



Quelle contribution du numérique à la décarbonation ?

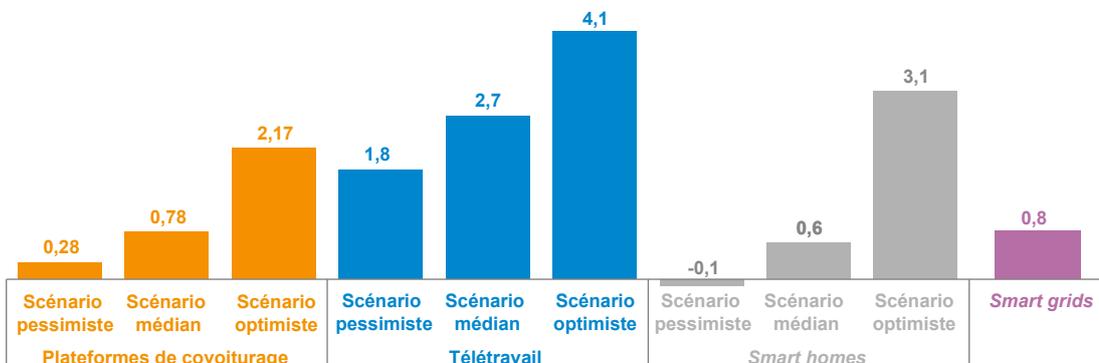
On connaît de façon assez robuste le niveau des émissions carbone attribuées à l'utilisation des technologies numériques. Ces émissions représentent environ 2,5 % de l'empreinte carbone de la France. D'ici à 2030, dans un scénario tendanciel, elles devraient atteindre 25 MtCO₂e, en hausse de 45 % par rapport à 2020, et la consommation électrique due à l'usage de ces équipements devrait passer à 54 TWh, en hausse de 5 %. Mais que sait-on, à l'inverse, sur la contribution du numérique aux trajectoires de décarbonation ?

La question est complexe et n'a pas reçu de réponse d'ensemble jusqu'à présent. On explore ici les résultats de la littérature pour quantifier le potentiel de décarbonation de quatre cas d'usage choisis dans les domaines clés de l'énergie et des transports : les *smart grids*, les *smart homes*, le télétravail et le covoiturage.

Sans être négligeable, le potentiel de ces solutions numériques paraît globalement modeste au regard du niveau actuel des émissions de leur secteur d'application. Souvent limitées par des effets rebond, les économies d'énergie et les réductions d'émissions escomptées restent largement hypothétiques, nécessitant en général des changements de comportement des utilisateurs. Ainsi, la pratique du télétravail par 10 millions d'actifs à hauteur d'un jour par semaine permettrait d'éviter entre 1 et 4 MtCO₂ par an, en fonction de leurs comportements et de l'organisation des espaces de travail. Dans un scénario optimiste, les *smart homes* pourraient réduire la consommation d'énergie de 20 TWh et les émissions de 4 MtCO₂ mais, sous des hypothèses moins favorables, elles pourraient conduire à une augmentation nette de ces deux grandeurs (+2 TWh et +0,1 MtCO₂), compte tenu de l'empreinte de la solution elle-même.

Au-delà des quatre cas étudiés ici à titre illustratif, les méthodes d'évaluation de l'impact environnemental des solutions numériques doivent être améliorées et surtout partagées entre les acteurs. Des évaluations fiables de l'ensemble des coûts et bénéfices sont nécessaires pour orienter correctement la décision publique. Elles doivent tenir compte du contexte de déploiement des solutions, afin d'en définir le domaine de pertinence. La promotion, utile et nécessaire, des solutions pouvant contribuer à la transition écologique ne doit pas occulter l'enjeu majeur qui reste la maîtrise des impacts environnementaux des usages numériques dans leur ensemble.

Potentiels d'émissions annuelles évitées par cas d'usage, effets rebond compris, en MtCO₂e



Lecture : pour les trois usages autres que les *smart grids*, les scénarios distinguent des hypothèses qui font varier les gains d'efficacité de la solution d'une part et l'ampleur des effets rebond d'autre part, en tenant compte de l'empreinte de la solution. Ces résultats ont été estimés sur la base du mix énergétique français actuel et des hypothèses de déploiement suivantes :

- covoiturage : 2,1 millions de trajets covoiturés supplémentaires par jour (projection du plan national pour le covoiturage pour 2027 – Gouvernement (2022), *France Nation verte*) ;
- télétravail : 1 jour de télétravail par semaine pour 10 millions d'actifs en emploi ;
- *smart home* : équipement de 30 millions de logements d'un système intelligent de chauffage.

L'estimation des gains des *smart grids* est issue de RTE (2017), *Réseaux électriques intelligents*, septembre. Les chiffres sur le potentiel de gains d'émissions du télétravail sont issus des travaux de l'Ademe (2020), *Étude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail*, septembre.

Source : France Stratégie

Anne Faure

Département Développement durable et Numérique

Gauthier Roussilhe

conseiller scientifique

La Note d'analyse est publiée sous la responsabilité éditoriale du commissaire général de France Stratégie. Les opinions exprimées engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du gouvernement.

INTRODUCTION

Quel rôle peuvent jouer les technologies numériques dans la trajectoire de décarbonation de l'Union européenne et de la France, qui visent la neutralité climatique d'ici 2050 ? Dans son dernier rapport¹, le Giec rappelle les risques environnementaux que pose une transformation numérique non maîtrisée, notamment en raison d'une forte croissance de la consommation énergétique. Le rapport souligne cependant que ces technologies pourraient substantiellement contribuer à la décarbonation : « *Digital technologies have significant potential to contribute to decarbonisation [...] Yet, if left unmanaged, the digital transformation will probably increase energy demand*². »

L'Union européenne soutient ainsi la convergence des transitions numérique et environnementale, souvent qualifiée de « transition jumelle » ou *twin transition*. Si l'on estime désormais de façon assez robuste le niveau des émissions dues à l'utilisation des technologies numériques – 3 % des émissions au niveau mondial et 2,5 % en France³, en 2020 –, à l'inverse la contribution potentielle du numérique aux politiques de décarbonation est beaucoup moins documentée. L'objectif de cette note est d'explorer le potentiel de certains usages numériques pour réduire l'empreinte carbone d'autres secteurs et d'éclairer les méthodes d'estimation de ces gains, à la lumière d'une revue critique de la littérature disponible.

Après un rappel des enjeux méthodologiques et institutionnels qui rendent aujourd'hui nécessaire un tel exercice, on examine successivement les résultats fournis par la littérature⁴ pour quatre services numériques : les *smart grids*, les *smart homes*, le télétravail et les plateformes de covoiturage. Il s'agit de voir dans quelle mesure on peut, à l'échelle de la France, illustrer le potentiel de décarbonation de ces solutions, en prenant en compte les effets directs et indirects de leur déploiement.

QUELLES SOLUTIONS NUMÉRIQUES POUR ACCOMPAGNER LA TRAJECTOIRE ZÉRO CARBONE ?

Des premiers chiffrages discutables

Depuis le début des années 2000, des études ont tenté d'estimer les gains de décarbonation rendus possibles par le déploiement de solutions numériques, avec des approches et des résultats contrastés.

En 2006, l'organisation non gouvernementale WWF ou Fonds mondial pour la nature estimait que le développement d'usages numériques tels que le télétravail, les conférences audio et vidéo ou la dématérialisation de certains services pourrait permettre d'éviter 1 GtCO₂e d'émissions à l'horizon 2020 à l'échelle mondiale, soit environ 1 % des émissions effectivement observées en 2020⁵. D'autres travaux ont avancé des gains plus élevés. En 2008, une étude de la Commission européenne⁶ estimait ainsi que, dans un scénario de développement écologiquement favorable, le numérique pourrait contribuer à réduire les émissions de la seule Union européenne de 400 MtCO₂e en 2020, soit 7 % des émissions de l'UE en 1990 et trois fois l'empreinte du secteur (en revanche, dans un scénario au fil de l'eau, le bilan global du numérique en termes d'émissions serait négatif). Pour la France, en 2008, le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) concluait que les technologies de l'information et de la communication permettraient d'économiser de une à quatre fois les émissions propres au secteur⁷. Le GeSI, consortium d'entreprises numériques, prévoyait quant à lui que les technologies du numérique pourraient éviter près de 12 GtCO₂e dans le monde en 2030, soit 20 % des émissions mondiales et près de neuf fois l'empreinte estimée du secteur⁸. Plus récemment, en 2019, la principale association mondiale des opérateurs de téléphonie mobile estimait que ce secteur, à lui seul, avait permis d'éviter l'émission de 2 GtCO₂e en 2018.

1. Giec (2023), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, juillet.

2. « Les technologies numériques ont un potentiel important pour contribuer à la décarbonation [...] Pourtant, si elle n'est pas bien maîtrisée, la transformation numérique augmentera probablement la demande énergétique. »

3. Voir Ademe-Arcep (2023), *Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France. Analyse prospective à 2030 et 2050*.

4. En complément des références bibliographiques figurant en notes de bas de page, on trouvera sur le site de France Stratégie [une annexe bibliographique](#) plus développée.

5. Pamlin D. et Szomolányi K. (2006), « *Saving the climate @ the speed of light. First roadmap for reduced CO₂ emissions in the EU and beyond* », European Telecommunications Network Operators' Association et WWF.

6. Bios Intelligent Service et Commission européenne (2008), *Impacts of Information and Communication Technologies on Energy Efficiency*, rapport final, octobre.

7. Breuil H., Burette D. et Flüry-Hérard B. (2008), *TIC et développement durable*, rapport, CGEDD, décembre.

8. Plusieurs rapports successifs ont été publiés, le rapport SMARTer2030 suit la publication de SMARTer2020 en 2012.



Ces résultats ont suscité des critiques substantielles au sein de la communauté scientifique, qui a contesté les méthodes utilisées et l'ordre de grandeur des estimations. Ces critiques portent principalement sur quatre arguments :

- le scénario contrefactuel est rarement bien spécifié, les études mêlant souvent des approches consécutives et attributionnelles⁹. Par ailleurs, les rapports précités considèrent généralement une stabilité des effets, sans tenir compte de la dégradation ou de l'obsolescence de la solution¹⁰ ;
- quand un scénario de référence est proposé, il n'est souvent pas comparable d'une étude à l'autre et il prend rarement en compte les trajectoires de décarbonation¹¹ : les émissions évitées d'une solution numérique sont souvent calculées sur la base d'un scénario où le niveau carbone de l'énergie consommée est considéré comme stable (voir Graphique 1) ;

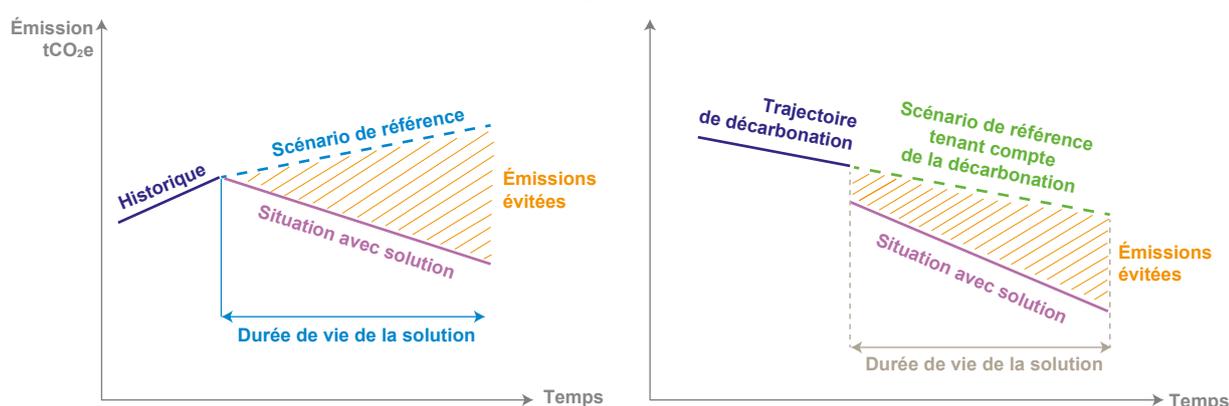
- les coûts environnementaux propres aux solutions elles-mêmes sont souvent sous-estimés voire ignorés¹² ;
- les effets rebond sont presque systématiquement passés sous silence. Ils ont depuis fait l'objet d'une littérature abondante¹³, même si les effets résultant des comportements des utilisateurs restent difficiles à isoler¹⁴.

Pour toutes ces raisons, ces premières études doivent être interprétées avec prudence. Elles ont toutefois eu la vertu, en dépit de leurs limites, de souligner l'importance d'approfondir les recherches, dans un contexte économique et réglementaire européen très évolutif.

Évaluer les émissions évitées par les technologies numériques : une démarche nécessaire et urgente

Dans le contexte européen du « Pacte vert » et du plan de relance « NextGeneration EU », des financements importants, publics comme privés, doivent être consacrés à

Graphique 1 – Mécanisme de décroissance des gains d'émissions évitées par une solution numérique



Lecture : à gauche, gain d'émissions de la solution dans le cas où le scénario de référence ne prend pas en compte les effets des trajectoires de décarbonation de l'énergie. À droite, prise en compte dans le scénario de référence de la trajectoire de décarbonation de l'énergie.

Source : d'après Word Business Council on Sustainable Development (2023), « [Guidance on avoided emissions. Helping business drive innovations and scale solutions toward net zero](#) », p. 17 et p. 33

9. Une analyse consécutuelle cherche à déterminer de façon dynamique les impacts (directs et indirects) physiques et socioéconomiques induits par la mise en œuvre d'une solution, comparés à un scénario de référence clairement établi. L'objectif d'une analyse attributionnelle est de déterminer quelle part des émissions est imputable à une solution donnée, pour chaque unité fonctionnelle, dans un temps et un espace limités. Voir Schaubroeck T. *et al.* (2021), « [Attributional & consequential life cycle assessment: definitions, conceptual characteristics and modelling restrictions](#) », *Sustainability*, vol. 13(13), juillet.
10. Voir Pohl J., Hilty L. M. et Finkbeiner M. (2019), « [How LCA contributes to the environmental assessment of higher order effects of ICT application: A review of different approaches](#) », *Journal of Cleaner Production*, vol. 219, p. 698-712 ; Freitag C., Berners-Lee M., Widdicks K., Knowles B., Blair G. et Friday A. (2020), « [The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations](#) », Lancaster University/Small Word Consulting, décembre.
11. Voir Pohl J., Frick V., Hoefner A., Santarius T. et Finkbeiner M. (2021), « [Environmental saving potentials of a smart home system from a life cycle perspective: How green is the smart home?](#) », *Journal of Cleaner Production*, vol. 312, août ; Hilty L. M., Arnfalk P., Erdmann L., Goodman J., Lehmann M. et Wäger P. A. (2006), « [The relevance of information and communication technologies for environmental sustainability. A prospective simulation study](#) », *Environmental Modelling & Software*, vol. 21(11), novembre, p. 1618-1629.
12. Voir Bieser J. C. T. et Hilty L. M. (2018b), « [Assessing indirect environmental effects of information and communication technology \(ICT\): A systematic literature review](#) », *Sustainability*, vol. 10(8), juillet ; Ipsen K. L., Zimmermann R. K., Nielseon P. S. et Birkved M. (2019), « [Environmental assessment of Smart City Solutions using a coupled urban metabolism. Life cycle impact assessment approach](#) », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 24(7), juillet, p. 1239-1253.
13. Voir Coroamă V. C. et Mattern F. (2019), « [Digital rebound – Why digitalization will not redeem us our environmental sins](#) », dans Wolff A. (dir.), *ICT4S 2019. Proceedings of the 6th International Conference on ICT for Sustainability* ; Bieser J. C. T. et Hilty L. M. (2018a), « [Indirect effects of the digital transformation on environmental sustainability: Methodological challenges in assessing the green-house gas abatement potential of ICT](#) », dans Penzenstadler B., Easterbrook S., Venters C. C. et Ahmed S. I. (dir.), *ICT4S 2018. The 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability*, p. 68-81 ; Bieser J. C. T., Höjer M., Kramers A. et Hilty L. M. (2022), « [Toward a method for assessing the energy impacts of telecommuting based on time-use data](#) », *Travel Behaviour and Society*, vol. 27, avril, p. 107-116 ; Court V. et Sorrell S. (2020), « [Digitalisation of goods: a systematic review of the determinants and magnitude of the impacts on energy consumption](#) », *Environmental Research Letters*, vol. 15(4), avril.
14. Stermieri L., Kober T., Schmidt T. J., McKenna R. et Panos E. (2023), « [Quantifying the implications of behavioral changes induced by digitalization on energy transition: A systematic review of methodological approaches](#) », *Energy Research & Social Science*, vol. 97, mars.

l'atteinte des objectifs de décarbonation de l'Union européenne. Afin d'orienter ces fonds vers les solutions qui contribueront effectivement à la décarbonation, l'Europe a défini une taxonomie¹⁵ qui identifie les activités économiques écologiquement durables¹⁶. Ainsi seules les entreprises proposant des solutions éligibles à la taxonomie pourront bénéficier des investissements privilégiés des institutions financières (Banque mondiale, AFD, etc.) ou lever des capitaux via les nouvelles obligations vertes du marché européen. Or parmi ces critères d'éligibilité figurent spécifiquement une analyse de cycle de vie et l'estimation des effets nets de la solution¹⁷.

À ces exigences s'ajoutent celles fixées par la nouvelle directive *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD)¹⁸ qui implique de nouvelles modalités de *reporting* extrafinancier des entreprises. Se trouvent notamment précisées les actions qui pourront s'inscrire positivement dans le bilan environnemental et social des entreprises.

La question des effets environnementaux nets des solutions numériques en Europe est ainsi devenue une question d'importance pour les entreprises puisqu'elle conditionne l'accès à des financements. Ces impératifs concernent aussi les investisseurs publics qui ont besoin d'évaluations robustes de l'apport que représentent ces technologies.

Les défis méthodologiques

Pour répondre à ces exigences, plusieurs organismes ont engagé des travaux visant à produire des outils méthodologiques, principalement à l'attention des entreprises. Le World Resources Institute (WRI)¹⁹ fournit un guide détaillé sur les méthodologies d'évaluation des émissions évitées par différentes technologies, dont les solutions numériques. Ces méthodologies tiennent compte en principe des travaux académiques les plus récents²⁰.

Le World Business Council for Sustainable Development²¹, en collaboration avec le cabinet de conseil Carbone 4 et son initiative Net Zero, a publié un guide qui vise à stimuler l'innovation en faveur de solutions neutres en carbone²². Ce document issu du travail conjoint d'entreprises, d'uni-

versitaires et d'experts techniques comprend un volet relatif aux « émissions évitées ».

Concernant plus spécifiquement le secteur du numérique, la Commission européenne a lancé en 2023 son initiative Coalition européenne pour le numérique vert (EGDC) qui vise à produire un guide méthodologique fondé sur l'observation de cas d'usage à partir de données recueillies auprès de fournisseurs de solutions, afin d'estimer leurs contributions à la trajectoire européenne de décarbonation. Les résultats de ces travaux ont été publiés en avril 2024²³.

L'Union internationale des télécommunications (UIT) a formalisé dès 2022, avec l'adoption de la recommandation L.1480, un cadre méthodologique permettant l'évaluation des gains nets d'une solution numérique²⁴. Il s'agit d'estimer au plus près les contributions nettes à la décarbonation d'une solution numérique, en prenant en compte les effets directs mais aussi indirects (positifs ou négatifs) dans une logique conséquentielle. Pour illustrer cette démarche, le Tableau 1 page suivante décrit pour un cas d'usage simple, celui d'un GPS ou système de positionnement par satellite, les principaux effets à prendre en compte.

Si la mesure des effets directs est couverte par les approches dites ACV qui analysent toutes les étapes du cycle de vie, la prise en compte des effets indirects se révèle beaucoup plus complexe. Aussi l'UIT préconise-t-elle dans sa recommandation L.1480 l'utilisation d'« arbres de conséquences », une arborescence schématique qui permet d'envisager pour un cas d'usage l'ensemble des effets potentiels – positifs ou négatifs – sur la décarbonation. Des exemples de ces arbres sont donnés plus loin pour les quatre cas d'usage étudiés.

Quels cas d'usage pertinents a priori ?

Les solutions numériques pour réduire les émissions sont nombreuses et concernent tous les secteurs. Les potentiels les plus importants se situent logiquement dans les secteurs les plus énergivores – donc prioritaires dans les politiques de décarbonation – ou qui fournissent des produits ou des services génériques continuellement

15. Commission européenne (2022), « Taxonomie verte : mode d'emploi ! » article du 12 janvier.

16. Commission européenne (s.d.), « EU taxonomy for sustainable activities », page Web. Voir aussi Aubain P. et Le Goaziou I. (2023), « Seconde année d'application de la taxonomie européenne : enseignements et perspectives 2024 », EY, article du 1^{er} décembre.

17. Commission européenne (s.d.), « Data-driven solutions for GHG emissions reductions », page Web.

18. Directive (UE) 2022/2464 du Parlement européen et du Conseil du 14 décembre 2022.

19. World Resources Institute (2023), « International governance of technological carbon removal: Surfacing questions, exploring solutions », Working Paper, août.

20. Coroamă V. C., Bergmark P., Höjer M. et Malmödin J. (2020), « A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services – Part I: Single Services », dans Chitchyan R. et Schien D. (dir.), *ICT4S 2020. Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability*, p. 36-45.

21. Organisation mondiale de recherche privée à but non lucratif.

22. WBCSD et Carbone 4 (2022), *Guidance on Avoided Emissions. Helping Business Drive Innovations and Scale Solutions Toward Net Zero*, mars.

23. European Green Digital Coalition (2024), « Measuring the impact of digital solutions on the climate », avril.

24. La recommandation UIT-T L.1480 décrit une méthode d'évaluation des incidences de l'utilisation de solutions fondées sur les technologies de l'information et de la communication (TIC) sur les émissions de gaz à effet de serre d'autres secteurs.



Tableau 1- Contribution des solutions numériques à la décarbonation : effets directs et indirects des usages, le cas du GPS

CATÉGORIE	EFFETS	DESCRIPTION	EXEMPLE	ÉMISSIONS DE CO ₂ ÉVITÉES POTENTIELLES
Effets directs	Production	Ressource et énergie consommées pour produire le matériel ou le code (logiciel).	Construire le GPS.	-
	Fonctionnement	Consommation électrique pour faire fonctionner la solution numérique (avec ou sans prise en compte des centres de données et des réseaux).	Utiliser le GPS.	-
	Élimination	Ressources et énergie consommées pour supprimer les éléments physiques ou virtuels de l'application.	Recycler le GPS.	-
Effets indirects	Optimisation	Amélioration de l'efficacité énergétique ou ressource.	Optimisation des trajets. Fluidification des trajets.	+
	Substitution	Remplacement d'un objet physique par une solution numérique.	Réduction des services de prévision et de sécurité routière.	+ +
	Effet rebond direct	Réduction d'un coût d'accès à un service qui a pour effet d'augmenter la demande pour ce service.	Augmentation du nombre de trajets réalisés. Augmentation du nombre de véhicules en circulation.	-
	Effet rebond indirect	Réduction d'un coût d'accès à un service qui a pour effet d'augmenter l'accès à d'autres types de services.	Réinvestissement des économies réalisées par un ménage sur la consommation de carburant dans d'autres secteurs de dépenses (loisirs, etc.) qui peuvent accroître les émissions ou au contraire participer à leur réduction (par exemple, isolation de son logement).	+ +

Contributions nettes positives ou négatives, en émissions de CO₂ évitées

Source : France Stratégie, d'après Bieser J., Hintemann R., Hilty L. M. et Beucker S. (2023), « A review of assessments of the greenhouse gas footprint and abatement potential of information and communication technology », *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 99, mars

nécessaires à la société. Les bâtiments, l'énergie ou les transports entrent dans cette catégorie. Le numérique pourrait aussi faciliter la décarbonation de secteurs tels que la santé ou la banque, mais avec un potentiel de réduction absolue moindre du fait de la part relativement faible de ces secteurs dans les émissions²⁵.

C'est la raison pour laquelle on choisit d'explorer ici des cas d'usage empruntés aux secteurs de l'énergie, du bâtiment et des transports, en sélectionnant quatre solutions numériques *a priori* prometteuses et pour lesquelles des estimations sont disponibles : les réseaux électriques intelligents (*smart grids*), la gestion intelligente des consommations d'énergie des bâtiments (*smart homes*), le télétravail et les plateformes de covoiturage.

Pour chacun d'entre eux, on cherche à estimer les émissions évitées potentielles, en tenant compte des effets rebond. On aura compris que la liste n'est pas exhaustive : des solutions numériques pertinentes existent aussi dans l'industrie ou l'agriculture, mais ne sont pas étudiées dans cette note.

La démarche s'appuie sur les diverses estimations identifiées dans la littérature académique et institutionnelle. On a retenu en priorité les références postérieures à 2017, qui concernent l'Europe ou la France, et qui comprennent dans la mesure du possible des analyses systématiques de littérature.

LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES INTELLIGENTS

Une « smartification » porteuse de flexibilité

Qu'il s'agisse du transport ou de la distribution d'électricité, des solutions dites « intelligentes » peuvent être déployées à tous les niveaux d'un réseau électrique. Ces solutions collectent et analysent des données, favorisent la circulation d'information entre les fournisseurs et les consommateurs, et permettent d'ajuster le flux d'électricité en temps réel : entre 2 % et 10 % de la consommation énergétique des ménages européens se trouverait ainsi économisée²⁶. La smartification assure l'équilibrage et la flexibilité des réseaux : grâce aux réseaux intelligents ou *smart grids*, on peut piloter au plus près les dispositifs

25. Bieser J. C. T. et Hilty L. M. (2018a), « Indirect effects of the digital transformation on environmental sustainability... », *op. cit.*

26. Malmodin J. et Coroamă V. C. (2016), « Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation. The example of smart metering », dans *2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG)*, septembre. Voir à ce sujet *Annales des Mines* (2021), « Le numérique et la refondation du système électrique », n° 15 de la série *Enjeux numériques*, coord. par E. Baranes, septembre.

de stockage d'énergie²⁷ et les « capacités d'effacement », autrement dit les quantités d'énergie qui peuvent ponctuellement être retirées du réseau national d'électricité pour le soulager lors des pics de consommation. On peut aussi gérer et accompagner une part croissante d'électricité issue de sources renouvelables ou de systèmes décentralisés (qu'il s'agisse d'auto-production ou de prosumers).

Les *smart grids*, en facilitant la surveillance du réseau, permettent d'améliorer la maintenance et la gestion des incidents : les temps de coupure en cas de panne sont réduits, les dysfonctionnements susceptibles d'accroître la consommation sont rapidement détectés. Ces systèmes intelligents participent ainsi à la réduction des coûts d'exploitation du réseau et limitent les déplacements des équipes techniques : les interventions des équipes d'Enedis ont par exemple baissé de plus de 70 % depuis l'installation des compteurs Linky. Les gains obtenus pourraient même contribuer à réduire le nombre d'infrastructures de secours nécessaires et à réorienter certains investissements vers une plus grande décarbonation du réseau²⁸.

Une partie des gains que sont censés apporter les *smart grids* est liée aux compteurs intelligents²⁹. On estime que ces appareils sont susceptibles de diminuer la consommation énergétique des logements de 0 % à 5 % par an au niveau européen³⁰. En termes d'émissions, pour un ménage, cela reviendrait à éviter annuellement entre 80 kgCO₂e et 320 kgCO₂e³¹, selon le mix électrique. Pour maximiser les gains liés à la gestion dynamique de la demande, il est cependant essentiel que les consommateurs adhèrent au dispositif et modifient éventuellement leurs comportements. La littérature insiste sur l'importance d'accompagner les usagers, sous peine de voir naître un sentiment de défiance alimenté par le manque de transparence sur les données, le sentiment d'intrusion dans l'espace privé ou la faible satisfaction des services rendus – le tout pouvant mener à une sous-utilisation du dispositif et à l'érosion des objectifs de transition énergétique³².

Au-delà des solutions de *smart grids*, des technologies de blockchain garantissant l'authentification d'un contrat dans un système décentralisé ou la généralisation de l'intelligence artificielle dans les systèmes prédictifs pourraient aussi à terme contribuer à réduire les émissions du secteur de l'énergie³³. Mais pour ces deux types de solutions numériques, la quantification reste à établir et le sens même de l'effet net est incertain compte tenu des empreintes carbone de ces solutions.

Avant de passer au chiffrage, le Schéma 1 page suivante présente sous forme d'un « arbre de conséquences » les différentes contributions – positives ou négatives – d'un *smart grid* à la réduction des émissions de CO₂, en distinguant les effets directs et indirects.

Des gains toutefois modestes et incertains pour le réseau français

Une étude réalisée en 2017 par le gestionnaire du réseau RTE³⁴ a fourni une première estimation des impacts des *smart grids* sur le réseau électrique français. Quatre solutions sont passées au crible : le stockage³⁵, la gestion active de la demande résidentielle via les compteurs intelligents et des « boîtiers », la gestion active de la demande industrielle et tertiaire, et enfin le pilotage de la production éolienne. L'analyse porte sur la potentialité des gains carbone de différentes solutions de smartification et sur la pertinence économique du déploiement de ces solutions, mais seuls sont retenus les reports induits de consommation, les réductions de consommation étant négligées car limitées. L'étude menée par RTE retient une acception large des *smart grids* qui inclut toute solution contribuant à la flexibilité électrique, y compris l'investissement dans les nouvelles technologies de stockage STEP (stations de transfert d'énergie par pompage).

Dans le contexte de 2017, RTE estimait que le déploiement de l'ensemble des solutions de *smart grids* permettrait un gain net d'émissions d'environ 0,8 MtCO₂/an à l'horizon 2030,

27. L'éventail de technologies de stockage d'énergie électrique est vaste : stockage thermique, stockage par air comprimé, batteries électrochimiques, *power-to-gas to-power*, station de transfert d'énergie par pompage (STEP), etc.

28. Jumel S. et Mallet P. (2023), « Les enjeux de la numérisation pour les gestionnaires du réseau de distribution », *Responsabilité et environnement*, n° 109, Annales des Mines, p. 77-81.

29. Selon la définition de la Commission européenne, un compteur est considéré comme « intelligent » s'il possède une gamme étendue d'attributs : a) fournir une rétroaction directe aux consommateurs, b) effectuer des relevés fréquents, avec un décalage maximal de quinze minutes, accessible en temps réel à l'entreprise de distribution d'énergie, c) fournir une communication bidirectionnelle pour le contrôle et la maintenance. Ces fonctionnalités ne sont pas toutes actives par défaut sur les Linky français.

30. Bastida L., Cohen J. J., Kollmann A., Moya A. et Reichl J. (2020), « Exploring the role of ICT on household behavioural energy efficiency to mitigate global warming », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 103(C), p. 455-462 ; BEIS (2019), *Smart Metering Implementation Programme. A Report on Progress of the Realisation of Smart Meter Consumer Benefits*, département britannique des Affaires et du Commerce, septembre.

31. Malmudin J. et Coroamă V. C. (2016), « Assessing ICT's enabling effect through case study ex-trapolation... », *op. cit.*

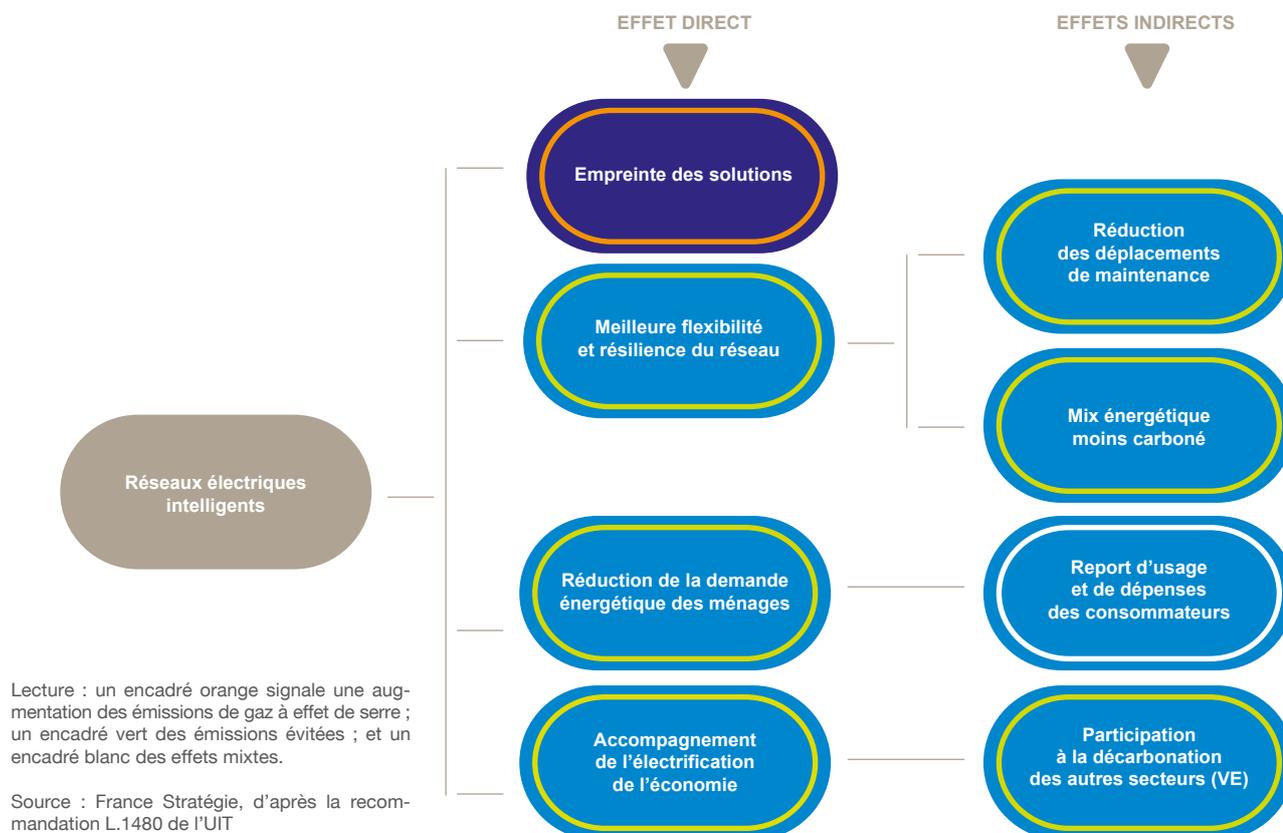
32. BEIS (2019), *Smart Metering Implementation Programme...*, *op. cit.* ; Simon F. et Schweitzer V. (2023), « When smart meters backfire on energy transition internalization: Ethical electricity suppliers' mitigation of consumer data vulnerability and attendant psychological disempowerment », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 194, septembre.

33. Annales des Mines (2021), « Le numérique et la refondation du système électrique », *op. cit.*

34. RTE (2017), *Réseaux électriques intelligents. Valeur économique, environnementale et déploiement d'ensemble*, septembre.

35. Les technologies de stockage d'énergie électrique (voir *supra*) ont aujourd'hui des degrés divers de maturité. L'étude RTE a privilégié l'étude de la gestion intelligente des batteries, en particulier des batteries Li-on dont on connaît les caractéristiques techniques et les conditions de leur développement économique.

Schéma 1 – Contribution des *smart grids* à la décarbonation : effet direct et effets indirects



en comptant le cycle de vie des matériels déployés, soit environ 3 % des émissions annuelles du système électrique français. Plus des deux tiers de ces bénéfices proviendraient du stockage (batteries et STEP), dont l'intégration dans le périmètre des solutions numériques peut toutefois être discutée, en raison des divers dispositifs techniques mobilisés.

L'effacement et la modulation de la consommation, grâce aux compteurs communicants et autres « boîtiers » permettant un pilotage dynamique des équipements électriques, contribueraient plus modestement à la réduction des émissions : 0,2 MtCO₂ pour les bâtiments professionnels et 0,1 MtCO₂ pour les logements. Ces résultats doivent être considérés avec une grande prudence et interprétés comme une borne haute, compte tenu notamment de l'évolution des perspectives de développement des capacités de production nucléaire et des comportements observés depuis la date de réalisation de l'étude. La crise énergé-

tique de l'hiver 2022-2023 a notamment révélé qu'indépendamment des solutions numériques, il existait un potentiel de sobriété significatif³⁶, même si son ampleur et sa pérennité font encore débat. En outre, un pilotage tarifaire simple ne nécessitant aucune des fonctionnalités propres aux compteurs communicants - à commencer par la distinction entre heures pleines et heures creuses - peut déjà constituer une solution de flexibilité assez efficace³⁷.

Toutefois, le recours au numérique pourrait s'annoncer plus prometteur pour certains nouveaux usages de l'électricité pouvant contribuer à la flexibilité. RTE souligne ainsi que le pilotage intelligent de la recharge des batteries des véhicules électriques³⁸ en France pourrait non seulement réduire les émissions nationales, mais au-delà sensiblement diminuer les émissions liées à la production d'électricité dans les pays voisins, en raison notamment du mode de fonctionnement du marché électrique européen³⁹.

36. Voir RTE (2023a), *Bilan prévisionnel, édition 2023 – Futurs énergétiques 2050. 2023-2035 : première étape vers la neutralité carbone – Synthèse*, septembre ; RTE (2023b), « *Chapitre 2 – La consommation* », dans *Bilan prévisionnel, édition 2023 – Futurs énergétiques 2050. 2023-2035 : première étape vers la neutralité carbone – Volet consommation*, octobre.

37. Jacquemart Y., Oriol L. et Janvier T. (2024), « *Flexibilités de la demande : un levier essentiel pour décarboner et optimiser le système électrique* », *La Revue de l'énergie*, n° 671, mars-avril.

38. Incluant la recharge bidirectionnelle (V2G), qui permet au véhicule électrique de se recharger sur le réseau électrique et de redistribuer de l'énergie vers le réseau lorsqu'il n'est pas utilisé.

39. Les gains produits par un pilotage intelligent des modes de recharge des véhicules en France auraient selon RTE une influence sur la sollicitation de tous les moyens de production pilotables en Europe, notamment les moyens de production reposant sur les énergies fossiles qui se situent majoritairement dans d'autres pays. Voir RTE (2019), *Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique*, mai.

Tableau 2 – Estimation des émissions de CO₂ évitées annuellement par le déploiement de solutions de flexibilité *smart grids* à l'horizon 2030, en ktCO₂/an

	Ensemble des solutions <i>smart grids</i> étudiées dans l'étude RTE (2017)	Dont effacement et modulation dans les bâtiments via compteurs intelligents et « boîtiers »
Émissions évitées par les solutions	881	340
Empreinte des solutions	-41	-21
Gains nets des solutions	840	319

Lecture : le déploiement de solutions *smart grids* sur le réseau électrique français permettrait d'éviter 0,8 MtCO₂ par an à l'horizon 2030. Les émissions évitées par les solutions prennent en compte l'impact sur la production d'électricité à partir de combustibles fossiles mais aussi sur les capacités de production et sur le réseau (analyse en cycle de vie). L'empreinte de la solution prend en compte les émissions liées à son utilisation et à son cycle de vie.

Source : France Stratégie d'après RTE (2017), *Réseaux électriques intelligents. Valeur économique, environnementale et déploiement d'ensemble*, septembre

Les *smart grids* peuvent également permettre une réduction de la consommation d'électricité mais cet effet est encore plus incertain que celui sur les émissions. En particulier, l'effacement peut se traduire soit par une diminution nette de la consommation, soit par son déplacement dans le temps, et l'ampleur de cet effet de report ne fait pas consensus. RTE retient, dans l'estimation centrale de l'étude 2017, des hypothèses de taux de report de 85 % pour l'effacement résidentiel et de 100 % pour l'effacement industriel et tertiaire, qui impliqueraient des économies d'électricité très faibles.

LA GESTION INTELLIGENTE DES LOGEMENTS

Des gains très dépendants des contextes de déploiement

Les émissions de CO₂ liées au chauffage des résidences principales en France métropolitaine s'élevaient en 2021 à 45 millions de tonnes en 2021, soit 1,5 tCO₂ par logement, en incluant les émissions indirectes du chauffage électrique et du chauffage par réseau de chaleur⁴⁰. Il existe aujourd'hui des solutions numériques qui permettent de gérer les systèmes et de réduire la consommation d'énergie dans les logements. Ces dispositifs de gestion intelligente des logements (Home Energy Management System ou HEMS) entraînent des réductions de consommation énergétique sur tous les équipements de la maison. Mais c'est pour la gestion de la température ambiante (le chauffage

en particulier) que ces solutions présentent les effets les plus intéressants. Elles sont capables en effet de prendre en compte les préférences des utilisateurs – visent-ils d'abord l'économie, le confort, la performance écologique ? –, mais aussi les caractéristiques du bâtiment et les prévisions météorologiques, à l'échelle d'une pièce, d'un logement ou d'un bâtiment.

Certaines études ont évalué les réductions d'émissions que pourrait représenter l'installation de tels dispositifs intelligents. Les gains seraient particulièrement importants dans les pays froids – jusqu'à -30 % en Finlande⁴¹ ou en Suède⁴² – ou dans les pays ayant un mix énergétique relativement carboné (Royaume-Uni). Ces gains sont par ailleurs susceptibles de diminuer substantiellement à mesure que la production d'énergie se décarbone, ce qui suppose une réévaluation régulière⁴³. Toutefois, il reste difficile d'isoler les effets propres à la solution numérique en raison des variables exogènes liées au contexte d'observation : s'agit-il d'un climat froid ou chaud ? de logements collectifs ou individuels ? avec quel niveau d'isolation ? En outre, certains résultats peinent à distinguer la part des gains attribués au dispositif intelligent installé localement (*smart home*) de celle qui revient au pilotage du réseau (*smart grids*), cette dernière part pouvant varier avec le dispositif technique observé. Les préférences des utilisateurs peuvent également avoir un effet sur l'efficacité de la solution. Plusieurs études montrent que pour parvenir à une solution optimale, il faut tenir compte à la fois des signaux prix et du signal d'émission carbone⁴⁴. Si les solutions HEMS permettent de modifier les profils de consommation des ménages – par exemple en décalant les temps de consommation ou le nombre d'heures de consommation élevée –, les impacts dépendent largement des préférences des utilisateurs (pour l'économie, le confort ou la durabilité écologique).

Certains consommateurs, voyant leur facture globale diminuer, vont renoncer à ces gains financiers pour choisir de maintenir leur température à l'identique voire l'augmenter. L'amélioration de l'efficacité énergétique des logements ne conduit donc pas forcément à une baisse de la demande d'énergie et les économies d'énergie réalisées peuvent être annulées par des changements de comportement (effets rebond) (voir Schéma 2 page suivante).

40. SDES (2024), « *Tableau de suivi de la rénovation énergétique dans le secteur résidentiel* », 7 mars.

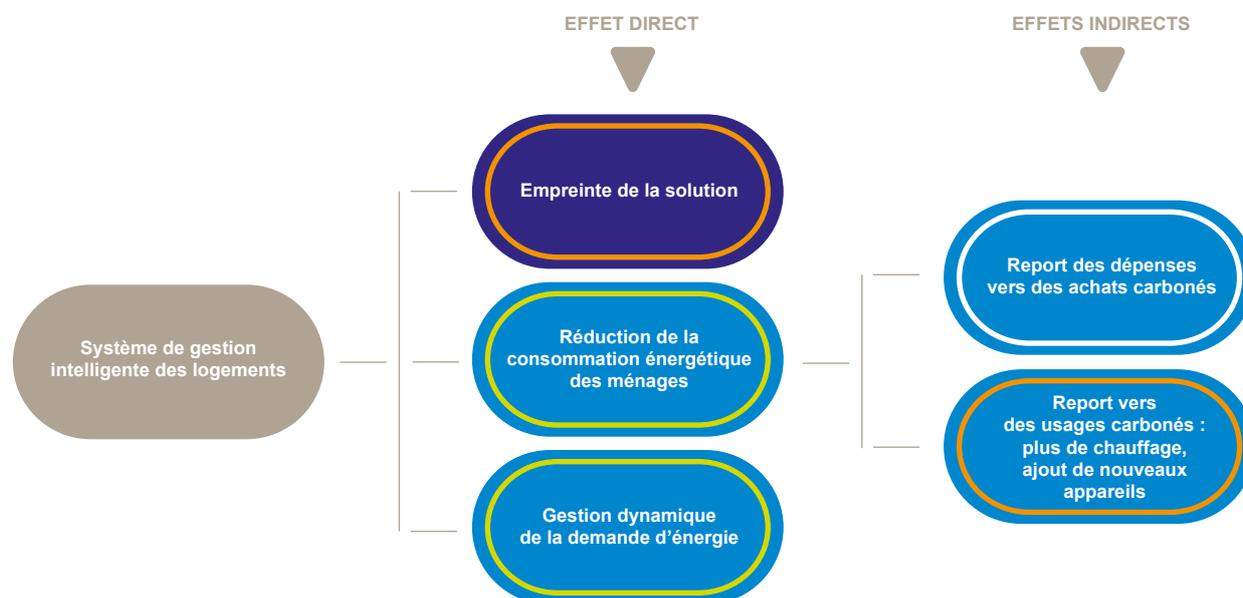
41. Tuomela S., de Castro Tomé M., Iivari N. et Svento R. (2021), « *Impacts of home energy management systems on electricity consumption* », *Applied Energy*, vol. 299, octobre.

42. Nilsson A., Wester M., Lazarevic D. et Brandt N. (2018), « *Smart homes, home energy management systems and realtime feedback: Lessons for influencing household energy consumption from a Swedish field study* », *Energy and Buildings*, vol. 179, septembre, p. 15-25.

43. Voir Pohl J. et al. (2021), « *Environmental saving potentials of a smart home system from a life cycle perspective...* », *op. cit.* ; Fiorini L. et Aiello M. (2022), « *Automatic optimal multi-energy management of smart homes* », *Energy Informatics*, vol. 5.

44. Voir Nilsson A. et al. (2018), « *Smart homes, home energy management systems and real-time feed-back...* », *op. cit.* ; Fiorini L. et Aiello M. (2022), « *Automatic optimal multi-energy management of smart homes* », *op. cit.* ; Tuomela S., de Castro Tomé M., Iivari N. et Svento R. (2021), « *Impacts of home energy management systems on electricity consumption* », *Applied Energy*, vol. 299, octobre.

Schéma 2 – Contribution des *smarts homes* à la décarbonation : effet direct et effets indirects



Lecture : un encadré orange signale une augmentation des émissions de gaz à effet de serre ; un encadré vert des émissions évitées ; et un encadré blanc des effets mixtes. Pour les effets indirects, on distingue les effets sur les achats du ménage (achats de nouveaux biens de consommation plus ou moins carbonés) des effets sur les usages du ménage, qui peut choisir par exemple de reporter ses gains sur l'utilisation d'autres appareils (niveau d'équipement constant).

Source : France Stratégie, d'après la recommandation L.1480 de l'UIT

Pour les ménages français, l'étude de référence publiée par Belaïd, Ben Youssef et Lazaric (2020)⁴⁵ a mesuré que l'ensemble des effets rebond directs liés aux économies d'énergie pourrait réduire les gains de la solution de 72 % à 86 %.

Il convient en outre de prendre en compte la consommation énergétique de la solution déployée sur l'ensemble de son cycle de vie⁴⁶. Ainsi, pour un foyer type en région Grand Est⁴⁷, modérément connecté (une dizaine de capteurs dans la maison), les économies d'énergie doivent être d'au moins 3,5 % de la consommation habituelle pour compenser la consommation électrique de la solution ajoutée. Ce chiffre passe à 6 % si l'on fait passer le nombre de capteurs à 25, et presque 10 % pour plus de 40 capteurs dans un même foyer.

Des effets globaux incertains pour les ménages français

Sur la base des résultats de la littérature, et en particulier à partir de la méthodologie présentée dans l'étude de l'Ademe Grand Est⁴⁸, nous avons cherché à illustrer ce que pourrait apporter la généralisation de solutions numé-

riques de gestion intelligente dans les trente millions de résidences principales françaises.

Nous avons retenu plusieurs scénarios qui tiennent compte à la fois des gains d'efficacité énergétique de la solution (2 %, 4 % ou 10 %)⁴⁹, des effets rebond pouvant réduire les gains de la solution de 25 %, 50 % ou 75 % et des émissions liées à la mise en œuvre de la solution⁵⁰. On considère que la solution elle-même consomme un coût carbone constant dans tous nos scénarios, de 10,7 kgCO₂e par an et par logement (correspondant à une solution moyenne d'une dizaine de capteurs).

Dans le scénario optimiste, la solution HEMS permettrait de réduire la consommation d'énergie de 20 TWh et d'éviter annuellement 3,1 MtCO₂e par an pour l'ensemble des logements en France métropolitaine. Elle conduirait en revanche à augmenter la consommation d'énergie de 2 TWh et ses émissions de 0,1 MtCO₂e dans le scénario pessimiste. En effet, sous des hypothèses défavorables, les gains d'efficacité énergétique après effets rebond pourraient être insuffisants pour compenser les émissions liées à la mise en œuvre de la solution elle-même.

45. Belaïd F., Ben Youssef A. et Lazaric N. (2020), « Scrutinizing the direct rebound effect for French households using quantile regression and data from an original survey », *Ecological Economics*, vol. 176, octobre.

46. Ces hypothèses prennent en compte le coût de la fabrication de la solution, pour une durée de vie de la solution estimée à cinq ans.

47. Ademe, I-Care et Hubblo (2023), *Impact environnemental des usages du numérique en Grand Est*, rapport final, coll. « Expertises », septembre.

48. *Ibid.*

49. Pohl J. et al. (2021), « Environmental saving potentials of a smart home system from a life cycle perspective... », *op. cit.*

50. Belaïd F. et al. (2020), « Scrutinizing the direct rebound effect for French households... », *op. cit.*

Tableau 3 – Réduction annuelle des émissions et de la consommation avec une solution *smart homes* appliquée à l'ensemble des résidences principales en France métropolitaine

	Hypothèse pessimiste	Hypothèse médiane	Hypothèse optimiste
Gains d'efficacité HEMS* avant effets rebond	2 %	4 %	10 %
Effets rebond	75 %	50 %	25 %
Gains d'efficacité HEMS après effets rebond	0,5 %	2,0 %	7,5 %
Empreinte de la solution par résidence principale (en kgCO ₂)	10,7	10,7	10,7
Réduction des émissions due aux gains d'efficacité après effets rebond par résidence principale (en kgCO ₂)	7,5	29,8	111,8
Réduction nette des émissions par résidence principale (en kgCO ₂)	-3,2	19,1	101,1
Réduction nette CO ₂ en pourcentage	-0,2 %	1,3 %	6,8 %
Réduction nette des émissions (en MtCO₂) pour l'ensemble des résidences principales	-0,1	0,6	3,1
Réduction nette des émissions (en TWh) pour l'ensemble des résidences principales	-2,4	2,5	20,4

* HEMS = Home Energy Management System = Système de gestion intelligente des logements

Note : estimation de la consommation énergétique de la solution HEMS de 135 kWh/an et facteur émission de l'électricité de 0,079 kgCO₂/kWh⁵¹. Nombre de résidences principales en France métropolitaine : 30 millions. Émissions annuelles moyennes de CO₂ liées au chauffage par résidence principale de 1,49 tonne pour 10,8 MWh de consommation énergétique⁵².

Lecture : dans l'hypothèse médiane, la solution de gestion intelligente réduirait de 4 % la consommation énergétique, avec un effet rebond estimé à 50 %, ce qui permettrait d'éviter 19 kgCO₂e par logement et par an, soit 0,6 MtCO₂e pour l'ensemble de la France métropolitaine.

Source : France Stratégie

TÉLÉTRAVAIL ET SMART WORK

Des effets rebond non négligeables

Le télétravail est souvent vu comme un moyen de réduire les émissions de gaz à effet de serre, à l'échelle d'un pays, aux États-Unis⁵³, en Irlande⁵⁴, ou à l'échelle d'une ville moyenne française⁵⁵. Une expérimentation récente à l'échelle d'une entreprise a montré que les gains nets, estimés suivant la méthodologie fondée sur l'analyse conséquentielle, pouvaient même être significatifs⁵⁶.

En France, selon l'Ademe, les gains d'émissions directement liés à la réduction des trajets domicile-travail pour un jour télétravaillé hebdomadaire s'élèveraient en moyenne à 271 kgCO₂e par an⁵⁷ et par télétravailleur.

Mais ces premières estimations ne tenaient pas compte des effets rebond, notamment des effets de report éventuels vers d'autres types de trajets, de proximité ou de longue distance. Il faut aussi intégrer le recours à la visioconférence et

la hausse de la consommation énergétique à domicile (liée aux équipements informatiques et au chauffage) ainsi que, à l'inverse, la baisse de consommation dans l'entreprise. Ainsi, en considérant l'ensemble de ces effets, l'Ademe estime que les gains annuels liés à un jour de télétravail seraient réduits à 181 kgCO₂e en l'absence de *flex office*. En revanche, les gains pourraient être supérieurs à l'effet direct de réduction des trajets domicile-travail en cas de recours au *flex office* : cette organisation de l'espace sans bureaux attitrés permet en effet de réduire les surfaces utilisées et donc la consommation énergétique, le chauffage et les opérations de maintenance du bâtiment. Les options de *flex office* étudiées par l'Ademe sont toutefois drastiques et sont à considérer comme des hypothèses très optimistes⁵⁸.

L'estimation des effets rebond reste, de manière générale, incertaine et délicate. Une étude menée au Royaume-Uni conclut que le télétravail pourrait même conduire à une augmentation des émissions, la réduction liée à la baisse des déplacements domicile-travail se trouvant plus que

51. Arrêté du 15 septembre 2006 relatif au DPE (diagnostic de performance énergétique) pour les bâtiments ou parties de bâtiment autres que d'habitation existants proposés à la vente en France métropolitaine.

52. « 2021, France métropolitaine, tous logements – Données corrigées des variations climatiques, y compris émissions indirectes électricité et chauffage urbain », dans SDES (2024), « Tableau de suivi de la rénovation énergétique dans le secteur résidentiel », *op. cit.*

53. Hook A., Court V., Sovacool B. K. et Sorrell S. (2020), « A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking », *Environmental Research Letters*, vol. 15(9), août.

54. Stefaniec A., Brazil W., Whitney W., Zhang W., Colleary B. et Caulfield B. (2024), « Examining the long-term reduction in commuting emissions from working from home », *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, vol. 127, février.

55. Tenailleau Q., Tannier C., Vuidel G., Tissandier P. et Bernard N. (2021), « Assessing the impact of telework enhancing policies for reducing car emissions: Exploring calculation methods for data-missing urban areas. Example of a medium-sized European city (Besançon, France) », *Urban Climate*, vol. 38, juillet.

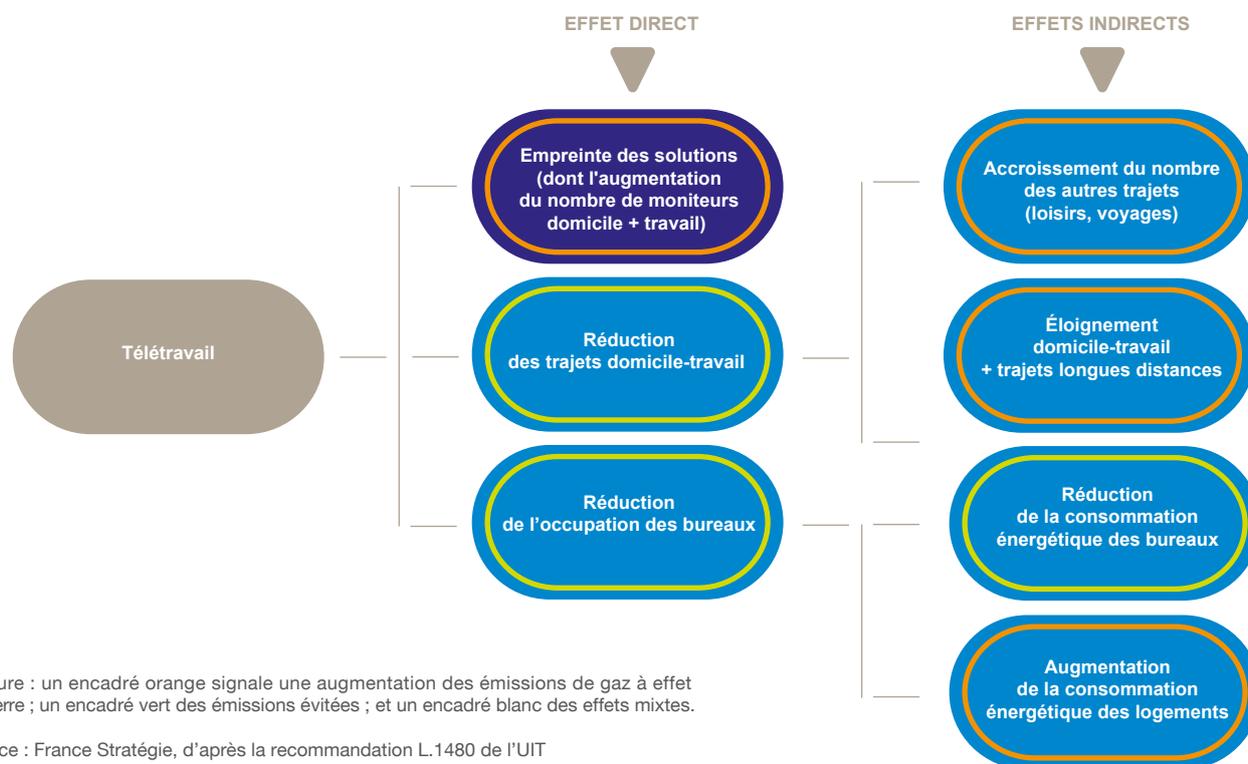
56. Labidurie Omnes N., Bêlorgey F., Brun A., Canet J.-M. et Fournier J. (2023), « Assessing how the use of teleworking impacts GHG emissions: A study case », dans *European Conference on Networks and Communications & 6G Summit: 6G Visions and Sustainability*.

57. Ademe (2015), *Évaluation de l'impact du télétravail rapport final*, septembre. Ce chiffre repose sur une enquête auprès d'un échantillon de télétravailleurs, dont 81 % se déplacent en voiture et habitent à 20 km en moyenne de leur travail (soit 40 km aller-retour), et prend pour hypothèses un facteur d'émission des véhicules particuliers de 250 gCO₂e/km, incluant notamment les émissions liées à la fabrication des véhicules, et un taux d'occupation moyen des véhicules de 1,4 passager. Ce chiffre de l'impact lié à la réduction des trajets domicile-travail a été complété en 2020 par une estimation des effets rebond : voir Ademe et Greenworking (2020), *Étude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail*, rapport final, coll. « Expertises », septembre.

58. Voir Ademe et Greenworking (2020), *ibid.*



Schéma 3 – Contributions du télétravail à la décarbonation : effet direct et effets indirects



Lecture : un encadré orange signale une augmentation des émissions de gaz à effet de serre ; un encadré vert des émissions évitées ; et un encadré blanc des effets mixtes.

Source : France Stratégie, d'après la recommandation L.1480 de l'UIT

contrebalancée par une hausse des émissions bâtimentaires, dans le résidentiel notamment⁵⁹. Selon les auteurs, les émissions de chauffage supplémentaires pour les télétravailleurs assidus (trois à cinq jours par semaine à domicile) sont trois fois plus importantes que les économies d'émissions de transport, pour une hypothèse où ces télétravailleurs chauffent leur logement pendant deux heures supplémentaires par jour de télétravail à 20 °C. Ainsi, les émissions domestiques supplémentaires compensent largement les économies d'émissions de transport. D'autres auteurs estiment que le télétravail se traduirait par une hausse globale des distances parcourues, soit en raison de plus grandes distances entre le domicile et le lieu de travail, soit en raison des déplacements supplémentaires non liés au travail⁶⁰ (voir Schéma 3). Par ailleurs, lorsqu'il est pratiqué par des cadres ou des travailleurs à hauts revenus, le télétravail pourrait engendrer plus d'effets rebond, liés par exemple aux trajets de loisirs plus nombreux ou, à plus long terme, au choix résidentiel des ménages qui

peuvent s'installer dans des territoires plus éloignés des centres urbains et des centres d'activités⁶¹.

Un potentiel de réduction des émissions modéré pour la France

Pour parvenir à un ordre de grandeur des effets du télétravail en France, nous avons considéré les gains d'émissions de l'ensemble des salariés exerçant un métier « télétravaillable », soit l'hypothèse optimiste⁶² de 34 % des 30 millions de salariés en France pratiquant en moyenne un jour de télétravail hebdomadaire⁶³.

Le scénario le plus favorable tient compte d'une maximisation optimiste de l'utilisation des bureaux – avec un *flex office* organisé, impliquant une réduction des espaces de bureaux utilisés – pour un gain annuel de 413 kgCO₂e. Le scénario médian s'appuie quant à lui sur les estimations initiales de l'Ademe⁶⁴, avec un gain annuel de 271 kgCO₂e par télétravailleur, qui peut s'interpréter comme un scénario où

59. Shi Y., Sorrell S. et Foxon T. (2023), « The impact of teleworking on domestic energy use and carbon emissions: An assessment for England », *Energy and Buildings*, vol. 287, mai.

60. Caldarola B. et Sorrell S. (2022), « Do teleworkers travel less? Evidence from the English National Travel Survey », *Transportation Research. Part A: Policy and Practice*, vol. 159, mai, p. 282-303.

61. Viana E. D., Motte-Baumvol B., Belton Chevallier L. et Bonin O. (2020), « Does working from home reduce CO₂ emissions? An analysis of travel patterns as dictated by workplaces », *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, vol. 83, juin.

62. Sur la base du modèle de Dingel J. I. et Neiman B. (2020), « How many jobs can be done at home? », NBER Working Paper n° 26948, avril.

63. En 2021, 21,7 % des salariés avaient télétravaillé au moins un jour par semaine (55 % des cadres), cette part redescendant à 18,8 % en 2023. Voir Jauneau Y. (2022), « En 2021, en moyenne chaque semaine, un salarié sur cinq a télétravaillé », *Insee Première*, n° 1987, mars ; Péricaud É. (2024), « Une photographie du marché du travail en 2023 », *Insee Première*, n° 1987, mars.

64. Voir Ademe et Greenworking (2020), *Étude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail*, op. cit.

Tableau 4 – Estimation des effets du télétravail sur les émissions évitées de CO₂e par an

	SCÉNARIO PESSIMISTE Hypothèse avec effets rebond, sans <i>flex office</i> (181 kgCO ₂ e/an)	SCÉNARIO MÉDIAN Hypothèse sans effets rebond et sans <i>flex office</i> (271kgCO ₂ e/an)	SCÉNARIO OPTIMISTE Hypothèse avec effets rebond et <i>flex office</i> (413 kgCO ₂ e/an)
KgCO ₂ évités par jour de télétravail pour 47 jours télétravaillés par an	3,9	5,8	8,8
*MtCO ₂ e évitées pour 10 millions d'actifs susceptibles de télétravailler	1,8	2,7	4,1

Lecture : dans le scénario médian, un jour de télétravail permettrait d'éviter en moyenne 5,8 kgCO₂, soit une réduction agrégée de 2,7 MtCO₂ pour 10 millions de télétravailleurs sur un an.

Source : France Stratégie, d'après les données Ademe et Greenworking (2020), *Étude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail*, op. cit.

les effets rebond négatifs potentiels sont compensés par une gestion optimale des bureaux. Enfin, le scénario pessimiste prend en compte les effets rebond, sans gestion optimisée des espaces de bureau, et considère que seulement 181 kgCO₂e peuvent être évités annuellement⁶⁵.

Accroître le télétravail d'un jour hebdomadaire pour 10 millions de salariés pourrait réduire les émissions nationales de 2,7 MtCO₂ dans le scénario médian, dont 1,7 MtCO₂ dans le transport de passagers (le reste des gains étant lié à la production en amont des carburants et des véhicules)⁶⁶. Au-delà des incertitudes élevées qui l'entourent, un tel chiffre met en évidence que le télétravail ne fournira à lui seul qu'une contribution modérée à la nécessaire réduction des émissions des transports, d'autant que la pratique du télétravail tend à se stabiliser auprès des salariés après la forte progression post-2019⁶⁷. Rappelons que celles-ci, d'après le SGPE, doivent passer de 129 MtCO₂e en 2022 à 92 MtCO₂e en 2030 – et de 77 MtCO₂e à 49 MtCO₂e pour le seul transport de passagers⁶⁸. À noter enfin que les gains apportés par le télétravail ont vocation à diminuer mécaniquement au fur et à mesure de l'électrification du parc de véhicules particuliers.

LES PLATEFORMES DE COVOITURAGE

Un rôle marginal des plateformes dans le covoiturage

Le covoiturage (*carpooling* ou *ridesharing*) permet l'utilisation par plusieurs automobilistes d'un seul véhicule particulier pour effectuer le même trajet⁶⁹. La mesure des gains de carbone de cette pratique est distincte selon

qu'on observe les trajets courts (moins de 80 km) ou de longue distance (plus de 80 km). Ainsi, en 2018, pour les trajets longs, la société BlaBlaCar⁷⁰ estimait avoir permis l'économie de 272 000 tonnes de CO₂e en France en densifiant le nombre d'usagers par véhicule et en réduisant ainsi le nombre de trajets réalisés par des « autosolistes ». Ces résultats restent toutefois très modestes au regard des 78 MtCO₂e émises par les véhicules particuliers en France, pour la même année⁷¹. En outre, ces chiffres ne sont pas auditables, puisque aucune information sur la méthodologie suivie pour les établir n'est disponible (notamment absence de précision sur le scénario de référence retenu)⁷².

Les potentialités de gains sont en fait plus importantes sur les trajets courts, qui sont *a priori* plus nombreux puisque 74 % des déplacements domicile-travail sont réalisés avec des véhicules individuels. Pourtant, on estime à seulement 3 % la part du covoiturage quotidien pour les particuliers⁷³. L'autosolisme est également fréquent pour les déplacements professionnels, qui s'effectuent à 88 % avec le seul conducteur et sur de courtes distances⁷⁴. En outre, le covoiturage informel reste largement prépondérant par rapport à celui organisé par des plateformes numériques.

Les autorités françaises ont mis en place depuis 2019 (reconduit en 2022) un plan d'accompagnement au covoiturage⁷⁵, qui permet aux autorités organisatrices de mobilités (AOM) dans les territoires d'inciter financièrement au covoiturage : 33 plateformes numériques participent aujourd'hui à ce

65. Ademe et Greenworking (2020), *Étude sur la caractérisation des effets rebond...*, op. cit.

66. Si l'on retient comme facteur d'émission le ratio de 0,24 tCO₂ /MWh pour le parc de voitures en moyenne selon le service statistique du ministère chargé de l'énergie. Voir Théron G. et Mesqui B. (2022), « Les facteurs d'évolution des émissions de CO₂ liées à l'énergie en France de 1990 à 2020 », *Datalab Énergie*, CGDD, septembre.

67. Voir Jauneau Y. (2022), op. cit.

68. SGPE (s.d.), « La planification écologique dans les transports », réunion du Conseil national de la refondation du 31 mai 2023.

69. On le distingue de l'autopartage (*carsharing*), fondé sur un système de location auprès d'un gestionnaire de flottes de véhicules individuels. Nous avons exclu ici les études qui concernent les plateformes de VTC, de type Uber ou Lyft.

70. <https://www.blog.blablacar.fr/blablalife/lp/zeroemptyseats>

71. Citepa (2023), *Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques, bilan des émissions en France de 1990 à 2022*, rapport d'inventaire Secten.

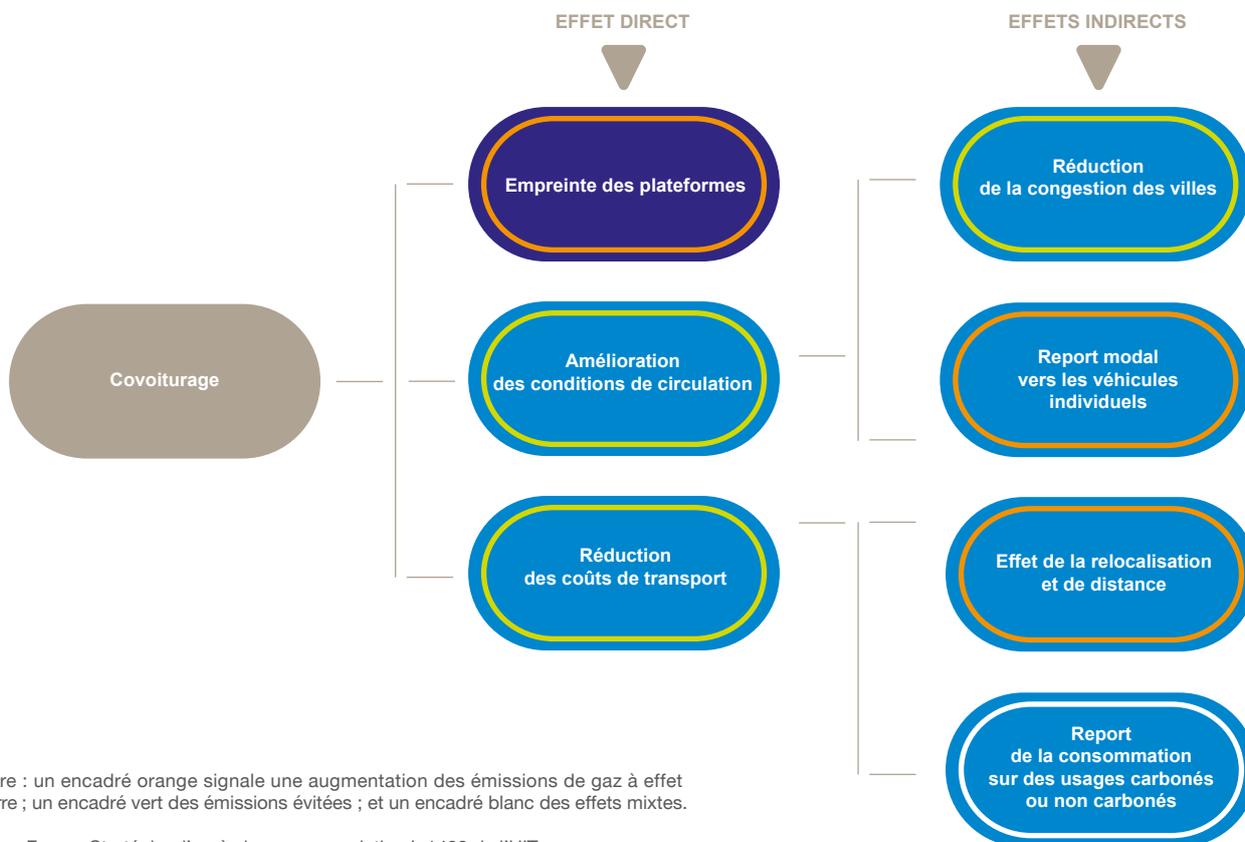
72. Sénecat A. et Vaudano M. (2024), « Derrière le succès de BlaBlacar », *Le Monde*, 6 avril.

73. <https://www.ecologie.gouv.fr/covoiturage>

74. SDES-Insee (2018), *Enquête sur la mobilité des personnes 2018-2019*, avril.

75. Gouvernement (2022), *France nation verte. Agir, mobiliser, accélérer*, décembre.

Schéma 4 – Contributions des plateformes de covoiturage à la décarbonation : effet direct et effets indirects



Lecture : un encadré orange signale une augmentation des émissions de gaz à effet de serre ; un encadré vert des émissions évitées ; et un encadré blanc des effets mixtes.

Source : France Stratégie, d'après la recommandation L.1480 de l'UIT

plan via l'alimentation d'un registre de preuve de covoiturage. En 2023, ce sont en moyenne 27 000 trajets par jour qui sont réalisés par le biais de plateformes, ce qui représente seulement 4 % des 900 000 trajets covoiturés quotidiens réalisés en France métropolitaine⁷⁶.

Les gains environnementaux du covoiturage ont été mis en évidence dans la littérature surtout en milieu urbain⁷⁷. Selon l'OCDE, les gains de la mobilité partagée seraient ainsi de l'ordre de 6 % des émissions dans les 247 villes étudiées⁷⁸.

En France, les estimations les plus récentes établies dans la littérature sur la base du registre de preuve de covoiturage font état d'un gain d'émissions de 5 000 tCO₂e en 2021⁷⁹. Cette estimation doit toutefois être considérée

comme une borne haute, ne prenant pas en compte le principal effet rebond du covoiturage, soit le report modal des usagers sur des véhicules particuliers au détriment des transports collectifs⁸⁰. Une enquête auprès d'un panel d'usagers a montré que 69 % des passagers se seraient déplacés en train s'ils n'avaient pas utilisé le covoiturage pour réaliser leur dernier déplacement⁸¹.

À plus long terme, une amélioration des conditions de circulation pourrait inciter les collectivités à limiter leur offre de transports collectifs. Elle pourrait aussi permettre aux habitants d'envisager de vivre plus loin des centres-villes et de leur travail, ce qui augmente les distances de déplacement (effet relocalisation). Une étude estime qu'au total, ces effets rebond du covoiturage pourraient réduire de 68 % à 77 % les gains de décarbonation attendus⁸² (voir Schéma 4).

76. Ministère de la Transition écologique (s.d.), « [Évaluation du plan covoiturage](#) », page Web (consultée le 20 mars 2023).

77. The Shift Project (2017), « [Décarboner la mobilité dans les zones de moyenne densité](#) », septembre.

78. Tikoudis I., Martinez L., Farrow K., Garcia Boussou C., Petrik O. et Oueslati W. (2021), « [Exploring the impact of shared mobility services on CO₂](#) », OECD Environment Working Papers, n° 175, OCDE, avril.

79. Rasoldier A., Combaz J., Girault A., Marquet K. et Quinton S. (2022), « [How realistic are claims about the benefits of using digital technologies for GHG emissions mitigation?](#) », dans *LIMITS '22: Workshop on Computing within Limits*.

80. Amatuni L., Ottelin J., Steubing B. et Mogollón J. M. (2020), « [Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Assessing the modal shift and lifetime shift rebound effects from a life cycle perspective](#) », *Journal of Cleaner Production*, vol. 266, avril.

81. Ademe et 6t-Bureau de recherche (2015), *Enquête auprès des utilisateurs du covoiturage...*, op. cit.

82. Coulombel N., Boutueil V., Liu L., Viguié V. et Yin B. (2019), « [Substantial rebound effects in urban ridesharing: Simulating travel decisions in Paris, France](#) », *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, vol. 71, juin, p. 110-126.

Des gains potentiels limités par les effets rebond

Le plan national pour le covoiturage⁸³ a fixé un objectif de 3 millions de trajets covoiturés quotidiennement en 2027, soit une augmentation de 2,1 millions par rapport à 2022. Cette cible comprend aussi bien le covoiturage réalisé via des plateformes que le covoiturage informel.

Sur la base des résultats de la littérature, on peut estimer les réductions d'émissions dans l'hypothèse d'atteinte de cet objectif. Nous avons retenu, dans les scénarios pessimiste et optimiste, des hypothèses de distances moyennes parcourues de respectivement 10 km et 24 km⁸⁴, et des effets rebond de 77 %, 50 % et 25 %⁸⁵. On considère qu'une voiture en circulation émet en moyenne 157 gCO₂/km⁸⁶.

On obtient des gains d'émissions annuels de 0,3 MtCO₂e dans le scénario pessimiste et de plus de 2 MtCO₂e dans le scénario optimiste (ou, pour le scénario médian, une réduction d'environ 3 TWh de consommation d'énergie⁸⁷). Ces gains restent assez faibles par rapport à la nécessaire réduction des émissions des transports : pour rappel, en 2018, le secteur routier à lui seul a produit 120 MtCO₂e d'émissions. En outre, même en supposant l'objectif gouvernemental atteint, il est très difficile d'estimer dans quelle

Tableau 5 – Estimation des réductions d'émissions annuelles dans l'hypothèse d'une hausse de 2,1 millions de trajets quotidiens covoiturés supplémentaires

	Hypothèse pessimiste	Hypothèse médiane	Hypothèse optimiste
Émissions évitées par l'augmentation du covoiturage en MtCO ₂	0,28	0,78	2,15
Réduction de la consommation d'énergie associée en TWh	1,17	3,125	9,04

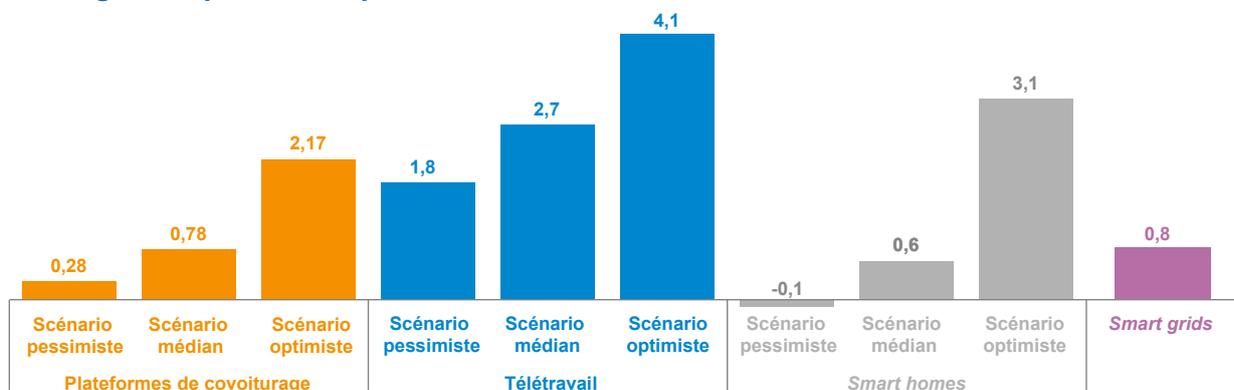
Lecture : les scénarios pessimiste et optimiste retiennent pour hypothèses des distances moyennes parcourues de 10 km et 24 km, et des effets rebond de 77 %, 50 % et 25 %. On considère qu'une voiture en circulation émet en moyenne 157 gCO₂/km.

Source : France Stratégie

mesure les plateformes numériques censées jouer un rôle essentiel dans ces nouvelles mobilités y contribueront, alors qu'elles sont encore marginales aujourd'hui dans les pratiques des co-voitureurs (4 % des trajets réalisés).

Avant de conclure, on rassemble dans le Graphique 2 les potentiels d'émissions qui pourraient être évitées chaque année grâce aux quatre solutions numériques que nous avons étudiées à la lumière de la littérature, en distinguant trois scénarios, pessimiste, médian et optimiste.

Graphique 2 – Potentiels d'émissions annuelles évitées par an en MtCO₂e par cas d'usage, avec prise en compte des effets rebond



Lecture : pour les trois usages autres que les smart grids, les scénarios distinguent des hypothèses qui font varier les gains d'efficacité de la solution d'une part et l'ampleur des effets rebond d'autre part, en tenant compte de l'empreinte de la solution. Ces résultats ont été estimés sur la base du mix énergétique français actuel et des hypothèses de déploiement suivantes :

- covoiturage : 2,1 millions de trajets covoiturés supplémentaires par jour (projection du plan national pour le covoiturage pour 2027 – Gouvernement (2022), France Nation verte) ;
- télétravail : 1 jour de télétravail par semaine pour 10 millions d'actifs en emploi ;
- smart home : équipement de 30 millions de logements d'un système intelligent de chauffage.

L'estimation des gains des smart grids est issue de RTE (2017), *Réseaux électriques intelligents*, septembre. Les chiffres sur le potentiel de gains d'émissions du télétravail sont issus des travaux de l'Ademe (2020), *Étude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail*, op. cit.

Source : France Stratégie

83. Gouvernement (2022), *France nation verte...*, op. cit.

84. Forum Vies mobiles et La Fabrique écologique (2023), *Y a-t-il un passager dans l'auto ? Que peut-on attendre du covoiturage du quotidien pour la transition écologique*, étude, septembre.

85. Coulombel N. et al. (2019), « Substantial rebound effects in urban ridesharing... », op. cit.

86. Ministère de la Transition écologique et des territoires, 2021. Voir Babet C. et Trevien C. (2023), « Quels freins à la baisse des émissions de gaz à effet de serre du parc automobile ? », *Datalab Essentiel – Transport*, CGDD, juillet.

87. Si l'on retient comme facteur d'émissions le ratio de 0,24 tCO₂/MWh pour le parc de voitures en moyenne selon le ministère de la Transition énergétique. Voir Théron G. et Mesqui B. (2022), « Les facteurs d'évolution des émissions de CO₂ liées à l'énergie en France... », op. cit.



CONCLUSION

À l'issue de notre analyse, il est difficile de déterminer un impact significatif des solutions numériques sur les trajectoires de décarbonation. La revue de la littérature a révélé des résultats contrastés, soulignant que l'efficacité de ces solutions dépend fortement des conditions de déploiement et que les effets indirects peuvent être importants. Dans certaines circonstances défavorables, certaines solutions numériques pourraient même augmenter les émissions.

L'examen de quatre cas d'usage à l'échelle de la France a mis en évidence des potentiels de décarbonation réels mais limités, au-delà des incertitudes de leur estimation, par rapport aux objectifs sectoriels (bâtiment, énergie, transports). Ainsi, la priorité doit rester à la limitation des impacts environnementaux négatifs du numérique. En outre, comme l'illustre le cas des *smart grids*, un service numérique se suffit rarement à lui seul, n'étant le plus souvent que la condition technique de changements de comportement dont la réalisation dépend aussi de facteurs économiques, sociaux, culturels, etc.

Alors que ces technologies se déploient dans les territoires, l'enjeu majeur pour les décideurs publics est d'identifier les solutions les plus adaptées à chaque contexte, en considérant des alternatives potentiellement moins gourmandes en ressources et en anticipant les effets rebond qui varient avec le cas d'usage et selon les conditions de déploiement.

Notre étude n'est évidemment pas exhaustive. Il est aujourd'hui difficile d'anticiper les effets de l'émergence de nouvelles technologies, telles que le développement de l'internet des objets⁸⁸, les véhicules autonomes⁸⁹ et plus généralement toutes les solutions fondées sur l'intelligence artificielle. Il convient en particulier de ne pas ignorer la puissance de calcul et les capacités de stockage de données requises par ces solutions, qui entraînent une consommation accrue de matériaux et d'énergie pouvant dans certains cas dépasser les gains d'efficacité des innovations⁹⁰.

De manière plus générale, l'absence d'une méthodologie standardisée d'évaluation rend difficile la comparabilité des résultats et leur généralisation. Cette situation souligne le besoin urgent d'améliorer les méthodes d'évaluation pour obtenir des estimations plus fiables et précises. En Europe et en France, des initiatives émergent pour répondre à ces défis. En France, après les travaux de la filière numérique et la publication en 2023 de sa proposition de feuille de route de décarbonation⁹¹, l'Ademe a lancé des travaux qui permettront une modélisation des gains de décarbonation des solutions numériques en privilégiant une approche par cas d'usage (méthode empreinte projet) et qui systématisera l'approche par arbre de conséquences.

À moyen terme, ces efforts devraient permettre de développer des outils efficaces pour évaluer l'impact complet des solutions numériques sur les émissions. Au-delà, la pertinence de déployer de telles solutions doit être appréciée en fonction de l'ensemble de leurs effets, environnementaux directs et indirects, sociaux et économiques, en tenant compte en particulier de la trajectoire décroissante de ces gains en raison de la décarbonation globale de l'économie.

88. France Stratégie (2022), *Le monde de l'Internet des objets : des dynamiques à maîtriser*, rapport sous la direction scientifique de Claude Kirchner, février.

89. Ni J. et de Tréglodé H. (2024), « Les robots taxis chinois sont-ils l'avenir de la mobilité ? », *La Note d'analyse*, n° 138, France Stratégie, mai.

90. Voir Freitag C. et al. (2020), « The climate impact of ICT... », *op. cit.* ; Ligozat A. L., Lefèvre J., Bugeau A. et Combaz J. (2022), « Comment évaluer les bénéfices nets des solutions d'IA pour l'environnement ? », *Interstices.info*, article du 24 novembre.

91. Gouvernement (2023), « France nation verte. Proposition de feuille de route de décarbonation de la filière numérique ».

RETROUVEZ LES DERNIÈRES ACTUALITÉS DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



www.strategie.gouv.fr



[@strategie_Gouv](https://twitter.com/strategie_Gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[francestrategie](https://www.facebook.com/francestrategie)



[@FranceStrategie_](https://www.instagram.com/FranceStrategie_)



[StrategieGouv](https://www.youtube.com/StrategieGouv)



Directeur de la publication/rédaction : Cédric Audenis, commissaire général par intérim ;
secrétariat de rédaction : Gladys Caré, Olivier de Broca, Valérie Senné ;
dépôt légal : juillet 2024 - N° ISSN 2556-6059 ;

contact presse : Matthias Le Fur,
directeur du service Édition-Communication-Événements,
01 42 75 61 37, matthias.lefur@strategie.gouv.fr

Institution autonome placée auprès du Premier ministre, France Stratégie contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Elle anime le débat public et éclaire les choix collectifs sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Elle produit également des évaluations de politiques publiques à la demande du gouvernement. Les résultats de ses travaux s'adressent aux pouvoirs publics, à la société civile et aux citoyens.