	Estimations LEURE	PCV-1 %	PCV-1 - BAU
% et kt en 2019	Total des réductions des émissions GES en kt CO2e par an, relatif à 2019									
Population			-565.7	-11.90%				-565.7	-11.90%	0.00%
Carburants / Mobilité	Sobriété	Réduction des déplacements, localisation des activités	-106.4	-2.24%				-106.4	-2.24%	0.00%
	Sobriété	Covoiturage, télétravail, moins d'offre route	22.9	0.48%	DGMR_17, Post PCV-1		78	48.0	1.01%	0.53%
	Efficiency	Report modal	-25.0	-0.52%	DGMR_1-11,17	225.1	118	90.7	1.91%	2.43%
43.5%	Efficiency	Entretien des routes, réductions de vitesse	0.0	0.00%	DGMR_13-16		23	25.4	0.53%	0.53%
2066	Efficiency	Transport de marchandises	13.0	0.27%	DGMR_21-22		20	18.0	0.38%	0.11%
Objectif sectoriel nécessaire 2030 : -71%	Energie propre	Electrification des véhicules privés et publics + Utilisation de voitures à faible émission	111.0	2.33%	DGMR_12, SAN_1-2, DIREN_4 (CoCEn_2021, p. 70, Annexe.6)	455	323	459.7	9.67%	7.33%
Combustibles / Energie, Industrie, Bâtiments (CoCEn)	Sobriété	Réduction de surface habitable	-68.5	-1.44%				-68.5	-1.44%	0.00%
35.3%	Efficiency	Rénovation bâtiments	67.3	1.42%	DIREN_1 (CoCEn_2021, p. 24, Tab.1)	280.5		131.5	2.77%	1.35%
1680	Energie propre	Production locale d'énergies renouvelables + Adapter les infrastructures			DIREN_1 (CoCEn_2021, p. 24, Tab.1)	incl. dans rénovation bâtiments		0.0	0.00%	0.00%
Objectif sectoriel nécessaire 2030 : -34%	Energie propre	Pompes à chaleur			DIREN_1 (CoCEn_2021, p. 24, Tab.1)	incl. dans rénovation bâtiments		0.0	0.00%	0.00%
Agriculture et affectation du sol et du territoire	Sobriété	Moins de production et consommation de viande							0.00%	0.00%
10.3%	Efficiency	Réduire les émissions et énergie dans l'agriculture	-5.6	-0.12%	DGAV 5	17	17	2.5	0.05%	0.17%
492	Efficiency	Affouragement et compléments d'alimentation bovine	0.0	0.00%	DGAV 4	24		4.2	0.09%	0.09%
Agriculture hors affectations	Energie propre	Biogaz	3.9	0.08%	DGAV 3	30	30	32.4	0.68%	0.60%
14.7%	NET	Séquestrer le carbone organique dans les sols	0.0	0.00%	DGAV 2, GEODE 1	100	100	46.7	0.98%	0.98%
697	NET	Biochar							0.00%	0.00%
Objectif sectoriel nécessaire 2030 : -30%	NET	Revitalisation des marais							0.00%	0.00%
Industrie	Sobriété	Moins de production et consommation industrielle	13.4	0.28%				13.4	0.28%	0.00%
10.9%	Efficiency				DIREN_1 (CoCEn_2021, p. 24, Tab.1)	incl. dans rénovation bâtiments		0.0	0.00%	0.00%
516	Energie propre				DIREN_1 (CoCEn_2021, p. 24, Tab.1)	incl. dans rénovation bâtiments		0.0	0.00%	0.00%
Objectif sectoriel nécessaire 2030 : -40%	CCS+NET	Incinerateurs+CCS, ciment+CCS, béton EW						0.0	0.00%	0.00%
TOTAL, par rapport à 2019			-539.8	-11.35%		1131	709	131.8	2.77%	14.13%
GES kt CO2e territoriales	2019	4754	Quantis 2022			Par rapport à 1990 (estimé)		381.8	7.63%	13.42%
	2030 max	2502	Objectif -50% (base 1990)							
		2252	Objectif -55% (base 1990)							
	2030 min	2002	Objectif -60% (base 1990)							
	1990 estimation	5004	Estimation, Annexe 5							
	2030 avec PCV-1	4622								
	2030 sans PCV-1	5294								
					Qualité des données :	*	**	***	****	

Code couleur : texte noir mesure incluse dans PCV-1 ; texte orange non-inclus dans PCV-1 (voir typologie de l'action climatique, §3)

Chiffres sur fond en couleur : confiance élevée, moyenne, faible

Toutes les variations par rapport à 2019, sauf la dernière colonne qui mesure la variation par rapport à BAU

Annexe 2 - Hypothèses et détails d'analyse Energie / Bâtiment / Industrie

Le tableau ci-dessous résume les résultats pour ce secteur :

Réduction PCV-1 en 2030			BAU [kt]	BAU %	Mesures opérationnelles	Objectif PCV-1	Estimation service cantonal	Estimations LEURE [kt]	PCV-1 %	PCV-1 - BAU %
Combustibles / Energie, Industrie, Bâtiments (CoCEn)	Sobriété	Réduction de surface habitable	-68.5	-1.44%				-68.5	-1.44%	0.00%
35.3%	Efficiency	Rénovation bâtiments	67.3	1.42%	DIREN_1 (CoCEn_2021, p.24, Tab.1)	280.5		131.5	2.77%	1.35%
1680	Energie propre	Production locale d'énergies renouvelables + Adapter les infrastructures			DIREN_1 (CoCEn_2021, p.24, Tab.1)	incl. dans rénovation bâtiments		0.0	0.00%	0.00%
Objectif sectoriel nécessaire 2030 : -34%	Energie propre	Pompes à chaleur			DIREN_1 (CoCEn_2021, p.24, Tab.1)	incl. dans rénovation bâtiments		0.0	0.00%	0.00%

Code couleur : texte noir mesure incluse dans PCV-1 ; texte orange non-inclus dans PCV-1 (voir typologie de l'action climatique, §3)

Chiffres sur fond en couleur : confiance élevée, moyenne, faible

Toutes les variations par rapport à 2019, sauf la dernière colonne qui mesure la variation par rapport à BAU

A2.1 Emissions GES totales

- StatVD, consommation d'énergie finale :
 - [en TWh] 18.2 (2019), 16.5 (2020), 18.0 (2022), 15.3 (2030), 13.1 (2050)
 - [en PJ] 65.4 (2019), 59.4 (2020), 64.9 (2022), 54.9 (2030), 47.2 (2050)
 - Estimation Δ 2022/2019 : -0.74%
- Emissions directes de gaz à effet de serre liées à l'énergie 2019 : 2854 kt CO_{2e}
- Emissions 2019 combustibles + gaz naturel (IND_08.06.01.02) : 1502 kt CO_{2e} (52.6%)
 - Emissions 2030, total 2300 kt CO_{2e}
 - Emissions 2030 combustibles + gaz naturel (réduction prorata) : 1210 kt CO_{2e}
 - Bâtiments d'habitation : 45% gaz, 55% mazout
- CoCEn réduction 2019->2030, **292 kt CO_{2e}** = 1502-1210, linéaire (réduction annuelle constante)
- Emissions 2022 combustibles + gaz naturel correspondent à celles de 2019, ajustées selon l'estimation StatVD (-0.74%), ensuite réduction exponentielle (% de réduction annuel constant) selon le scénario choisi, détails ci-après dans la section "Rénovation des bâtiments"

A2.2 Surface habitable par personne

- Vaud historique : 40-43-46 m² en 1980-1990-2000
- OFS: 43 m² en 2019 ([Surface moyenne par habitant selon le nombre de pièces, par canton](#))

- Stable 42.4 m² 2012-2016, ensuite depuis 2017 : **+0.2 m²/an**
- Perspectives énergétiques 2050+ : +22% total, +30% résidentiel 2015-2050
 - Population 8.282 M (2015), 10.440 M (2050, [ref scenario](#)), +26% → +3.1% surface/personne ; → +1.3% 2015-2030
- Selon l'OFS, la taille moyenne des ménages vaudois diminue lentement (2015-2019 [source](#) ; 2020-2030 [source](#))
 - 2015 2019 2020 2030
 - 2.26 2.23 2.24 2.22
- L'évolution passée des m² par personne a surtout été expliquée par la variation de la taille des ménages ; cette évolution semble se poursuivre, notamment à cause de l'augmentation de richesse
- Par contre, une analyse de StatVD, 2017, "[Perspectives de ménages 2015 – 2040](#)", tableau T2.3 en page 12, scénario moyen, projette une stabilité 2020-2030 de la taille des ménages, à 2.27. Nous ne pouvons pas prédire l'avenir, mais les chiffres OFS semblent plus dans la continuité des tendances passées.
- **Hypothèse retenue** : +0.2 m²/an ou +2.2 m² / 43 m² entre 2019 et 2030, → **+5.1%** sur 80% des émissions GES Energie-Industrie-Bâtiments sur base d'extrapolation historique
- Ces estimations concordent avec celles de la DIREN et de STAT VD

A2.3 A. Rénovation des bâtiments (Programme Bâtiments, PB)

- Le parc immobilier suisse a consommé environ 96 TWh en 2018 (corrigé des variations météorologiques ; 45% de la consommation d'énergie finale de la Suisse), dont 88% pour le chauffage et l'eau chaude, dont 2/3 fossils (source [suisseenergie.ch](#)).
- [Parc immobilier 2050 – Vision de l'OFEN](#) (mars 2022) prévoit une réduction d'énergie totale du bâtiment suisse à 65 TWh, et une réduction par m² de 55% relativement à 2010 (72 kWh/m²/an en 2050, contre 156 kWh/m²/an en 2010). Le parc suisse comprend 1.8 million de bâtiments à usage d'habitation, dont 1 million de maisons individuelles et 500'000 immeubles.
- Surface totale chauffée suisse : 800 km² ([source](#))
 - Surface totale logements vaudois : 38.5 km² ([source](#) Stat Vaud)
- Efficacité énergétique des bâtiments [kWh/m²/an]
 - Construction 1950 : 150
 - Construction 2020 : 35
 - Parc suisse 2019 : 140 (estimé à partir de 156 en 2010)
 - Parc vaudois en 2019 comme le parc suisse : 140
 - Après rénovation (qui a lieu après 2019) : 50

Trois méthodes de calcul sont effectuées pour obtenir un résultat le plus plausible et probable :

Méthode 1 :

- **Efficience / isolation** : Bâtiments rénovés par an - hypothèses pour le Canton de Vaud
 - Total **0.8%** des bâtiments rénovés chaque année (CoCEn, p.25, §4.4.1)
 - Le périmètre de calcul du PB concerne les logements (en majeure partie) et aussi les PME (ne faisant pas partie des conventions d'objectifs, qui concerne les grandes entreprises)

- BAU, scénario A (“Hypothèses”, DIREN), réduction annuelle de besoins énergétiques du bâtiment vaudois : **0.2875%** = $0.8\% \times (1 - (20\% \times (160-50)/160 + 50\% \times 80\% + 30\% \times (160-105)/160))$; Réduction GES annuelle BAU en 2030 (selon modèle dans la feuille de calcul qui accompagne de rapport, onglet “Énergie”) : **27.3 kt CO_{2e}**
 - 20% de rénovations complètes, passant de 160 à 50 kWh/m²/an (M01+M14)
 - 50% de rénovations correspondent à l’isolation thermique partielles, notamment des toits, permettant de gagner 20% sur la consommation d’énergie (M01)
 - 30% de rénovations de façade partielles, l’amélioration correspond à la moitié d’une rénovation complète (M01)
 - Efficience moyenne des bâtiments avant rénovation (plus élevé que le parc suisse ou vaudois, car les bâtiments inefficients sont rénovés en priorité) : 160 kWh/m², notre estimation à partir de CREM-DIREN 2014 “Rapport méthodologique Zones favorables aux réseaux thermiques : Cadastre de la densité thermique froid et chaleur” et CREM-OFEN 2018 “Effets de la politique climatique et énergétique dans les cantons 2016, Secteur du bâtiment”
- PCV-1, accélération des rénovations, scénario B (“Hypothèses”, DIREN) : réduction annuelle de besoins énergétiques du bâtiment vaudois : **0.5175%** = $1.8 \times 0.2875\%$ (**taux de rénovation x1.8**, investissements x2)
- Réduction GES annuelle PCV-1 en 2030 (selon modèle dans la feuille de calcul, onglet “Énergie”) : **48.7 kt CO_{2e}**
- Les bâtiments appartenant au canton (1’300 bâtiments, 1’275’000 m²) représentent 1.57% des surfaces totales (=1.275 km²/81.2 km², réf. “Modellierung TEP-Energy auf Basis Gebäudeparkmodell 2021”, TEP Energy GmbH, Zürich, 2022, par la DIREN), et n’affectent pas significativement ce calcul, même s’ils présentent une ambition supérieure du niveau de rénovation ([source](#)) ou financements (CHF 86m, [source](#))
- **Energie propre / remplacement des chauffages**
 - Chaleur ambiante de l’environnement (énergie thermique extraite de l’environnement) : 300 GWh/an en 2015 (28’000 installations), évolution PAR “Politique actuelle de référence” (BAU) 630 GWh/an en 2030 (CoCEn, p.99)
 - Augmentation de la puissance thermique cumulée 2019-2030 des PAC (BAU) = $11/15 \times (630-300)$ GWh/an = 242 GWh/an
 - Les pompes à chaleur remplacent le mix énergétique suivant : 45% gaz, 55% mazout
 - Facteur de substitution : $299.99 \text{ kt CO}_2\text{e/TWh} = 45\% \times 290.8 + 55\% \times 307.5 \text{ kt CO}_2\text{e/TWh}$
 - La réduction GES correspondant à 242 GWh/an en 2030 est de 72.6 kt CO_{2e} (299.99×0.242)
 - Nous pensons que la réalité du scénario de continuité sera loin derrière cet objectif ambitieux, en absence du PCV-1, et estimons à 50% en coordination avec la DIREN l’évolution BAU probable : **36.3 kt CO_{2e}** dû au remplacement des chauffages
 - Pour PCV-1, la Méthode 3 indique une réduction correspondant aux objectifs de la CoCEn de 85.2 kt CO_{2e}, ce qui semble assez ambitieux. De ce fait, nous estimons que 90% de ce potentiel pourrait être réalisé avec les moyens prévus : **76.7 kt CO_{2e}** ($90\% \times 85.2$)
 - Alternativement, appliquant l’accélération de 1.8x au chiffre BAU, nous obtenons 65.3 kt CO_{2e} (1.8×36.3).
- **Évolution BAU Isolation + Chauffages : 63.6 kt CO_{2e}** (27.3 + 36.3)
 - Y compris les conventions d’objectif des entreprises : **67.3 kt CO_{2e}**
- **Évolution PCV-1 Isolation + Chauffages : 125.4 kt CO_{2e}** (48.7 +76.7)
 - Y compris les conventions d’objectif des entreprises : **129.1 kt CO_{2e}**

Méthode 2 : Efficacité Financière - [Le Programme Bâtiments, Rapport annuel 2020](#) : environ 17’000 bâtiments ont été rénovés en 2020, ou **0.94%** par an

- Suisse

- Montant de subventions total: CHF 2.3 milliards
- Réduction GES cumulée : 16 Mt CO_{2e} ; subventions de CHF 141 / t CO_{2e}
- Réduction GES annuelle : 0.66 Mt CO_{2e} ; CHF 3480 / t CO_{2e} (sur 24 ans)
 - Le Rapport 2020 du programme bâtiment suisse indique en p.2: “*Le parc immobilier suisse a ainsi pu réduire sa consommation annuelle d’énergie de 2,5 milliards de kilowattheures (kWh) et ses émissions annuelles de CO₂ de 660000 t. L’effet des mesures subventionnées se cumulent sur toute leur durée de vie pour atteindre près de 65,5 milliards de kilowattheures et plus de 16 millions de tonnes de CO₂*”. 660 kt CO₂ annuelles et 16 Mt total impliquent une durée de vie de la rénovation de 24 ans (16E6/660E3)

- Vaud - calcul des réductions GES à partir des subventions pour la rénovation

- Montant de subventions total : CHF 550 millions (ca. 50 millions/an x 11 ans, CoCEn, graphique p.59, texte p.60 ; aussi DGE finances)



Programme Bâtiments (PB)

- 1 programme Bâtiments défini chaque année
- 1 an pour engager et 5 ans pour dépenser
- 5% de frais de gestion distribués par la Confédération

- “Ensuite, l’analyse du fonds pour l’énergie indique, pour les années 2023 à 2026, une part VD de CHF 15 mios/an et une part CH de CHF 33 mios/an”

(en milliers CHF)						
PB	Part VD	Part CH	Total	% VD	% CH	Frais gestion
PB 2017	5'000	28'622	33'622	15%	85%	1'435
PB 2018	7'000	31'547	38'547	18%	82%	1'598
PB 2019	14'000	38'040	52'040	27%	73%	1'914
PB 2020	15'000	39'931	54'931	27%	73%	1'999
PB 2021	15'000	35'431	50'431	30%	70%	1'778
PB 2022	15'000	34'849	49'849	30%	70%	1'742
Total	71'000	208'420	279'420	25%	75%	10'466

- Réductions GES cumulées résultant des subventions totales de CHF 550 m : 3.90 Mt CO_{2e} = 550m/141
- Réduction GES annuelle en 2030 : **162.5 kt CO_{2e}** = 3900/24 (sur 24 ans)
- 162.5 kt annuels en 2030 correspondent à **1.79%** d’amélioration d’efficacité énergétique du bâtiment vaudois par an, ou à un taux de rénovation théorique (base 100% isolations, aucune PAC) de **4.99%** p.a. (=1.792*0.8/0.2875), bien supérieur au 1.44% (1.8 x 0.8%) suggéré.
- **Facteur de correction pour la canton de Vaud** : les échanges avec la DIREN ont mis en évidence la nécessité d’ajuster les facteurs basées sur la moyenne suisse, compte tenu de la nature des rénovations vaudoises “priviliégiant l’isolation des bâtiments plutôt que les installations de chauffage”, et obtenant des réduction GES par CHF de subvention plus faible. Ce facteur de correction peut être calculé à partir du Rapport Cantonal Plan Bâtiment et s’élève à **78.67%**, correspondant aux réductions GES par CHF de subvention vaudoise relatif à la subvention moyenne du programme bâtiment suisse.
- Répartition des réductions CO₂ entre mesures d’isolation et remplacement des chauffages : selon le rapport programme bâtiments détaillé par canton (chiffres 2020, effet énergétique par classe de mesures), 45% des mesures PB incluent l’isolation (isolation et rénovation du système),

Programme bâtiments	CH_ENER_2020	VD_ENER_2020
Isolation thermique	38.00%	43.58%
Installations techniques	32.20%	37.00%
Rénovation du système	11.04%	1.16%
Nouvelle construction	3.54%	2.28%
Approvisionnement en chaleur centralisé	15.22%	15.98%
Total général	100.00%	100.00%

comparable à la méthodologie CoCEn 2019 :

- **Note** : ce taux de rénovation suit le même périmètre relativement large que celui défini dans la CoCEn, c’est-à-dire qu’un bâtiment est inclus dans ce taux dès lors qu’une subvention d’isolation, même mineure, est octroyée. Il s’agit bien d’une estimation de taux de rénovation concernant

l'isolation. Le rôle de l'isolation au sein des différentes mesures du Programme Bâtiments sur la période 2022-2030 est en effet difficile à estimer sans une étude plus poussée.

- Réduction GES annuelle en 2030 avec le facteur de correction pour le canton de Vaud : **127.8 kt CO_{2e}/an** = $162.5 \text{ kt CO}_{2e}/\text{an} \cdot 0.7867$. Cette réduction correspond à **1.40%** d'amélioration d'efficacité énergétique du bâtiment vaudois par an, ou un **taux de rénovation de 3.90% par an** ($1.40\% \cdot 0.8/0.2875$), isolations et chauffages confondus, ou environ **1.74% par an** ($1.39\% \cdot 0.8/0.2875 \cdot 45\%$) des rénovations incluant l'isolation (taux méthodologiquement comparable à celui présenté dans la CoCEn 2019).
 - Y compris les conventions d'objectif des entreprises : **131.5 kt CO_{2e}**

A2.3 B. **Méthode 3** : Validation de cohérence à partir de la contribution des **pompes à chaleur**

- Chaleur ambiante de l'environnement (énergie thermique extraite de l'environnement) : 300 GWh/an en 2015 (28'000 installations), objectif 810 GWh/an en 2030 (CoCEn, p.30, p.99)
 - Augmentation de la puissance thermique cumulée 2019-2030 des PAC (PCV-1) = $11/15 \times (810-300)$ GWh/an = 374 GWh/an ou 34 GWh/an²
 - Les pompes à chaleur remplacent 45% gaz, 55% mazout
 - Facteur de substitution : **299.99 kt CO_{2e}/TWh** = $45\% \times 290.8 + 55\% \times 307.5 \text{ kt CO}_{2e}/\text{TWh}$
- Il faut distinguer les pompes à chaleur installées dans les nouveaux bâtiments (dont 48% en sont équipés, soit 637 sur 1327 bâtiments chauffés en 2019) et les rénovations ([Registre fédéral des bâtiments et des logements](#), registre vaudois téléchargé, variable d'année de construction GBAUJ == 2019 sélectionnée, et comptage des installations de chauffage (GWAERZH1))
 - Nous prenons l'hypothèse d'une efficacité thermique des bâtiments nouveaux de 35 kWh/m². En 2019, StatVD indique 4733 logements construits ([Nouveaux logements construits, selon le type de bâtiments, Vaud, depuis 1996](#)) ou 487'500 m² (= $4733 \times 103 \text{ m}^2$) ([source](#))
 - 48% de cette surface correspond à 234'000 m² de nouveaux logements avec PAC
 - L'énergie correspondante est de 8.19 GWh ($234'000 \text{ m}^2 \times 35 \text{ kWh/m}^2$)
 - Les bâtiments nouveaux représentent 24% (= $8.19/34$) de l'augmentation de la puissance thermique annuelle moyenne des PAC
- La réduction GES correspondant à la rénovation par PAC est de 284 GWh/an = $11 \cdot (34-8.19)$ GWh/an en 2030, ou **85.2 kt CO_{2e}** (299.99×0.284), et représente 66.7% ($85.2/127.8$) des réductions du programme bâtiment, dont elle fait partie. Même si les pompes à chaleur représentaient 38.7% = $(78\% \times 7155 + 52\% \times 2240)/(7155+2240+8050)$ des rénovations suisses en 2020, leur contribution de 66.7% semble plus élevée que notre estimation précédente (méthode 2) mais possible, car il s'agit de mesures qui sont particulièrement efficaces d'un point de vue CO₂.

En résumé, nous avons validé par trois méthodes la cohérence des calculs par rapport aux hypothèses et aux moyens mis en place ; par contre, nous sommes loin d'observer le taux de rénovation de 3.90% (isolation et/ou chauffage, ou 1.74% pour le taux relatif à l'isolation qui est celui utilisé dans la CoCEn) par an correspondant aux moyens prévus (méthode 2) : soit il faut du temps pour l'atteindre, soit l'objectif est trop ambitieux vu l'approche entièrement volontaire. A ce stade, il est difficile de le dire.

A2.3 C. Convention d'objectif d'entreprise

- Émissions totales GES en kg CO_{2e} / MWh = kt CO_{2e} / TWh (Quantis 2022, p.71)
 - Gaz naturel : 290.8
 - Mazout : 307.5

- Émissions thermiques totales en 2019 : **295.8 kt CO_{2e}** = 1.03 (70% x 290.8 + 30% x 307.5) kt CO_{2e}
- Convention d'objectif d'entreprise est possible pour les [grands consommateurs](#), thermique ou électrique, selon la loi sur l'énergie (LVLEne) et le règlement (RLVLEne) :
 - >5 GWh thermique : 73 entreprises en 2019
 - >0.5 GWh électrique : 680 entreprises en 2019
 - Consommation d'énergie thermique concernée totale en 2019 : 1'025'752'365 kWh
 - Arrondi à **1.03 TWh**, dont environ 70% gaz et 30% mazout
- [Amélioration d'efficacité énergétique relative requise](#) (conventions cantonales) : 20% sur 10 ans, en moyenne **1.84%** par an
 - seulement 0.92% pour l'électricité du fait de sa surpondération (facteur 2)
 - Mêmes améliorations pour les convention d'objectifs de la Confédération ou cantonales
 - **Aucune différence matérielle entre BAU et PCV**
 - Partie conventions **cantonales** : nous gardons **1.84%** d'amélioration d'efficacité **relative** sur 41/659 entreprises = **6.2%** de la consommation (hypothèse : même consommation moyenne pour les deux types de convention)
 - Partie conventions **fédérales** : -12.8% sur 10 ans, ou **1.36%** d'amélioration d'efficacité **relative** sur 618/659 entreprises = **93.8%** de la consommation (hypothèse : même consommation moyenne pour les deux types de convention)
 - Moyenne d'amélioration d'efficacité relative pondérée pour les deux types de convention : **1.39%**
= 1.84% * 6.2% + 1.36% * 93.8%
 - Augmentation d'activité : PIB suisse 2019-2030 passerait de CHF 703 à 805 GCHF (+14.5%) ; en moyenne cela correspond à 1.23% de croissance annuelle
 - Finalement, appliquant 1.23% de croissance à 1.39% d'amélioration d'efficacité relative, nous avons une **amélioration d'efficacité absolue de 0.16% p.a.** (reporté dans le tableau de calcul)

A2.4 Emploi, compétences

- [Le Programme Bâtiments](#) a investi 300 MCHF en 2020, pour 2100 nouveaux emplois. Utilisant ce même ratio, nous estimons que le programme bâtiment du PCV-1 va créer 350 emplois, y compris environ la moitié de nouveaux emplois, une petite fraction des 28'500 emplois dans la construction vaudoise ([source](#)).

A2.5 Augmentation des émissions GES de la production industrielle territoriale

Nous distinguons trois types d'émissions :

- Les émissions GES liées à la consommation de produits industriels, qui sont essentiellement importés et ne figurent pas dans les émissions territoriales
- Les émissions liés à l'énergie électrique ou thermique utilisée dans l'industrie, déjà comptabilisées dans la partie énergie (CoCEn)
- Les émissions des procédés industriels, pour le canton de Vaud essentiellement la cimenterie d'Eclépens de Holcim, de l'incinération de déchets, et des sources plus distribuées (liées aux COV, HFC etc.) estimées par Quantis. Ce total est estimé à 414.3+101.7=516 kt CO_{2e} en 2019, en augmentation de 3.2% par rapport à 2015 (500 kt CO_{2e}).

Hypothèse retenue : extrapolation de la tendance 2015-2019, avec une augmentation de **9%** sur 11 ans (2019-2030) et des émissions GES de la production industrielle territoriale de **563 kt CO_{2e}** en 2030. Par personne, cette augmentation correspond à une réduction de 2.5% ou 13.4 kt CO_{2e}.

Annexe 3 - Hypothèses et détails d'analyse Agriculture

Le tableau ci-dessous résume les résultats pour ce secteur :

Réduction PCV-1 en 2030			BAU [kt]	BAU %	Mesures opérationnelles	Objectif PCV-1	Estimation service cantonal	Estimations LEURE [kt]	PCV-1 %	PCV-1 - BAU %
Agriculture et affectation du sol et du territoire	Sobriété	Moins de production et consommation de viande							0.00%	0.00%
10.3%	Efficiencie	Réduire les émissions et énergie dans l'agriculture	-5.6	-0.12%	DGAV 5	17	17	2.5	0.05%	0.17%
492	Efficiencie	Affouragement et compléments d'alimentation bovine	0.0	0.00%	DGAV 4	24		4.2	0.09%	0.09%
Agriculture hors affectations	Energie propre	Biogaz	3.9	0.08%	DGAV 3	30	30	32.4	0.68%	0.60%
14.7%	NET	Séquestrer le carbone organique dans les sols	0.0	0.00%	DGAV 2, GEODE 1	100	100	46.7	0.98%	0.98%
697	NET	Biochar							0.00%	0.00%
Objectif sectoriel nécessaire 2030 : -30%	NET	Revitalisation des marais							0.00%	0.00%

Code couleur : texte noir mesure incluse dans PCV-1 ; **texte orange** non-inclus dans PCV-1 (voir typologie de l'action climatique, §3)

Chiffres sur fond en couleur : confiance élevée, moyenne, faible

Toutes les variations par rapport à 2019, sauf la dernière colonne qui mesure la variation par rapport à BAU

A3.1 Séquestration du carbone dans les sols agricoles - méthodes

- Toutes les mesures, annoncées dans le communiqué [“28 millions pour réduire les émissions de gaz de serre du secteur agricole tout en favorisant la production”](#) du 7 juin 2022, et détaillées dans [l'Exposé des Motifs et Projet de Décret](#) (EMPD), publié le même jour, sont entièrement incitatives et volontaires, et de ce fait difficiles à chiffrer.
- L'EMPD définit les mesures et financements jusqu'à 2026 ; si ces mesures portent leurs fruits, elles seront sûrement reconduites, voire élargies. De ce fait, notre estimation porte sur une extension cohérente avec l'EMPD pour 2023-2026, avec une certaine accélération ensuite. Nous espérons que la suite dès 2027 se basera sur les enseignements de 2023-2026.
- Malgré l'écart entre le potentiel élevé, défini par HEPIA, et les modalités beaucoup plus limitées définies dans l'EMPD, ce n'est pas une limitation fondamentale. En effet, dans une perspective volontaire, l'adhésion ne dépasse pas les 1000 exploitations budgétées par l'EMPD en 4 ans (2023-2026).
- Le monitoring continu des pratiques et de leurs effets (par exemple, la teneur de carbone dans le sol) est essentiel. Les mesures prévues par l'EMPD doivent très probablement être élargies ; des études complémentaires (HEPIA) sont en cours. Il est important de commencer dès maintenant à réfléchir à la suite dès 2027, en lien avec l'évolution du plan climat.
- Surfaces agricoles du canton de Vaud : 110'000 ha
 - Surfaces agricoles en grandes cultures : 50'000 ha

- Surfaces agricoles en grandes cultures en déficit (75%) : 37'500 ha
- Émissions GES des sols agricoles vaudois [en kt CO₂e] :
 - L'étude Quantis indique pour 2019 : 43.3 kt CO₂e (p.59). Il s'agit d'une estimation très approximative à partir des moyennes suisses, que nous n'utilisons pas pour notre analyse.
 - A partir de l'analyse HEPIA 2021 "[Etude du déficit de carbone organique des sols vaudois, taux d'évolution et relation avec les pratiques agricoles](#)", nous estimons le carbone organique contenu dans les 20 cm supérieurs des sols des grandes cultures vaudoises déficitaires en carbone organique (surface 37'500 ha, densité des sols 1'333 kg/m³, carbone organique 1.5%) à 40 t/ha. Une augmentation actuelle d'environ 0.9% par an correspond à 0.36 t/ha/an C ou 1.32 t/ha/an CO₂, soit pour toute la surface 49.49 kt/an (=375E6*0.2*1333*1.5%/44/12*0.9%/1E6)
 - Sur la base des mesures détaillées dans cette analyse et la courbe asymptotique résultante (p.20), nous estimons qu'en absence des mesures supplémentaires du PCV-1, ce taux restera inchangé à 0.9% en 2030. Pour notre scénario BAU, il n'y a pas de changement significatif de 2019 à 2030. Par contre, avec des mesures appropriées, le potentiel de séquestration de carbone dans les sols vaudois est très élevé.
- Potentiel de séquestration de carbone dans les sols vaudois (HEPIA 2021)
 - Environ 75% des sols de grandes cultures du canton de Vaud sont en déficit de carbone organique, ayant un ratio matière organique/argile <17%
 - Potentiel si augmentation du ratio matière organique/argile à x% de tous les sols ayant un ratio inférieur à x% :
 - **17% : potentiel de séquestration 2'000 kt CO₂e (scénario de référence retenu)**
 - 20% : potentiel de séquestration 4'000 kt CO₂e
 - 24% : potentiel de séquestration 6'000 kt CO₂e
- Scénarios de 30%, 50% et 70% du potentiel de séquestration de carbone atteint en 2050, sur base volontaire (**scénario de référence retenu : 70%**)
- Dynamique d'augmentation de carbone dans le sol
 - Signature de contrat avec les services cantonaux s'engageant à mettre en pratique les méthodes agricoles favorisant la séquestration de carbone dans les sols. Augmentation linéaire de 2023 à 2037, quand selon scénario les agriculteurs représentant 30%-50%-70% des surfaces des sols déficitaires vaudois auront signé
 - Le potentiel de séquestration de carbone de nouveaux contrats avec les agriculteurs reste constant pendant toute la période
 - Trois ans de préparation : formation, préparation d'équipements, tests en petite surface, échange d'expérience. Pendant cette période, le carbone dans le sol n'augmente pas.

Méthode 1

- Pendant 10 ans le taux de carbone augmente linéairement dans le sol jusqu'à atteindre un taux de matière organique/argile finale (dans le scénario de référence 17%). Le taux de séquestration requis est de 2 Mt CO₂ sur 10 ans sur base de la totalité des sols vaudois déficitaires en matière organique (ratio matière organique/argile <17%), soit 37'500 ha, ou 200'000 t CO₂ / 37'500 ha / an = 5.33 t CO₂/ha/an. Un tel chiffre aurait peu de sens sur une exploitation individuelle, vu la variabilité (de teneur en C, topologie, saturation en C asymptotique, et pratiques individuelles), mais statistiquement, sur des centaines d'exploitations, devrait s'approcher à qq. % de l'estimation par les moyennes trouvées dans la littérature scientifique de la méthode 2, ci-après

Méthode 2

- Les valeurs séquestration de carbone dans les sols sont validés utilisant la somme des principales mesures à partir de la littérature scientifique (non labour des sols (0.2 [t C/ha/an]), une réduction de l'utilisation d'engrais minéraux azotés (0.3 [t C/ha/an]), l'utilisation de fumier (0.45 [t C/ha/an]), la rotation des cultures (0.16 [t C/ha/an]) et la plantation de légumineuses (0.25 [t C/ha/an])) trouvées dans la littérature scientifique (références [8,9,10,11,12]), appliquées en perpétuité, et augmentant le taux de carbone pendant 10 ans avant stabilisation à un ratio de matière organique/argile de 17%: $4.99 \text{ t CO}_2/\text{ha/an} = (0.2+0.3+0.45+0.16+0.25)*44/12 \text{ t CO}_2/\text{t C}$

A3.2 Séquestration du carbone dans les sols agricoles - scénarios

Scénario de continuité

Nous trouvons dans l'inventaire fédéral des gaz à effet de serre, les émissions liées à l'utilisation des sols agricoles depuis 1990 jusqu'à 2019 [1]. Les surfaces agricoles du canton de Vaud représentent 11% de toutes les surfaces agricoles suisses [2] et nous pouvons donc estimer que les émissions des sols agricoles du canton de Vaud correspondent à 11% du total des émissions. Ce ratio et calcul est aussi utilisé dans le Tableau 29, p.60 de Quantis. Ainsi, nous prenons les émissions dues aux sols agricoles en 1990 et en 2019 et nous calculons une augmentation ou diminution moyenne par année qu'on peut ensuite comparer avec l'objectif du canton.

Stockage moyen des sols agricoles par an

$$= \frac{\text{Émissions des sols vaudois en 1990} - \text{Émissions des sols vaudois en 2019}}{2019 - 1990}$$

Objectif Plan Cantonal Vaudois

Nous regardons dans le Plan climat vaudois - 1^{ère} génération - qui a comme objectif un stockage de 3 à 5 Mt CO_{2e} entre 2020 et 2050 [3]. Cela correspond donc à une fourchette 100 kt de CO_{2e} à 167 kt de CO_{2e} stockés par an dans les sols vaudois.

Estimation service cantonal

En se basant sur le tableau du potentiel de réduction de CO₂ de l'agriculture vaudoise, nous avons un objectif, avec une participation totale, de 100 kt CO_{2e} par an.

Autres estimations officielles

Dans le plan climat cantonal de Genève, nous voyons que leur objectif CO₂ est de 15'000 tonnes de CO_{2e} [4] sachant que ce canton a une surface agricole de 10'050 hectares et une structure de cultures comparable [5]. Grâce à cela nous trouvons donc un rapport de tonnes de CO_{2e} stockées par hectares :

$$\text{Tonnes de CO}_2 - \text{équivalent par hectare} = \frac{15'000}{10'050} = 1.5 [\text{t CO}_2\text{e/an/ha}]$$

Nous pouvons ensuite multiplier ce chiffre par le nombre d'hectares agricoles dans le canton de Vaud qui sont en déficit de matière organique (c'est le même chiffre avec lequel nous allons calculer notre estimation), soit 114'500 ha x 1.5 t CO_{2e}/ha = 172 kt CO_{2e} [6], pour trouver une estimation de ce que cet objectif représenterait à l'échelle du canton de Vaud. Cependant, la fiabilité de cette estimation est faible dans la mesure où la structure et les caractéristiques des sols diffèrent significativement.

Estimations LEURE

Nous posons comme objectif que les sols de grandes cultures du canton de Vaud qui sont en déficit, soit 75% [6], atteignent tous un ratio matière organique/argile de 17% d'ici 2050. Nous savons que les hectares de grandes cultures du canton de Vaud représentent 50'000 hectares [7] et nous travaillons donc ici sur 37'500 hectares (75%). Une étude de l'HEPIA (2021) a montré que le déficit de ses hectares par rapport à un ratio de 17% représente 2'000'000 tonnes de CO_{2e}. Ainsi, sachant qu'on a pour objectif un taux de participation de 70%, nous devrions atteindre en 2050, 1'400'000 tonnes de CO_{2e} stockés dans les sols.

L'augmentation du carbone dans les sols ne peut pas être un phénomène immédiat. Ainsi, afin de prendre cela en compte, nous supposons qu'une fois qu'un agriculteur a accepté de participer à des programmes d'augmentation du carbone dans les sols, il y a alors 3 ans pendant lesquels il ne se passe rien sur le sol directement mais où l'agriculteur met en place les mesures, prend des cours, achète des équipements, etc. Ensuite, pendant 10 ans le carbone augmente linéairement sur la parcelle de l'agriculteur jusqu'à ce que le ratio de 17% soit atteint uniformément.

Nos résultats montrent qu'une séquestration annuelle de **46.7 kt CO_{2e}/an** en 2030 serait possible, dans le scénario le plus optimiste visant 70% de participation en 2050. Ce scénario nécessite une mise en place assez ambitieuse atteignant le taux de participation 37.3% en 2030, car il s'agit d'un programme entièrement volontaire. Ce scénario représente la fourchette haute de ce qui semble possible, si les moyens nécessaires sont mobilisés.

Le scénario moyen visant 50% de participation en 2050 permettrait une séquestration de **33 kt CO_{2e}/an** en 2030, sur base de participation 26.7% en 2030.

Afin de vérifier la cohérence des chiffres trouvés, nous appliquons une deuxième méthode de calcul. Ainsi, nous avons sélectionné des méthodes permettant d'augmenter le taux de carbone dans le sol tel qu'un non-labour des sols (0.2 t C/ha/an), une réduction de l'utilisation d'engrais minéraux azotés (0.3 t C/ha/an), l'utilisation de fumier (0.45 t C/ha/an), la rotation des cultures (0.16 t C/ha/an) et la plantation de légumineuses (0.25 tC/ha/an). A chacune de ces méthodes est associé un taux d'augmentation du carbone dans le sol par hectare et par an [8, 9, 10, 11, 12]. Nous utilisons donc ce taux ainsi que le nombre d'hectares sur lesquels ces méthodes seront appliquées et le taux d'augmentation annuel de participation au projet pour calculer le potentiel annuel de stockage de CO₂ dans les sols. Nous constatons que ce potentiel correspond à 6% près à l'objectif trouvé dans la première méthode sur base de 10 ans aux sols pour atteindre l'objectif de 17% exprimé précédemment, avec un total de 44 kt CO_{2e}/an atteint en 2030.

Potentiel taux de carbone stocké par an= (0.2 + 0.3 + 0.45 + 0.16 + 0.25) t C/ha/a * 44/12 t CO₂/t C * 4.67% * 37'500 ha/1000 = 9 kt CO_{2e}/a

A3.3 Valoriser la production de biogaz - méthodes

- Scénarios 30%, 50%, et 70% de participation des agriculteurs (et donc réduction) atteint en 2050 (**scénario de référence retenu : 70%**)
- Nous prenons les émissions de méthane données par Quantis à la page 54 pour *Bétail et fermentation entérique* : 466'439 t CO₂e ; ce chiffre comprend la fermentation entérique et la gestion du fumier et du lisier, dans les proportions 57% et 17% ([GHG inventory of Switzerland, Submission of April 2022](#) "NIR 2022", pp.276-277), "Main agricultural sources of greenhouse gases were 3A Enteric fermentation, emitting 57% of all agricultural GHGs, followed by 3D Agricultural soils with 26% and 3B Manure management with 17%". La fermentation entérique représente donc 359 kt CO₂e (= 466.4 x 57/(57+17)), et la gestion du fumier 107 kt CO₂e (= 466.4 x 17/(57+17)),
- Les émissions générées aux champs qui ne peuvent pas être récupérées sont comptées dans la catégorie séparée "pratiques agricoles". (Rapport Quantis 2022)
- La production de biogaz permet d'éviter 85% des émissions de méthane [22, 23]

Méthode 1

- Nous calculons le biogaz produit directement à partir des chiffres précédents

Méthode 2

- Afin de valider la méthode 1, nous utilisons des chiffres fixes de production de méthane par fermentation entérique par type d'animal fermier (hal.archives-ouvertes.fr/hal-01173493/document) afin de calculer la production hypothétique de méthane dû à la fermentation entérique dans le canton de Vaud (détails ci-après)

A3.4 Valoriser la production de biogaz - scénarios

Scénario de continuité

En Suisse, la part de déjections animales utilisées pour produire du biogaz en 2018 était de 4.6% [18] et nous faisons donc l'hypothèse que le même ratio peut-être appliqué à la production du canton de Vaud. Bien que les pionniers de la production de biogaz à partir de déjections animales ont commencé en 1990 [19], la pratique se développe courant des années 2000, correspondant à un passage de 0% à 4.6% en 15 ans, ce qui nous permet de calculer un pourcentage d'augmentation annuel de 0.3%. Nous pouvons donc en extrapoler qu'en 2030, 8.2% des déjections animales seront utilisés pour produire du biogaz. Nous calculons ensuite les émissions de CO₂ évitées par le stockage des déjections animales et les émissions de CO₂ qui auraient été dégagées par l'utilisation de gaz naturel au lieu de biogaz (méthodologie dans la partie *Estimations LEURE*). Le changement dû à l'extrapolation de la tendance correspond à 3.86 kt CO₂e/an = (0.082-0.046) * 17/(57+17) * 466.4 kt CO₂e/an (Quantis, p.54).

Objectif Plan Cantonal Vaudois & Estimation service cantonal

Les mesures opérationnelles du PCV-1 (DGAV 3, p.68) définissent l'objectif de 30 kt CO₂e par an [3, 6].

Autres estimations officielles

Nous trouvons dans la conception cantonale de l'énergie, des objectifs énergétiques faits à partir de biomasse agricole pour 2035 avancée à 2030 [20] l'objectif de 37 GWh/an (Annexe 6, p.103). En appliquant le facteur de 0.2 kg CO₂e/kWh de gaz naturel pour trouver combien de CO₂ seraient émis si le gaz naturel était utilisé à la place du biogaz : 7.4 kt CO₂e = 37 GWh/an x 0.2 kt CO₂e/GWh

Estimations LEURE

Méthode 1 : Nous pouvons calculer ce qui peut être évité chaque année en partant d'une utilisation de 4.6% (en 2019) des déjections animales dans le canton de Vaud et que l'on a comme objectif 70% d'ici 2050 avec une augmentation linéaire.

Le potentiel de réduction de méthane (sans changement supplémentaire des trajectoires du nombre d'animaux) correspond à **86.88 kt CO₂e/an** = $(0.70-0.046) \times 85\% \times 17/(57+17) \times 466.4$ kt CO₂e/an (Quantis, p.54) pour 100% de participation en 2050.

Nous estimons qu'une réduction de **32.4 kt CO₂e/an en 2030**, correspondant exactement à l'objectif du PCV-1 (30 kt/an) est possible, sur base d'un programme volontaire très ambitieux atteignant 70% de participation volontaire en 15 ans (2038). Un scénario moyen visant 50% de participation en 15 ans permettrait d'atteindre 23.2 kt CO₂e/an en 2030.

Méthode 2 : Pour tester la fiabilité des chiffres trouvés, nous cherchons à appliquer une seconde méthode. Ici, nous voulons calculer les émissions de méthane dues à la fermentation entérique d'une autre façon et pour cela nous utilisons donc des chiffres fixés par types d'animaux fermiers trouvés dans la littérature scientifique (vaches=117.7 kg CH₄/tête/an, autres bovins=62.3 kg CH₄/tête/an, équidés=20.7 kg CH₄/tête/an, porcins=0.81 kg CH₄/tête/an, ovins=7.3 kg CH₄/tête/an, caprins=11.9 kg CH₄/tête/an) [24]. Cela nous permet donc de calculer, avec le nombre précis de ces animaux dans le canton de Vaud, les émissions de méthane dues à la fermentation entérique et donc par la suite d'en déduire les émissions dues aux déjections animales toujours en se basant sur les chiffres de Quantis. Avec cette méthode nous trouvons qu'en 2030, 33 kt CO₂e pourraient être évités et en 2050, 61 kt CO₂e. Ces chiffres sont proches de ceux trouvés avec la première méthode.

Émissions de méthane entérique = 303'519 t CO₂e/an = $(117.7 \text{ kg CH}_4/\text{vaches/an} \times 33'000 \text{ vaches} + 62.3 \text{ kg CH}_4/\text{bovins/an} \times 75'520 \text{ bovins} + 20.7 \text{ kg CH}_4/\text{équidés/an} \times 7'890 \text{ équidés} + 0.81 \text{ kg CH}_4/\text{porcins/an} \times 31'960 \text{ porcins} + 7.3 \text{ kg CH}_4/\text{ovins/an} \times 14'419 \text{ ovins} + 11.9 \text{ kg CH}_4/\text{caprins/an} \times 3'661 \text{ caprins}) \times 10^{-3} \times 34 \text{ t CO}_2/\text{t CH}_4$

Émissions de méthane dues aux déjections du bétail = 162'920 t CO₂e/an = $466'439 \text{ t CO}_2\text{e/an} - 303'519 \text{ t CO}_2\text{e/an}$

Le potentiel de réduction de méthane (sans changement supplémentaire des trajectoires du nombre d'animaux) avec cette méthode correspond à **100.9 kt CO₂e/an** = $(85\%-4.6\%) \times 57/(17+57) \times 162.9$ kt CO₂e/an (Quantis, p.54) pour 100% de participation ce qui est proche de l'objectif trouvé précédemment.

Nous trouvons donc une réduction possible de 38.4 kt CO₂e/an en 2030 pour le même programme que précédemment visant à atteindre 70% de participation en 15 ans.

Réduire la consommation d'énergies sur les exploitations agricoles (DGAV 5)

- Émissions GES des machines agricoles en 2019 : 40 kt CO₂e (Quantis p.66, T32, 2/3 "offroad")
 - Augmentations 2015-2019 : +1%/an
 - BAU : +4.4 kt CO₂e
- Réduction probable du programme volontaire environ 30% du potentiel théorique en 2030 :
 - 2.4 kt CO₂e/an = $40 \text{ kt CO}_2/\text{an} \times 20\% \times 30\%$
- Réduction de la partie chauffage (mazout) : calculé séparément, inclus dans énergie (Annexe 2)

A3.5 Affouragement et compléments d'alimentation bovine

La problématique des compléments d'alimentation bovine, afin de réduire la formation de méthane dans la fermentation entérique, doit distinguer deux cas très différentes :

1. **Affouragement des bovins**, bien synthétisé dans l'EMPD (p.21) à partir de [Compléments alimentaire inhibant les émissions de méthane](#), AgroCleanTech Verein, 12-2017 : “*Concrètement, il s'agit d'augmenter l'affouragement de l'herbe à un stade plus précoce (moins de cellulose, plus de sucre et d'acides gras linoléiques), tout comme la proportion de légumineuses (dont la luzerne), de compléter la pâture avec du blé, ou encore avec certains additifs alimentaires à base d'huiles essentielles pour permettre une diminution significative des émissions de méthane*”. La même source recommande de diminuer la partie céréales, pommes de terre et betteraves. L'EMPD prévoit également un soutien à la culture de la luzerne (pp.16-17), non encore répandue dans le canton de Vaud. De plus, pour des raisons évidentes de biodiversité et du climat, il faut arrêter d'importer l'alimentation animale (et tout autre produit) issue des zones tropicales déforestées, par exemple les tourteaux de soja d'Amérique du Sud.
2. Les **compléments d'alimentation bovine**, synthétiques ou extraites des sources naturelles, détaillées dans [An evaluation of evidence for efficacy and applicability of methane inhibiting feed additives for livestock](#), Global Research Alliance (GRA), 11-2021. Cette analyse détaillée montre le potentiel, mais aussi les limitations et incertitudes, liées notamment à l'utilisation réelle, différentes des études limitées : “*Almost all studies have relied on additives mixed into a total mixed ration; that is, in a diet which provides the additive in every mouthful. There is almost no evidence of how much mitigation will be achieved if the additive is provided in a supplement that the animal may only consume once daily or once every few days, as in rangeland systems*”. L'analyse conclut : “*When matched with the scientific concern about additives not being optimised for pulsed intake as supplements, the grazing livestock in the developing world may not achieve significant mitigation through feed additives in the near future*”. Il faut ajouter que les intérêts commerciaux (les compléments d'alimentation bovine sont chers et ne peuvent pas être produits par l'agriculteur) rendent une évaluation impartiale encore plus difficile. Nous recommandons la plus grande prudence.

Pour la première partie, un potentiel de réduction territorial est réel, surtout en combinaison avec le soutien à la culture de la luzerne. Compte tenu de l'effet limité (l'affouragement des bovins ne fait pas partie des 10 “mesures à fort impact”), nous ne l'avons pas modélisé et nous reprenons les chiffres de l'EMPD (p.21), qui estime une réduction de **4.2 kt CO₂e** par an. Un bilan sur la base de consommation, intégrant les émissions actuelles en Amérique du Sud liées à l'alimentation bovine suisse, montrerait une réduction bien supérieure.

Pour la deuxième partie, les autres sources scientifiques étudiées ne permettent pas de tirer des conclusions claires : les articles parlant du sujet et l'appuyant avec des chiffres sont peu nombreux, avec soit des expériences conduites sur trop peu de sujets [25, 26], soit faites par des partis avec un intérêt dans le sujet (producteur de ces compléments [27, 28]), ou bien l'étude n'était que trop peu citée malgré une date de publication de plusieurs années déjà [29, 30, 31]. Malgré des nombreuses études en cours, nous suivons l'avis de la Global Research Alliance de novembre 2021, qui souligne l'absence totale d'évidence des effets des compléments d'alimentation bovine dans des conditions réelles d'exploitation ; de ce fait nous avons conclu que, pour le moment, une diminution grâce aux compléments d'alimentation bovine serait de 0 kt CO₂e/an.

A3.6 Alimentation (humaine)

Dans cette analyse, nous avons regardé l'évolution de la production de viande suisse sur la période 1999-2020, et estimé l'évolution des émissions vaudoises liées à la production de viande bovine.

Consommation de viande : [Consommation de denrées alimentaires, par groupe de denrées](#)

Consommation Suisse 1999-2019-2020, par personne, en kg/an (source OFS "[Bilan de la viande](#)", je-f-07.02.03.01.05) :

- **Total : 53.2→47.6→47.3**
 - **Bovins : 11.1→11.0→11.1**
 - Porcs : 24.8→20.5→20.4
 - Volaille : 8.7→10.7→10.6

Production Suisse, 1999-2019-2020, abattage en kt (pop. 7.144-8.575-8.637 millions)

- **Total : 442→492→499** (+11.3%, -7.2% per capita 1999-2019)
 - **Bovins : 110→118→118** (+7.2%, -10.7% per capita 1999-2019)
 - Porcs : 226→221→224 (-2.2%, -18.5% per capita 1999-2019)
 - Volaille : 46→100→106 (+117%, +81% per capita 1999-2019)

Première hypothèse : extrapolation de la réduction de la production, dans la perspective des émissions territoriales ; émissions GES de l'alimentation suivant la même évolution que la production de viande Suisse. Changement 2019-2030 : $e^{\ln((492/8575)/(442/7144))/20 \cdot 11} = 0.95937$, arrondi à **-4%**. En termes d'émissions GES, nous estimons que la production animale représente 80% de l'impact de l'agriculture ; la réduction de 4% correspondrait à environ 22.3 kt CO_{2e} = 80% x 4% x 697 kt CO_{2e}.

Hypothèse retenue : vu les incertitudes à trois niveaux (lien entre production de viande et émissions GES, lien entre l'évolution suisse et vaudoise, extrapolation vers 2030 peu certaine), nous avons **décidé de ne pas inclure ce chiffre**. Il devrait être estimé dans le cadre des futures mesures visant une réduction de la consommation de viande, qui ne sont pas incluses dans le PCV-1.

A3.7 Sources

- [1] Evolution des émissions de gaz à effet de serre de la Suisse depuis 1990 (avril 2021), Office fédéral de l'environnement, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/etat/donnees/inventaire-gaz-effet-serre.html>
- [2] Bilan des émissions de gaz à effet du canton de Vaud, Quantis, V2.0, 16.06.2022
- [3] Stratégie du Conseil d'Etat vaudois pour la protection du climat, Plan climat vaudois - 1ère génération, Canton de Vaud, Juin 2020, [https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/accueil/fichiers_pdf/2020_juin_actus/Stratégie du Conseil d'État vaudois_pour_la_protection_du_climat.pdf](https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/accueil/fichiers_pdf/2020_juin_actus/Strategie_du_Conseil_d'Etat_vaudois_pour_la_protection_du_climat.pdf)
- [4] Plan climat cantonal 2030 2e génération, République et Canton de Genève, 2021, <https://www.ge.ch/document/24973/telecharger>
- [5] Genève, un canton agricole; République et Canton de Genève; <https://www.ge.ch/dossier/agriculture-proximite-qualite/geneve-canton-agricole/geneve-canton-agricole>
- [6] Plan Climat Vaudois - Mesures opérationnelles (V0), Canton de Vaud, 09 juin 2020
- [7] Qualité des sols et séquestration de carbone organique - Synthèse des études et recommandations pour le Plan climat vaudois, Département de l'environnement et de la sécurité et Département de l'innovation et du sport, 17 février 2021
- [8] Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.C., Jayet, P.A., Soussana, J.F., Stengel, P., 2002. 'Increasing carbon stocks in French agricultural soils?'. Synthesis of an Assessment Report by the French Institute for Agricultural Research on Request of the French Ministry for Ecology and Sustainable Development. Sci. Assess. Unit for Expertise, INRA, Paris (36 pp)
- [9] Casella E, Soussana JF. 1997. 'Long-term effects of CO₂ enrichment and temperature increase on the carbon balance of a temperate grass sward'. Journal of Experimental Botany 48 : 1309 –1321
- [10] Buysse, P., Roisin, C., Aubinet, M., 2013. 'Fifty years of contrasted residue management of an agricultural crop : impacts on the soil carbon budget and on soil heterotrophic respiration'. Agric. Ecosyst. Environ. 167, 52–59.
- [11] D. Arrouays, C. Jolivet, L. Boulonne, G. Bodineau, N. P. A. Saby and E. Grolleau, "A New Initiative in France: A Multi-Institutional Soil Quality Monitoring Network," Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, Vol. 88, No. 2, 2002, pp. 93-103
- [12] Quinkenstein & H. Jochheim. 'Assessing the carbon sequestration potential of poplar and black locust short rotation coppices on mine reclamation sites in Eastern Germany - Model development and application'. Journal of Environmental Management. Vol. 168. March 2016. p 53-66. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.044>
- [13] Pascal Boivin & Karine Gondret, HEPIA, Etude du déficit de carbone organique des sols vaudois, taux d'évolution et relation avec les pratiques agricoles, 11 février 2021

- [14] Parc de véhicules, Canton de Vaud, "Parc des véhicules à moteur par catégorie, état au 30 septembre, Vaud, depuis 1990", <https://www.vd.ch/themes/etat-droit-finances/statistique/statistiques-par-domaine/11-mobilite-et-transports/parc-de-vehicules/>
- [15] Parc des véhicules routiers en 2015, "Le parc des véhicules à moteur proche de la barre des 6 millions", Office fédéral de la statistique, 04/02/2016, <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/catalogues-banques-donnees/communiques-presse.assetdetail.40705.html>
- [16] Consommation énergétique de l'agriculture en Suisse, Annett Latsch & Thomas Anken, Agroscope Transfer, Environnement, N°56, 02/2015, <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/38412.pdf>
- [17] Calculateur de CO2 : avec le GNC et le biogaz, vous préservez le climat; Gaz énergie, <https://www.cng-mobility.ch/fr/reduisez-vos-emissions-de-co2-grace-au-gnc/>
- [18] Ökostrom Schweiz (2020) : Produits issus de la méthanisation des installations de biogaz agricole – Fertiliser de manière efficace et durable avec le lisier méthanisé et le fumier méthanisé. Ökostrom Schweiz, association faîtière du biogaz agricole, Winterthur, Suisse
- [19] Le paysan Bourgeon Niklaus Hari : "Une micro-installation de biogaz fait beaucoup pour le climat", Bio Suisse, 07/09/2017
- [20] Conception cantonale de l'énergie, Département du territoire et de l'environnement - Direction générale de l'environnement - Direction de l'énergie, 19/06/2019, https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/energie/fichiers_pdf/1356.015_Publication_CoC_En_2021.08.06.pdf
- [21] Mphethe I. Tongwane & Mokhele E. Moeletsi, "Provincial cattle carbon emissions from enteric fermentation and manure management in South Africa", Environmental Research, Volume 195, April 2021, doi : <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110833> , url : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935121001274>
- [22] Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France, OMINEA - 18ème édition, Mars 2021, Ministère de la Transition Ecologique et CITEPA, <https://www.citepa.org/fr/ominea/>
- [23] Agriculture - cheptels, ADEME, https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?agriculture_-_cheptels.htm
- [24] Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France, Michel Vermorel & J. Pierre Jouany & Maguy Eugène & Daniel Sauvant & Jean Noblet & Jean-Yves Dourmad, Productions animales, Institut National de la Recherche Agronomique, 2008, 21 (5), pp.403-418, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01173493/document>
- [25] Methane output and diet digestibility in response to feeding dairy cows crude linseed, extruded linseed, or linseed oil, Cécile Martin & Jacques Rouel & Jean-Pierre Jouany & Michel Doreau & Yves Chilliard, Journal of Animal Science, May 2008, 86 (10), DOI : [10.2527/jas.2007-0774](https://doi.org/10.2527/jas.2007-0774)
- [26] Linseed oil supplementation to dairy cows fed diets based on red clover silage or corn silage : Effects on methane production, rumen fermentation, nutrient digestibility, N balance, and milk production, C. Benchaar & F.

Hassanat & R. Martineau & R. Gervais, American Dairy Science Association, 2015, DOI : <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-9398>

[27] 3-nitrooxypropanol mitigates enteric methane with a minimal impact on the feedprint, D. Van Wesemael & L. Vandaele & S. Huysveld & S. De Campeneere & V. Fievez & M. Kindermann & U. Létinois & N. Peiren, Août 2019, 114., 7th Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference, Iguassu, Brazil, URL : <http://www.ggae2019.org/sites/default/files/proceedings-ggae2019.pdf>

[28] Persistency of the 3-nitrooxypropanol effect on methane and hydrogen emissions in postpartum Holstein-Friesian dairy cows, S. van Gastelen & J. Dijkstra & G.P. Binnendijk & S. M. Duval & J. M.L. Heck & M. Kindermann & T. Zandstra & A. Bannink, 2019, In A. Berndt, L. G. Pereira Ribeiro & A. L. Abdalla (Eds), Proceedings of the 7th CGAA-Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference (pp. 109-109), (Proceedings; No.135), Embrapa, URL : <http://www.ggae2019.org/sites/default/files/proceedings-ggae2019.pdf#page=109>

[29] Decrease in methane emissions in dairy cows with increase in dietary linseed content, C. Martin & A. Ferlay & Y. Chilliard & M. Doreau, Proceedings of the British Society of Animal Science, 2009, 21 (21), DOI : [10.1017/S175275620002860X](https://doi.org/10.1017/S175275620002860X)

[30] Methane output and rumen microbiota in dairy cows in response to long-term supplementation with linseed or rapeseed of grass silage- or pasture-based diets, C. Martin & D. Pomiès & A. Ferlay & Y. Rochette & B. Martin & Y. Chilliard & D. Morgavi & M. Doreau, Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production, 2011, 71, pp. 243-247

[31] Vrancken H, Suenkel M, Hargreaves P, Chew L and Towers E, (2019), Reduction of Enteric Methane Emission in a Commercial Dairy Farm by a Novel Feed Supplement, Open Journal of Animal Sciences, 9, 286-296, DOI: [10.4236/ojas.2019.93024](https://doi.org/10.4236/ojas.2019.93024)

Annexe 4 - Hypothèses et détails d'analyse Mobilité

Le tableau ci-dessous résume les résultats pour ce secteur :

Réduction PCV-1 en 2030			BAU [kt]	BAU %	Mesures opérationnelles	Objectif PCV-1	Estimation service cantonal	Estimations LEURE [kt]	PCV-1 %	PCV-1 - BAU %	
Carburants / Mobilité	Sobriété	Réduction des déplacements, localisation des activités	-106.4	-2.24%				-106.4	-2.24%	0.00%	
	Sobriété	Covoiturage, télétravail, moins d'offre route	22.9	0.48%	DGMR_17, Post PCV-1		78	48.0	1.01%	0.53%	
	Efficienc	Report modal	-25.0	-0.52%	DGMR_1-11,17	225.1	118	90.7	1.91%	2.43%	
	43.5%	Efficienc	Entretien des routes, réductions de vitesse	0.0	0.00%	DGMR_13-16		23	25.4	0.53%	0.53%
	2066	Efficienc	Transport de marchandises	13.0	0.27%	DGMR_21-22		20	18.0	0.38%	0.11%
Objectif sectoriel nécessaire 2030 : -71%	Energie propre	Electrification des véhicules privés et publics + Utilisation de voitures à faible émission	111.0	2.33%	DGMR_12, SAN_1-2, DIREN_4 (CoCEn_2021, p.70, Annexe.6)	455	323	459.7	9.67%	7.33%	

Code couleur : texte noir mesure incluse dans PCV-1 ; texte orange non-inclus dans PCV-1 (voir typologie de l'action climatique, §3)

Chiffres sur fond en couleur : confiance élevée, moyenne, faible

Toutes les variations par rapport à 2019, sauf la dernière colonne qui mesure la variation par rapport à BAU

Note : les effets des mesures ont été évalués séparément. Les mesures du PCV-1 ne sont pas indépendantes : elles s'influencent. Par exemple, l'électrification des voitures ou l'efficacité du transport de marchandises peut renforcer l'effet rebond. Ce point a été discuté autant que possible autour de chaque mesure. Également leur somme arithmétique tend à surestimer les réductions, par exemple les réductions de vitesse auront moins d'effet si forte évolution des parts modales vers le transport public. En réalité, ce second effet est minime : -11.26% de l'ensemble des émissions GES territoriales vaudoises pour la somme arithmétique des mesures de mobilité vs. -11.14% pour une analyse plus fine.

A4.1 Report Modal

- Point de départ 2019** : Les parts modales (PM) initiales 2019 ainsi que les émissions associées détaillées sont présentées en partie « détail des calculs ». Celles-ci sont issues des données Quantis 2022 sur les déplacements des vaudois et non vaudois sur le territoire vaudois. Les déplacements liés au transport des frontaliers sur le territoire vaudois n'ont pas été analysés en détail (car difficile à intégrer avec le micro-recensement qui les exclut), mais sont inclus dans le bilan Quantis sur lequel est basé notre analyse. La répartition modale en 2019 (hors frontaliers) : les transports individuels motorisés (TIM) **74.15%**, transport public (TP) **19.72%**, et mobilité douce (MD) **6.13%**. La distance annuelle parcourue est de 14'457 km/personne/an. Ces résultats sont obtenus sur la base des données démographiques nationales et cantonales 2015 et 2019 OFS, soit respectivement 767'497 et 8'327'126 résidents en 2015 et 806'088 et 8'606'033 résidents en 2019 (Source données nationales : OFS, Structure de la population résidente permanente selon le canton, de 1999 à 2020, je-f-01.02.03.04, source des données cantonales présentées en Annexe 1). Les émissions GES liées à la mobilité des personnes sur le sol vaudois sont de **1'637 kt CO₂e** en 2019 ou 1'567 kt CO₂e hors frontaliers (Quantis Table 15, p.39), hors transport aérien local, bateaux, offroad, et marchandises. Les émissions GES totales de la mobilité s'élèvent à **2'066 kt CO₂e**.

- **Effet covid** : Pour le transport de voyageurs, covid-19 a entraîné une diminution significative de la PM des TP. Cet effet est estimé sur la base de l'étude Intervista "Suivi de la mobilité Covid-19", 07-2021, comme une diminution de 20% des distances parcourues en TP (pas de changement des distances en MD et TIM). La répartition modale de 2022 est ainsi calculée. La répartition au sein des grandes classes modales est considérée inchangée. Les parts modales pour 2022 pour les TIM, TP et MD sont ainsi de **77.20%**, **16.42%** et **6.38%**. La question du retour aux parts modales de 2019 reste ouverte, rapidement vers 2024 (scénario PCV-1), plus lentement vers 2026 (scénario LEURE), ou à la vitesse de l'évolution pré-covid après 2030 (scénario BAU) ?

- **Méthode de calcul** : En appliquant les coefficients d'émission et les rapports intra-modaux présentés dans la Table 3, nous obtenons la formule suivante pour le calcul des émissions GES :

$$Emission\ GES\ [kt\ CO_2e] = \sum (PM * Coefficient\ d'emission) * Population\ 2019 * distance\ tot * 10^{-9}$$

$$\approx (185.95 * PM[TIM] + 31.20 * PM[TP] + 3.26 * PM[MD]) * 806'088 * 14'402 * 10^{-9}$$

$$\approx 2'159 * PM[TIM] + 362.2 * PM[TP] + 0.04 PM[MD]$$

Cette formule est présentée dans la feuille de calcul, onglet Mobilité, et permet de calculer les réductions GES du point précédent.

- **Estimation BAU** : Selon Quantis 2022, l'évolution (en %) des PM sur la période 2015-2019 pour les déplacements des vaudois sur le sol vaudois étaient pour la MD, les 2 roues, la voiture, le train, le bus, et le tram de respectivement -0.03, +0.06, +0.44, -0.63, +0.14 et +0.02. Nous posons l'hypothèse d'une augmentation constante par rapport à 2022 égale au taux de croissance annuelle obtenu sur la période 2015-2019 à la période 2022-2030. L'évolution en 2030 par rapport à 2019 est de -0.06, +0.12, +0.88, -1.26, +0.28 et +0.04. La variation des PM en 2030 serait alors: **MD : -0.06%**, **TIM : +1.00%**, **TP: -0.94%**. Les rapports au sein des classes modales ayant évolués, les facteurs d'émissions moyen par classe modale sont eux aussi modifiés. Les nouveaux facteurs obtenus sont présentés dans la table 4 ci-dessous. Le calcul des émissions GES dans ce scénario est donc : Emissions [kt CO₂e] $\approx (185.90 * PM[TIM] + 34.65 * PM[TP] + 3.26 * PM[MD]) * 806'088 * 14'402 * 10^{-9} \approx 2'158 * PM[TIM] + 402.26 * PM[TP] + 0.04 PM[MD]$. Le calcul des émissions GES associées est présenté en feuille de calcul, onglet Mobilité. Le report Modal conduit à une augmentation des émissions en 2030 de **25.0 kt CO₂e**

- **Note** : afin de simplifier notre modèle, nous avons extrapolé les variations au lieu de recalculer toutes les distances, ce qui induit qq. erreurs dont l'effet est négligeable, par exemple la PM de MD augmente très légèrement (au lieu de diminuer de 0.06%)

- **Estimation de l'effet PCV-1** : Le report modal visé par le PCV-1 cible une augmentation de la PM des TP en 2030 à 30%, soit une augmentation absolue de 10.3% de la PM de 2019 (19.7%) Il faut noter que la DGMR a estimé que la part modale des TP devrait se situer entre 22% et 30% en 2030. Le chiffre de 30% repris dans PCV-1 (p.40) représente le scénario MAX de la DGMR. La politique de promotion de la marche et du vélo mène à une augmentation de la PM de ces modes à respectivement 5% et 3% (estimation selon le Microrecensement mobilité et transports 2015 pour le canton de Berne). Les réductions d'émissions GES obtenues pour le report modal vers les TP et MD sont de **225.1 kt CO₂e**. Ces réductions sont obtenues selon la méthode présentée ci-dessous et présentés dans la feuille de calcul, onglet Mobilité.
- **Estimation LEURE** : La répartition modale 2030 visée par le canton semble difficile à atteindre avec les mesures envisagées. Une répartition plus probable **compte tenu des moyens mis en place** est estimée selon le scénario de base des Perspectives d'Évolution de Transport 2050 (PET 2050). Celle-ci est de 21.2% pour les TP et 71.2% pour les TIM. Une PM de 3% pour le vélo est conservée. La réduction finale GES atteinte est de **58.3 kt CO₂e**.

- Sur recommandation de la DGMR, et en prenant en compte l'effet supplémentaire de [Léman2030](#), nous ajustons notre estimation à 23% de PM en 2030 (MD inchangée), ce qui augmente significativement la réduction finale GES obtenue à **90.7 kt CO₂e**
- Le potentiel réel du report modal est bien plus important, mais celui-ci est limité par l'absence de mesures contraignantes concernant l'utilisation des TIM dans le PCV-1. En effet une étude sur le potentiel de report modal des TIM vers les TP en Pologne avec revue de littérature détaillée des autres pays (source: [Potential of modal shift from private cars to public transport: A survey on the commuters' attitudes and willingness to switch – A case study of Silesia Province, Poland](#)) a montré que le lien entre l'optimisation du système des TP (efficacité, baisse des prix) et augmentation de leur utilisation par le public n'est pas évident. Le facteur le plus important pour augmenter l'attractivité des TP se révèle être une meilleure coordination des liaisons et une augmentation de leur vitesse. Mais pour changer les pratiques de transport, des mesures plus restrictives (exemple : route à accès réglementée, péages, ou fermeture de parkings en ville) se révèlent nécessaires.
- Une complexité supplémentaire est liée aux habitudes générationnelles, notamment pour la pendularité, et probablement un effet de rattrapage d'offre précédemment déficitaire, qui a induit une forte augmentation des TP, surtout dans la période 2000-2010. Aussi avec la numérisation, le temps de trajet devient moins important que la qualité et la fiabilité des correspondances.

Estimation DGMR :

La valeur « réaliste » obtenue par l'outil DGMR en termes de réduction GES de l'effet « cohorte et report modal » est de 203 kt CO₂e. Les objectifs en termes de report modal se basent sur une PM des TP entre 25 et 30%. Le scénario MIN correspond à **118 kt CO₂e**.

A4.2 Évolution des déplacements

- Aucune mesure ne visant spécifiquement la réduction des déplacements ou localisation des activités n'est incluse dans le PCV-1
- **BAU** : L'évolution des distances parcourues sur le territoire vaudois est estimée sur la base du rapport Quantis de manière similaire à l'évolution des PM. Nous appliquons l'hypothèse d'un retour en 2023 de distance de transport similaire à celle de 2019. Sur la période 2015-2019, les déplacements en relation avec le canton vaudois ont augmenté de 38.05 à 39.46 km/jour/habitant (+3.7%). En extrapolant cette évolution sur la période 2023-2030, nous trouvons une variation = $e^{(\ln(1+3.7\%)/4*7)} = 1.065645$. Nous prenons l'approximation d'une augmentation de 6.5% de distances parcourues par rapport à 2019. La distance totale parcourue en 2030 sera donc de 42.02 km/jour/habitant ($1.065*39.46$). L'augmentation GES associée est de **106.4 kt CO₂e** (= $1'637*0.065$)
- Il est extrêmement difficile d'estimer l'évolution des distances parcourues en 2030. D'un côté, nous avons une grande pression écologique et changement (très lent) des habitudes et de culture, mais aussi un vieillissement de la population (moins de déplacements professionnels, plus de déplacements de loisirs). De l'autre côté, la tendance historique d'augmentation des déplacements, l'effet rebond lié à la réduction de coûts de la mobilité. De différentes estimations vont de 0 à +9% des distances (+180 kt CO₂e) ou plus. Nous gardons l'estimation à +6.5% essentiellement basée sur les données empiriques du passé, avec toute son incertitude inévitable.

A4.3 Changement des pratiques de mobilité individuelles

- Télétravail

Le télétravail n'est pas directement inclus dans les mesures du PCV-1 ; dans notre analyse nous l'avons groupé avec le covoiturage, car cette mesure est souvent liée dans la gestion de mobilité des entreprises. L'étude [6-t] "Etude du potentiel renouvelé du télétravail en termes de réduction de la mobilité dans le canton de Vaud", tableau 26, p.69, estime une réduction en GES liée à l'intensification de cette pratique à **73 t CO_{2e}** par travailleur, correspondant à - 1.4 % globalement sur 1'637 kt soit **22.9 kt CO_{2e}** par an.

- Covoiturage (DGMR_17)

Concernant le potentiel de réduction du télétravail, le rapport [6-t] "Stratégie covoiturage du bassin lémanique avec zoom sur le Grand Genève", 06-2020, préconise un taux d'occupation des TIM pour « tous motifs » de 1.9 pour le canton de Vaud (page 52). La référence 2019 Quantis étant de 1.8. Le gain GES résultant estimé est de **82.52 kt CO_{2e}** = $22'997.69 + 365 * 10^6 * 186.79 * (1 - 1.8/1.9)$ (selon données d'émission du parc automobile présentées en Table 3).

Compte tenu des mesures mises en place, ce maximum théorique paraît excessivement optimiste ; nous estimons que 30% ou **25 kt CO_{2e}** serait bien plus réaliste.

Le cumul des mesures télétravail et covoiturage permet un gain GES de **48 kt CO_{2e}**.

En l'absence de données concernant l'évolution du télétravail et du covoiturage sur le territoire vaudois ces dernières années, seules les réductions en émissions liées au télétravail seront allouées au scénario BAU.

Estimation DGMR :

L'effet du covoiturage est simulé par l'outil DGMR en postulant un doublement des passagers pour le motif « travail ». La réduction réaliste obtenue est de 52 kt CO_{2e}. Pour le télétravail, un gain de 26 kt CO_{2e} a été retenu, soit un total de 78 kt CO_{2e}.

A4.4 Améliorer le bilan énergétique de la construction et de l'exploitation des infrastructures de transport

- Réduction de vitesse sur les autoroutes

Une diminution de 3% des émissions sur les autoroutes est considérée suite à la diminution des vitesses limites (source : EEA "Do lower speed limits on motorways reduce fuel consumption and pollutant emissions?"). La circulation routière vaudoise est estimée selon l'Annuaire Statistique Vaud 2019 (p.190, données 2017), p.190), (on prend le kilométrage annuel vaudois comme le kilométrage des autoroutes vaudois sur autoroutes suisse * kilométrage total Suisse, soit = $27.7 * 10^9 * 206/1'855 = 3.08 \times 10^9 \text{ km/an}$. En appliquant le taux moyen d'émission du parc automobile et une réduction de 3%, la réduction annuelle est donc : $3.08 * 186.79 * 3\% = 17.2 \text{ kt CO}_2e$.

Une autre intervention est chiffrée selon la mesure opérationnelle DGMR_16 qui cible un abaissement de vitesse sur le contournement de Lausanne. L'objectif vise une diminution de 0.5% des émissions totale de CO₂ liées à la mobilité vaudoise soit **8.2 kt CO_{2e}** (=0.5%*1637) si nous utilisons le chiffre Quantis de **1.637 kt CO_{2e}** hors transport de marchandises. Ces chiffres nous paraissent plausibles et n'ont pas fait l'objet d'analyses supplémentaires.

Le potentiel total de réduction est donc de **25.4 kt CO_{2e}**.

Estimation DGMR :

Une réduction maximale des GES liée à une réduction de la vitesse limite sur les routes est de 23 kt CO_{2e} . Ces réductions se basent sur l'hypothèse 10% de gain sur autoroute et 5% routes principales

A4.5 Transport des marchandises

Les émissions relatives au transport de marchandises sont estimées dans le rapport Quantis à **296'800 kt CO₂e** (Table 32 p.66). Les différentes prestations de transports et facteurs d'émissions correspondants aux différents types de transport utilisés sont présentés dans le rapport Quantis (Tableau 22, p.48), et rappelés en Table 5.

BAU : L'augmentation des émissions liée au trafic de marchandises est estimée selon le scénario de base des Perspectives d'évolution du transport 2050 (Source, DETEC: Le transport de marchandises dopé par la performance économique) à l'échelle de la Suisse (+18% des prestations de transport de marchandises). Cette évolution inclut la croissance démographique de 11.90% d'ici 2030) Nous évaluons donc l'augmentation des émissions par personne à +6% . En se basant sur les émissions liées au transport de marchandises sur le territoire vaudois calculées par Quantis et présentées en Annexe, les émissions passent de **297 kt CO₂e** en 2019 à **315 kt CO₂e** en 2030 (+6%). Cependant lorsqu'on regarde la tendance 2015-2019 d'évolution des émissions GES liées au transport de marchandises (Quantis - Table 32, p.66), nous constatons une baisse de 1.1% des émissions liées au transport, malgré l'augmentation de la population (+4.2%) sur cette période. En soustrayant les émissions liées à l'augmentation de la population nous obtenons une réduction liée à l'augmentation de l'efficacité du transport de marchandise de 5.3%. En extrapolant cette évolution sur la période 2019-2030, nous trouvons une variation = $e^{(\ln(1-5.3\%)/4*11)} = 0.86092$. La réduction GES 2030 est donc estimée à 14% par rapport aux émissions 2019. La projection des émissions liées au trafic selon le scénario BAU est donc de $0.86*315 = 270.9 \text{ kt CO}_2\text{e}$, soit une réduction de **26 kt CO₂e** par rapport aux émissions 2019. Compte tenu de la difficulté de continuer les augmentations d'efficacité dans un secteur déjà optimisé, nous estimons que 50% de l'extrapolation serait plus réaliste, soit une réduction de **13 kt CO₂e** par rapport aux émissions 2019

Estimation LEURE :

La stratégie cantonale présentée dans le PCV-1 vise à améliorer l'efficacité du transport ferroviaire. En se basant sur le scénario de base de la PET_2050 , la part modale du train dans le transport des marchandises augmente de **3%** en 2030 (Évolutions relatives au transport de marchandises, admin.ch). Les émissions GES finales associées, sur la base des chiffres du rapport Quantis 2022, et en posant l'hypothèse d'une diminution de 1.5% de la PM des poids lourds suisses et étrangers, mènent à une diminution des GES de **5.0 kt CO₂e**. (Table 5)

$$((141*807.8699+115*151.1503+1737*89.5335+12*423.1382)*10^{-3})$$

= 292 kt CO₂e, soit une réduction de 5 kt CO₂e par rapport au 297 kt CO₂e émises en 2019) En ajoutant la réduction de **26 kt CO₂e** calculée en BAU, l'évolution finale est une réduction GES de **31 kt CO₂e**.

A4.6 Électrification du parc automobile et augmentation des véhicules à faible émission

- Réduction des émissions du parc de véhicules

Nous posons l'hypothèse d'une diminution des émissions du parc automobile moyen de **10% sur 11 ans**. Le facteur d'émission moyen pour le parc automobile obtenue serait alors de $0.90*186.79 = 168.11 \text{ g CO}_2\text{e/pkm}$

La réduction GES associée est donc de $0.1 * 186.79 * 0.7415 * 0.9751 * 806'088 * 14'402.9 * 10^{-9} = 156.8 \text{ kt CO}_2\text{e}$.

Il est important de considérer ces réductions en GES comme approximatives, de nombreuses études ont démontrés que les réductions réels enregistrées étaient inférieures à celle approximées dans les études et tests en laboratoires (Source : Meilhan, N. (2019), La note d'analyse, 78, 1-12, Comment faire enfin baisser les émissions de CO₂ des voitures).

De ce fait, et vu que l'estimation d'amélioration du *parc* de voitures fossiles de 10% est elle-même optimiste, nous estimons que **80 kt CO₂e/an** serait bien plus réaliste (hors effet électrification).

- Électrification du parc de véhicules

Source 1 : Le scénario de taux d'électrification du parc automobile vaudois pris pour référence est issu du scénario « Nouvelle Politique Énergétique » utilisé par la Direction Général de l'Environnement du canton de Vaud ([Planification stratégique de la recharge publique dans le canton de Vaud](#), Fig 23 p.40). En 2030, ce scénario prévoit **10%** de voiture électrique (VE) et **7%** de voiture hybride rechargeable (VHR).

Les VH non rechargeables n'étant pas mentionnés, nous conservons le ratio 2019. L'hypothèse d'un mixte 70% essence et 30% diesel est ensuite appliquée. La répartition 2030 du parc automobile obtenue est la suivante :
V.diesel → 24.90%, VE → 17.00%, V.essence → 56.80%, VH non rechargeable → 1.30%

En appliquant les facteurs d'émissions Quantis et le facteur correctif 0.9 de réduction globale des émissions du parc, le facteur d'émission du parc automobile est calculé

$$\text{Facteur d'Emission [gCO}_2\text{e/pkm]} = 0.9 * (168 * 24.90\% + 79 * 17.00\% + 196 * 56.80\% + 1.30\% * 152)$$

= 151.71 g CO₂e /pkm

La réduction GES associée :

$$(186.798 - 151.71) * 0.7415 * 0.9751 * 806\,088 * 14\,402.9 * 10^{-9} = 294.5 \text{ kt CO}_2\text{e}$$

La réduction GES obtenue combinée avec la réduction des émissions du parc automobile est de **294.5 kt CO₂e**, soit une réduction liée à l'augmentation de la part électrique de **214.5 kt CO₂e** (= 294.5 - 80)

Source 2 : Le scénario d'évolution du parc électrique vaudois pris pour référence ici est celui du document "Scénarios d'électromobilité pour la Suisse - 8 mars 2021" publié par EBP (Source: 2021-03-08_EBP_CH_EmobSzen_PKW_2021_v2.docx). Le scénario NET 0 proposé (Figure 6, p.11) prévoit une part de VE et VH non rechargeable en 2030 de **30** et **15%**. Nous appliquons de nouveau l'hypothèse 30% diesel et 70% électrique. La répartition 2030 du parc automobile obtenue est la suivante : V.diesel → 16.50%, VE → 30.00%, V.essence → 38.50%, VH non rechargeable → 15.00%

$$\text{Facteur d'Emission [gCO}_2\text{e/pkm]} = 0.9 * (168 * 16.50\% + 79 * 30.00\% + 196 * 38.50\% + 15.00\% * 152)$$

= 134.71 g CO₂e /pkm

La réduction GES associée :

$$(186.798 - 134.71) * 0.7415 * 0.9751 * 806\,088 * 14\,402.9 * 10^{-9} = 437.3 \text{ kt CO}_2\text{e}$$

La réduction GES obtenue combinée avec la réduction des émissions du parc automobile est de **437.3 kt CO₂e**, soit une réduction liée à l'augmentation de la part électrique de **357.3 kt CO₂e** (= 437.3 - 80)

Source 3 : Article : [Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and the consequences for worldwide CO₂ emissions](#), Rietmann et al 2020

Switzerland : Appendix B, page 12 → 2030 EV inventory share (total number of cars on the road) : 37.40%

En appliquant la part de 37.4% à la part électrique en conservant les ratios 2019 dans les autres catégories de véhicules (en les multipliant par (1-37.4%)/(1-0.32%)), la répartition 2030 du parc automobile obtenue est la suivante : V.diesel → 18.54%, VE → 37.40%, V.essence → 43.25%, VH non rechargeable → 0.82%

$$\text{Facteur d'Emission [gCO}_2\text{e/pkm]} = 0.9 * (168 * 18.54\% + 79 * 37.40\% + 196 * 43.25\% + 0.82\% * 152)$$

= 132.04 g CO₂e /pkm

La réduction GES associée :

$$(186.798 - 132.04) * 0.7415 * 0.9751 * 806\,088 * 14\,402.9 * 10^{-9} = 459.7 \text{ kt CO}_2\text{e}$$

La réduction GES obtenue combinée avec la réduction des émissions du parc automobile est de **459.7 kt CO_{2e}**, soit une réduction liée à l'augmentation de la part électrique de **379.7 kt CO_{2e}** (= 459.7 - 80)

Pour notre estimation de réduction GES associée à l'électrification du parc automobile, nous utilisons la troisième source, dont les calculs de scénarios sont plus sophistiqués, notamment à cause d'une modélisation de la diffusion des VE en courbe "S", et qui fournit un résultat proche de la source 2.

- **BAU**: Le scénario BAU suppose une poursuite sur la période 2019-2030 du taux d'électrification 2019, soit 0.7%/an (Source: Planification stratégique de la recharge publique dans le canton de Vaud, p.1). En 2030, le taux d'électrification aura ainsi augmenté de 7.7% pour atteindre les 8%. La part de VH non rechargeable est estimée à 10% selon le scénario BAU du rapport 2021 EBP. La répartition 2030 du parc automobile obtenue est la suivante : V.diesel → 23.1%, VE → 8.0% , V.essence → 53.9% , VH non rechargeable → 15.0%. $Facteur\ d'Emission\ [gCO_2e/pkm] = (168 * 23.1\% + 79 * 8.0\% + 196 * 53.9\% + 152 * 15.0\%)$

= **173.57 g CO_{2e} /pkm**

La réduction GES associée :

$$(186.798 - 173.57) * 0.7415 * 0.9751 * 806'088 * 14'402.9 * 10^{-9} = 111.0 \text{ kt CO}_2\text{e}$$

- **PCV** : L'objectif quantitatif retenu pour les estimations est celui donné en SAN_1, d'une « Une diminution progressive, de 2% par année, des émissions de CO₂ émises par les véhicules vaudois ». Ainsi en 2030, la diminution attendue est de 22% par rapport à 2019. Si nous appliquons ce résultat au émission totale en terme de mobilité Quantis, soit **2'066 kt CO_{2e}**, cela représente un gain GES de **454.5 kt CO_{2e}** (= 0.22 * 2 066). Un autre objectif est donné dans la CoCEN ou les objectifs NPE en terme de mobilité visent une énergie finale produite ou consommée de 4'456 GWh/an. En 2015, cette énergie était de 5'425 GWh/an. En appliquant une intensité carbone de 181 gCO_{2e}/kWh, le gain GES correspondant est de **175 kt CO_{2e}** (= (5 425 - 4 456) * 181 * 10⁻³).

Note: notre analyse ne distingue pas assez finement les voitures hybrides rechargeables et non rechargeables, qui sur papier ont des facteurs d'émissions très différents. Dans l'usage réel, les différences des émissions sont minimes (source : [Plug-in hybrid vehicle co2 emissions: how they are affected by ambient conditions and driver mode selection](#), 12-2021).

Estimation DGMR : Le gain GES réaliste estimé par la DGMR est de 323 kt CO_{2e}.

A4.7 Report Modal - analyse détaillée

Le kilométrage 2019 par mode de transport utilisé est celui du rapport Quantis 2022 (Tableau 17, p.42). Nous excluons ici les déplacements effectués par les frontaliers sur le sol vaudois. Les distances relatives par habitants vaudois sont obtenues en multipliant les distances journalières parcourue par les vaudois et non vaudois par leur population respective et en pondérant par la population vaudoise. En utilisant les populations vaudoises 2015 et 2019 précisées en Annexe 1 et les populations nationales 2015 et 2019 formulé dans la partie hypothèse, les formules utilisées sont les suivantes :

$$Distance\ Journalière\ 2015[km/j] = (Distance\ Journalière\ Vaudoise\ 2015[km/j] * 767'497 + Distance\ Journalière\ Non\ Vaudoise\ 2015[km/j] * (8'327'126 - 767'497)) / 767'497$$

$$Distance\ Journalière\ 2019[km/j] = (Distance\ Journalière\ Vaudoise\ 2019[km/j] * 806'088 + Distance\ Journalière\ Non\ Vaudoise\ 2015[km/j] * (8'606'033 - 806'088)) / 806'088$$

Les parts modales correspondantes sont ensuite calculées en utilisant la formule : $Part\ Modale\ [\%] = \frac{Distance\ journalière, mode\ de\ transport}{Distance\ journalière\ totale} * 100$

Les résultats obtenus pour les différents modes de transport sont présentés en table 1.

	2015 [km/j]	2015 [%]	2019 [km/j]	2019 [%]
Mobilité Douce	2.35	6.17	2.42	6.14
Moto/Scooter	0.68	1.78	0.73	1.84
Voiture	27.34	71.87	28.53	72.30
Train	6.26	16.45	6.25	15.83
Bus	1.14	2.99	1.23	3.13
Tram/Métro	0.28	0.74	0.30	0.76
Total	38.05	100.00	39.46	100.00

Table 1 : Parts Modales et Distance journalière par acteur sur le territoire cantonal, Source: Quantis, OFS

- Les émissions par véhicule et par personnes utilisées sont issues du rapport Quantis. La répartition au sein des classes modales pour les véhicules thermiques provient de l’Outil DGMR auxquelles une hypothèse supplémentaire d’un mix 30% diesel et 70% essence a été ajoutée (basée sur l’approche de la consommation de carburant par Statistique Vaud issue du parc des véhicules immatriculés dans le canton de Vaud) a été utilisée. La répartition tram/métro ainsi que celle vélo/vélo électrique utilisées sont celles de l’outil DGMR basés sur le MRTM 2015.
- Pour tous les calculs de report modal, la distance totale parcourue de 14’402.9 km/an/personne est supposée constante jusqu’en 2030.
- Les émissions correspondantes aux différentes mesures en termes de mobilité sont calculées grâce au Table 2 et 3. En supposant un distance totale parcourue par habitant constante de 14’402.9 km/an/personne et un population constante de 806’088 habitants, les émissions par mode de véhicules pour les 13 types de transport sont ensuite additionnées en multipliant les Émissions totales par personne - kilomètre [g CO_{2e}/pkm] (Table 2) par les distances parcourues au sein de chaque classe en utilisant les répartition présentées (Table 3).

$$Emission\ GES\ [kt\ CO_2e/an] = (\sum PM(i) * E(i) [g\ CO_2e/pkm]) * 14'402.9[km/pers/an] * 806'088[pers] * 10^{-9}$$

$PM(i)$: Part modale du type de transport i [-]

$E(i)$: Émissions totales par Personne - kilomètre associé au mode de transport i [g CO_{2e}/pkm]

- Nous calculons avec cette méthode les émissions 2019 associées à la mobilité des personnes sur le territoire vaudois. Nous obtenons un résultat de 1’673 kt CO_{2e} (= (74.15%*185.95+19.72%*31.20+6.13%*16.67%*8.70)*14402.90*806088*10⁻⁹). Cela représente une émission supérieure de 2% à celle calculée par Quantis. Cette différence est due à une répartition au sein de chaque classe indisponible dans le rapport Quantis. Cependant les résultats

sont assez proches pour ne pas mettre en cause les estimations de réduction GES associées aux mesures de mobilité.

Véhicule		Émissions totales par véhicule-kilomètre [g CO2e/vkm]	Émissions totales par Personne - kilomètre [g CO2e/pkm]		Taux d'occupation/ de remplissage moyen
			Total	Directe	
TIM	V.diesel	304	168	97	1.8
	V.électrique	143	79	-	1.8
	V.essence	353	196	120	1.8
	V.gaz naturel	286	159	97	1.8
	V.hybride non	273	152	81	1.8
	moto	199	153	97	1.3
TP	Train	1050	7		29%
	Bus thermique	1500	152	100	17%
	Tram	1240	43		29%
	Trolleybus	570	30		100%
MD	Marche	0	0		100%
	Vélo	8	8		100%
	Vélo électrique	15	15		100%

Table 2 : Matrice Quantis utilisée pour obtenir les émissions totales par personne - kilomètre [g CO2e/pkm] par mode de transport, Source : Quantis

Part Modale		Véhicule	Millier km/jour	[%]	Répartition (Source: DGMR)	Facteurs d'émissions GES par classe de Véhicule [g CO2e/pkm]	
TIM	74.15%	V.diesel	22'997.69	97.51%	29.51%	186.79	185.95
		V.électrique			0.32%		
		V.essence			68.87%		
		V.gaz naturel			0.00%		
		V.hybride non			1.30%		
		Moto			588.44	2.49%	
TP	19.72%	Train	5'038.05	80.33%	78.00%	31.20	
		Bus	991.49	15.81%			
		tram/métro	241.83	3.86%			

					22.00%		
MD	6.13%	Marche	1'950.73	83.33%	90.00%	8.70	8.70
		Vélo		16.67%			
		Vélo électrique		10.00%			
Total	Millier km/jour		31'808.23				
Total	km/personne/an		14'402.90				

Table 3 : Table des répartitions 2019 adoptées au sein de chaque classe modale. Source : Quantis, DGMR

		Répartiton		Facteur d'émis.	
		2019-Quantis	2030-BAU	2019-Quantis	2030-BAU
TIM	Voiture	97.51%	97.38%	185.95	185.90
	Motos	2.49%	2.62%		
TP	Train	80.33%	77.65%	31.20	34.65
	Bus	15.81%	18.09%		
	Tram/metro	3.86%	4.26%		
MD	Marche			8.70	8.70
	Vélo	16.67%	16.67%		

Table 4 : Facteurs d'émissions associés au scénario BAU de report modal

A4.8 Rendre plus efficient le transport de marchandises

	Prestation [mio tkm]		Facteur d'Emission [gCO ₂ eq/tkm]	Emission [kt CO ₂ e]	
	2019	2030		2019	2030
Poids lourd suisse	829.945	807.869	141	117	114

Poids lourd étranger	173.226	151.150	115	20	17
Camionnettes (<3.5t)	89.534	89.534	1737	156	156
Train	378.987	423.138	12	5	5
Total	1'471.692	1'471.692		297	292

Table 5 : Émissions et Prestations liées au transport de marchandises. Les données 2019 sont issues du rapport Quantis 2022. Les prestations 2030 sont calculées selon l'hypothèse : +3% PM train, -3% PM Poids lourds

Annexe 5 - Estimation des émissions GES territoriales vaudoises 1990

Pourquoi estimer les émissions 1990 ?

A notre connaissance, il n'existe aucune source "officielle" pour les émissions GES vaudoises 1990. Seules les émissions de CO₂ (3273 kt en 1990) sont documentées.

Comme l'objectif du PCV-1 se définit par rapport aux émissions GES 1990, nous avons besoin d'une estimation.

Méthodes et résultats d'estimation

Note: les émissions suisses sont normalement communiquées hors LULUCF (affectation du sol et du territoire), alors que les émissions vaudoises incluent cette catégorie. Afin de préserver la cohérence, nous utiliserons les émissions incl. LULUCF pour les trois méthodes ci-après, qui pour la Suisse 1990 s'élèvent à 51.522 Mt CO_{2e} (excl. LULUCF: 53.566 Mt).

Méthode 1 - au prorata de la population vaudoise, à partir de [l'inventaire Suisse des GES pour 1990 \(avril 2022\)](#) :
4'386 kt CO_{2e} = 51.522 Mt * 574'660 / 6'751'000 kt CO_{2e}

Méthode 2 - une autre estimation pourrait être calculée à partir des émissions CO₂ vaudoises en 1990 (3273 kt, estimées à partir de la consommation d'énergie) en appliquant le même ratio qu'en 2019 : GES / CO₂ = 4754 / 2854 = 1.67, suggérant 5466 kt CO_{2e}, avant correction. Comme le ratio GES / CO₂ change dans le temps, et nous n'avons les chiffres fiables que pour 2015 et 2019, nous pouvons extrapoler à partir de ces deux points : 4754 / 2854 = 1.67 en 2019, et 4675 / 2944 = 1.59 en 2015. En 1990, le ratio GES / CO₂ estimé serait $4675/2944 * e^{(\ln(4675/4754 * 2854/2944) * 25/4)}$ = 1.18. En multipliant ce ratio avec les émissions CO₂ vaudoises en 1990, nous obtenons 3273 * 1.18 = **3855 kt CO_{2e}**.

Vu les incertitudes d'une extrapolation sur 25 ans, cette estimation semble peu fiable.

Méthode 3 - comme dans la méthode 1, nous partons de [l'inventaire Suisse des GES pour 1990 \(avril 2022\)](#), ajusté au prorata de la population vaudoise. Ensuite nous appliquons deux corrections :

1. Correction croissance économique : **-1.42%** (sur 29 ans, le PIB VD augmente légèrement plus vite que le PIB CH ; il a donc été proportionnellement plus petit en 1990). Comme le PIB vaudois n'est publié que depuis 1997 ([StatVD, PIB-VD reel depuis 1997](#)), mais suit de près l'évolution du PIB suisse avant 2008 (Observatoire BCV de l'économie vaudoise, [Vaud rhymes with grow](#), p.11), nous gardons le même ratio VD/CH de PIB/capita (86.69%) entre 1990 et 1997. Ceci permet d'estimer le PIB nominal vaudois en 1990 à 27.27 GCHF.
 - Les grands événements sportifs, tels que les Jeux Olympiques, peuvent affecter le PIB vaudois jusqu'à environ 3 GCHF ou 5%, par exemple en 2016 ([source](#), p.23). Si l'intensité de l'activité économique concernée diffère de la moyenne vaudoise, il faudrait le prendre en compte. Comme les années de référence 2015 et 2019 ne sont pas concernées, nous n'avons pas besoin d'analyser ces intensités CO₂/CHF du sport.
2. Correction structurelle empirique : **+15.72%**, calculée en comparant les émissions GES (incl. LULUCF) par habitant vaudois et suisse en 2019. Ce paramètre tient compte de la taille et efficacité relative des maisons et des voitures, de la densité des agglomérations, du poids relatif des différents secteurs industriels, et des habitudes culturelles de mobilité et de consommation - ces facteurs ne changent que très lentement.

Estimation des émissions GES 1990 : **5'004 kt CO_{2e}** = 4386 * (1+15.72%) / (1+1.42%) kt CO_{2e}

Nous retiendrons le résultat de la méthode 3.

Annexe 6 – Estimation des réductions par secteur, approche “sobriété”

Notre estimation est calculée sur la base des chiffres vaudois et des hypothèses suivantes, elles-mêmes adaptés du rapport [“The role of energy demand reduction in achieving net-zero in the UK”](#) :

- **Bâtiment- Energie :**
 - **Sobriété** / surface habitable : -10 m²/habitant, par décennie ; au moins compensant la croissance démographique et la réduction de la taille des ménages ; une réduction plus rapide serait possible mais n’est pas incluse dans notre simple modèle
 - **Efficacité** énergétique, exprimée en besoin d’énergie annuelle par m² : -18%, -23%, -28%, -33%, -38% en 2030, 2035, 2040, 2045, 2050 respectivement, par rapport à 2019
 - **Énergie propre** : le mix énergétique passe de 15% PAC, 10% bois/biomasse (BM), et 75% fossile en 2019 à :
 - 30% PAC, 10% BM, 60% fossile en 2030
 - 45% PAC, 10% BM, 45% fossile en 2035
 - 60% PAC, 10% BM, 30% fossile en 2040
 - 75% PAC, 10% BM, 15% fossile en 2045
 - 90% PAC, 10% BM, 00% fossile en 2050
 - Par exemple, en 2030, les émissions GES du secteur correspondent à -34% = (1-18%)(efficacité) * 60%/75%(fossile->PAC) - 1

- **Mobilité :**
 - **Sobriété** / km-voiture réduits de 55%, 62%, 70% en 2030, 2040, 2050 respectivement, par rapport à 2019
 - **Efficacité et énergie propre** : le taux d’électrification correspond à 35% en 2030 (conforme au PCV-1) et 100% en 2040 (nette accélération de l’électrification)
 - Par exemple, en 2030, les émissions GES du secteur correspondent à -71% = -55%(km-voiture réduits) - 45%*35%(électrification)
 - Limitation de l’estimation : notre simple modèle ne distingue pas entre les trains (émissions presque zéro) et les bus (polluants si fossiles ; nous n’avons pas estimé le taux de l’électrification).
 - **Note** : dans le chapitre 5, notre méthodologie pour les émissions grises suit celle de la stratégie climatique de la Confédération (territorialité de la production de voitures, carburants etc.), et non du canton de Vaud (territorialité des déplacements, Quantis p.45).

- **Industrie :**
 - **Sobriété** : notre modèle se base sur -70% ciment, et -100% déchets plastiques en 2050, calculés de façon linéaire entre 2025 et 2050
 - **CCS+NET** : Nous appliquons CCS+EW (altération améliorée) afin d’atteindre -90% des émissions du secteur industriel en 2050, ce qui correspond à la “Stratégie climatique à long terme 2050” du Conseil Fédéral

- **Agriculture :**
 - **Sobriété** : notre modèle est basé sur une réduction de la consommation de viande, surtout bovine, d’au moins 67% en 2050, par rapport à 2019. La réduction d’impact climatique et biodiversité de ce changement s’élève à -50%
 - **NET** : vu le potentiel de séquestration de carbone très élevé dans les sols, et à terme d’autres écosystèmes comme des marais, et ce pendant plusieurs décennies, l’objectif modélisé correspond à -60% des émissions 2019 par des approches NET.
 - Ensemble, la sobriété (-50%) et les émissions négatives (-60%) permettent à l’agriculture d’atteindre -110% en 2050, par rapport à 2019

Le tableau suivant résume les calculs des émissions par secteur :

- suisses, par rapport à 1990
- suisses, par rapport à 2019
- vaudoises, par rapport à 2019, adaptées à partir de chiffres suisses
- vaudoises, par rapport à 1990 et 2019, adaptées à partir de la réduction de la demande

Réductions requises par secteur												
Emissions suisse par rapport à 1990	1990		2030 v		2035 v		2040 v		2045 v		2050 v	
	[Mt]	% 1990	1990		1990		1990		1990		1990	
Combustibles / Energie, Indust	26.57	51.17%	-54%	-27.63%	-74%	-37.87%	-82%	-41.96%	-90%	-46.06%	-100%	-51.17%
Carburants / Mobilité	14.69	28.29%	-27%	-7.64%	-39%	-11.03%	-57%	-16.13%	-78%	-22.07%	-100%	-28.29%
Industrie	4.35	8.38%	-28%	-2.35%	-38%	-3.18%	-50%	-4.19%	-72%	-6.03%	-90%	-7.54%
Agriculture + LULUCF	4.54	8.74%	-20%	-1.75%	-25%	-2.19%	-30%	-2.62%	-35%	-3.06%	-40%	-3.50%
autres	1.77	3.41%										
Total (incl. LULUCF)	51.92	100.00%		-39.37%		-54.27%		-64.90%		-77.22%		-90.51%
Emissions suisse par rapport à 2019	2019		2030 v		2035 v		2040 v		2045 v		2050 v	
	[Mt]	% 2019	2019		2019		2019		2019		2019	
Combustibles / Energie, Indust	19.87	45.19%	-38%	-17.39%	-65%	-29.48%	-76%	-34.31%	-87%	-39.15%	-100%	-45.19%
Carburants / Mobilité	14.88	33.84%	-28%	-9.45%	-40%	-13.46%	-58%	-19.48%	-78%	-26.49%	-100%	-33.84%
Industrie	4.50	10.23%	-30%	-3.11%	-40%	-4.10%	-52%	-5.29%	-73%	-7.46%	-90%	-9.24%
Agriculture + LULUCF	3.67	8.35%	-1%	-0.09%	-7%	-0.60%	-13%	-1.12%	-20%	-1.64%	-26%	-2.15%
autres	1.05	2.39%										
Total (incl. LULUCF)	43.97	100.00%		-30.04%		-47.64%		-60.19%		-74.74%		-90.43%
Spécificités vaudoises, hors sobriété, réductions v 2019			2030		2035		2040		2045		2050	
Combustibles / Energie, Indust	35.30%		-20%	-7.06%	-40%	-14.12%	-60%	-21.18%	-80%	-28.24%	-100%	-35.30%
Carburants / Mobilité	43.50%		-28%	-12.18%	-42%	-18.27%	-62%	-26.97%	-86%	-37.41%	-100%	-43.50%
Industrie	10.90%		-30%	-3.27%	-40%	-4.36%	-52%	-5.67%	-73%	-7.96%	-90%	-9.81%
Agriculture + LULUCF	10.30%		-15%	-1.55%	-23%	-2.37%	-31%	-3.19%	-39%	-4.02%	-47%	-4.84%
Total (incl. LULUCF)	100.00%			-24.06%		-39.12%		-57.01%		-77.62%		-93.45%
Réduction de la demande Vaud			2030		2035		2040		2045		2050	
Combustibles / Energie, Indust	35.30%		-34%	-12.14%	-54%	-18.99%	-71%	-25.13%	-87%	-30.57%	-100%	-35.30%
Carburants / Mobilité	43.50%		-71%	-30.78%	-85%	-37.14%	-100%	-43.50%	-100%	-43.50%	-100%	-43.50%
Industrie	10.90%		-40%	-4.36%	-52%	-5.67%	-65%	-7.09%	-77%	-8.39%	-90%	-9.81%
Agriculture + LULUCF	10.30%		-30%	-3.09%	-50%	-5.15%	-70%	-7.21%	-90%	-9.27%	-110%	-11.33%
Réduction de la demande Vaud, par rapport à 2019	100.00%			-50.37%		-66.95%		-82.93%		-91.73%		-99.94%
Réduction de la demande Vaud, par rapport à 1990	4754	5004		-52.85%		-68.60%		-83.78%		-92.15%		-99.94%