

petit traité d'écomobilité

Alexis Fraisse

PETIT TRAITÉ D'ÉCOMOBILITÉ

ÉDITIONS Charles Léopold Mayer

38 rue Saint-Sabin – 75011 Paris/France

www.eclm.fr

Maison d'édition de la **Fondation Charles Léopold Mayer pour le Progrès de l'Homme** (FPH), les Éditions Charles Léopold Mayer (ECLM) publient des ouvrages sur la transition écologique, économique et sociale. Elles accompagnent les acteurs de la transition afin qu'ils puissent développer, mettre en forme et diffuser leur plaidoyer par l'intermédiaire du livre. Association française à but non lucratif, les ECLM existent depuis 1995 et disposent de plus de 400 titres à leur catalogue. Elles publient aujourd'hui une dizaine de titres par an.

Les ECLM sont membres de la Coredem (communauté de sites ressources pour une démocratie mondiale : www.coredem.info) et de l'Alliance internationale des éditeurs indépendants (www.alliance-editeurs.org).

© Éditions Charles Léopold Mayer 2023

Essai n°253

ISBN: 978-2-84377-236-8

Mise en pages : La petite Manufacture – Delphine Mary

Conception graphique : Nicolas Pruvost

L'auteur

Titulaire d'une maîtrise en génie des systèmes industriels, spécialisé en mécanique, **Alexis Fraisse** a été ingénieur durant quinze ans dans le domaine de la défense. Il s'est ensuite engagé pendant plusieurs années dans la vie politique locale en tant que conseiller municipal investi dans les questions environnementales.

Actuellement président d'une association d'utilisateurs de vélo, il invente et expérimente des façons de vivre et de se déplacer compatibles avec les défis vitaux de notre siècle.

Organisations associées à la diffusion et à la promotion

À travers son réseau de plus de 460 associations locales réparties sur tout le territoire, la **FUB**, Fédération française des Utilisateurs de la Bicyclette, agit pour apporter des réponses concrètes aux préoccupations des cyclistes et pour promouvoir l'usage du vélo comme mode de déplacement du quotidien.

La FUB œuvre ainsi pour une meilleure prise en compte des utilisateurs cyclistes dans les politiques de transports, la réglementation, les aménagements et l'éducation.

www.fub.fr

L'**AF3V** agit pour la réalisation d'un réseau ambitieux de véloroutes et de voies vertes au bénéfice de la transition écologique, de l'inclusion sociale et de la santé. L'aménagement de véloroutes et de voies vertes encourage la réduction des déplacements émissifs en gaz à effet de

serre (GES) au profit de l'écomobilité, contribue au développement d'un tourisme respectueux de l'environnement et favorise l'émergence d'un territoire solidaire et accessible par tous.

www.af3v.org

Découvrez la filmographie sur l'écomobilité réalisée par Autour du 1^{er} mai en consultant la fiche du livre sur le site de la maison d'édition : www.eclm.fr

Autour du 1^{er} mai est une association loi 1901 qui se veut un outil de lien social par l'intermédiaire du cinéma. Parmi ses activités d'accompagnement des structures de la transition qui œuvrent vers une société plus juste et plus durable, l'association anime la base Cinéma & Société, un catalogue raisonné de films sur les questions de société qui met à disposition de celles et ceux qui souhaitent organiser des projections toutes les informations nécessaires à l'élaboration de leurs programmations.

<http://autourdu1ermai.fr>

À mon ami Arnaud, disparu bien trop tôt.

INTRODUCTION

Mettre le contact, quoi de plus banal? Dans les pays industrialisés, nous assouvissons notre hypermobilité grâce à divers véhicules motorisés – en premier lieu les automobiles –, qui sont aussi le bras armé de notre surconsommation. Nous sommes tellement accoutumés-es à cette agitation que nous agissons souvent en toute innocence. Pourtant, loin d'être anodin, ce comportement nous mène droit au carambolage: destruction de la biodiversité, réchauffement climatique, épuisement des ressources, dégradation de la santé... Il est urgent de prendre un autre chemin!

Ce livre a pour ambition d'aiguiser notre conscience collective et de nous orienter vers des façons de nous déplacer respectueuses de notre planète et à même de nous assurer un avenir viable. Il s'adresse en particulier à celles et ceux qui ont envie de comprendre et d'adapter leurs modes de transport. Vous n'y trouverez pas de voie toute tracée, mais vous connaîtrez la direction à prendre et les raisons qui la justifient, tout en sachant éviter les pièges. Cet indispensable nouveau cap vous semblera peut-être lointain et hors d'atteinte. Pourtant, il est réellement à notre portée, alors que les graves conséquences de notre attentisme s'invitent déjà dans nos vies. Ce voyage s'annonce donc inévitable.

L'itinéraire proposé commence par un état des lieux des crises causées par nos très critiquables habitudes

de déplacement. Nous poursuivrons avec quelques notions de science physique indispensables pour composer en douceur avec les forces qui pèsent sur nos trajets. Nous survolerons ensuite la mécanique et la chimie des moteurs pour savoir comment les choisir et les utiliser à bon escient. Enfin, après avoir écarté les fausses solutions, qui pour certaines ont déjà pignon sur rue, nous découvrirons les meilleures façons de nous mouvoir dans un monde qui doit impérativement rester habitable.

I. VOYANTS ROUGES PLANÉTAIRES

La Terre est un vaisseau spatial en orbite autour du Soleil. Un coup d'œil attentif sur le tableau de bord terrestre nous fait prendre conscience que la santé de notre sphère verte et bleue n'est pas au beau fixe, et que nous n'y sommes pas pour rien. Parmi les crises que traversent la planète et ses habitants, il est difficile de dire laquelle est la plus grave. Mais elles sont toutes plus ou moins liées et ont souvent des causes communes, parmi lesquelles nos déplacements, qui portent une large part de responsabilité.

BIODIVERSITÉ : PRÉVENIR LE CRASH

Notre corps céleste n'est pas le seul à graviter autour d'une étoile. Pourtant, dans l'état actuel de nos observations, nous ne connaissons pas d'autres endroits qui abritent ce que nous appelons la vie. Nous faisons partie de ce tissu incroyablement complexe d'êtres très variés qui interagissent les uns avec les autres et qui évoluent dans les divers milieux du globe. Dans ce vaste écosystème, les innombrables espèces sont interdépendantes. La nôtre n'échappe pas à la règle : l'humanité ne peut pas vivre sans le reste du monde vivant, à qui nous devons tout ce qui est essentiel à notre existence, notamment notre nourriture et notre oxygène !

Les êtres vivants et les communautés qu'ils forment sont l'héritage d'une longue évolution caractérisée par d'incessants échanges, assemblages et métissages, parfois ponctuée d'accidents de parcours. Plus grande est la diversité parmi les espèces, plus la vie a des solutions de survie et d'adaptation face aux bouleversements. En revanche, si la richesse du vivant est altérée et que la pression sur les milieux naturels est trop forte, l'ensemble de la vie sur Terre peut être remis en question au cours d'une « extinction massive ». Notre planète en a connu au moins cinq majeures durant son histoire. La dernière remonte à 65 millions d'années et correspond à la fin du règne des dinosaures. Elle a très probablement été précipitée par l'impact d'une énorme météorite. Aujourd'hui, le rythme d'érosion du vivant est tel que nous sommes à l'aube d'une sixième extinction¹! Et cette fois, le cataclysme ne vient pas de l'espace, mais de notre propre civilisation thermo-industrielle... La bonne nouvelle, c'est que le monde vivant semble doté d'une grande résilience : après chaque coup dur, la vie finit par repartir sur de nouveaux chemins, parfois très différents des précédents. En revanche, les disparitions d'espèces sont synonymes de grandes souffrances et nous pourrions, si nous ne changeons rien, faire partie de la liste des condamnés...

Mais en quoi nos déplacements mettent-ils la vie sur Terre en danger ? Pour commencer, nos bolides sont

1. Bruno David, *À l'aube de la 6^e extinction. Comment habiter la Terre*, Grasset, 2021.

responsables de nombreux accidents collatéraux et de multiples pollutions qui touchent sans distinction les espèces qui se trouvent sur leur passage ou dans leur sillage. Mais pour mettre le doigt sur la plus grosse hécatombe, il faut regarder ce qui se trouve juste sous nos pneus. Chaque voiture a une empreinte au sol d'une dizaine de mètres carrés, qui augmente avec la vitesse et qui se duplique dans tous les lieux où elle se rend. Des surfaces planes et stériles sont nécessaires partout où elle roule et partout où elle stationne! La facilité avec laquelle nous nous déplaçons nous a permis de nous étaler un peu partout, avec, en contrepartie, de grandes distances à parcourir et de multiples destinations à atteindre pour satisfaire nos besoins ou nos envies. On rase donc des forêts, des prairies et des cultures pour couvrir le sol de goudron ou de béton. On coupe des territoires en morceaux avec des barrières parfois infranchissables pour de nombreux animaux (y compris les cyclistes et les marcheurs). L'agriculture industrielle appauvrit elle aussi d'immenses surfaces de terre vivante, et ce phénomène est aggravé par l'utilisation de végétaux pour nourrir nos gros moteurs (biocarburants). L'artificialisation des sols, qui détruit et morcelle les habitats naturels, est la principale cause du déclin alarmant des populations d'êtres vivants et le préambule à d'irréversibles extinctions d'espèces². Nous sommes tout bonnement en train d'écraser notre écosystème sous nos roues!

2. Ministère de la Transition écologique, « En quoi la biodiversité est-elle menacée? », 2022. <https://biodiversite.gouv.fr/en-quoi-la-biodiversite-est-elle-menacee>

Nos incessants va-et-vient autour du globe ont une autre conséquence : volontairement ou non, ils transportent nombre d'espèces loin de leurs lieux de vie habituels. Certaines n'y survivent pas. Mais d'autres s'adaptent à leur nouveau milieu au point de devenir envahissantes et de menacer la pérennité des espèces locales. La renouée du Japon et l'écrevisse de Louisiane sont des exemples bien connus dans nos régions. Dans les écosystèmes riches et en bonne santé, après beaucoup de temps et de dégâts, des mécanismes de régulation finissent par se mettre en place, ce qui limite l'ampleur de l'invasion. Des micro-organismes pathogènes (bactéries et virus) font d'ailleurs souvent partie de ces garde-fous, car ils ciblent volontiers les lignées qui se répandent un peu trop. À ce titre, nous devrions nous demander quel est le statut de notre propre espèce dans ce grand chamboule-tout biologique : perturbatrice, régulatrice ou elle-même invasive ? Peut-être les trois... Quoi qu'il en soit, la vie ne nous a pas attendus pour se diffuser. Depuis bien longtemps, elle profite des migrations, des vents, des courants, des variations du climat et de la dérive des continents. Ces mouvements font d'ailleurs partie des moteurs de l'évolution. Cependant, la récente accélération inédite et forcée de cette « mondialisation » du vivant ne laisse pas le temps à l'adaptation : les quelques lignages qui prolifèrent le font au détriment de nombreux autres qui disparaissent. Ajoutons à cela les étroites sélections animales et végétales, avec très peu de variété génétique, que nous installons sans partage sur de vastes surfaces du globe pour notre alimentation et celle de certains moteurs. À titre de comparaison, bien qu'elles représentent

une très faible biodiversité, nos quelques espèces d'animaux d'élevage pèsent plus de dix fois plus lourd en masse de matière vivante que l'ensemble des mammifères et oiseaux sauvages³! Et notre unique espèce humaine pèse au moins six fois plus lourd que tous ces animaux sauvages.

Tout indique que nous allons vers plus de pauvreté et d'uniformité au sein de notre biotope terrien, ce qui le rend plus fragile face aux périls à venir. Dans le propre intérêt de l'espèce humaine, qui se dit intelligente, nous devons rapidement, c'est-à-dire de notre vivant, prendre la voie de la préservation de la biodiversité! D'autant plus que nous avons besoin de toutes les forces vives de la planète pour combattre un autre phénomène extrêmement inquiétant...

SURCHAUFFE GLOBALE

L'atmosphère terrestre laisse passer le rayonnement solaire, qui chauffe la surface de la Terre. Une partie de la chaleur est ensuite réémise vers le ciel sous forme de rayonnement infrarouge. Au lieu de laisser partir ce rayonnement dans l'espace, les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère le retiennent partiellement, un peu comme le ferait un pare-brise géant. Ce phénomène naturel permet à notre planète d'avoir une température relativement clémente à sa surface.

3. Yinon M. Bar-On, Rob Phillips et Ron Milo, "The biomass distribution on Earth", *PNAS*, vol. 115, n° 25, mai 2018. <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1711842115>

Mais notre récente civilisation industrielle émet en continu des quantités gigantesques de gaz à effet de serre, conduisant à une montée de fièvre globale bien trop rapide pour que la vie puisse s'y adapter sereinement ! C'est ce que l'on nomme le « réchauffement climatique⁴ », ou « dérèglement climatique », un problème planétaire aux conséquences déjà désastreuses pour l'ensemble de la biosphère, humains compris. Baisse des récoltes, famines, disparitions d'espèces, zones inhabitables, déplacements de populations, épidémies, inondations, sécheresses, canicules, méga-incendies, violentes intempéries, températures inhabituelles sont le triste lot du **xxi^e** siècle. La hausse du niveau des mers se poursuivra durant les prochains siècles jusqu'à atteindre plusieurs mètres, alimentée par la lente dilatation des gigantesques masses océaniques et par l'inexorable fonte des glaces terrestres. Pour limiter les dégâts, il est urgent de stopper dès maintenant les causes de ce dérèglement !

Les plus gros émetteurs de gaz à effet de serre sont les pays industrialisés. En France, le secteur du transport représente plus d'un tiers du bilan carbone du pays (dans le monde, il pèse pour un quart des émissions). Et la moitié des émissions du transport est due aux véhicules

4. Olivier Voizeux et Stéphane Jungers, « Tout comprendre au réchauffement climatique », *Reporterre*, 7 mai 2022. <https://reporterre.net/Tout-comprendre-au-rechauffement-climatique>

individuels⁵ (un tiers dans le monde⁶)! Si l'on prend en compte toutes les activités industrielles pour fabriquer nos véhicules et les travaux nécessaires à leurs voies de circulation, le tableau climatique du transport se noircit encore d'une poignée de pourcents⁷.

Les deux gaz à effet de serre émis en grande quantité par nos moteurs sont le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O), principaux produits de la combustion d'hydrocarbures. Ils sont tous les deux naturellement présents dans notre atmosphère et ne sont pas toxiques du point de vue de la santé⁸. Ils sont incolores et inodores, ce qui explique peut-être en partie notre difficile prise de conscience des volumes importants que nous larguons dans l'air. La vapeur d'eau que nous produisons ne pose pas

5. Aurore Colin, Clara Calipel, Manuel Baude, Jérôme Duvernoy et Alexis Foussard, *Datalab – Chiffres clés du climat – France, Europe et Monde*, ministère de la Transition écologique / I4CE, édition 2022. <https://www.i4ce.org/publication/datalab-chiffres-cles-climat-2022-france-europe-monde-climat/>

6. Leonardo Paoli, "Cars and Vans. More efforts needed", IEA, septembre 2022. <https://www.iea.org/reports/cars-and-vans>

7. Selon une étude réalisée pour le compte de l'Ademe (*Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020*, https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/3285/_90511__acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf), en ce qui concerne le cycle de vie d'une voiture classique, environ un quart de son bilan carbone global est dû à sa fabrication. Et environ 6% de son impact global est dû à l'infrastructure. <https://www.upenergie.com/info-energie-energie-grise/>

8. Le CO₂ ne commence à devenir toxique pour l'humain qu'à partir de 7% en volume dans l'air. Or, actuellement, sa concentration est de 420 ppm, soit 167 fois moins. Nous avons encore un peu de marge de ce côté-là.

vraiment de problème puisqu'elle ne représente qu'une goutte dans le grand cycle de l'eau, qui la mêle rapidement aux nuages, puis aux précipitations. En revanche, le CO₂ que nous rejetons massivement déséquilibre le cycle du carbone : les plantes, les algues, le plancton et d'autres organismes marins ne l'absorbent pas aussi vite que nous le produisons. Sa concentration augmente donc dans l'atmosphère et contribue fortement au réchauffement climatique. Atteignant aujourd'hui 420 parties par million (ppm), elle est 50 % plus élevée que pendant l'ère préindustrielle⁹. Elle augmente aussi dans les océans, ce qui les rend plus acides, mettant en péril une part de la vie marine fixatrice de carbone (coraux et organismes à coquille). Comment sortir de ce cercle vicieux ?

Il serait illusoire d'espérer faire face au problème en rafraîchissant nos habitacles ; la climatisation des véhicules participe aussi, dans une moindre mesure, au réchauffement climatique. D'une part, elle augmente la consommation du moteur, et donc ses émissions de CO₂. D'autre part, les fuites de fluide frigorigène, même si elles sont faibles, relâchent des hydrofluorocarbures (HFC), qui ont un pouvoir de réchauffement global extrêmement élevé. Des alternatives bien moins calorigènes, comme les hydrofluoroléfinés (HFO), le CO₂ (qui ne pose pas de

9. GEO avec AFP, « Niveau de CO₂ dans l'air : une hausse de 50 % par rapport à l'ère pré-industrielle, alertent des chercheurs », GEO, juin 2022. <https://www.geo.fr/environnement/niveau-de-co2-dans-lair-une-hausse-de-50-par-rapport-a-lere-pre-industrielle-alertent-des-chercheurs-210251>

problème lorsqu'il est confiné en faible quantité dans un circuit frigorifique) et même l'eau, commencent doucement à émerger. Cela peut sembler louable, mais, malgré tout, la climatisation alourdit toujours la facture énergétique déjà colossale de nos véhicules, ce qui continue à se traduire par des émissions massives de CO_2 . Notons enfin que ces égoïstes machines à rafraîchir produisent en réalité surtout de la chaleur, laquelle est recrachée vers les autres usagers de la rue.

Un autre gaz à effet de serre joue un rôle important : le méthane (CH_4). À quantité égale, il est vingt-huit fois plus réchauffant que le CO_2 . Majoritairement émis par l'agriculture, il est, pour le moment, peu présent dans les transports. Il est néanmoins emprisonné en grande quantité dans le sol et les fonds sous-marins, au sein de poches de gaz naturel et sous forme d'hydrates de méthane. Afin d'éviter les fuites délétères et la tentation de brûler le gaz dans nos moteurs en émettant du CO_2 , le plus raisonnable est de ne plus forer le sol à la recherche de gisements. Il serait par ailleurs encore plus sage que le transport diminue drastiquement sa contribution au réchauffement climatique, car les hydrates de méthane libèrent progressivement leur puissant gaz à effet de serre à mesure que la température augmente. De même, dans les régions très froides, la lente fonte du pergélisol (sol gelé en permanence) rend possible la transformation des matières organiques qu'il contient... en dioxyde de carbone et en méthane ! Comme si nos pots d'échappement ne suffisaient pas. Et ce n'est pas fini ! En contribuant à la déforestation et à la destruction des écosystèmes, nos chers véhicules nous privent de précieuses

pompes à carbone naturelles. Bref, vous l'aurez compris, en plus des effets directs de leurs émissions, nos transports participent à de nombreux phénomènes qui ne font que dégrader la situation.

Le péril climatique est grave et connu depuis plus de quarante ans. Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a été créé en 1988. Composé de milliers d'experts dans le monde entier, il évalue sans relâche l'état des connaissances scientifiques sur l'évolution du climat, sur ses causes et sur ses impacts. Ses conclusions recommandent de tout faire pour rester sous la barre d'une augmentation moyenne globale de 1,5°C par rapport à la température de l'époque préindustrielle (1850-1900). Il faut savoir qu'aujourd'hui nous sommes déjà à + 1,1°C. Depuis un quart de siècle, les conférences annuelles sur le climat s'enchaînent. À la suite de celle de Paris en 2015, les Nations unies continuent de réaffirmer la nécessité de ne pas dépasser 1,5°C, sans grande conviction puisque les objectifs fixés pour y arriver sont en réalité bien insuffisants. Qui plus est, aucun moyen sérieux et contraignant n'a encore été mis en place pour tenir ces engagements pourtant trop modestes.

En ce début de siècle, seules la crise financière de 2008-2009 et la crise sanitaire de 2020-2021 ont fait légèrement baisser, involontairement, les émissions humaines

mondiales liées au transport¹⁰. La crise énergétique actuelle aura-t-elle des contrecoups similaires, toujours sans aucune volonté préalablement réfléchie de réduire nos besoins énergétiques ? Ce n'est même pas sûr. En effet, avec un total de 40,6 gigatonnes de CO₂, l'année 2022 atteint des niveaux record¹¹ ! Nous n'avons donc toujours pas pris de virage et nous restons les témoins complices soit d'une augmentation moyenne, soit d'une stagnation. Le CO₂ continue donc de s'accumuler dans l'atmosphère et les sept dernières années ont été les plus chaudes jamais enregistrées depuis les années 1850-1900¹² ! Or, pour espérer rester sous la barre des 1,5 °C, notre « budget carbone » mondial, tous domaines confondus, n'est plus que d'environ 380 gigatonnes de CO₂¹³ (nous en avons déjà émis 2 500 gigatonnes dans l'atmosphère depuis 1850). En maintenant nos volumes actuels d'émissions, nous aurons déjà rejeté le quota fatidique de dioxyde de carbone dans

10. Jacob Teter, "CO₂ emissions from transport rebounded in 2021, returning to their historical growth trend", IEA, septembre 2022. <https://www.iea.org/reports/transport>

11. Audrey Garric, « Les émissions mondiales de CO₂ restent à des niveaux record cette année », *Le Monde*, 11 novembre 2022. https://www.lemonde.fr/climat/article/2022/11/11/les-emissions-mondiales-de-co2-restent-a-des-niveaux-record-cette-annee_6149409_1652612.html

12. Météo-France, « Les 7 dernières années sont les plus chaudes à l'échelle du globe », janvier 2022. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/planete/2021-5e-annee-la-plus-chaude-lechelle-du-globe-selon-copernicus>

13. Pierre Friedlingstein *et al.*, "Global Carbon Budget 2022", *ESSD*, vol. 14, n° 11, novembre 2022. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>

moins de neuf ans ! Si nous n'amorçons pas immédiatement une diminution rapide et continue pour atteindre la neutralité carbone en 2050, nous nous dirigeons vers une augmentation catastrophique de 3°C à la fin du siècle¹⁴ ! Et ce n'est qu'une moyenne pour l'ensemble du globe. En fonction du lieu et des saisons, l'augmentation pourrait être bien plus intense, avec par exemple, en France, vers 2100, des étés plus chauds de 5°C par rapport au début du xx^e siècle¹⁵ !

Nous n'avons donc plus une année à perdre : si nous ne voulons pas transformer notre planète en autociseur, c'est dès maintenant qu'il faut éteindre le feu ! Et pour cela, la grande majorité des gisements connus d'hydrocarbures fossiles doit impérativement rester sous terre¹⁶ ! Si nous arrivons à ralentir à temps, certes, nous allons quand même devoir affronter la vague climatique que nous avons déjà engendrée, mais au moins nous ne l'aurons pas transformée en tsunami.

14. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*, octobre 2021. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

15. Audrey Garric, « En France, le réchauffement climatique s'annonce pire que prévu, selon de nouvelles projections », *Le Monde*, 20 octobre 2022. https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/10/20/en-france-le-rechauffement-climatique-s-annonce-pire-que-prevu-selon-de-nouvelles-projections_6146566_3244.html

16. Audrey Garric, « Pour limiter le réchauffement à 1,5°C, il faudrait laisser 60% du pétrole et du gaz dans le sol, et 90% du charbon », *Le Monde*, 8 septembre 2021. https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/09/08/pour-limiter-le-rechauffement-a-1-5-c-il-faudrait-laisser-60-du-petrole-et-du-gaz-dans-le-sol-et-90-du-charbon_6093946_3244.html

VERS LA PANNE SÈCHE ?

Pour nous déplacer comme nous le faisons, il faut des matières premières en grande quantité. Les voitures actuelles pèsent quasiment toutes plus d'une tonne, soit cent fois le poids d'un vélo ! Une grande part de cette masse est composée d'acier (beaucoup de fer et un peu de carbone). Même si le fer est abondant à la surface de notre planète, son extraction et sa transformation sont gourmandes en énergie et en surfaces de terres vivantes. C'est encore pire pour l'aluminium, qui est de plus en plus utilisé pour les moteurs et les châssis. Présents en plus faible quantité, les autres métaux qui composent les véhicules n'en sont pas moins problématiques. Les métaux rares contenus dans l'électronique embarquée et les catalyseurs nécessitent une extraction difficile et polluante. La voiture électrique, avec ses centaines de kilogrammes de batteries, a un impact environnemental à la fabrication plus élevé que celui d'une voiture « conventionnelle ». Et dans tous les véhicules, on trouve aussi beaucoup de plastique, dérivé du pétrole. Si on s'intéresse au bilan carbone, avant même d'avoir commencé à rouler, une voiture thermique de 1,2 tonne pèse déjà près de 8 tonnes de CO₂, et une voiture électrique de 1,5 tonne en pèse 15¹⁷ !

N'oublions pas les matériaux et l'énergie nécessaires à la construction de nos voies de circulation. Déplacer de la

17. Chiffres calculés à partir de plusieurs modèles de voitures thermiques et électriques dont Green NCAP a réalisé l'analyse du cycle de vie. <https://www.greenncap.com/european-lca-results/>

terre et casser du rocher mobilise de lourds engins de chantier tournant au fioul. Le bitume contenu dans l'enrobé des routes est un sous-produit du pétrole. L'autre composant, le gravier, semble poser moins de problèmes. Il est pourtant, qui l'eût cru, en voie de raréfaction, comme le sable¹⁸ ! Ces granulats entrent aussi dans la composition du béton, nécessaire à nos infrastructures routières, ferroviaires, portuaires et aéroportuaires. Et le béton contient aussi du ciment, dont la production, à partir de calcaire chauffé à haute température, consomme beaucoup d'énergie et émet énormément de CO₂. Dans toutes ces constructions, on utilise également de grandes quantités d'acier, dont nous avons déjà parlé.

Toutefois, c'est après leur fabrication, dans la phase d'utilisation, que les véhicules saignent le plus la Terre. Une voiture moyenne qui finit sa course à 240 000 kilomètres brûle environ 14 000 litres de carburant, qu'elle transforme en plus de 38 tonnes CO₂, soit un volume de 20 000 mètres cubes (de quoi remplir une soixantaine de maisons)¹⁹ ! Les grosses quantités d'énergie requises par la propulsion de nos moyens de déplacement sont issues à une écrasante

18. Pascal Hérard, « Pénurie de sable : un enjeu planétaire environnemental et économique », TV5Monde Info, 12 août 2017. <https://information.tv5monde.com/info/penurie-de-sable-un-enjeu-planetaire-environnemental-et-economique-185813>

19. Pour une voiture qui consomme en moyenne 6 l de gazole aux 100 km et qui parcourt 240 000 km. Avec 2,67 kg de CO₂ par litre de gazole consommé, cela représente 38,4 t de CO₂, soit 20 500 m³ (avec une masse volumique du CO₂ de 1,87 kg/m³), de quoi remplir 59 maisons de 140 m² avec 2,5 m sous plafond.

majorité du pétrole²⁰. Charbon, énergies renouvelables et uranium (particulièrement en France) assurent la motricité électrique d'une infime portion du parc d'engins mobiles.

En plus de graves dégâts environnementaux, cette consommation effrénée de ressources pour produire et faire avancer nos véhicules tend à rendre celles-ci rares et difficiles à extraire. On emploie donc des méthodes de plus en plus polluantes pour ponctionner la Terre. Cette course vers la pénurie s'accompagne en outre de désastres humains, d'esclavage moderne et de crises géopolitiques. Les pays les plus dépendants des richesses du sous-sol de l'étranger pourraient être tentés par des options militaires en vue de garantir leurs approvisionnements. Pour assouvir leur addiction, ils pourraient aussi fermer les yeux sur les pires exactions de leurs fournisseurs.

Au rythme actuel de consommation, ces ressources minérales, métalliques et énergétiques auront une fin plus ou moins proche qui, pour les plus contraintes, pourrait se compter en petites dizaines d'années. Le gâteau terrestre a une taille limitée et nous en avons déjà dévoré une bonne part. Nous devons maintenant le déguster avec une extrême parcimonie afin qu'il en reste pour les générations futures. Toutefois, l'épuisement des ressources ne pourrait-il pas être salutaire pour mettre un terme aux dégâts de leur utilisation outrancière ? Hélas non, car nos réserves

20. Jacob Teter, "Transport continues to rely on oil products for 91% of its final energy, down only 3 percentage points from the early 1970s", IEA, septembre 2022. <https://www.iea.org/reports/transport>

restreintes sont encore paradoxalement bien trop abondantes ! En effet, à la cadence d'aujourd'hui, nous aurons causé des dommages colossaux et irréversibles bien avant que la pénurie ne nous freine. Pour prendre le cas notable du pétrole, ce n'est pas sa fin à venir qui nous met en grave péril, mais l'usage démesuré que nous continuons à en faire. Alors, au lieu de réfléchir à la sécurité de nos approvisionnements, pensons à notre propre survie en nous désintoxiquant des substances qui ruinent non seulement notre planète, mais aussi ses habitants.

DÉTRESSE SANITAIRE ET SOCIALE

Outre les conséquences sur notre écosystème planétaire, nos déplacements affectent directement nos vies humaines, à commencer par notre santé ! Forcée par des millions d'années d'évolution dans des environnements naturels variés, notre espèce a développé une formidable capacité à se déplacer sur ses jambes. À tel point que le bon fonctionnement de notre corps est compromis s'il ne les utilise pas régulièrement. Selon l'Organisation mondiale de la santé, la sédentarité renforce toutes les causes de mortalité, double les risques de maladies cardiovasculaires, de diabète, d'obésité, et augmente les risques de cancer du côlon, d'hypertension artérielle, d'ostéoporose, de troubles lipidiques, de dépression et d'anxiété²¹.

21. OMS, « Lignes directrices de l'OMS sur l'activité physique et la sédentarité », 25 novembre 2020. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/337003/9789240014862-fre.pdf>

Notre récente habitude de nous déplacer avec des véhicules qui font le travail à notre place est donc très néfaste pour notre organisme !

Et pour ne rien arranger, les véhicules motorisés émettent (directement ou indirectement) toute une panoplie de substances délétères. Ces résidus de combustion et d'usure sont composés de gaz : monoxyde de carbone (CO), oxydes d'azote (NO_x), ozone (O₃), oxydes de soufre, composés organiques volatils..., mais aussi de particules plus ou moins fines (PM10, PM2,5), mises en suspension dans l'air par les moteurs, ainsi que par l'abrasion des pneumatiques, des freins et des chaussées (phénomène accentué par le poids et la vitesse des véhicules). Ces polluants atmosphériques sont à l'origine de nombreuses maladies cardiovasculaires et respiratoires, ainsi que de cancers. Dans le monde, ils tuent 7 millions de personnes chaque année²² ! En France, responsables d'au moins 50 000 décès prématurés par an²³, ils sont à peu près aussi meurtriers

22. OMS, « Les nouvelles lignes directrices mondiales de l'OMS sur la qualité de l'air visent à éviter des millions de décès dus à la pollution atmosphérique », 22 septembre 2021. <https://www.who.int/fr/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>

23. Marc Cherké, « La pollution de l'air provoquerait près de 100 000 morts prématurées par an en France », *Le Figaro*, 9 février 2021. <https://www.lefigaro.fr/sciences/la-pollution-de-l-air-provoquerait-pres-de-100-000-morts-prematurees-par-an-en-france-20210209>

que la Covid-19²⁴, et au bas mot quinze fois plus létaux que les accidents de la route²⁵!

Les morts et les mutilations causées par les accidents de la circulation ne doivent pas moins nous interroger. La motorisation permet de déplacer de lourdes masses à des vitesses élevées, ce qui aggrave la violence des chocs. Sans en être forcément conscient, chaque conducteur a entre les mains une arme potentiellement mortelle pour lui-même et pour les autres. Ce danger omniprésent fait peser un sentiment d'insécurité qui a transformé la chaussée en une zone hostile, désertée par les usagers des modes de déplacement naturels comme la marche et le vélo. Les rues ne sont plus les terrains de jeux, d'activité et de rencontre qu'elles étaient avant la fracassante invasion automobile.

Même s'il n'est pas mortel, le bruit est une autre violence infligée aux riverains des axes de transport motorisé. Causant du stress et perturbant le sommeil, il dégrade fortement la qualité de vie, et donc la santé.

Sur le plan social, les véhicules motorisés individuels cloisonnent leurs occupants dans un habitacle ou dans

24. Le 16 mars 2023, Santé publique France annonce 165 288 décès en France liés à la Covid-19 depuis le début de l'épidémie (environ trois ans se sont écoulés depuis début mars 2020), soit une moyenne annuelle d'environ 55 000 décès. <https://www.santepubliquefrance.fr/dossiers/coronavirus-covid-19/coronavirus-chiffres-cles-et-evolution-de-la-covid-19-en-france-et-dans-le-monde>

25. Ministère de l'Intérieur, « Chiffres provisoires de l'accidentalité routière en 2021 : le nombre de morts en France métropolitaine à nouveau sous la barre des 3 000 », 1^{er} juin 2022. <https://www.interieur.gouv.fr/actualites/communiqués/chiffres-definitifs-de-laccidentalite-routiere-en-2021-nombre-de-morts-en>

une bulle visuelle et sonore qui les coupe du contact avec les autres. C'est un facteur aggravant de l'isolement que subissent les individus dans nos sociétés modernes et qui conduit souvent à de la souffrance psychologique. Au-delà des relations avec nos congénères, les déplacements rapides à l'intérieur de boîtes nous éloignent aussi de notre environnement et de toutes les petites merveilles qui bordent les chemins. Les véhicules ont beau être confortables et insonorisés, ils sont souvent coincés dans des bouchons et occupés par des chauffeurs assujettis à des horaires difficiles à tenir. Le stress qui s'installe chez les automobilistes se transforme parfois en accès d'agressivité totalement disproportionnés ! Il est beaucoup plus rare de voir des piétons s'insulter et en venir aux mains...

L'usage abusif des véhicules motorisés a aussi créé de l'isolement géographique. Il a facilité l'éloignement entre habitations, emplois, services, commerces, loisirs, laissant sur le carreau ceux qui ne sont pas véhiculés. Choisie ou subie, la possession d'engins motorisés est par ailleurs un facteur d'endettement des ménages à revenus modestes. Le coût d'achat, d'entretien et de fonctionnement constitue une charge difficile à supporter. Il existe des alternatives (marche, vélo, transports en commun et, dans le pire des cas, autopartage et covoiturage), mais la pression sociale ou professionnelle a longtemps été et reste encore une incitation à posséder son propre véhicule motorisé comme un signe de réussite.

Le développement inconsidéré des transports a encouragé un autre phénomène global : l'hyperspécialisation géographique de la production industrielle et

agricole. Cette mondialisation à outrance a conduit certaines régions de notre planète à ne plus être capables de produire elles-mêmes certaines marchandises de base. Les approvisionnements sont donc devenus totalement dépendants d'un réseau d'acheminement mondial titanesque, mais pourtant très fragile. Les cendres d'un volcan, la contagion d'un virus, la volonté d'un État, une guerre armée ou économique peuvent gripper cette énorme machine et entraîner de graves pénuries. Celles-ci peuvent devenir dramatiques lorsqu'il s'agit de denrées alimentaires vitales ou de produits de première nécessité!

Nous venons de passer en revue de nombreux signaux d'alarme. Ils sont allumés depuis des dizaines d'années et se font de plus en plus insistants! Pourquoi persistons-nous à ne pas les voir?

REMETTRE EN QUESTION NOS HABITUDES ET NOS MODES DE VIE

Devant la gravité des conséquences de notre mobilité pathologique, posons-nous des questions! Pourquoi nous déplaçons-nous autant? Ce chapitre n'a pas la prétention de fixer un code de conduite universel: il nous aidera seulement à réfléchir. Il appartiendra ensuite à chacune d'interroger et de changer les modes de vie qui entraînent des déplacements excessifs. Ne nous trompons pas de destination, c'est bien notre destinée que nous mettons en jeu! Ce qui est certain, c'est qu'il va falloir revoir l'ordre de nos priorités.

La liberté à tout prix

La « liberté » offerte par les nombreux moyens de déplacement nous permet une mobilité frénétique. Puisque des transports rapides le permettent, pourquoi ne pas aller régulièrement à l'autre bout du pays ou du globe ? Tout simplement parce que « la liberté des uns s'arrête là où commence celle des autres » ! Nous sommes tous dans le même bateau et certains comportements individuels peuvent mettre en péril l'ensemble des passagers.

Par ailleurs, cette liberté est toute relative. Est-ce un choix ou une contrainte de parcourir 100 kilomètres par jour pour aller travailler ? Est-ce un choix ou une injonction publicitaire de surconsommer dans des zones commerciales excentrées qui ne sont accessibles qu'en voiture ? Est-ce un choix ou une pression mondaine d'aller s'isoler dans un hôtel de luxe à l'autre bout de la planète, alors que l'on connaît à peine les trésors qui se trouvent dans notre région ? Notre vraie liberté n'est-elle pas de voyager léger et à l'air libre, avec les moyens que la nature nous a offerts ? Si nous ne saisissons pas cette chance dès maintenant, quelle latitude nous restera-t-il dans un monde que nous aurons rendu très difficile à vivre ?

De plus en plus vite

La rapidité contre nature permise par certains transports motorisés nous incite à aller de plus en plus loin, de plus en plus souvent. À tel point que nous pouvons relier divers points de la planète en quelques heures, tout en ignorant totalement les territoires que nous traversons ! Trompés par l'illusion de gagner du temps, nous avons

perdu l'occasion de découvrir notre environnement proche. Posons-nous aussi la question du temps que nous passons à travailler pour nous offrir nos moyens de transport disproportionnés. Et que faisons-nous du temps que nous pensons avoir gagné ?

Comme nous le verrons par la suite, la vitesse a des conséquences négatives très lourdes qu'il faut mettre en balance avec les gains réels, souvent relatifs, discutables et futiles. Une nouvelle façon d'envisager le temps et l'espace est l'une des clés de la réussite de notre voyage vers demain. Nous devons prendre le temps nécessaire à nos trajets, et nous pouvons même en profiter. Paradoxalement, c'est bien en ralentissant rapidement notre course folle que nous gagnerons le contre-la-montre climatique et écologique !

La quête du confort

Il est confortable de se laisser porter dans l'habitacle climatisé d'un véhicule sans avoir à fournir le moindre effort pour avancer. Mais avons-nous pris en compte les efforts nécessaires pour produire, entretenir et faire fonctionner nos gros moyens de déplacement ? Le prix que nous payons est bien dérisoire face au coût réel pour l'environnement et pour la collectivité. Et bien loin de nos regards, à l'autre bout de la chaîne, se trouvent souvent des travailleurs surexploités.

Dans notre société aseptisée et surprotégée, quelques gouttes de transpiration ou de pluie sont devenues totalement intolérables durant nos déplacements ! Pourtant, notre corps a un besoin vital de se dépenser au grand air et

peut s'adapter à des conditions météorologiques variées. À tel point que nous compensons actuellement notre mode de vie assisté et abrité par des loisirs sportifs en plein air, auxquels nous nous rendons bien souvent en mode motorisé. Ne serait-il pas plus simple de joindre l'utile à l'agréable en profitant de nos déplacements pour faire du bien à notre santé, tisser des liens sociaux, découvrir la nature et les cultures environnantes? Ne serait-ce pas plus confortable que les terribles conditions de vies qui nous attendent si nous perpétons nos habitudes dévastatrices?

Tout sacrifier au progrès

On peut voir dans nos moyens de transport une certaine forme de progrès. Plus rapides, plus grands, plus confortables, plus connectés, plus automatisés, la plupart des véhicules modernes semblent représenter un avenir inéluctable. Mais lorsque cette progression nous mène à notre perte, pouvons-nous raisonnablement penser que nous allons dans le bon sens?

Alors, faudrait-il faire demi-tour pour remonter le temps jusqu'à une époque idéalisée où les modes de déplacement semblaient bien plus vertueux? Probablement pas, car, d'une part, notre histoire des transports est parsemée de pratiques qui ne sont plus acceptables, comme les machines à vapeur chauffées au charbon ou l'exploitation et la maltraitance animales et humaines. D'autre part, le contexte n'est plus le même: nous sommes plus nombreux, nous disposons d'infrastructures et de connaissances nouvelles (nous en avons aussi oublié ou perdu

d'autres...) et, en parallèle, notre monde a subi des bouleversements irréversibles. La marche arrière n'est donc pas une bonne voie, même si nous pouvons nous inspirer du passé pour adopter les déplacements du futur. Plus qu'un changement de sens, c'est une nouvelle direction qu'il nous faut prendre. Ni retour en arrière ni fuite en avant, la véritable modernité est une adaptation à notre époque et à ses exigences capitales !

Les excès de la croissance

Le dogme économique dominant d'aujourd'hui repose sur des ventes massives de voitures régulièrement renouvelées, sur une consommation illimitée de kilomètres et de carburant, pour aller toujours plus vite, plus loin, avec toujours plus d'accessoires prétendument indispensables. Selon les préceptes du capitalisme, les contrecoups environnementaux, sanitaires et sociaux sont autant de sinistres aubaines, car ils génèrent encore de nouvelles activités économiques : dépollution, soin des malades, crédits à la surconsommation... Mais n'est-il pas suicidaire de vouloir à tout prix continuer sur cette voie sans issue ? Est-il viable de faire croître indéfiniment ce monstrueux marché en le gavant avec nos ressources terrestres limitées qu'il transforme en déchets toxiques ? La vraie richesse ne serait-elle pas ailleurs ? Les considérations purement économiques sont bien dérisoires dans le contexte écologique actuel et à venir. L'argent n'est qu'un outil d'échange non comestible, mais qui peut encore être utilisé intelligemment dans un monde aux déplacements beaucoup plus vertueux. En définitive, le seul capital que nous devons

entretenir coûte que coûte, c'est le patrimoine vivant qui nous permet d'exister sur cette Terre !

L'argument de l'emploi est souvent utilisé pour perpétuer notre hypermobilité malade : nous aurions un besoin irrépensible de fabriquer et d'utiliser des véhicules polluants pour occuper nos vies. Mais il est complètement absurde d'asservir des humains à se rendre quotidiennement loin de chez eux pour accomplir des travaux qui, bien souvent, détruisent leur propre environnement ! En revanche, nous avons de nombreux défis à relever pour inventer et adopter des modes de déplacement compatibles avec les possibilités de notre planète. L'économie peut et doit se reconvertir pour contribuer à ce vaste chantier, et il y aura largement de quoi offrir à chacun-e un rôle vraiment enrichissant !

Tenue correcte exigée

Le monde du travail des pays « développés » impose un certain nombre de règles tacites d'apparence physique. Dans certaines professions, la tenue vestimentaire doit se conformer à un cadre érigé. Outre l'inconfort qu'il peut engendrer sur le lieu de travail, ce costume de circonstance influence aussi la façon de s'y rendre : il n'est pas toujours facile de pédaler ou de marcher à son aise lorsque l'on est tiré-e à quatre épingles. S'ajoute à cela une idée de la prestance liée à la fonction : bridé-e par le souci d'une image stéréotypée, on n'ose pas arriver décoiffé-e par un casque, humecté-e par une légère transpiration ou déposé-e par un véhicule dont la taille et le prix ne sont pas en rapport avec le niveau dans la hiérarchie. Quelques

verrous pourraient sauter en offrant, par exemple, la possibilité de se changer en arrivant. Mais le plus simple et le plus sain serait de mettre définitivement de côté notre déguisement d'apparat et d'endosser fièrement une vraie tenue de justicier climatique, qui n'a peur ni d'un peu de sueur ni des intempéries. Bon, restons modestes, ce genre de super-héros/héroïne n'a pas besoin de voler. Suivant les circonstances, il ou elle pourra donc se contenter de chaussures commodes pour marcher, de vêtements adaptés à la météo et, si nécessaire, d'un casque léger et d'un gilet à bandes réfléchissantes. Nul besoin d'être des surhumains pour éviter de nous retrouver nu-es et vulnérables face à des bouleversements en partie causés par des codes vestimentaires un peu trop rigides.

Des besoins vraiment essentiels ?

Les déplacements encouragent les relations sociales et familiales, les échanges commerciaux et culturels, et même, dans une plus large mesure, le brassage génétique. Mais est-il nécessaire d'aller aussi loin, aussi vite, aussi souvent et avec d'aussi gros véhicules ? Rien n'empêche de passer d'excellentes vacances en se déplaçant à pied ou à vélo, tout en profitant de paysages insoupçonnés et en faisant de très belles rencontres. Dans le cadre d'une économie relocalisée, on pourrait aller travailler à portée de jambes et consommer sain et responsable à proximité de son lieu d'habitation. Les retrouvailles avec nos familles et amis géographiquement éloignés seraient toujours joyeuses, même si leur fréquence baissait.

Notre voisinage regorge aussi d'amis potentiels qu'une vie locale plus intense permettrait de découvrir.

De même, posons-nous la question de l'adéquation entre les véhicules que nous utilisons et ce qu'ils transportent réellement. Nos imposantes voitures de plus d'une tonne (1 000 kilogrammes) transportent la plupart du temps un seul être humain de moins de 100 kilogrammes, lui-même doté d'une formidable capacité à se déplacer par ses propres moyens. Et que dire de l'utilité d'un véhicule de 1 500 kilogrammes (1 500 000 grammes) pour transporter une lettre de 20 grammes, un paquet de cigarettes de 30 grammes ou une baguette de 250 grammes ? En réalité, nous déplaçons bien plus les véhicules que la charge utile qu'ils sont censés transporter ! Même un pack d'eau en bouteille ne justifie pas un véhicule cent fois plus lourd que lui, d'autant plus qu'il existe des solutions bien plus avantageuses économiquement et écologiquement, comme l'eau du robinet. Le summum de l'inutilité est atteint lorsqu'on laisse le moteur tourner alors que le véhicule est stationné !

On attribue souvent aux véhicules des fonctions tout autres que le transport. Ils peuvent servir de marqueurs sociaux par la mise en avant d'attributs sans réelle utilité. Aussi bien dans le monde de l'automobile que dans celui du deux-roues motorisé, on assiste à une course à la puissance, à la grosseur, à la vitesse, au luxe, au bruit, à la technologie. Que la séduction vienne des constructeurs ou que l'envie vienne des consommateurs, de tels critères ne sont pas compatibles avec les défis environnementaux que nous devons relever !

Nos objets aussi se déplacent beaucoup, notamment les denrées alimentaires. Notre nourriture a-t-elle besoin de faire le tour du globe avant d'arriver dans nos assiettes ? Posons-nous la question de la provenance et du trajet de chaque produit que nous achetons. Et lorsque la réponse n'est pas évidente, nous pouvons aussi nous interroger sur la nécessité même de nos achats.

Sans pour autant renoncer à nos besoins essentiels, n'est-il pas nécessaire d'adopter dès maintenant les modes de déplacement qui nous mèneront vers un monde capable de satisfaire nos fonctions vitales ?

Découvrir le monde

Nous nous déplaçons aussi juste pour aller voir ce qu'il se passe plus loin. Cette irrépressible curiosité est plus ou moins saine en fonction des véhicules que nous utilisons et des distances que nous parcourons. Ce besoin de découverte nécessite-t-il forcément des milliers de kilomètres parcourus à des vitesses presque soniques, les fesses collées à un siège ? N'est-ce pas à l'air libre et sur nos deux jambes que nous pouvons réellement nous en mettre plein la vue et plein les narines ? Et si nous avons absolument envie d'émoustiller nos sens dans des contrées lointaines, pourquoi ne pas s'y rendre au rythme que proposent un sac à dos, des sacoches et des attentes sur un quai ? Le plus intéressant se trouve souvent en chemin... et parfois à deux pas de notre porte ! Encore faut-il que notre environnement immédiat ne soit pas trop dégradé par les nuisances des véhicules motorisés, par le goudron et le béton, par l'agriculture industrielle, par l'exploitation minière

et par l'étalement urbain. Le cas échéant, nous pouvons essayer de restaurer le vivant dans nos paysages pour que mettre le pied dehors (re)devienne un petit voyage ! Et si la vraie vie, c'était le mouvement ? Encore faut-il s'entendre sur les meilleures façons de bouger. Nous avons besoin de la science pour éclairer ces considérations philosophiques.

II. LES FORCES EN JEU LORS DE NOS DÉPLACEMENTS

Pour avancer vers notre destination, nous ne pouvons plus nous contenter d'enfoncer aveuglément une pédale d'accélérateur. Trop habitués à solliciter un gros moteur pour vaincre à notre place les forces qui s'opposent au mouvement, nous avons un peu oublié quelques notions de physique de base. Ces dernières sont pourtant très utiles pour savoir économiser les ressources énergétiques que requièrent nos déplacements. Commençons par comprendre ce que signifie ici le mot « énergie » : c'est l'ensemble des efforts à fournir pour bouger d'un point A à un point B. On parle aussi de « travail », pas seulement pour celui ou celle qui appuie sur les pédales, mais aussi pour tous les intermédiaires qui participent à l'effort, qu'ils soient thermiques, électriques ou autres. Nous aborderons plus tard les transformations d'une forme d'énergie à l'autre qui se jouent dans les moteurs. Pour le moment, constatons que, dans tous les cas, en fin de chaîne, c'est l'énergie mécanique qui fait avancer notre véhicule. Et celle-ci est égale à la multiplication des forces à vaincre par la distance à parcourir¹.

1. $E_g = \Sigma F \cdot d$ avec E_g : travail ou énergie nécessaire à un déplacement en joules, ΣF : somme des forces qui s'opposent frontalement au déplacement en newtons, d : distance parcourue lors du déplacement en mètres.

On comprend donc facilement qu'en réduisant la longueur (ou le nombre) de nos trajets, on réduit d'autant les besoins en énergie mécanique et, par répercussion, notre consommation de carburant, quel qu'il soit. De par sa simplicité et son efficacité, cette mesure est celle qu'il faut adopter en tout premier lieu ! Mais on peut aussi agir en parallèle sur toutes les forces qui pèsent sur notre mouvement.

NÉGOCIER LES CÔTES

La gravité terrestre, ou pesanteur, fait que tous les véhicules sont attirés vers le centre de la Terre par leur poids, qui est proportionnel à leur masse². Sur le plat, cela ne pose pas trop de problèmes. Mais, dans une côte, il faut fournir un effort pour faire grimper cette masse en altitude³. À mesure que l'on monte, l'énergie dépensée est convertie en énergie potentielle de pesanteur⁴, qui pourra potentiellement être réutilisée dans la prochaine descente.

Nous ne pouvons pas réduire la gravité qui nous maintient à la surface terrestre, à moins de nous en éloigner considérablement ou d'aller habiter sur un objet céleste

2. $P = m \cdot g$ avec P : poids en newtons, m : masse en kilogrammes, g : accélération de la pesanteur en mètres par seconde au carré ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$ sur Terre).

3. $F_g = P \cdot \sin \alpha$ avec F_g : composante de la force de gravité qui s'oppose à l'avancement dans une côte en newtons, P : poids en newtons, α : angle de la pente en radians.

4. $\Delta E_p = P \cdot \Delta z$ avec ΔE_p : variation d'énergie potentielle en joules, P : poids en newtons, Δz : variation d'altitude en mètres.

moins massif. Nous pourrions aussi ne plus la ressentir en nous satellisant en orbite autour de la Terre. Laissons sans regret ces options de côté. Bien qu'évoluant dans les premières couches de l'atmosphère, les engins volants semblent défier la pesanteur. Mais pour la plupart, ils le font au prix d'une très forte consommation d'énergie, car il leur faut une puissante propulsion pour se maintenir en l'air. Quelques rares aéronefs font exception à cette règle : nous les découvrirons plus loin. Pour le moment, contentons-nous de trouver quelques astuces simples pour composer avec la force d'attraction de notre bonne vieille planète, sans épuiser toutes ses ressources.

Sur terre, face à une côte, la meilleure défense, c'est l'esquive ! Quand on veut se rendre de l'autre côté d'une montagne, il est en général plus facile de la contourner que de monter à son sommet pour redescendre. Ce choix d'éviter les trajets pentus s'est imposé pour le train, en partie à cause du manque d'adhérence du contact fer sur fer entre les roues et les rails. En suivant les courbes de niveau du terrain et en franchissant les obstacles grâce à des viaducs et à des tunnels, le train peut transporter des charges très lourdes avec une puissance limitée. Pour économiser ses forces, un.e cycliste adopte aussi volontiers les trajets les plus plats. Mais le record de planéité est détenu par le transport par voie d'eau, même s'il lui arrive parfois de franchir quelques écluses et d'affronter quelques vagues. Pour preuve, sur les chemins de halage qui longent les canaux, des bateaux de plusieurs dizaines

de tonnes pouvaient autrefois être tirés par une seule femme ou un seul homme⁵!

Lorsque l'on ne peut pas éviter une côte, il est possible de l'affronter sans une débauche de puissance, tout simplement en réduisant la vitesse. C'est ce que fait naturellement un-e cycliste dont la puissance corporelle est limitée. Il ou elle réduit ainsi son effort en l'étalant sur une plus longue durée. Un système de changement de rapport de vitesses (pignons et dérailleur, par exemple) lui est bien utile dans cette épreuve.

Enfin, pour lutter contre la gravité terrestre, un des meilleurs moyens est d'être le plus léger possible. À titre d'exemple, pour gravir la même côte, une personne de 75 kilogrammes montée sur un vélo de 20 kilogrammes dépense dix-sept fois moins d'énergie mécanique que si elle était au volant d'une voiture de 1 500 kilogrammes⁶. Et si l'on prend en compte les autres forces qui s'opposent à l'avancement, l'économie d'énergie est encore plus spectaculaire!

5. Traitgenevois, « Le halage à col d'homme », Traits en Savoie, 1^{er} juillet 2014. www.traitsensavoie.fr/spip.php?article298

6. Dans une côte à faible vitesse et avec des pneus bien gonflés, l'effort dû au poids est largement prépondérant sur les autres et il est proportionnel à la masse totale du véhicule. Dans le cas du vélo avec son cycliste, la masse totale est de $75 + 20 = 95$ kg. Dans le cas de la voiture avec son conducteur, la masse totale est de $1\,500 + 75 = 1\,575$ kg. Le rapport entre les deux masses totales est de $1\,575 / 95 = 16,6$.

ÉCHAPPER À L'INERTIE

Un véhicule représente une masse à déplacer. Même sur le plat, il faut de la force pour le lancer de l'arrêt vers sa vitesse de croisière. Le problème est le même avec les pièces mécaniques en rotation (roues, axes, engrenages...). Cette mise en mouvement demande une énergie initiale qui se transforme en énergie cinétique (l'énergie du mouvement) à mesure que la vitesse augmente. L'énergie cinétique d'un corps en mouvement est proportionnelle à sa masse et au carré de sa vitesse⁷. En d'autres mots, si l'on multiplie la masse par deux, l'énergie cinétique est aussi multipliée par deux. En revanche, si l'on multiplie la vitesse par deux, l'énergie cinétique est multipliée par quatre! Et si l'on accélère fort pour atteindre rapidement la vitesse de croisière, la force à vaincre devient d'autant plus importante⁸, ce qui signifie que le moteur doit fournir plus de puissance (nous verrons plus tard ce qu'est la puissance, avec les problèmes qu'elle pose).

On appelle « inertie » cette résistance qu'oppose une masse, aussi bien lorsque l'on veut la faire bouger que lorsque l'on essaie de l'arrêter. Il existe plusieurs ruses pour ne pas s'épuiser à vaincre l'inertie. Limiter sa vitesse est très efficace puisque, comme nous venons de le voir,

7. $E_c = 1/2 m \cdot v^2$ avec E_c : énergie cinétique en joules, m : masse en kilogrammes, v : vitesse en mètres par seconde.

8. $F_i = a \cdot m$ avec F_i : force d'inertie en newtons, a : accélération en mètres par seconde carré (l'accélération est une variation de vitesse par unité de temps), m : masse en kilogrammes.

l'énergie cinétique évolue comme le carré de la vitesse. Cela a par ailleurs l'avantage de diminuer la fréquence, la durée et l'intensité des phases d'accélération et de freinage. On peut aussi adopter une conduite souple et progressive, tout en anticipant les obstacles pour éviter des accélérations et des freinages brutaux. C'est ce que l'on appelle l'écoconduite. Associée à une vitesse modérée, elle peut nous faire économiser jusqu'à 10% de carburant⁹, ce qui est déjà pas mal. Mais pour s'affranchir de l'inertie, on peut aller beaucoup plus loin en utilisant un véhicule qui cumule extrême légèreté et vitesse modeste, par exemple un vélo. En effet, ce dernier réclame deux cent cinquante fois moins d'énergie qu'une voiture pour atteindre sa vitesse de croisière depuis l'arrêt¹⁰! Mais l'histoire n'est pas finie, car une fois le mouvement lancé, il faut encore l'entretenir.

GARDER L'ÉNERGIE

L'énergie n'apparaît pas et ne disparaît pas, elle se transforme. Mais au passage, elle a une fâcheuse tendance

9. Ademe, « L'écoconduite, une attitude à adopter ! », mis à jour le 14 mars 2022. <https://expertises.ademe.fr/air-mobilites/mobilite-transport/passera-laction/solutions-technologiques/dossier/optimiser-lutilisation-lentretien-vehicule/lecoconduite-attitude-a-adopter>

10. Résultat obtenu en calculant pour chacun des véhicules l'énergie cinétique accumulée de l'arrêt à la vitesse de croisière. Les paramètres pour la voiture sont : $m = 1575 \text{ kg}$ et $v_{\text{croisière}} = 90 \text{ km/h}$. Les paramètres pour le vélo sont : $m = 95 \text{ kg}$ et $v_{\text{croisière}} = 23 \text{ km/h}$. Dans ces conditions, l'énergie cinétique accumulée est de 0,492 MJ pour la voiture et de 0,00194 MJ pour le vélo, soit 254 fois moins.

à perdre en qualité¹¹. Énergie potentielle de pesanteur et énergie cinétique sont deux formes d'énergie mécanique et sont qualifiées d'énergies nobles, car elles se convertissent facilement l'une en l'autre, ou en d'autres formes d'énergie, sans trop se déprécier. À l'inverse, la chaleur est une énergie dégradée, car elle est difficilement exploitable pour recréer du mouvement.

Pour illustrer ce propos, imaginons un véhicule sans moteur et sans freins qui doit parcourir une série de bosses et de creux (un peu comme le wagonnet d'un grand huit). S'il part du haut d'une bosse, grâce à son altitude, le véhicule possède de l'énergie potentielle de pesanteur. En se laissant descendre dans le creux, il va perdre de l'altitude, donc de l'énergie potentielle de pesanteur, mais il va gagner de la vitesse, donc de l'énergie cinétique. Quand il est arrivé dans le creux, sa vitesse est maximale et lui permet de gravir la bosse suivante. Dans la montée, il perd de la vitesse, donc de l'énergie cinétique, mais gagne de l'altitude, donc de l'énergie potentielle de pesanteur.

Si les bosses successives avaient toutes une hauteur inférieure à celle de départ et s'il n'y avait aucune perte d'énergie (ce qui, hélas, est impossible), le véhicule pourrait en franchir une infinité sans qu'on lui fournisse la moindre énergie en cours de route. Et si la dernière descente se prolongeait par une voie parfaitement

11. En thermodynamique, c'est le principe de l'augmentation de l'entropie, qui correspond, en des termes plus littéraires, à une inexorable augmentation du désordre global chaque fois que nous utilisons de l'énergie.

plate, le véhicule conserverait sa vitesse indéfiniment, toujours sans apport d'énergie.

En revanche, si le véhicule possède des freins (ce qui est plus prudent) et les utilise pendant qu'il roule, il ne pourra pas remonter aussi haut que son point de départ, car les freins dégradent l'énergie cinétique en la transformant en chaleur. Et si, comme dans la réalité, il y a d'autres forces parasites qui s'opposent au mouvement tout en dégradant l'énergie, le véhicule finira forcément par s'arrêter.

Sur nos routes, pour éviter de perdre trop d'énergie en freinant, les meilleurs moyens restent encore les mêmes : rouler à vitesse modérée, adopter l'écoconduite et être très léger. Il existe aussi des systèmes qui ralentissent le véhicule en convertissant une partie de l'énergie cinétique en une autre forme d'énergie noble : mécanique, électrique, magnétique ou chimique. Cette récupération partielle d'énergie pourra ensuite être utilisée plus tard. Mais ces dispositifs ne sont jamais parfaits et, dans tous les cas, on ne peut jamais conserver la totalité de l'énergie noble de départ. Quoi qu'il en soit, même sans freiner, la noble énergie mécanique perd peu à peu ses titres en chemin, car divers phénomènes physiques en veulent à son rang. Voyons comment nous pouvons nous arranger pour retarder son inexorable déclin vers la chaleur diffuse.

COMME SUR DES ROULETTES

Lorsqu'un pneu roule sur une route, il se déforme sous l'effet du poids du véhicule qu'il supporte. Cette défor-

mation répétée oppose une certaine difficulté à l'avancement du véhicule que l'on appelle « résistance au roulement ». Cela se traduit par un échauffement et une surconsommation d'énergie. On peut diminuer ces pertes en gonflant les pneus à plus forte pression (dans la limite de ce qu'ils peuvent supporter et du confort des passagers). En règle générale, plus les pneus sont étroits, plus ils peuvent (et doivent) être gonflés fort. Utilisés sur des modèles « haute efficacité », certains élastomères s'échauffent moins sous la déformation, ce qui diminue un peu la résistance au roulement.

La planéité de la chaussée influence aussi la résistance au roulement, car chaque bosse entraîne la déformation des pneus ou la sollicitation des amortisseurs, ce qui génère une légère perte d'énergie. Face à cela, des roues de grand diamètre sont moins secouées par les irrégularités du terrain grâce à leur capacité à « enjamber » les petits obstacles. Mais les roues ont parfois leurs limites, et sur certains parcours accidentés il est beaucoup plus pertinent de faire usage de ses pieds.

La consistance du terrain pèse également de façon déterminante sur la capacité à rouler. Un sol meuble et désagrégé cause en effet beaucoup de frictions énergivores. Pour vous en convaincre, essayez de rouler à vélo sur du sable ou dans de la boue ! On peut se sortir de l'ornière en utilisant de très gros pneus, mais il faudra tout de même bien appuyer sur les pédales, ou mettre pied à terre.

À l'extrême inverse, les véhicules sur rails ont l'avantage d'une résistance au roulement extrêmement faible, car le contact fer sur fer engendre très peu de

déformations. Certaines technologies, comme la sustentation magnétique ou le glissement sur coussin d'air, permettent d'éliminer totalement le roulement. Mais elles consomment beaucoup plus d'énergie que l'utilisation de bonnes vieilles roues.

Dans tous les cas, la diminution du poids du véhicule est toujours bénéfique pour diminuer la résistance au roulement¹².

MOINS FLUIDE QU'IL N'EN A L'AIR

Tout véhicule terrestre baigne dans un fluide : l'air. Ce mélange gazeux, presque imperceptible à faible vitesse, devient de plus en plus difficile à pénétrer lorsque l'on va vite. La force due à la résistance de l'air, aussi appelée « traînée¹³ », augmente comme le carré de la vitesse¹⁴. C'est-à-dire que si l'on va deux fois plus vite, l'air devient quatre fois plus résistant ! Au-dessus de 50 km/h, la traînée commence à être la principale force qui s'oppose à l'avancement. Et à 130 km/h sur autoroute, quasiment tout

12. $F_r = C_r \cdot P$ avec F_r : force de résistance au roulement en newtons, C_r : coefficient de résistance au roulement (coefficient sans dimension allant de 0,01 pour un pneu classique de voiture sur route à 0,0003 pour une roue en acier sur un rail en acier), P : poids en newtons.

13. François-Philippe Gallois et Romain Blanc-Tailleur, « La natation et la traînée », *Culture physique*, Arte, 2021. <https://www.arte.tv/fr/videos/100100-002-A/culture-physique/>

14. $F_x = 1/2 \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^2$ avec F_x : force de résistance de l'air en newtons, ρ : densité de l'air en kilogrammes par mètre cube ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ à 15 °C et 1,013 bar), S : surface frontale du véhicule en mètres carré, C_x : coefficient de traînée (dépend de la forme du véhicule), v : vitesse en mètres par seconde.

le carburant que brûle une voiture sert à brasser de l'air¹⁵ ! Pour limiter ces pertes inutiles, il y a plusieurs solutions :

- rouler lentement. C'est la solution la plus efficace et la plus simple à mettre en œuvre ! Encore faut-il soigner notre addiction à la vitesse. Les véhicules sans moteur peuvent nous y aider ;

- regrouper nos déplacements. Pour éviter de braver l'air à maintes reprises, on peut utiliser un seul véhicule au lieu de plusieurs. Par exemple, un tandem génère moins de frottements avec l'air que deux vélos. De même, un covoiturage avec cinq occupants remue cinq fois moins d'air que cinq voitures transportant chacune une seule personne. Et un autocar remue encore moins d'air que ne le ferait la somme des voitures de tous ses passagers ;

- utiliser des véhicules aérodynamiques. On peut optimiser la forme des véhicules rapides pour qu'ils pénètrent facilement l'atmosphère en provoquant un minimum de remous. Diminuer la hauteur et la largeur est une façon efficace de mieux fendre l'air. Ce n'est, hélas, pas la tendance actuelle du marché de l'automobile ;

15. Calcul réalisé sur une voiture de type Renault ZOE pesant 1575 kg avec chauffeur et roulant à vitesse constante sur une route plate. Les forces prises en compte dans ce calcul sont la résistance au roulement et la résistance de l'air avec les valeurs suivantes : $C_{rr} = 0,0065$, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ et $S \cdot C_x = 0,75 \text{ m}^2$. À 53 km/h, les deux forces sont à peu près égales. À 130 km/h, la résistance de l'air représente 86 % de l'effort total à fournir pour avancer.

– suivre de très près le véhicule qui précède. C'est une technique que connaissent bien les cyclistes qui roulent en peloton, mais qui est très risquée en cas de défaillance de l'un des membres du groupe. Cette technique s'avère plus fiable et plus efficace si les engins roulants sont attelés les uns aux autres pour former un train.

Lançons-nous tout de suite dans un petit exercice pour mettre en application les deux dernières notions que nous venons de découvrir. En prenant en compte à la fois la résistance de l'air et la résistance au roulement, on peut comparer deux moyens de déplacement terrestres bien connus : une voiture et un vélo. La physique nous révèle que pour parcourir la même distance en vitesse de croisière, le vélo réclame vingt-cinq fois moins d'énergie mécanique¹⁶ ! Décoiffant, non ?

Décollons maintenant pour constater que le transport aérien est quant à lui pris au piège de son milieu. L'air est si léger qu'il est très difficile de s'appuyer dessus. Pour arriver à propulser les aéronefs, il faut éjecter à très grande vitesse le gaz environnant et ceux de la combustion. Et sauf

16. La comparaison entre la voiture et le vélo est effectuée sur le plat et à vitesse constante en calculant l'énergie mécanique nécessaire à leur déplacement sur une même distance. Les forces prises en compte sont la résistance au roulement et la résistance de l'air (de densité $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$). Les paramètres pour la voiture sont : $m = 1\,575 \text{ kg}$, $C_{rr} = 0,0065$, $S \cdot C_x = 0,75 \text{ m}^2$ et $v = 90 \text{ km/h}$. Les paramètres pour le vélo sont : $m = 95 \text{ kg}$, $C_{rr} = 0,006$, $S \cdot C_x = 0,4 \text{ m}^2$ (cycliste traditionnel avec bras tendus, mains en haut du guidon) et $v = 23 \text{ km/h}$. Dans ces conditions, la somme des forces de résistance à l'avancement est de 388 N pour la voiture et de 15,6 N pour le vélo, soit 25 fois moins.

à être aussi léger que l'air, il faut maintenir la cadence pour ne pas retomber comme un caillou. Mais à ces vitesses, l'air oppose énormément de résistance à l'avancement et devient turbulent. Il en résulte d'importantes consommations de carburant. Les vols de ligne réduisent leur traînée en volant à haute altitude (environ 10 000 mètres), où l'air est moins dense. Le prix à payer est une longue et dispendieuse phase de montée, ainsi qu'une cabine pressurisée. En montant beaucoup plus haut (à une centaine de kilomètres d'altitude), l'air se fait extrêmement rare et la traînée disparaît presque totalement. Mais l'énergie qu'il faut pour propulser un aéronef aux limites de l'atmosphère terrestre est bien trop importante pour justifier de transformer les avions en fusées¹⁷. La voie des cieux semble donc pour le moment difficile à mettre au régime. Alors, restons au sol et faisons le vide (absence totale d'air) dans des gros tubes étanches. Des capsules hermétiques accueillant des voyageurs pourraient y circuler sans être gênées par l'air. C'est ce que propose le projet Hyperloop, mais nous verrons que cette solution très complexe n'est pas souhaitable non plus. Décidément, à moins d'y aller tout en finesse, l'air ne se laisse pas facilement aborder.

De leur côté, les bateaux doivent composer avec un autre fluide, bien plus dense que celui que nous respirons, et donc bien plus difficile à fendre. On le comprend vite en essayant de courir avec les jambes immergées dans l'eau.

17. Victor Tangermann, "Rocket Launches Are Shockingly Bad for the Environment", *Futurism*, 19 juillet 2021. <https://futurism.com/the-byte/rocket-launches-bad-environment>

Pour ne pas lutter vainement contre les flots, les embarcations peuvent bénéficier de recettes comparables à celles que l'on utilise à terre ou dans les airs, mais à une autre échelle: lenteur, regroupement des cargaisons, formes hydrodynamiques, dimensions étirées en longueur... Comme nous le verrons plus loin, certains engins flottants font même le choix de se sortir de l'eau. En attendant, reconnaissons à ce liquide d'intéressantes propriétés, dont celle de transporter sans trop d'efforts des chargements lourds et volumineux.

Air, eau, terre, nos moyens de déplacement sont toujours en contact avec au moins un de ces éléments. Mais lorsqu'il s'agit de trouver de solides supports pour se propulser, suivre une direction ou s'immobiliser, la surface terrestre reste bien souvent notre meilleur point d'appui.

ÉVITER LES FRICTIONS

Les matériaux solides ont aussi leur lot de consommations parasites. À bord des véhicules, elles se produisent le long d'une succession d'organes de transmission entre le moteur et les roues (ou autre système de propulsion). Engrenages, courroies, poulies, chaînes, pignons génèrent des pertes d'énergie par frottement, car il y a une légère friction des matériaux les uns contre les autres. Dans la pratique, ces frottements sont très faibles grâce à la lubrification, à l'utilisation de roulements à billes (ou à roulements) et à une conception optimisée. En règle générale, moins il y a d'éléments intermédiaires entre le moteur et les roues, moins il y a de frottements. Des pièces qui ont

besoin de transmettre moins de puissance génèrent aussi moins de frottements et sont plus légères. La comparaison entre une boîte de vitesses de voiture et les pignons d'un vélo l'illustre bien.

Par ailleurs, divers accessoires à bord de certains véhicules, comme la climatisation, les équipements électriques et électroniques, consomment aussi de l'énergie. Au sommet de cette cascade de forces à vaincre, il y a le moteur qui est, lui aussi, le lieu de nombreuses pertes, notamment par frottement, mais aussi caloriques, électriques, magnétiques, chimiques, lesquelles se dissipent encore et toujours sous forme de chaleur. Et ce n'est pas terminé : en remontant plus haut vers la source, il y a encore beaucoup d'étapes à franchir pour produire l'énergie qui alimente le moteur... C'est ce que nous allons voir bientôt.

NI LIÈVRE NI TORTUE

Ces quelques rudiments de science physique du mouvement mettent en évidence trois facteurs très influents sur la consommation énergétique de nos trajets : distance, vitesse et poids. Moins nous déplacer, rouler tout doux et voyager ultraléger suffiraient donc à réduire très significativement l'impact de nos déplacements. Alors, pourquoi orienter tous nos efforts vers de difficiles évolutions techniques des moteurs, qui n'apportent en général que des améliorations marginales ? Avec notre diplôme de bonne conduite en poche, à défaut de pouvoir décrypter ce qui se passe dans nos cerveaux, passons en revue ce qui se trame sous nos capots.

III. TOUR D'HORIZON DES MOTEURS D'AUJOURD'HUI

Comment fonctionne la pièce maîtresse de notre véhicule, celle qui le fait avancer : le moteur ! Qu'y a-t-il réellement sous nos capots et dans nos réservoirs ? Le panorama qui va suivre n'est pas exhaustif, mais il balaye les technologies plus ou moins courantes utilisées ou testées à l'heure actuelle. Quel que soit son type, un moteur est un convertisseur d'énergie qui transforme diverses sources d'énergie en énergie mécanique et en chaleur. Ses performances se mesurent de différentes façons, qui peuvent prêter à confusion. Elles sont aussi très subjectives : ce qui fait rêver certains conducteurs peut s'avérer être un vilain défaut. Avant d'admirer les mécaniques, faisons un peu de tri parmi les chiffres publicitaires plus ou moins scrupuleux qui nous inondent.

CRITÈRES DE CHOIX

Consommations dévoilées

Après avoir été reléguée au second rang à l'époque des Trente Glorieuses, la consommation est à l'heure actuelle un critère très important pour choisir son véhicule, d'autant plus en période de crise énergétique ! Mais de quoi parle-t-on exactement ? De litres de carburant, de kilowattheures, de grammes de CO₂, d'euros... ? Pour comparer

des véhicules ayant le même type de moteur, ce n'est pas très compliqué : on penche assez naturellement vers celui qui affiche les chiffres les plus bas. Attention tout de même, car les conditions réelles d'utilisation peuvent conduire à de gros écarts par rapport aux valeurs données par les constructeurs. En effet, ces dernières sont issues d'essais normalisés correspondant à une conduite extrêmement douce, qui n'est pas encore totalement rentrée dans les mœurs¹ !

Avec des moteurs de technologies différentes, la comparaison devient plus complexe. Bien que pouvant être exprimée dans une même unité de mesure, par exemple le joule (J) ou le kilowattheure (kWh), l'énergie consommée par nos moyens de transport pour parcourir 100 kilomètres se présente sous différentes formes et peut être mesurée à différents stades de longues chaînes de conversions. Il y a donc des chiffres que l'on ne peut pas comparer directement ! Prenons l'exemple de deux voitures de même gabarit et de même poids qui réalisent le même trajet dans les mêmes conditions. L'une fonctionne avec un moteur thermique, et l'autre avec un moteur électrique. Pour la première, connaissant le pouvoir calorifique de son carburant et sa consommation en litres aux 100 kilomètres, on peut en déduire l'énergie thermique utilisée pour parcourir cette distance. Elle est classiquement de l'ordre

1. Hugo Lara, « Cycle WLTP : différences entre autonomie annoncée et autonomie réelle », Automobile Propre, 1^{er} avril 2021. <https://www.automobile-propre.com/dossiers/voiture-electrique-differences-entre-lautonomie-annoncee-et-lautonomie-reelle/>

de 45 kilowattheures². Pour la seconde, en plaçant un compteur au niveau de sa prise de recharge, on obtient une consommation d'énergie électrique d'environ 15 kilowattheures pour 100 kilomètres³. Entre 45 kilowattheures d'un côté et 15 kilowattheures de l'autre, il y a tout de même un facteur trois! Comment peut-on expliquer une telle différence alors que les deux véhicules ont besoin de la même énergie mécanique pour réaliser le trajet? En réalité, nous venons de comparer des chiffres qui ne sont pas comparables, puisque l'un correspond à de l'énergie thermique et l'autre à de l'énergie électrique! Or l'énergie électrique est une énergie noble, facilement convertible en énergie mécanique, mais indisponible telle quelle dans la nature... Elle est le plus souvent produite dans une centrale à partir d'énergie thermique, avec au passage environ deux tiers de chaleur perdue! Il faut donc environ 3 kilowattheures d'énergie thermique pour produire 1 kilowattheure d'énergie électrique. Donc 15 kilowattheures d'énergie électrique nécessitent en amont 45 kilowattheures d'énergie thermique. En comparant ce qui est comparable, par exemple l'énergie thermique, on voit que les deux types de véhicules ont à peu près la même consommation⁴...

2. Exemple d'une voiture diesel consommant 4,5 litres de gazole aux 100 km avec un pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gazole de 10 kWh/l.

3. Exemple d'une voiture électrique de type Cupra Born V qui affiche 15,3 kWh/100km.

4. Jérôme Fraisse, « TD sur l'application du rendement dans une chaîne d'énergie (voiture électrique vs thermique) de l'énergie primaire à l'énergie utile + diaporama de synthèse », 2017. <https://jfraisse.pagesperso-orange.fr/comport-energ.htm>

Même si elle donne déjà une indication très intéressante, la quantité d'énergie rapportée à la distance parcourue ne doit pas être la seule façon de mesurer la consommation d'un moteur, car elle ne rend pas forcément compte des déchets toxiques et des divers impacts négatifs sur l'environnement. Le réchauffement climatique est un problème suffisamment grave pour que les émissions de gaz à effet de serre à l'échappement, exprimées en grammes de CO₂ par kilomètre, soient systématiquement affichées pour les véhicules à moteur thermique. De leur côté, à cause du flou sur les façons variées de produire de l'électricité, les véhicules électriques échappent à cette exigence de transparence. Pire, ils ont même le droit d'afficher « zéro ». Pourtant, si l'on prend en compte l'intégralité de son cycle de vie, de la fabrication à la mise au rebut en passant par l'utilisation, une voiture électrique européenne de taille « raisonnable » émet l'équivalent de 130 grammes de CO₂ au kilomètre⁵. Certes, c'est un peu mieux que son équivalent thermique, qui approche des 180 grammes⁶, mais c'est loin d'être neutre. Et comme

5. Exemple d'une Renault ZOE R110 ZE50 dont l'analyse du cycle de vie a été réalisée par Green NCAP avec un mix énergétique européen moyen. https://www.greenncap.com/wp-content/uploads/pre-lca/Green%20NCAP_Renault%20ZOE-2020-0058_LCA%20fact%20sheet.pdf

6. Exemple d'une Peugeot 208 1.5 Blue HDI 100 diesel dont l'analyse du cycle de vie a été réalisée par Green NCAP avec un mix énergétique européen moyen. https://www.greenncap.com/wp-content/uploads/pre-lca/Green%20NCAP_Peugeot%20208-2021-0074_LCA%20fact%20sheet.pdf

il n'y a pas que le CO₂ dans la vie, nous essayerons d'identifier les autres problèmes posés par chaque type de moteur.

La façon la plus populaire de mesurer la consommation reste le porte-monnaie. Pourtant, cet indicateur est souvent très éloigné de la réalité physique et écologique. Le prix au litre ou au kilowattheure est en effet une valeur artificielle, qui fluctue en fonction des cours que dicte le marché. Il peut contenir diverses taxes, ou au contraire des subventions. Il peut aussi être fixé arbitrairement. Ne nous fions donc pas trop à cette valeur abstraite et volatile pour choisir quelles forces nous feront avancer vers le futur! Quoi qu'il en soit, les solutions les plus sobres sont souvent celles qui coûtent aussi le moins cher, et ce, sur tous les plans: finances, environnement, santé... Il n'y a donc, par exemple, aucun risque de se méprendre en passant de la voiture au vélo ou à la marche.

Rendement limité

On entend parfois parler du rendement d'un moteur ou de son efficacité. Cette grandeur sans dimension (sans unité) est le rapport entre l'énergie mécanique obtenue après la conversion et l'énergie fournie avant la conversion⁷. Il est toujours inférieur à 1 (ou 100%). En d'autres termes, on obtient toujours moins d'énergie mécanique utile à l'avancement du véhicule que d'énergie fournie

7. $\eta = E_{\text{out}}/E_{\text{in}}$ avec η : rendement, E_{out} : énergie de sortie utile (ici énergie mécanique), E_{in} : énergie consommée en entrée par le moteur (les deux énergies doivent être exprimées avec la même unité de mesure).

au départ, car une part de l'énergie est inévitablement dégradée. La réalité est donc cruelle : un véhicule qui a de gros besoins en énergie mécanique pour se mouvoir (par exemple, parce qu'il est lourd ou qu'il roule à vive allure) ne pourra jamais être économe en énergie, quelle que soit la technologie de son moteur, même si ce dernier a un très bon rendement (proche de 100%)! Dit autrement, le moteur aura beau exploiter au mieux l'énergie qu'on lui fournit, il lui en faudra quand même beaucoup pour propulser un véhicule qui n'a pas su réduire les forces qui s'opposent à son mouvement.

Le rendement n'est qu'un pourcentage qui ne donne des informations intéressantes que si on l'associe à une consommation d'énergie. Prenons comme exemple une grosse voiture de type 4 x 4 et un scooter. Supposons qu'ils ont tous deux un moteur thermique avec un rendement du même ordre de grandeur (une vingtaine de pourcents). Ont-ils pour autant une consommation semblable? Non, puisque, dans la pratique, le plus gros des deux consomme en moyenne 12 litres de carburant aux 100 kilomètres, alors que l'autre n'en consomme que 3, soit quatre fois moins. Pourtant, le petit moteur du deux-roues n'a pas bénéficié d'autant d'efforts d'optimisation que celui du gros véhicule. En réalité, dans ce cas d'école, ce n'est pas le rendement qui fait la différence, mais le poids et la taille du véhicule.

Pour des engins roulants à la morphologie similaire, peut-on s'amuser à comparer les rendements de leurs moteurs? Pourquoi pas, mais à condition que ces derniers utilisent le même type de carburant. Dans le cas contraire, cela n'a pas

vraiment de sens. Pourtant, les constructeurs d'automobiles électriques exploitent abusivement cette ambiguïté. À titre d'exemple, sur son site Internet, la marque au losange met en avant cette phrase de l'US Department of Energy: «Les véhicules électriques convertissent plus de 77% de l'énergie électrique fournie par le réseau en puissance au niveau des roues. Les véhicules traditionnels à essence ne convertissent que 12 à 30 % de l'énergie contenue dans le carburant pour propulser les roues⁸.» Vigilance: on tente là de nous faire comparer des choux et des carottes! Dans un cas, l'énergie d'entrée est électrique; dans l'autre, c'est l'énergie thermique que va fournir le carburant. Or, pour produire de l'électricité, il faut bien souvent du carburant que l'on brûle dans des centrales qui ont un rendement d'environ 30% (seulement 30% de l'énergie contenue dans le carburant finit en électricité). Le long d'une chaîne de conversion d'énergie, les rendements de chaque maillon se multiplient entre eux pour aboutir au rendement global. Et 30% multipliés par 77%, cela fait 23%: dans la même fourchette que les «12 à 30%» des «véhicules traditionnels à essence»! Précisons que nous ne sommes pas là pour défendre ces derniers.

On peut aller plus loin en élargissant la chaîne des rendements en amont et en aval du moteur. L'exercice peut s'avérer compliqué, mais il permet d'avoir une vision

8. Renault Group, «Comprendre la puissance d'un moteur électrique», 23 février 2021. <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/comprendre-la-puissance-dun-moteur-electrique/>

plus juste du véritable rendement global d'un véhicule, qui est bien souvent ridiculement bas (puisqu'en multipliant entre eux des nombres plus petits que un, on obtient des nombres encore plus petits). Pour des voitures thermiques, le calcul devrait se faire du gisement de pétrole aux roues du véhicule. Et pour leurs homologues électriques, de la mine de charbon aux roues. On devrait même encore pousser le curseur en ne prenant en compte comme énergie de sortie que celle qui sert réellement à la charge utile transportée. Et là, on se rendrait compte que l'énergie mécanique transmise à un être humain de moins de 100 kilogrammes est drastiquement inférieure à l'énergie primaire qui assure la mise en mouvement de son véhicule de plus d'une tonne, quel que soit son moteur. Faut-il systématiquement se lancer dans des analyses complexes pour choisir un moyen de transport et son moteur? Pas forcément, car il y a des cas où le bon sens et l'intuition éclairée suffisent pour nous orienter vers la meilleure efficacité globale. Prenons toujours le même exemple emblématique : pour déplacer une personne bien portante sur quelques kilomètres, entre une voiture et un vélo, il n'y a pas photo!

Puissance stérile

La puissance est une quantité d'énergie par unité de temps⁹. Un véhicule puissant consomme beaucoup d'énergie en peu de temps. En d'autres termes, il vide rapidement

9. $P = E/t$ avec P : puissance en watts, E : énergie en joules, t : temps en secondes.

son réservoir. L'unité de mesure officielle de la puissance est le watt (W), qui correspond à un joule par seconde ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$) ou à un wattheure par heure ($1 \text{ W} = 1 \text{ Wh/h}$). Cette unité est bien adaptée pour mesurer la puissance d'un cycliste qui, en vitesse de croisière, transmet une centaine de watts à sa monture via ses pédales¹⁰. Pour une voiture, on change d'échelle en utilisant le kilowatt ($1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$) ou le traditionnel cheval-vapeur ($1 \text{ ch} = 736 \text{ W}$) pour exprimer la puissance que le moteur communique aux roues.

Dans le domaine des déplacements, la puissance mécanique est le produit instantané de la vitesse et de la somme des forces qui s'opposent à l'avancement¹¹. Cela signifie que, pour vaincre des forces élevées tout en maintenant une vitesse importante, un véhicule doit être muni d'un moteur de forte puissance. Mais cela a un prix : plus lourd, plus cher, plus gourmand, plus polluant et plus dangereux ! Vouloir beaucoup de chevaux sous le capot n'est donc pas très judicieux, surtout après avoir lu les lignes qui expliquent pourquoi et comment s'en dispenser. La puissance permet aussi de fortes accélérations, celles qui nous « collent au

10. Calcul réalisé pour une personne de 75 kg montée sur un vélo de 20 kg (soit 95 kg au total) roulant à une vitesse constante de 23 km/h sur une route plate. Les forces prises en compte dans ce calcul sont la résistance au roulement et la résistance de l'air avec les valeurs suivantes : $C_{rr} = 0,006$, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ et $S \cdot C_x = 0,4 \text{ m}^2$. La puissance mécanique à fournir au vélo pour maintenir la vitesse est $P = 100 \text{ W}$ (on néglige les pertes via la transmission).

11. $P = \Sigma F \cdot v$ avec P : puissance nécessaire à l'avancement du véhicule en watts, ΣF : somme des forces qui s'opposent frontalement au déplacement en newtons, v : vitesse du véhicule en mètres par seconde.

siège». Hors d'un circuit de course, il va sans dire qu'il ne sert absolument à rien d'accélérer de 0 à 100 km/h en moins de quelques secondes et de flirter avec les 300 km/h! C'est même à l'opposé des principes de l'écoconduite qui visent, entre autres, à diminuer la consommation et à éviter les comportements dangereux. Et si le véhicule est lourd, l'accélération devient encore plus coûteuse. Puissance, accélération et vitesse de pointe restent pourtant des (contre-)performances fièrement affichées par presque tous les constructeurs automobiles, leader américain de l'électrique en tête¹²! Serait-ce le signe que les véhicules qu'ils produisent sont toujours inappropriés aux enjeux de demain ?

Des véhicules disproportionnés

On ne peut pas parler de puissance sans parler d'adaptation. Le fonctionnement d'un moteur est optimal lorsqu'il délivre sa puissance de sortie dans une certaine plage de force et de vitesse de rotation. C'est pour cela que, entre le moteur et la piste, il y a souvent divers

12. La voiture Tesla Model S Plaid (https://www.tesla.com/fr_fr/models), la première voiture mise en avant sur le site français du constructeur, affiche fièrement un passage de 0 à 100 km/h en 2,1 s, une vitesse maximale de 322 km/h et une puissance de pointe de 1 020 ch! Ce qui n'est pas dit, c'est que l'autonomie annoncée de 600 km en cycle WLTP est divisée au minimum par 7 si on pousse la voiture à son maximum (calcul réalisé en ne prenant en compte que la résistance au roulement et la résistance de l'air avec les paramètres suivants : $m = 2\,162$ kg, $C_r = 0,008$, $\rho = 1,225$ kg/m³, $S \cdot C_x = 0,50$ m² et en comparant les forces de résistance pour deux vitesses, $v = 90$ km/h et $v = 322$ km/h). La puissance nécessaire pour atteindre 322 km/h est plus de 25 fois supérieure à celle qui permet de rouler à 90 km/h! Lors du passage de 0 à 100 km/h en 2,1 s, l'accélération de la voiture est égale à plus de 8 fois l'accélération maximale du cycle WLTP.

organes de transmission qui modifient le rapport entre force et vitesse, en privilégiant l'un *ou* l'autre¹³. On peut citer comme exemples la boîte de vitesses, les plateaux, les pignons, les variateurs et les roues (dont le diamètre a une influence). Ces organes ne fournissent pas de puissance au moteur (ils lui en prélèvent même un peu à cause de petites pertes), mais ils lui permettent de donner le meilleur de lui-même en l'adaptant aux diverses situations que rencontre le véhicule : démarrage, accélération, côte, terrain plat, allure réduite, etc. Parmi les nombreux systèmes qui existent, ceux à variation continue (comme sur les scooters) sont plus faciles à utiliser, mais génèrent plus de frottements que ceux qui changent de rapport par paliers.

Encore faut-il que le moteur soit adapté au véhicule qu'il entraîne. Un moteur surpuissant sera la plupart du temps sous-utilisé et ne fonctionnera que rarement dans sa zone optimale, conduisant selon les cas à des consommations inutiles et à des désordres qui nuisent autant au moteur qu'à l'environnement. À l'opposé, un moteur sous-dimensionné sera souvent surmené, au risque de surchauffer, voire de casser. Cependant, il n'y a pas trop d'inquiétudes à ce sujet car les constructeurs savent le traiter. Le vrai problème n'est pas ici.

13. Une autre façon d'exprimer la puissance pour les mouvements de rotation est $P = C \cdot \omega$ avec P : puissance fournie sur une pièce en rotation (par exemple, un arbre moteur ou une roue) en watts, C : couple ou moment (exprime la force appliquée autour d'un axe) en newtons-mètres (Nm), ω : vitesse de rotation en radians par seconde. On voit que, pour une même puissance, on peut avoir soit un fort couple et une petite vitesse de rotation, soit un faible couple et une grande vitesse de rotation.

Par-dessus tout, quelle que soit la technologie du moteur, l'adaptation la plus importante se joue au niveau de l'adéquation entre le véhicule et son utilisation! En ce qui concerne le poids, même s'il est difficile d'édicter une règle universelle, on peut dire qu'un véhicule commence à être inadapté lorsqu'il est plus lourd que ce qu'il transporte. C'est, hélas, le cas de toutes les voitures actuelles, sans même parler du 4 x 4 comme moyen de transport unipersonnel en milieu urbain! Pour ce qui est de la taille, vous constaterez que la grande majorité des véhicules sur nos routes ne transporte qu'une seule personne, alors qu'ils sont conçus pour en accueillir cinq, avec bagages. Le problème est le même au sujet de la vitesse: en ville, on utilise des bolides capables d'atteindre 150 km/h (voire 200 km/h et plus) pour rouler à une vitesse moyenne de l'ordre de... 20 km/h¹⁴, qui est à peu près celle d'un-e cycliste. Tout cela étant dit, nous pouvons maintenant lever les capots pour découvrir les dessous des différents types de moteurs.

L'INSOUTENABLE MOTEUR THERMIQUE

Un moteur thermique à combustion transforme l'énergie chimique de son combustible en chaleur intense, puis convertit cette dernière en énergie mécanique. C'est une

14. Julien Bonnet, «Dans le Paris "à 30km/h", les voitures roulaient à 13,1 km/h en moyenne en septembre», BFM Business, 5 octobre 2021. https://www.bfmtv.com/auto/dans-le-paris-a-30km-h-les-voitures-roulaient-a-13-1-km-h-en-moyenne-en-septembre_AN-202110050282.html

machine thermique qui accomplit la tâche ingrate de produire une énergie noble à partir d'une énergie dégradée. En effet, il n'est pas facile de créer du mouvement à partir de chaleur, d'autant moins si celle-ci est trop « tiède ». En vertu des lois de la thermodynamique, le rendement de ce type de moteur est donc inévitablement restreint¹⁵.

Les combustibles sont la plupart du temps des hydrocarbures (gazole, essence, gaz, divers carburants d'origine végétale...) que l'on fait entrer en combustion en présence de l'oxygène de l'air. Cette inflammation produit de la chaleur et rejette majoritairement de la vapeur d'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2). Mais la réaction n'est jamais parfaite et il y a des interactions avec les autres composés de l'atmosphère (notamment l'azote). Elle génère donc aussi toute une palette de résidus indésirables et dangereux pour la santé (particules fines, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, composés organiques volatiles, ozone). On peut la résumer à l'équation chimique très simplifiée suivante :

Hydrocarbures (C_xH_y) + dioxygène (O_2) → eau (H_2O) + dioxyde de carbone (CO_2) + chaleur + résidus de combustion.

Le rendement de cette combustion est en général assez bon (presque tout le carburant est brûlé). En revanche, c'est pour transformer la chaleur (énergie dégradée) en mouvement (énergie noble) que cela se gâte, avec un rendement

15. Théorème de Carnot pour un moteur thermique : $\eta < 1 - T_f/T_c$ avec η : rendement du moteur, T_f : température de la source froide (air ambiant) en kelvins, T_c : température de la source chaude (combustion du carburant) en kelvins.

qui tourne autour des 25 % et qui plafonne à environ 40 %¹⁶ dans des conditions idéales de laboratoire, difficilement reproductibles sur les routes. Les 60 à 75 % restants partent sous forme de chaleur.

La très grande majorité des véhicules roulants et des embarcations flottantes motorisés fonctionne avec des moteurs à combustion interne à quatre temps. Certains deux-roues motorisés utilisent encore des moteurs à deux temps à essence, plus compacts, mais moins économes en carburant et plus polluants. Le principe est à peu près le même dans tous les cas : la combustion du carburant dans des cylindres produit des gaz chauds qui poussent des pistons, lesquels entraînent un arbre moteur dont la rotation est transmise vers les roues. Cette technologie est utilisée depuis plus de cent ans, mais comporte de nombreux inconvénients :

- la production massive de CO₂, responsable du réchauffement climatique ;
- des émissions de résidus de combustion qui polluent l'air et mettent notre santé en danger ;
- du bruit ;
- l'utilisation de combustibles de plus en plus rares et dont l'extraction et la production ont de lourds impacts sur l'environnement ;

16. IFP Énergies nouvelles, « Les véhicules essence et diesel », en cours de mise à jour. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/transports/les-vehicules-essence-et-diesel>

- des performances amoindries en cas de fonctionnement irrégulier (typiquement en milieu urbain);
- une fiabilité limitée et beaucoup d'entretien.

On peut noter quelques légères différences d'une technologie à l'autre. Les meilleurs rendements sont obtenus avec les moteurs Diesel, ce qui explique leur prédominance dans les transports terrestres et maritimes. Ils rejettent donc un peu moins de CO₂ au kilomètre que les moteurs à essence ou à gaz. Ils émettent toutefois plus de particules fines et d'oxydes d'azote. Du point de vue des résidus de combustion, les moteurs à gaz sont les plus propres. Cependant, les fuites de gaz, qui se produisent tout au long de la chaîne de production et d'approvisionnement, ont un fort pouvoir d'effet de serre.

Face aux risques sanitaires que les moteurs thermiques font peser sur la population, la législation tente d'imposer des limites de rejets à ne pas dépasser. Mais dans un monde où puissance, vitesse et grosseur sont encore la norme, l'équation est difficile, voire impossible, à résoudre. À tel point que certains constructeurs en arrivent à tricher en se contentant d'être conformes uniquement le jour du test, au risque d'être démasqués (comme dans l'exemple de l'affaire surnommée « dieselgate¹⁷ »). Divers accessoires tentent de limiter les résidus les plus nocifs pour la santé. On peut

17. « Dieselgate : l'affaire continue d'avancer à deux vitesses entre l'Europe et les États-Unis », latribune.fr, 4 juin 2022. <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/automobile/dieselgate-l-affaire-continue-d-avancer-a-deux-vitesses-entre-l-europe-et-les-etats-unis-920605.html>

citer les filtres à particules, les catalyseurs, les vannes de recirculation et les additifs chimiques. Mais comme ils cumulent une légère hausse de la consommation (donc des émissions de CO₂) et un fonctionnement très imparfait en conditions réelles, ils ne changent pas fondamentalement la donne quant aux nuisances des moteurs thermiques.

L'aéronautique utilise principalement des moteurs à réaction et à turbo-propulsion. L'éjection des gaz chauds résultant de la combustion de kérosène (hydrocarbure proche du gazole) fait avancer directement l'avion ou entraîne une turbine reliée à une hélice. Ces moteurs ont l'avantage d'être légers par rapport à la très grande puissance qu'ils peuvent délivrer. Ils sont en revanche extrêmement gourmands en carburant et très polluants ! Un autre inconvénient majeur est leur bruit assourdissant.

Dans le domaine de la combustion, il n'y a donc aucun champion toute catégorie. En dépit de tous leurs défauts, les moteurs thermiques doivent leur succès à la commodité de leurs carburants, hautement énergétiques et faciles à stocker à bord des véhicules. Avec un réservoir d'une cinquantaine de litres, une voiture thermique standard peut parcourir environ 1 000 kilomètres. Selon leur provenance, ces combustibles peuvent être classés en grandes catégories : les hydrocarbures fossiles, les biocarburants et les carburants de synthèse. Voyons ce qui se cache derrière ces mots.

Carburants fossiles, d'un autre âge

Les hydrocarbures fossiles sont issus de la décomposition d'anciens organismes vivants piégés dans des couches

géologiques depuis des dizaines ou des centaines de millions d'années.

Pour simplifier, on les trouve sous trois grandes formes : charbon, pétrole et gaz. Le charbon a longtemps été utilisé pour tous les engins à vapeur. Très polluant et peu pratique, il a maintenant laissé la place au pétrole et au gaz qui, après raffinage, donnent de l'essence, du gazole, du gaz de pétrole liquéfié (GPL), du gaz naturel pour véhicules (GNV).

Après avoir littéralement jailli du sol au début de leur exploitation, les hydrocarbures liquides et gazeux sont maintenant devenus plus difficiles à extraire. Leur raréfaction, pour cause de surutilisation, a fait émerger l'exploitation de gisements dits « non conventionnels », dont le bilan environnemental et énergétique est désastreux ! Dans le cas du gaz et du pétrole de schiste, il faut atteindre et forer la roche convoitée, puis la fissurer à l'aide d'eau sous pression et de produits chimiques pour libérer les petites bulles de gaz ou de pétrole qui y sont emprisonnées. Pour ce qui est des schistes bitumineux, on décape le sol sur plusieurs mètres d'épaisseur pour mettre à découvert une couche de sable mêlée à du goudron. On chauffe ensuite très fort ce substrat (en brûlant du combustible) pour en retirer un peu de pétrole. Jusqu'où serons-nous capables d'aller pour extraire les dernières gouttes d'hydrocarbures ?

En moins de deux siècles, nous avons brûlé une grande partie des ressources que la nature a mis des millions d'années à produire ! La panne sèche pourrait arriver, mais nous ne devons surtout pas l'attendre, car tout ce que nous continuons à brûler émet toujours du dioxyde de carbone,

qui nous pousse un peu plus vers l'emballement thermique. Nous n'avons pas le choix: si nous voulons conserver des conditions de vie supportables sur Terre, nous devons définitivement faire une croix sur les hydrocarbures fossiles! C'est un défi de taille lorsque l'on sait que nos transports reposent actuellement presque exclusivement sur eux¹⁸. Avons-nous des solutions de remplacement?

Les pernicious biocarburants

Présentés comme une alternative aux carburants fossiles, les biocarburants (ou agroc carburants) sont des hydrocarbures issus de la matière organique vivante (non fossile). Les principales sources d'approvisionnement sont l'agriculture (colza, tournesol, palme, soja, betterave, canne à sucre...), les forêts (bois), les zones humides (tourbe) et parfois l'aquaculture ou la pêche (huiles de poisson). L'huile de baleine fut l'un des premiers biocarburants exploités à grande échelle... Derrière l'image verte qu'on leur attribue se cache une réalité désastreuse pour l'environnement.

La monoculture des palmiers à huile détruit les forêts primaires d'Asie du Sud-Est qui abritent une extraordinaire biodiversité, dont fait partie l'un de nos plus proches cousins, l'orang-outan, maintenant menacé d'extinction! Plus locales, les filières européennes du maïs, du blé, de la betterave (pour le « bioéthanol »), du colza et

18. IEA, "Energy consumption in transport by fuel in the Net Zero Scenario, 2000-2030", mis à jour 26 octobre 2022. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/energy-consumption-in-transport-by-fuel-in-the-net-zero-scenario-2000-2030>

du tournesol (pour le « biodiesel ») se targuent d'être plus responsables. Hélas, les millions d'hectares destinés à la production de biocarburant prennent déjà la place de cultures alimentaires, et même d'espaces naturels. Cela revient à donner la priorité à l'alimentation des voitures au détriment de celle des êtres vivants. Par ailleurs, avec sa mécanisation, sa consommation d'eau et ses produits chimiques, cette agriculture industrielle intensive est très polluante. Les agrocaburants n'assurent pour l'heure que quelques pourcents des besoins énergétiques de nos déplacements¹⁹. Sans même parler de leur généralisation, il serait écocidaire et génocidaire d'envisager leur utilisation à plus grande échelle, ne serait-ce que pour assurer une poignée de pourcents de plus de notre consommation démesurée. Un tel accaparement de terres suffirait en effet à mettre en péril à la fois la sécurité alimentaire de nombreuses populations et de la pérennité de précieux écosystèmes²⁰.

Les biocarburants affichent un bilan carbone prétendument neutre, car la croissance des végétaux utilisés capterait la même quantité de CO₂ que celle émise par

19. IEA, "Energy consumption in transport by fuel in the Net Zero Scenario, 2000-2030", art. cité.

20. Joachim Voisin-Marras, « Biocarburants : avancée vers l'impasse », Canopée, rapport octobre 2021. https://www.canopee-asso.org/wp-content/uploads/2021/10/Canopee-RAPPORT_BIOCARBURANTS-impasse.pdf

leur combustion. La réalité est bien moins glorieuse²¹. D'une part, ces cultures prennent directement ou indirectement la place d'écosystèmes qui sont, eux, de véritables puits de carbone (ils absorbent plus de CO₂ qu'ils n'en émettent). D'autre part, le rendement énergétique de ces agro-carburants est très mauvais : il faut injecter presque autant d'énergie pour les produire que d'énergie qu'ils fournissent aux moteurs. Et même si l'on arrivait d'un coup de baguette magique à atteindre la neutralité carbone, serait-il raisonnable de transformer de vastes surfaces de notre planète en déserts de monoculture végétale, exempts de toute biodiversité, juste pour alimenter nos moyens de transport énergivores ? Entre vivre et conduire, il faudrait choisir.

Les biocarburants de deuxième génération, issus de sous-produits de l'agriculture et de déchets organiques, semblent *a priori* plus vertueux. Ils permettent notamment d'obtenir du biogaz par méthanisation. Mais rappelons que le méthane est un puissant gaz à effet de serre. Les installations doivent donc être irréprochables pour traquer la moindre fuite. De toute façon, le parc actuel de véhicules consomme une quantité d'énergie gigantesque par rapport à ce que cette filière est capable de fournir. Il serait donc complètement absurde, et même impossible, de produire assez de déchets, avec tout le gaspillage

21. Angela Bolis, « Les biocarburants émettent plus de CO₂ que l'essence et le diesel », *Le Monde*, 28 avril 2016. https://www.lemonde.fr/energies/article/2016/04/28/les-biocarburants-emettent-plus-de-co2-que-l-essence-et-le-diesel_4910371_1653054.html

de ressources que cela implique, pour satisfaire l'appétit trop féroce de nos engins à moteur ! Il faut se rendre à l'évidence : les biocarburants ne sont pas une solution.

Halte à tous les hydrocarbures

Il est possible de synthétiser des substituts de pétrole. Quelle que soit la méthode employée, il faut de la matière première, le plus souvent du charbon, et beaucoup d'énergie ! Cela a pu satisfaire une demande stratégique en période de difficultés d'approvisionnement en pétrole, par exemple en Allemagne pendant la Seconde Guerre mondiale. Mais cette pratique n'a aucun intérêt environnemental, puisqu'elle émet globalement plus de CO_2 que l'utilisation directe du pétrole fossile. On peut aussi utiliser la biomasse (bois, tourbe, produits et sous-produits agricoles) pour synthétiser du carburant, mais on retombe dans les travers des biocarburants.

Et si l'on se servait de l'encombrant CO_2 et de l'abondante eau (H_2O) comme matières premières pour fabriquer des hydrocarbures ? Cette idée alléchante se heurte à la réalité physico-chimique. D'une part, il faut capturer le gaz carbonique au plus près de son émission. Nous savons réaliser des installations très complexes et coûteuses à la sortie des cheminées des usines les plus émettrices pour ne capturer qu'une toute petite partie du CO_2 . Mais nous sommes encore totalement incapables de le faire à la sortie d'un pot d'échappement. D'autre part, rappelons que le CO_2 n'est qu'un déchet de combustion. Le retransformer en carburant demande inévitablement plus d'énergie que celle déjà libérée par la combustion

de ce même carburant (il est toujours plus facile de descendre une pente que de la remonter). Le serpent se mord donc la queue. Des entrepreneurs ont essayé de noyer le poisson en utilisant des algues pour convertir le CO₂ en carburant²². Mais pour cette transformation, les algues aussi ont besoin d'énergie, en l'occurrence solaire, et elles ont un rendement plutôt faible. Pour répondre à la demande d'aujourd'hui, il faudrait transformer une grande partie de nos espaces naturels en bassins de culture. On en revient encore au choix entre la vie et le réservoir...

Ne tournons pas autour du pot : dans l'état actuel de notre consommation, fossiles ou pas, tous les hydrocarbures sont des impasses. Pour limiter les dégâts, on pourrait tout à fait concevoir des voitures qui ne consommeraient qu'un litre de carburant aux 100 kilomètres. Mathématiquement, elles ressembleraient vaguement à des vélos à quatre roues, et c'est bien vers ce type de véhicules qu'il faut nous diriger. Mais équipés de moteurs thermiques, ces engins continueraient de générer des nuisances inacceptables. La réhabilitation est donc impossible pour la combustion. Nous devons tourner la page. L'Union européenne semble avoir amorcé le mouvement

22. Mathilde Damgé, « Prix du carburant : le biopétrole, un miracle qu'on nous aurait caché ? », *Le Monde*, 8 novembre 2018. https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/11/08/le-biopetrole-un-miracle-qu-on-nous-aurait-cache_5380771_4355770.html

en interdisant la vente de voitures ou de camionnettes neuves tournant à l'essence ou au gazole à partir de 2035²³.

ÉLECTRIQUE MAIS PAS MAGIQUE !

Un moteur électrique convertit de l'énergie électrique en énergie mécanique grâce à un jeu d'aimants et/ou d'enroulements électromagnétiques parcourus par du courant. Le rendement de conversion de ce moteur est souvent assez bon (il peut dépasser 90%²⁴), car il a le privilège d'utiliser en entrée une énergie noble : l'électricité. Hélas, cette dernière ne vient pas de nulle part ! Il faut bien en premier lieu la produire, puis l'acheminer et éventuellement la stocker, ce qui fait chuter vertigineusement le rendement global (de la source primaire d'énergie jusqu'aux roues). Le moteur électrique comporte tout de même un certain nombre d'avantages relatifs.

Il est réversible. Un moteur électrique tourne lorsqu'on lui fournit de l'électricité. Mais si on le fait tourner avec de l'énergie mécanique, il peut produire de l'électricité. Il devient dans ce cas un générateur. Cette aptitude est utilisée pour récupérer une part d'énergie dans les descentes et dans les phases de décélération.

23. Boran Tobelem, « La fin des voitures thermiques dans l'Union européenne en 2035 », *touteurope.eu*, 7 novembre 2022. <https://www.touteurope.eu/environnement/podcast-la-fin-des-voitures-thermiques-dans-l-union-europeenne-en-2035/>

24. Mael Pilven, « Rendement record (97%) pour ce moteur électrique logé dans une roue », *InsideEVs*, 27 juin 2022. <https://insideevs.fr/news/593904/moteur-electrique-roue-lightyear/>

Avec peu de pièces qui s'usent et beaucoup moins d'horlogerie que dans un moteur thermique, le moteur électrique est fiable et a une durée de vie très importante. Son point faible reste cependant la surchauffe.

Le moteur électrique est bien plus silencieux qu'un moteur à combustion. Cependant, cette qualité est parfois dérisoire pour une voiture car, au-delà de 30 ou 40 km/h, les bruits de roulement sur la route et les bruits aérodynamiques prennent progressivement le dessus²⁵. L'absence de bruit à faible vitesse peut aussi devenir un inconvénient en ville, où les usagers non motorisés n'entendent pas arriver les véhicules électriques. Certaines voitures électriques vont donc jusqu'à émettre un bruit artificiel pour signaler leur présence.

Équipé d'un système de variation électronique, le moteur électrique fonctionne dans une large gamme de vitesses et supporte les arrêts et les démarrages répétés. Il peut se passer de boîte de vitesses mécanique et d'embrayage. Cela simplifie l'architecture du véhicule et limite son poids. Toutefois, cet aspect positif doit être relativisé par la complexité des centrales de production d'électricité (même si elles ne sont pas à bord du véhicule) et par le poids très significatif des batteries embarquées (sauf

25. Observatoire du bruit en Île de France, « Des solutions pour prévenir et lutter contre le bruit : faire baisser la vitesse », septembre 2012. [https://www.bruitparif.fr/pages/Autres%20actualites/2016-06-20%20Baisse%20des%20vitesses%20limite/2012-10-29%20-%20Fiche%20pratique%20Faire%20baisser%20la%20vitesse%20\(Aller%20plus%20loin\)%20-%20Bruitparif.pdf](https://www.bruitparif.fr/pages/Autres%20actualites/2016-06-20%20Baisse%20des%20vitesses%20limite/2012-10-29%20-%20Fiche%20pratique%20Faire%20baisser%20la%20vitesse%20(Aller%20plus%20loin)%20-%20Bruitparif.pdf)

pour les engins reliés en permanence au réseau, comme les trains).

Le moteur électrique n'émet pas de polluants sur le lieu de son utilisation, mais la pollution est déportée sur les sites de production de l'énergie. Rappelons aussi qu'indépendamment de son moteur, un véhicule émet des particules fines²⁶, soit directement via l'abrasion des freins, des pneumatiques et de la chaussée, soit indirectement en remettant en suspension, dans les tourbillons de son sillage, les particules qui étaient au sol. Ces émissions sont aggravées par le poids, le volume et la vitesse des véhicules.

Un certain nombre d'atouts semblent malgré tout donner l'avantage au moteur électrique dans beaucoup de situations, et plus particulièrement en ville. Pourtant, même électrique, la voiture dans son format actuel reste trop encombrante pour le milieu urbain, qui par ailleurs offre de bien meilleures possibilités de déplacement : marche, vélo et transport en commun. En fait, l'industrie automobile mise sur l'électrique pour sauver temporairement son image et sa peau, sans pour autant repenser radicalement ses véhicules. Ne soyons pas naïfs : « électrique » ne rime pas forcément avec « écologique » ! En effet, l'électricité ne règle pas le problème du gaspillage énergétique dû à l'utilisation de véhicules inadaptés. Ensuite, la fabrication

26. Ademe, « Émission des véhicules routiers – Les particules hors échappement », avril 2022. <https://librairie.ademe.fr/cadic/6878/emission-vehicules-routiers-particules-hors-echappement-2022.pdf>

du moteur électrique est plus gourmande en ressources critiques que celle de son cousin thermique. Utilisé dans les bobinages et les conducteurs, le cuivre, extrait de mines énergivores et à forts impacts environnementaux, va commencer à se raréfier à cause d'une demande croissante²⁷. Les terres rares (néodyme, dysprosium, samarium), qui entrent dans la composition des aimants permanents, sont obtenues en excavant le sol, puis en utilisant des procédés chimiques polluants et très consommateurs d'eau pour les extraire du minerai. Elles sont par ailleurs inégalement réparties à la surface de notre planète, ce qui pose des problèmes géostratégiques²⁸. Si on regarde les émissions de CO₂ liées à la fabrication, sans même parler de la batterie, le bilan du véhicule électrique est un peu plus mauvais que celui de son équivalent thermique²⁹. Pour compléter la comparaison et tempérer les prétentions écologiques de la motorisation électrique, penchons-nous sur la façon dont est produite et stockée l'électricité.

27. Emmanuel Hache, « Le cuivre dans la transition énergétique : un métal essentiel, structurel et géopolitique ! », IFP Énergies nouvelles, 4 décembre 2020 <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/cuivre-transition-energetique-metal-essentiel-structurel-et-geopolitique>

28. Emmanuel Hache, « Les terres rares dans la transition énergétique : quelles menaces sur les "vitamines de l'ère moderne" ? », IFP Énergies nouvelles, 7 janvier 2021. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/les-terres-rares-transition-energetique-quelles-menaces-les-vitamines-lere-moderne>

29. Selon les analyses de cycle de vie réalisées par Green NCAP, une Renault ZOE R110 ZE50 a un impact à la fabrication, hors batterie, équivalent à 36,8 gCO₂/km, contre 32,5 gCO₂/km pour une Peugeot 208 1.5 Blue HDI 100 diesel, soit 13 % plus.

Électricité carbonée

Une centrale thermique utilise une source de chaleur pour chauffer de l'eau qui se transforme en vapeur et entraîne des turbines. C'est une machine thermique au rendement restreint. Les turbines sont reliées à des alternateurs (générateurs) qui produisent de l'électricité en tournant.

On dit que l'électricité est carbonée lorsque la centrale utilise comme source de chaleur la combustion d'hydrocarbures fossiles (gaz, fioul et charbon), laquelle émet du dioxyde de carbone (CO₂) et des polluants atmosphériques. En France, un peu moins de 10% de l'électricité est encore produite de cette façon³⁰. Dans le monde, ce sont presque les deux tiers, avec une majorité de charbon³¹! Pour la même énergie produite, le charbon est deux fois plus émetteur de CO₂ que le gaz. Le fioul se situe entre les deux. Ces centrales sont toutes polluantes, mais elles ont l'avantage de pouvoir répondre rapidement à une forte demande d'électricité.

Faire rouler des voitures électriques à partir d'électricité carbonée n'a absolument aucun intérêt écologique : cela consiste à brûler les indésirables hydrocarbures dans

30. IEA, "Energy Statistics Data Browser, Energy supply, Electricity generation by source, France, 1990-2021", mis à jour 18 août 2022. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=FRANCE&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>

31. IEA, "Energy Statistics Data Browser, Energy supply, Electricity generation by source, World, 1990-2020", mis à jour 18 août 2022. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>

des centrales, puis à acheminer l'électricité jusqu'au moteur électrique via une longue chaîne de transport, de conversion et de stockage (batteries) comportant de multiples pertes³² (quelques pourcents à chaque étape). Même si le rendement énergétique des centrales thermiques (de l'ordre de 35 %, au mieux 60 %)³³ est un peu meilleur que celui des moteurs thermiques des véhicules, le jeu n'en vaut pas la chandelle : les hydrocarbures fossiles ne sont pas plus admissibles dans des unités de production d'électricité que sous des capots de voitures ! N'y aurait-il pas une autre source de chaleur intense pour faire tourner des centrales ?

Les temps longs du nucléaire

La grande majorité de l'énergie qui fait rouler les véhicules électriques français est d'origine nucléaire³⁴. En revanche, dans le monde, cette source n'assure qu'une dizaine de pourcents de la production d'électricité³⁵. Que peut-on espérer de cette technologie qui, pour l'heure, joue un rôle mineur dans le domaine global des transports électriques ?

32. Jérôme Fraisse, « Synthèse rendement voiture électrique », 2017. <https://jfraisse.pagesperso-orange.fr/fichiers/Synthese%20rendement%20voiture%20electrique.odp>

33. « Les centrales à cycle combiné gaz, une solution plus souple et moins polluante », *The Agility Effect*, 14 septembre 2020. <https://www.theagilityeffect.com/fr/article/les-centrales-a-cycle-combine-gaz-une-solution-plus-souple-et-moins-polluante/>

34. IEA, "Energy Statistics Data Browser, Energy supply, Electricity generation by source, France, 1990-2021", art. cité.

35. IEA, "Energy Statistics Data Browser, Energy supply, Electricity generation by source, World, 1990-2020", art. cité.

Commençons par comprendre un peu son fonctionnement. Une centrale nucléaire est une centrale thermique dont la chaleur provient de la modification des noyaux des atomes. Le procédé utilisé actuellement (ainsi que dans les centrales en construction ou en projet) s'appuie sur la fission du lourd noyau des atomes d'uranium. En absorbant un neutron, ce noyau devient instable et se casse en deux (ou trois) morceaux. Cette réaction libère d'autres neutrons, qui pourront reproduire le phénomène, tout en émettant des rayonnements et de grandes quantités de chaleur. On peut ainsi chauffer de l'eau dans plusieurs circuits et la vapeur obtenue fait tourner des turbines reliées à des alternateurs qui produisent de l'électricité.

L'énergie nucléaire est une énergie ultrafossile au regard de l'ancienneté de la formation de sa matière première. En effet, les atomes lourds comme l'uranium sont le fruit de réactions qui ont eu lieu au cœur de très grosses étoiles. Ils se sont éparpillés dans l'univers lorsque ces étoiles ont explosé³⁶. Il y a environ 5 milliards d'années, notre système solaire s'est formé en agrégeant des gaz et divers débris stellaires, dont certains contenaient de l'uranium. Aujourd'hui, alors que le système solaire est à maturité, la Terre ne reçoit quasiment plus de poussières d'étoiles qui lui fourniraient de nouveaux atomes. Tout cela pour dire que l'énergie nucléaire est définitivement non renouvelable!

36. Hubert Reeves, *Poussières d'étoiles*, Le Seuil, 1984.

À leur avantage, les barres de combustible à l'uranium placées dans le cœur des réacteurs des centrales ont une très grande densité énergétique (elles produisent beaucoup d'énergie dans un faible volume et pendant une durée importante). Mais il ne faut pas oublier de prendre en compte l'extraction et l'enrichissement. Dans les mines d'uranium, la concentration de cet atome est très faible, ce qui oblige à excaver de grandes quantités de roche, puis à les soumettre à des procédés chimiques. Ensuite, l'uranium naturel comporte plusieurs isotopes (composition légèrement différente du noyau de l'atome), dont un seul est fissile (son noyau est capable d'être « cassé » pour libérer de l'énergie). La proportion de départ d'uranium fissile est faible (moins de 1%). Il faut donc l'enrichir, en effectuant une sorte de tri, pour atteindre une part de 3 à 5%³⁷.

Cette filière de production d'électricité n'a pas été choisie pour son efficacité énergétique, qui est globalement assez médiocre. Souvenons-nous que les premiers réacteurs servaient à l'origine à transformer l'uranium en plutonium pour les bombes atomiques. Les grandes quantités de chaleur que cela générerait furent par la suite utilisées pour produire de l'électricité. Côté machine thermique, le rendement ne dépasse guère les 30%, principalement pour des raisons de sécurité. En effet, pour parer à la surpression, la température de la « chaudière » est

37. Ministère de la Transition écologique, « Approvisionnement en uranium et cycle du combustible nucléaire », 24 novembre 2017. <https://www.ecologie.gouv.fr/approvisionnement-en-uranium-et-cycle-du-combustible-nucleaire>

limitée à 320 °C³⁸. Et pour éviter les contaminations, la chaleur passe par des échangeurs intermédiaires étanches avant d'atteindre les turbines et la source de refroidissement. Pour ce qui est du combustible, même s'il est utilisé à des fins civiles, il n'en reste pas moins problématique. En effet, lorsqu'il n'est plus assez actif pour faire tourner la centrale, il doit être remplacé. Or le combustible usagé contient tout une gamme d'éléments radioactifs : les noyaux des atomes continuent à se modifier en libérant des rayonnements dangereux et de la chaleur. Certains composés sont aussi chimiquement toxiques. Tant et si bien que cette matière peut affecter les êtres vivants jusqu'au cœur de leurs cellules pendant des périodes allant jusqu'à des centaines de milliers d'années. Ces échelles de temps dépassent notre entendement. À titre de comparaison, nos ancêtres *Homo sapiens* se sont installés en Europe, sur les terres de leurs cousins *Homo neanderthalensis*, il y a moins de 50 000 ans. Quel humain moderne responsable peut engager l'avenir de ses descendants pendant une aussi longue période en leur léguant des déchets nocifs dont il ne sait pas quoi faire ?

Pour réduire la production de déchets radioactifs, on a cru un temps aux surgénérateurs, des centrales dites « de quatrième génération » qui permettraient de mieux exploiter le potentiel du combustible. Mais de telles

38. Autorité de sûreté nucléaire, « La sûreté des centrales nucléaires », Dossiers pédagogiques, mis à jour le 16 mars 2023. <https://www.asn.fr/1-asn-informe/dossiers-pedagogiques/la-surete-des-centrales-nucleaires>

installations sont si complexes et si dangereuses que nous n'avons jamais réussi à en faire fonctionner une de façon satisfaisante. Nous avons finalement eu la sagesse de les arrêter (en France, le prototype Superphénix a été mis définitivement à l'arrêt en 1998, et son petit frère Astrid abandonné en 2019). Actuellement, nous n'avons pas mieux à proposer que d'enterrer ou de laisser à l'air libre nos déchets nucléaires. Nous faisons le pari très risqué que nos héritiers garderont en mémoire qu'il ne faut pas y toucher, ou qu'ils sauront les récupérer pour les brûler une seconde fois dans les surgénérateurs qu'ils auront éventuellement réussi à mettre en œuvre. Quel beau cadeau !

Un autre danger des centrales nucléaires est le risque avéré d'accident majeur. Les catastrophes de Tchernobyl en 1986 et de Fukushima Daiichi en 2011 sont les exemples les plus tragiques de ce qui ne devait jamais arriver. Complexe et difficile à maîtriser, cette technologie, nécessite une vigilance sans faille. Or la sécurité des installations est ébranlée par de nombreuses menaces : catastrophes naturelles, guerre, attaque terroriste, faillite économique, instabilité politique, perte de compétences, vieillissement des infrastructures, réchauffement climatique. Il n'est pas raisonnable de continuer sur une voie aussi explosive. C'est pourtant la direction que semble vouloir prendre la France en prolongeant artificiellement la durée de vie de ses anciennes centrales et en essayant très péniblement d'en construire de nouvelles. Pour l'heure, dans notre pays, seul l'EPR (*Evolutionary Power Reactor*) de Flamanville est sorti de terre. Cette tête de série accuse un dépassement de budget d'au moins 10 milliards d'euros et

au minimum douze ans de retard. Si elle démarre un jour, aux dernières nouvelles, ce ne sera pas avant mi-2024³⁹...

Pour sa défense, la filière nucléaire met en avant de faibles émissions de CO₂. En effet, la fission des atomes ne libère pas de dioxyde de carbone. Seules la fabrication des centrales et la logistique complexe de toute la chaîne nucléaire ternissent son bilan carbone. Mais cette technologie pose tellement de problèmes extrêmement graves qu'elle ne peut pas constituer une solution acceptable face au réchauffement climatique. De toute façon, pour cause de complexité des chantiers, le renouvellement et la rénovation du parc de centrales ne pourront pas arriver à temps pour décarboner massivement nos déplacements⁴⁰.

Des voies parallèles font de temps à autre parler d'elles. Le thorium, plus abondant que l'uranium, pourrait être à la base d'une autre industrie nucléaire⁴¹. Dans des installations à l'état de concept, le cycle du thorium affiche de belles promesses théoriques : plus économe en combustible, déchets à durée de vie moins longue, sûreté

39. Pierre-Marie Puaud avec AFP, «Six mois de retard supplémentaire pour l'EPR de Flamanville: un chantier sans fin...», France 3 Normandie, 16 décembre 2022. <https://france3-regions.francetvinfo.fr/normandie/manche/flamanville/six-mois-de-retard-supplementaire-pour-l-epr-de-flamanville-c-est-un-chantier-sans-fin-2677464.html>

40. Bernard Deboyser, «Trop cher et trop lent, le nucléaire ne sauvera pas le climat», *Révolution énergétique*, 2 octobre 2019. <https://www.revolution-energetique.com/trop-cher-et-trop-lent-le-nucleaire-ne-sauvera-pas-le-climat/>

41. Isabelle Dumé, «Le thorium peut-il rivaliser avec l'uranium comme combustible nucléaire ?», *Polytechnique insights*, 30 mars 2022. <https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/energie/les-dernieres-avancees-technologiques-de-lenergie-nucleaire/le-thorium-peut-il-rivaliser-avec-luranium-comme-combustible-nucleaire/>

accrue. Il faudrait donc attendre quelques décennies de développement et encore une dizaine d'années de fonctionnement pour découvrir les failles de ces réacteurs restés dans les cartons. Même si certains pays qui ont du thorium dans leur sol semblent vaguement s'y intéresser, cette piste ne répondra jamais à temps au besoin urgent de mutation de nos transports⁴².

Le véritable Graal de l'énergie nucléaire, c'est la fusion ! Cela consiste à rapprocher deux noyaux d'atomes très légers d'hydrogène pour qu'ils en forment un plus lourd d'hélium en libérant une fabuleuse quantité d'énergie, sans générer trop de déchets dangereux. Ce type de réaction nucléaire se produit au cœur de notre Soleil et le fait briller. Sur Terre, on ne sait pas faire réagir l'hydrogène abondant, mais seulement ses variants plus rares : le deutérium et le tritium. L'un est extirpé de l'eau lourde qu'il faut patiemment concentrer à partir d'eau naturelle. L'autre est produit en irradiant du lithium. Mais ce n'est pas là que réside la plus grande difficulté. Pour qu'ici-bas la réaction puisse avoir lieu et qu'elle s'entretienne, il faut atteindre et maintenir des conditions de température et de pression aussi extrêmes que celles qui règnent au centre de notre astre flamboyant. La seule application de la fusion que les humains aient réussi à industrialiser est la bombe H, avec laquelle ils se sont rendus capables d'anéantir leur civilisation. Quant à une utilisation pour produire

42. Chantal Bourry, « Le réacteur au thorium : une nouvelle impasse », Réseau Sortir du nucléaire. <https://www.sortirdunucleaire.org/Le-reacteur-au-thorium-une-nouvelle-impasse>

de l'électricité, nous en sommes encore à des dizaines de lustres. Pour le moment, divers laboratoires à travers le monde tentent de provoquer des réactions contrôlées de fusion qui libèrent plus d'énergie qu'elles n'en consomment. Un seul a récemment réussi à atteindre ce premier objectif⁴³, mais il est plus tourné vers des applications militaires. D'autres programmes de recherche à vocation énergétique espèrent lui emboîter le pas. Le plus pharaonique est ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), une gigantesque machine expérimentale dont la construction implique plus de 30 pays. On saura peut-être vers 2050 si le principe peut fonctionner. Si oui, les premières centrales ne verraient le jour que vers la fin du siècle... Au lieu d'attendre immobiles un futur fiasco écologique, énergétique et financier⁴⁴, si nous ne voulons pas cuire sur place, il serait raisonnable d'apprendre dès maintenant à nous contenter de l'énergie que le Soleil envoie naturellement sur notre planète!

Les promesses des énergies renouvelables

La grande majorité des sources d'énergie disponibles sur Terre a pour origine le rayonnement solaire. Même

43. Greg De Temmerman et Rémi Delaporte-Mathurin, « Fusion nucléaire : une avancée majeure, mais le chemin reste long », *The Conversation*, 18 décembre 2022. <https://theconversation.com/fusion-nucleaire-une-avancee-majeure-mais-le-chemin-reste-long-196739>

44. Celia Izoard, « Iter, les promesses polluantes de la fusion nucléaire : l'enquête de Reporterre », *Reporterre*, 21 juin 2021. <https://reporterre.net/Iter-les-promesses-polluantes-de-la-fusion-nucleaire-l-enquete-de-Reporterre>

les gisements d'hydrocarbures fossiles sont des stocks très anciens de produits de photosynthèse. Mais nous avons vu qu'il était vivement conseillé de les laisser tranquilles. Heureusement, le soleil continue de briller, et ce, pour encore quelques milliards d'années. Il nous reste donc toujours la possibilité d'intercepter une partie de ce qu'il nous offre chaque jour. C'est la promesse des énergies renouvelables.

On peut qualifier de « renouvelable » une source d'énergie capable de se régénérer en un temps inférieur à celui d'une vie humaine. Une ressource *a priori* renouvelable ne l'est plus si on la surexploite au point de l'épuiser. De même, si une production d'énergie conduit à un appauvrissement irréversible de la biodiversité, on ne peut plus honnêtement la qualifier de « renouvelable ». Même si cette façon de produire de l'énergie est, semble-t-il, plus vertueuse que l'utilisation des combustibles cités précédemment, « renouvelable » ne signifie pas forcément « écologique ». Toute production d'énergie a un impact. Il convient donc, dans tous les cas, de modérer notre consommation d'énergie, quelle que soit son origine. La part du renouvelable dans l'électricité française est actuellement de l'ordre de 25%⁴⁵, alors qu'elle est d'environ 27% dans

45. RTE, « Bilan électrique 2021, production totale », 25 février 2022. https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/production_totale/

le monde⁴⁶. Elle provient principalement des sources suivantes : hydraulique, éolien, solaire, biomasse et déchets.

L'énergie hydraulique produit déjà de grandes quantités d'électricité, particulièrement dans les régions de montagne. C'est au départ l'énergie solaire qui active la grande pompe du cycle de l'eau. La pression (due à la différence de hauteur) et le débit de l'eau qui coule permettent de faire tourner des turbines reliées à des alternateurs qui génèrent de l'électricité. Les grandes masses d'eau stockées en hauteur dans les retenues constituent la principale réserve pour produire de l'électricité renouvelable à la demande. Et lorsqu'on a la chance de disposer de deux bassins en cascade et d'énergie en surplus sur le réseau électrique, on peut pomper l'eau d'en bas pour la remonter en haut afin de constituer un stock d'énergie potentielle. Ces installations posent tout de même des problèmes environnementaux à cause de la disparition des milieux engloutis et de la rupture de la continuité des cours d'eau dommageable à la vie aquatique. Bien qu'imparfaits, certains aménagements comme les passes à poissons limitent l'impact des petites installations hydro-électriques. Le potentiel de production pour de futures microcentrales reste cependant très limité, les meilleurs sites étant déjà occupés. L'hydro-électricité n'en reste pas moins le socle du système de production renouvelable.

46. IAE, "Energy Statistics Data Browser, Energy supply, Total energy supply by source, World", 1990-2020", art. cité.

Engendré par des différences de pression et de température entre des masses d'air, le vent tire aussi sa force du rayonnement solaire. Les éoliennes profitent de ces mouvements d'air pour faire tourner les pales de leur hélice reliée à un générateur. Sur des lieux bien exposés au vent, c'est une façon plutôt naturelle de produire de l'électricité. Leur développement est en pleine expansion, même si elles rencontrent parfois des résistances, souvent à cause de nuisances visuelles et sonores très subjectives. Pour limiter leur impact, le choix des lieux d'implantation doit prendre en compte la vie humaine et sauvage locale, notamment les populations d'oiseaux et de chauves-souris pour limiter les risques de collision et de perturbation. Oui, les éoliennes tuent des animaux volants⁴⁷, mais ne nous trompons pas de cible : les chats domestiques, les façades vitrées et les véhicules motorisés sont infiniment plus meurtriers. Ces installations ont finalement assez peu d'impact écologique, particulièrement lorsqu'elles sont implantées dans des zones déjà très appauvries par l'agriculture industrielle.

Le vent est plus fort et plus régulier en mer. On y implante donc aussi des parcs éoliens, même si leur mise en œuvre et leur entretien y sont beaucoup plus compliqués (éloignement du réseau, accès plus difficile, corrosion). Leur implantation doit là aussi se soucier de

47. Pascaline David, « Les éoliennes sont-elles un danger pour les oiseaux? », *Le Monde*, 28 mars 2022. https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2022/03/28/les-eoliennes-sont-elles-un-danger-pour-les-oiseaux_6119502_4355770.html

la préservation des milieux marins. Sur terre ou en mer, le vent n'est jamais disponible à 100% du temps. Malgré des périodes de creux, il offre une répartition temporelle intéressante car il peut souffler aussi bien la nuit que le jour et il est plus présent en hiver qu'en été. Cela le rend complémentaire d'autres sources d'énergie renouvelable.

Le rayonnement solaire incident peut aussi être capté directement, sans passer par l'eau ou le vent. Moyennant un rendement d'une vingtaine de pourcents, les panneaux photovoltaïques le convertissent instantanément en courant continu, qui peut être injecté sur le réseau après conversion via des onduleurs. L'absence de pièces en mouvement leur confère une grande fiabilité, et les performances de cette technologie s'améliorent continuellement. La part du photovoltaïque dans la production d'électricité est encore marginale, mais des capacités de fabrication en constante augmentation et des prix à la baisse laissent présager un développement important. En vue de ne pas empiéter sur les espaces naturels et agricoles, qui ont aussi besoin de la lumière du soleil, les panneaux doivent être implantés en priorité sur les toitures de nos bâtiments, avec l'avantage d'être situés au plus près des utilisateurs. Leur place idéale serait même d'être fixés directement sur nos véhicules. Hélas, la consommation des voitures électriques actuelles est bien supérieure à ce que pourraient produire des panneaux photovoltaïques intégrés à leur carrosserie. Pour preuve, sous nos latitudes, par une belle journée ensoleillée de début d'été, il faudrait environ 10 mètres carrés de panneaux bien exposés pendant quinze heures pour leur faire

parcourir 100 kilomètres⁴⁸... En revanche, des véhicules électriques ultralégers, donc très économes, pourraient tirer une énergie substantielle de panneaux photovoltaïques embarqués.

On peut aussi produire de l'électricité avec des centrales solaires thermiques, qui utilisent des miroirs pour concentrer la chaleur des rayons du soleil vers une chaudière dont la vapeur fait tourner des turbines reliées à des alternateurs. Des moyens de stockage de chaleur à base de sels fondus permettent de lisser la production entre le jour et la nuit. De telles centrales ne sont légitimes que dans des lieux très ensoleillés et où l'emprise des capteurs solaires n'est pas préjudiciable au milieu naturel. On pense hâtivement aux déserts, mais restons vigilants, car ces environnements abritent aussi de précieux écosystèmes. Et encore faut-il que les consommateurs ne soient pas à des milliers de kilomètres... Dans tous les cas, l'énergie solaire reste évidemment dépendante de l'ensoleillement, et en fonction des situations, des sources complémentaires seront les bienvenues. On peut tout de même lui reconnaître une certaine correspondance horaire avec l'agitation humaine qui est préférentiellement diurne.

Les organismes vivants capables de photosynthèse sont aussi des convertisseurs d'énergie solaire qu'ils utilisent

48. Calcul réalisé grâce à un logiciel en ligne de simulation de production photovoltaïque (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/tools.html) pour une voiture consommant 15 kWh d'électricité aux 100 km équipée de panneaux solaires à l'horizontale ayant un rendement de 20 % sous une latitude de 46° N au mois de juillet.

pour fabriquer de la matière organique à partir de dioxyde de carbone et d'eau. La masse qu'ils produisent est riche en énergie chimique. C'est ce que l'on appelle la « biomasse ». Elle englobe le bois des forêts, la tourbe des prairies humides et les sous-produits de l'agriculture. Ces matériaux peuvent être brûlés dans des centrales thermiques pour produire de l'électricité. Mais comme pour les hydrocarbures, le problème des résidus de combustion ne trouve pas de solutions satisfaisantes, et le passage par la case « chaleur » limite inévitablement le rendement (difficulté de convertir l'énergie dégradée en énergie noble). Si elle est utilisée à très petite échelle, la biomasse a le temps de se régénérer et la biodiversité des milieux exploités n'est pas trop sévèrement affectée. En revanche, un usage intensif de cette ressource conduit à raser des forêts et à détruire des écosystèmes, ce qui représente de véritables catastrophes écologiques (si la révolution industrielle s'était nourrie uniquement de bois, il y a bien longtemps qu'il n'y aurait plus aucune forêt sur Terre) et un bilan carbone désastreux. En définitive, les revers de l'utilisation de la biomasse pour produire de l'électricité sont sensiblement les mêmes que ceux des biocarburants. Laissons donc la matière vivante vivre sa vie ! Quant aux sous-produits agricoles, on peut leur trouver des utilisations bien plus durables, comme la fabrication d'isolants naturels pour réduire la consommation de chauffage de nos bâtiments.

Résidus de notre surconsommation, certains déchets contiennent encore de l'énergie qui peut être utilisée pour faire tourner des centrales thermiques. Pour cela, il faut tout d'abord effectuer un tri scrupuleux. Certaines

matières sèches et combustibles (plastiques, par exemple) peuvent être directement brûlées. Mais cette combustion émet énormément de polluants toxiques qu'il est très compliqué de filtrer avant la sortie de la cheminée. Mieux vaut les recycler et même ne pas les produire. De leur côté, les déchets organiques humides peuvent être méthanisés, avec plus ou moins de réussite suivant leur composition. Le biogaz ainsi obtenu peut servir de carburant à un groupe électrogène ou à une centrale. Dans tous les cas, complexe et polluante, la filière des déchets ne peut pas constituer une source abondante d'énergie. Elle est même vouée à décliner puisque l'avenir est à la réduction drastique de notre production de déchets. Et ne comptons pas trop sur notre inévitable matière fécale, car son contenu énergétique quotidien par personne ne pourrait faire avancer une voiture électrique classique que sur moins d'un kilomètre⁴⁹. Mieux vaut utiliser nos jambes et mettre nos fèces au compost pour amender le potager.

Que conclure de ce rapide tour d'horizon des principales énergies renouvelables ? Pressentons d'abord que les trois piliers de notre production électrique d'avenir seront l'hydraulique, l'éolien et le solaire. Ces deux derniers sont encore sous le feu de deux critiques récurrentes lancées par

49. Calcul réalisé avec une moyenne de 400 g de fèces par jour contenant 25 % de matière sèche ayant un pouvoir calorifique de 12 MJ/kg. Notre production quotidienne générerait donc 1,2 MJ d'énergie calorifique si on la brûlait dans une centrale thermique. Or ce type de centrale a un rendement d'environ 1/3 et produirait donc 0,4 MJ d'électricité, soit 0,111 kWh. Une voiture électrique classique a besoin de 15 kWh pour parcourir 100 km. Les déjections quotidiennes de son conducteur ne la feraient donc avancer que de 741 m.

les défenseurs du paysage énergétique de la fin du xx^e siècle. La première concerne le recyclage, qui est pourtant effectif en ce qui concerne la grande majorité des matériaux⁵⁰. Il reste certes des efforts à faire sur les pales en composite et sur les terres rares, mais des solutions existent. La seconde réprobation pointe la variabilité du vent et du soleil, qui sont des sources que l'on ne peut pas commander. Dans les faits, le problème n'est pas insurmontable⁵¹. Le foisonnement à l'échelle d'un pays permet de lisser les baisses de production locales, et les retenues d'eau constituent une bonne réserve de secours. Avec la montée en puissance des énergies renouvelables, de nouveaux aménagements devront se développer : des systèmes de stockage à plus ou moins courte durée et une meilleure interconnexion entre pays voisins. Mais c'est en matière de sobriété, d'efficacité énergétique et de flexibilité de la consommation que nous avons les plus grandes marges de progression.

Cela nous amène à un second point de conclusion important. Comme il est évoqué en préambule, tout moyen de production, si renouvelable soit-il, a un impact

50. Lorraine Véron, « La France a recyclé 3 700 tonnes de panneaux photovoltaïques en 2021 », *Révolution énergétique*, 19 juillet 2022 (<https://www.revolution-energetique.com/la-france-a-recycle-3-700-tonnes-de-panneaux-photovoltaïques-en-2021/>) ; Pierre Fortin, « Le recyclage des éoliennes en France: mythe ou réalité ? », *Les Échos Planète*, 21 février 2022 (<https://www.lesechos.fr/weekend/planete/le-recyclage-des-eoliennes-en-france-mythe-ou-realite-1915105>).

51. Bernard Deboyser, « Énergies renouvelables: leur "intermittence" est-elle problématique ? », *Révolution énergétique*, 5 décembre 2020. <https://www.revolution-energetique.com/dossiers/energies-renouvelables-leur-intermittence-est-elle-problematique/>

environnemental et humain. Tentons malgré tout d'établir un classement des sources les plus acceptables pour alimenter notre motricité électrique. La préférence va au photovoltaïque intégré à des véhicules très sobres. Viennent ensuite le photovoltaïque sur toiture, l'éolien judicieusement implanté et l'hydraulique déjà installé. Laissons tranquille la biomasse qui a bien plus sa place dans les cycles du vivant que dans des réactions de combustion. Dans tous les cas, pour ne pas exercer une pression trop forte sur l'écosystème terrestre, ces ressources renouvelables ne doivent répondre qu'à une utilisation raisonnée de l'électricité. D'autant plus qu'elles sont déjà très sollicitées pour les besoins autres que ceux liés au transport. Elles ne pourront donc pas faire face à la conversion électrique de notre parc actuel de véhicules sans une profonde remise en question de nos façons de nous déplacer. Et l'affaire ne s'arrête pas là, car une fois produite, notre électricité renouvelable consciencieusement sélectionnée a encore plus ou moins de chemin à parcourir pour arriver jusqu'aux moteurs.

Suivre le fil conducteur

L'électricité se transporte relativement bien le long de fils conducteurs en cuivre ou en aluminium. Il y a toujours des pertes en ligne, mais on peut les atténuer en utilisant de (très) hautes tensions, ou tout simplement en réduisant les distances grâce à des productions locales. En revanche, cette énergie est difficile à stocker, particulièrement à bord des véhicules, où le poids est pénalisant et où l'espace est précieux. D'où l'intérêt pour certains moyens

de transport d'être directement raccordés au réseau électrique local pendant qu'ils roulent. C'est le cas des trains, des tramways et des trolleybus, qui n'ont pas de limite d'autonomie puisque le réseau électrique assure la réserve d'énergie. Le réseau peut aussi absorber les réinjections d'électricité des engins dotés d'un système de ralentissement à récupération d'énergie.

En contrepartie, les voies de circulation doivent être équipées, sur toute leur longueur, de conducteurs électriques en contact avec le matériel roulant. Cette option est la mieux adaptée au transport de masse sur des trajets très fréquentés, mais elle ne convient pas aux véhicules individuels, qui ont des itinéraires très diffus.

Fardeau de batteries

Pour les véhicules électriques qui ne sont pas reliés au réseau pendant qu'ils roulent, la solution la plus courante pour stocker l'énergie électrique à bord est la batterie d'accumulateurs. Précisons que la batterie ne produit pas d'énergie électrique: elle ne fait que l'emmagasiner sous forme chimique lorsqu'on la recharge, puis la restituer lorsque l'on appuie sur l'accélérateur (avec quelques pourcents de pertes à chaque étape).

Dans le monde des batteries utilisables sur des véhicules, la famille lithium-ion affiche actuellement les meilleures performances. Mais tout est relatif: si le poids de la batterie de traction était le même que celui d'un réservoir de gazole plein, nos voitures électriques parcourraient environ vingt fois moins de kilomètres entre deux

recharges que leurs indésirables cousines thermiques⁵². Même si la plupart de ses trajets quotidiens sont courts, le consommateur moyen accoutumé au pétrole n'accepte pas d'acheter un véhicule qui doit être rechargé au bout d'une cinquantaine de kilomètres. Il ne reste donc qu'une solution : embarquer une batterie plus grosse, jusqu'à représenter le quart du poids total du véhicule, un tiers de son prix et 40 % du bilan carbone de fabrication du véhicule⁵³ ! Les voitures électriques courantes charrient en effet entre 300 et 400 kilogrammes de batterie pour assurer de 300 à 400 kilomètres d'autonomie⁵⁴. Cela peut monter beaucoup plus haut sur des modèles de luxe. Ce poids supplémentaire a inévitablement une influence négative sur la consommation⁵⁵ et surtout, comme nous le verrons plus loin, sur la quantité de ressources à extraire.

52. Les voitures électriques courantes embarquent environ 1 kg de batteries pour 1 km d'autonomie (par exemple, la nouvelle Fiat 500 électrique a une batterie de 182 kg pour une autonomie de 190 km en cycle mixte). Une voiture diesel classique peut parcourir 1 000 km avec un plein de 50 l qu'on peut estimer à 50 kg si on y ajoute la masse du réservoir vide. Avec une batterie de 50 kg, une voiture électrique ne parcourrait que 50 km, soit 20 fois moins.

53. Chiffre basé sur les analyses de cycle de vie réalisée en 2020 et 2021 par Green NCAP (<https://www.greenncap.com/european-lca-results/>) sur sept modèles électriques différents (Fiat 500 87 kW, Nissan LEAF e+ A03, VW ID.3 PRO 150 kW, Lexus UX 300e, Ford Mustang Mach-E, Hyundai KONA 39.2 kWh, Renault ZOE R110 ZE50). La part moyenne de la batterie dans le bilan carbone de fabrication du véhicule complet est de 39 %.

54. Par exemple, d'après les données du constructeur, une Nissan LEAF embarque 303 kg de batterie pour 270 km d'autonomie en cycle mixte WLTP et, pour la version e+, 440 kg de batterie pour 385 km d'autonomie en cycle mixte WLTP.

55. On peut l'estimer en se fondant, par exemple, sur la fiche technique d'une Cupra Born VZ qui propose deux versions d'autonomie : L et XL. Pour 129 km d'autonomie en plus, la version XL pèse 111 kg de plus. Sa consommation s'en trouve augmentée de 2 %.

On a beau faire grossir les batteries, il arrive toujours un moment où il faut les recharger. La durée d'une recharge complète sur une prise de courant classique est d'une dizaine d'heures, voire plus pour les batteries de grande capacité. Pendant ce temps, le véhicule est immobilisé par un fil à la patte. Si cela se passe la nuit ou durant les heures de travail, cela ne pose pas trop de problèmes. Mais il y a des cas où l'utilisateur souhaite reprendre son véhicule plus rapidement. L'idée de stations permettant un échange rapide de la batterie vide contre une batterie rechargée a été abandonnée : trop complexe, trop coûteux et trop risqué. Il existe cependant des systèmes de recharge rapide qui permettent de retrouver 80 % d'autonomie en moins d'une heure. En contrepartie, ils nécessitent des bornes électriques pouvant délivrer de très forts courants (plus de dix fois la puissance maximale d'une prise domestique) et ils usent plus rapidement les batteries.

Bien que précieuses et onéreuses, les batteries ne sont pas éternelles. Leur capacité diminue au fil des décharges et recharges successives, jusqu'à atteindre une perte d'autonomie qui n'est plus acceptable par l'utilisateur. Les constructeurs d'automobiles garantissent environ trois quarts de la capacité initiale au bout d'une dizaine d'années ou de 160 000 kilomètres⁵⁶. En réalité, l'usure dépend de nombreux facteurs. Les plus pénalisants sont les décharges profondes et les surchauffes. Les écoconducteurs

56. Par exemple, le modèle LEAF du constructeur Nissan.

patients et précautionneux devraient donc pouvoir garder la même batterie tout au long de la durée de vie de leur véhicule. On attend quelques évolutions technologiques dans la prochaine décennie, mais on peut dire que les batteries ont déjà atteint une certaine maturité qui leur permet de faire rouler assez confortablement les voitures électriques. La vraie question est celle de l'impact de leur cycle de vie. Commençons par la fin. Les batteries partiellement usagées peuvent encore avoir une seconde vie dans des applications stationnaires moins exigeantes. Une fois complètement hors d'usage, elles devraient entrer dans des filières de recyclage, pour le moment balbutiantes, mettant en jeu des procédés complexes et énergivores pour récupérer la majorité des éléments les plus précieux. Il n'empêche qu'avant de recycler il faut déjà produire. Et c'est là que cela devient critique. Un remplacement du parc automobile mondial actuel par des voitures électriques de même gabarit entraînerait très probablement des crises d'approvisionnement des métaux stratégiques utilisés actuellement dans les batteries : le lithium⁵⁷, le cobalt⁵⁸ et

57. Emmanuel Hache, « Le lithium dans la transition énergétique : au-delà de la question des ressources ? », IFP Énergies nouvelles, 10 février 2021. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/lithium-transition-energetique-au-dela-question-des-ressources>

58. Emmanuel Hache, « Le cobalt dans la transition énergétique : quels risques d'approvisionnements ? », IFP Énergies nouvelles, 12 novembre 2020. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/cobalt-transition-energetique-quels-risques-dapprovisionnement>

le nickel⁵⁹. En outre, l'exploitation de ces ressources limitées a aussi de lourds impacts environnementaux (émissions de CO₂, consommation d'eau, dégradation de sols) et humains (travail d'enfants dans les mines, accidents, intoxications). Des technologies avec des matériaux moins problématiques commencent à pointer le bout de leur nez. Mais cela ne changera pas radicalement le bilan carbone qui est actuellement d'environ 5 tonnes de CO₂ pour une batterie de 300 kilogrammes⁶⁰. Tant que les batteries continueront d'alimenter des mastodontes sur roues, cela ne réglera pas le problème de fond : nos déplacements énergivores resteront bien au-dessus de nos limites planétaires.

Pour conclure, même si elles s'améliorent continuellement, les batteries restent chères, délicates, encombrantes, longues à recharger, polluantes à produire et compliquées à recycler. Elles ne sont donc légitimes qu'en quantité limitée, sur des véhicules très légers et très sobres dont nous parlerons plus tard. En attendant, nous reste-t-il d'autres moyens pour stocker de l'électricité ?

L'aide des supercondensateurs

Les supercondensateurs peuvent remplacer les batteries dans certaines applications. Ils ont l'avantage de

59. Emmanuel Hache, « Le nickel dans la transition énergétique : pourquoi parle-t-on de métal du diable ? », IFP Énergies nouvelles, 26 mars 2021. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/nickel-transition-energetique-pourquoi-parle-t-metal-du-diable>

60. Estimation réalisée sur une Fiat 500 électrique avec batterie mixte à partir des données du constructeur (batterie de 294,3 kg) et de l'analyse du cycle de vie Green NCAP (Battery Production Estimated Average GHG Emissions = 5,04 t eqCO₂).

supporter jusqu'à un million de cycles de décharge et de pouvoir se recharger très rapidement, à condition que la prise électrique fournisse un courant suffisamment fort. Les supercondensateurs sont aussi capables de restituer une forte puissance. Cependant, à volume égal, ils stockent vingt-cinq fois moins d'énergie que les batteries⁶¹...

Ces composants sont donc adaptés à des utilisations très particulières, où les distances à parcourir entre chaque point de recharge sont faibles (de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres). Ils équipent par exemple des bus qui se connectent au réseau électrique à chaque arrêt. Grâce à leur aptitude à emmagasiner et à restituer l'énergie plus rapidement que des batteries, ils peuvent être aussi très utiles dans les systèmes de récupération d'énergie électrique au freinage et de restitution dans les phases d'accélération.

Malgré des propriétés intéressantes, les supercondensateurs ne révolutionneront pas la mobilité électrique, mais ils constituent déjà un associé utile pour les batteries, qui cherchent encore d'autres alliés.

Rêve d'hydrogène

L'hydrogène est souvent et depuis longtemps présenté comme une solution prometteuse. Et pour cause, ses

61. Céline Merlet, « Les supercondensateurs à la loupe, ou comment l'écorce de noix de coco est utilisée pour stocker l'énergie », Muséum Toulouse, 20 septembre 2019. <https://www.museum.toulouse.fr/-/les-supercondensateurs-a-la-loupe-ou-comment-l-eorce-de-noix-de-coco-est-utilisee-pour-stocker-l-energie>

atomes composent la molécule de dihydrogène (H_2) qui peut se combiner au dioxygène de l'air (O_2) dans une pile à combustible pour produire de l'électricité, avec un rendement d'environ 50%, en ne rejetant que de l'eau (H_2O) et de la chaleur. De plus, ce carburant peut être injecté dans un réservoir et le remplir en quelques minutes. Idéal pour alimenter un véhicule électrique ou venir en complément des batteries en augmentant l'autonomie de plusieurs centaines de kilomètres! Oui, mais...

Sur Terre, le dihydrogène n'est pas disponible abondamment en l'état. C'est un gaz très léger qui n'est présent que sous forme de traces dans l'air. Ce n'est donc pas là que l'on peut aller le chercher en quantité. En revanche, lié à d'autres atomes, l'hydrogène entre dans la composition de nombreuses molécules abondantes sur Terre, comme l'eau (H_2O) et les hydrocarbures (C_xH_y). Il faut cependant des réactions énergivores pour l'en extraire. L'hydrogène n'est donc pas une source d'énergie, mais un vecteur intermédiaire de stockage d'énergie.

Le moyen très majoritaire pour l'obtenir, appelé « reformage », consiste à « craquer » des molécules d'hydrocarbures avec de la chaleur. Cependant, cela n'a aucun intérêt puisque cela équivaut à brûler des hydrocarbures en émettant du CO_2 .

Une autre méthode, pour le moment très marginale, est l'électrolyse de l'eau (hydrolyse). En faisant passer un fort courant électrique dans l'eau, on casse les molécules en libérant du dihydrogène. Mais il faut malheureusement trois à quatre fois plus d'énergie électrique pour l'hydrolyse que celle que l'on récupère ensuite

à la sortie de la pile à combustible⁶². Cette méthode n'a donc d'intérêt que si l'énergie électrique utilisée est d'origine renouvelable, « propre » et surabondante. Or les énergies dites « renouvelables » ne le sont que lorsqu'elles sont utilisées de façon raisonnée. Elles ne sont par ailleurs jamais totalement propres. Et en France, elles sont très loin de la surabondance. Dans notre pays, le peu d'hydrogène produit par électrolyse consomme donc allégrement de l'électricité nucléaire.

D'autres problèmes techniques limitent l'utilisation du dihydrogène. Il est gazeux à température ambiante : il occupe donc un volume bien trop grand pour être transportable. Face à cela, la solution la plus courante est de le comprimer à très haute pression, au prix d'une consommation d'énergie significative. Les réservoirs de stockage doivent en réponse être très solides, donc relativement lourds, d'autant plus que ce gaz est extrêmement inflammable et explosif en présence de l'oxygène de l'air. Par ailleurs, la molécule de dihydrogène est la plus légère et la plus petite que nous connaissons, ce qui la rend très fuyante. Or le dihydrogène est aussi indirectement un puissant gaz à effet de serre⁶³... Diverses réactions inter-

62. Luc Bodineau et Pierre Sacher, « Rendement de la chaîne hydrogène », Ademe, janvier 2020. https://librairie.ademe.fr/cadic/1691/rendement-chaîne-h2_fiche-technique-02-2020.pdf

63. Philippe Schwoerer, « Hydrogène : ces fuites qui plombent le bilan carbone », *H2-Mobile*, 18 avril 2022 (<https://www.h2-mobile.fr/actus/hydrogene-ces-fuites-qui-plombent-bilan-carbone/>); rédaction de H2-Mobile, « Les fuites d'hydrogène continuent d'inquiéter les scientifiques », *H2-Mobile*, 8 août 2022 (<https://www.h2-mobile.fr/actus/fuites-hydrogene-continuent-inquieter-scientifiques/>).

médières, qui consomment aussi un peu d'énergie, sont envisagées pour le convertir en un autre composé plus facilement stockable, comme l'ammoniac (NH_3). Enfin, en bout de chaîne, les piles à combustible coûtent très cher à cause de la présence de platine comme catalyseur et elles ont une durée de vie inférieure à celle du véhicule⁶⁴.

Pour les véhicules routiers, l'hydrogène n'apporte finalement aucun avantage décisif par rapport aux batteries. Dans un avenir plus ou moins lointain, il trouvera peut-être sa place dans le domaine de la mobilité lourde et à longue distance, comme les trains sans ligne électrique et les navires⁶⁵. Pour l'heure, cet élément à la tête de notre tableau périodique n'est qu'un leurre ! En faisant miroiter l'arrivée prochaine de véhicules électriques prétendument « propres », il a pour seul réel effet de nous faire croire que nous pouvons intégralement électrifier nos mauvaises habitudes de déplacement.

REVENIR À L'ÉNERGIE MÉCANIQUE ?

Les roues ont besoin d'énergie mécanique pour tourner. Pourquoi donc ne pas stocker directement cette forme

64. Olivier Lottin, « Piles à combustible : des défauts dans les électrodes peuvent se propager à d'autres composants », Institut des sciences et de l'ingénierie des systèmes (INSIS) du CNRS, 3 juin 2022. <https://www.insis.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/piles-combustible-des-defauts-dans-les-electrodes-peuvent-se-propager-dautres-composants>

65. Association négaWatt, « Développer l'hydrogène : pourquoi et comment ? », note de positionnement, septembre 2020 (<https://www.negawatt.org/Developper-l-hydrogene-pourquoi-et-comment>).

d'énergie à bord? En prime, dans les phases de ralentissement ou de freinage, on pourrait même récupérer l'énergie cinétique du véhicule afin de la restituer plus tard, dans les phases d'accélération. Et, cerise sur le gâteau, l'utilisation de l'énergie mécanique n'émet pas de rejets! Aurions-nous trouvé un moteur idéal?

Ne nous emballons pas : la réalité est un peu plus complexe. Premièrement, il faut bien à l'origine produire l'énergie mécanique quelque part. Dans ce cas, comme pour l'énergie électrique, les problèmes sont reportés ailleurs. Deuxièmement, il faut arriver à la stocker. Plusieurs technologies permettent d'emmagasiner et de restituer de l'énergie mécanique. Elles ont l'avantage d'une fiabilité et d'une durée de vie importantes. Mais elles souffrent toutes d'une faible capacité de stockage au regard de leur poids. Elles ne permettent de couvrir que de petites distances et ne viennent la plupart du temps qu'en complément d'un moteur principal conventionnel.

L'idéal ne serait-il pas de cueillir directement l'énergie mécanique qui se trouve sur notre route? Explorons les techniques d'accumulation existantes avant de répondre à cette question.

Quand le poids est utile

Utilisé dans les horloges anciennes, le poids moteur est une masse que l'on remonte et dont la descente entraîne un mécanisme. Cela n'a pas d'intérêt à bord d'un véhicule, car celui-ci emporterait un poids bien trop lourd qu'il faudrait élever à une hauteur déraisonnable, le tout pour une autonomie extrêmement faible. En effet, on imagine assez

mal des blocs de fonte descendant le long d'un pylône sur le toit d'une voiture.

Ce principe est toutefois utilisé sur les transports tirés par câble, comme les téléphériques, certains funiculaires et les ascenseurs. Soit la cabine est reliée à un contrepoids qui descend lorsqu'elle monte, compensant ainsi son poids à vide, soit la cabine descendante joue le rôle de contrepoids pour la cabine montante. Mais il faut dans tous les cas un autre moteur, le plus souvent électrique, pour entraîner le poids supplémentaire des personnes qui montent.

Dans le domaine du transport fluvial, par un jeu de portes de chaque côté d'un sas, les écluses assurent l'ascension (ou la descente) des bateaux entre deux biefs de niveau différent en utilisant uniquement l'énergie renouvelable du poids de l'eau qui vient de l'amont. Notons que, dans ce cas, l'eau reste à l'extérieur du navire. Les sous-marins, eux, laissent rentrer de l'eau dans leurs ballasts pour prendre du poids et ainsi s'enfoncer dans les profondeurs. Mais pour remonter à la surface, il leur faut une pompe et une réserve d'air sous pression pour chasser l'eau superflue. Pour des questions de stabilité, les gros navires de transport sont aussi équipés de ballasts à eau.

Nous venons de voir que, dans de rares applications, une masse inerte peut être une alliée. Mais pour la majorité des moyens de déplacement, on cherche des solutions plus légères.

Volant d'inertie, à haut régime

Au lieu d'emporter un poids mort, on peut le faire tourner sur lui-même pour qu'il emmagasine une plus grande

quantité d'énergie. Le volant d'inertie est une masse cylindrique en rotation. On lui donne de la vitesse pour la recharger en énergie cinétique, puis on prélève ensuite celle-ci pour entraîner le véhicule. Ce principe est utilisé sur les petites voitures à friction de nos vieilles caisses à jouets. Dans ce cas, la masse rotative est reliée aux roues par un jeu d'engrenages. Dans les applications plus industrielles, le volant d'inertie est accouplé à un moteur électrique réversible en générateur. Lorsqu'il est raccordé au réseau, le moteur donne de la vitesse au volant. Ensuite, le volant rend sa vitesse au moteur, qui devient générateur d'électricité, pour alimenter d'autres moteurs accouplés aux roues. Ce principe a fonctionné dans les années 1950 sur les Gyrobus⁶⁶ qui, bien que manquant de fiabilité, pouvaient parcourir plusieurs kilomètres entre chaque arrêt, où ils se raccordaient temporairement au réseau électrique.

L'énergie cinétique stockée dans le volant d'inertie dépend de sa masse périphérique, mais surtout de sa vitesse (au carré!). Le poids et l'encombrement étant toujours pénalisants à bord d'un véhicule, les volants d'inertie modernes utilisent des matériaux légers et résistants (fibre de carbone) pour pouvoir tourner à très grande vitesse

66. Yannik Plomb, « Les Gyrobus d'Yverdon », notreHistoire.ch, 25 janvier 2019. <https://notrehistoire.ch/entries/ZnYJKxM7Bok>

tout en supportant la force centrifuge⁶⁷. À cause des frottements, le volant d'inertie perd un peu de vitesse lorsqu'il tourne tout seul. On limite ces pertes avec des volants sous vide (pas de frottements avec l'air) tournant sur des « roulements » magnétiques (pas de contact mécanique). Toutes ces astuces technologiques permettent d'atteindre des vitesses de rotation de dizaines de milliers de tours par minute. Mais l'inévitable « autodécharge » fait que les volants d'inertie ne sont pas adaptés au stockage de longue durée. L'énergie stockée doit donc être utilisée rapidement.

C'est le cas des systèmes de récupération d'énergie au freinage par volant d'inertie, adaptés aux véhicules qui alternent freinages puissants et fortes accélérations⁶⁸. Ils équipent certaines voitures de sport, mais n'ont pas encore été utilisés sur des véhicules plus sobres. La difficulté réside dans l'antagonisme des vitesses de rotation : plus on freine le véhicule pour le ralentir, plus on doit faire tourner le volant rapidement. Et à l'inverse, lorsque le volant cède son énergie pour faire accélérer le véhicule, il perd de la vitesse alors que les roues doivent en gagner. Cela nécessite des systèmes de variation de vitesse à très

67. Pour les pièces rotatives tubulaires, on peut exprimer l'énergie cinétique de la façon suivante. $E_c = 1/2 m \cdot r^2 \cdot \omega^2$ avec E_c : énergie cinétique en joules, m : masse du tube en kilogrammes, r : rayon du tube, ω : vitesse de rotation en radians par seconde. On voit que, pour une même quantité d'énergie, si on veut avoir un volant léger (m petit) et compact (r petit), on doit le faire tourner vite (ω grand).

68. Vincent Gonin, « Volvo Cars: le volant d'inertie confirme ses prouesses! », *Auto Plus*, 25 avril 2013. <https://www.autoplus.fr/volvo/volvo-cars-le-volant-dinertie-confirme-ses-prouesses-493744.html>

large gamme entre le volant et les roues. Bref, c'est complexe et, malgré tout, relativement lourd. Et de nos jours, les systèmes électriques ont pris le dessus. Rappelons à toutes fins utiles que l'écoconduite, une vitesse modérée et un poids plume restent les moyens les plus simples et les plus efficaces pour limiter les pertes dues aux freinages et aux accélérations.

Ressort, petit coup de punch

Certains matériaux ont d'autres propriétés potentiellement intéressantes. Lorsqu'on le déforme, un ressort ou un élastique acquiert de l'énergie mécanique qu'il peut restituer plus tard. Les ressorts en spirale ont été largement utilisés comme réservoirs d'énergie mécanique sur des réveils et sur des voitures jouets que l'on remontait avec une clé ou en les faisant reculer. Au xv^e siècle, Léonard de Vinci avait déjà imaginé une «voiture» fonctionnant sur ce principe. Hélas, la quantité d'énergie stockée par la tension d'un matériau élastique est beaucoup trop faible pour tenir la distance.

Le ressort pourrait cependant être utilisé en complément d'un autre moyen de propulsion sur des véhicules soumis à des arrêts très fréquents. Il se tendrait au freinage pour ensuite restituer l'énergie au redémarrage. Un tel système serait bien utile sur le vélo du facteur en ville, mais il n'existe pas encore de réalisations concrètes dans le domaine des déplacements. Et sous l'hégémonie des solutions électriques, le ressort n'est pas près de sortir de sa boîte.

Air comprimé, du réchauffé

L'air est compressible, un peu comme un ressort. On peut donc le stocker à haute pression dans un réservoir, puis l'injecter dans un moteur (du type moteur à pistons, par exemple) qui transforme alors cette pression en mouvement. À l'inverse, le moteur peut aussi servir de ralentisseur en comprimant de l'air qui pourra recharger un peu le réservoir.

Un inconvénient majeur de ce système est l'échauffement de l'air au moment de la compression. Les pertes thermiques engendrées représentent plus de la moitié de l'énergie nécessaire pour comprimer l'air! Certes, l'air émis à l'échappement n'est pas polluant, mais, comme toujours, le problème est déplacé à l'endroit où un autre moteur doit entraîner un compresseur pour remplir le réservoir ou une citerne.

Ce type de stockage permet quand même d'atteindre raisonnablement plusieurs dizaines de kilomètres d'autonomie. Bien que n'ayant pas de réel intérêt énergétique, il a été utilisé et abandonné, à plusieurs reprises, sur des locomotives, des tramways et des voitures. L'air comprimé a aussi été envisagé en association avec un moteur à essence pour récupérer de l'énergie au freinage⁶⁹, mais là encore, c'est l'électricité qui a gagné la bataille.

69. Guillaume Porcher, «Technologie Hybrid-Air PSA: mais pourquoi tant de haine?», Automobile Propre, 26 janvier 2013. <https://www.automobile-propre.com/technologie-hybrid-air-psa-mais-pourquoi-tant-de-haine/>

Vents et courants, à glaner en chemin

Mais pourquoi chercher à stocker péniblement de l'énergie mécanique lorsqu'elle est disponible autour de nous? Pour se mouvoir, un véhicule ou une embarcation peut profiter des déplacements naturels des masses d'air et d'eau, le plus souvent causés par des phénomènes thermiques dus au rayonnement solaire. La voile et la carène sont des moyens très fiables et très efficaces pour capter *in situ* l'énergie mécanique de l'air et de l'eau, sans aucune pollution. Ce n'est pas nouveau: nos ancêtres savaient aussi bien parcourir les mers que remonter ou descendre les fleuves avec l'alternance des forces de ces deux éléments. Mais notre récente et fâcheuse habitude de ponctionner la Terre pour nous déplacer nous l'a peut-être fait oublier. Ou alors, nous n'avons pas encore su retrouver la patience et la sagesse de nous laisser porter à la vitesse que la nature nous propose. Rien de tel qu'une petite séance de char à voile pour se convaincre à nouveau du potentiel du vent! Encore faut-il que ce dernier se lève...

NOTRE PRODIGIEUX MOTEUR BIOLOGIQUE

Avons-nous aussi oublié que nous, humains, comme la grande majorité des autres animaux, avons la capacité de nous mouvoir par nos propres moyens? Nous avons un moteur biologique intégré qui ne demande qu'à fonctionner!

On peut trouver une certaine similitude entre l'équation chimique globale à l'œuvre dans notre corps et celle qui se produit dans un moteur thermique à combustion.

Nous ingérons puis digérons des molécules à base de chaînes carbonées, analogues aux hydrocarbures, et les faisons réagir avec l'oxygène (O_2) de l'air que nous respirons pour en exploiter l'énergie chimique, en rejetant de l'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2). Le rendement pour convertir cette énergie en mouvement est du même ordre de grandeur que dans les moteurs thermiques : environ 24 % (les 76 % restants sont convertis en chaleur)⁷⁰. La ressemblance est troublante, mais la comparaison s'arrête là, car la biologie comporte d'immenses avantages.

Forte de millions, voire de milliards, d'années d'évolution (depuis les origines de la vie sur Terre), la « technologie » du vivant a eu tout le temps de s'adapter en sélectionnant les solutions les plus appropriées à chaque environnement. Les êtres vivants jouissent d'une grande fiabilité (peu de pannes, réparations spontanées) et d'une grande sobriété (consommation énergétique adaptée aux possibilités de l'organisme et du milieu naturel). Dans les conditions normales, ils n'émettent pas de produits toxiques pour leur environnement. Au contraire, leurs rejets sont réutilisés par d'autres organismes de l'écosystème.

En ce qui nous concerne, les membres du genre *Homo* ont adopté et perfectionné une astucieuse façon de se déplacer sur deux jambes, ce qui fait d'eux d'excellents

70. Luc Tappy et Éliane Guenat, « Dépenses d'énergie, composition corporelle et activité physique chez l'homme », *M/S médecine/sciences*, vol. 16, n° 10, 2000. https://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/1526/2000_10_1063.pdf?sequence=1

voyageurs terrestres, très endurants, sur une grande variété de terrains. Rien n'empêche par ailleurs d'allier la technologie et la biologie : on peut assurer une locomotion alerte en utilisant des moteurs humains sur des dispositifs mécaniques. Un-e cycliste monté-e sur un vélo en est un très bon exemple. Lorsqu'elle ou il pédale, la part de sa respiration due à l'effort n'émet que 6 grammes de CO_2 au kilomètre⁷¹, soit dix-sept fois moins de gaz à effet de serre qu'une voiture thermique standard (105 grammes de CO_2 au kilomètre)! Le choix de la propulsion humaine conduit en effet naturellement à la conception de machines légères et efficaces. Et pour cause ! Lorsque l'on utilise la force de ses muscles pour se déplacer, on ressent directement l'effort à fournir. Cela incite spontanément à adapter la taille du véhicule, la longueur des trajets et la vitesse de déplacement. Il ne viendrait à l'idée de personne de pédaler pour entraîner un fardeau d'une tonne à l'autre bout du pays en moins d'une journée ! À l'inverse, les tableaux de bord des véhicules motorisés manquent d'un indicateur percutant sur l'effort qu'ils font subir à l'ensemble de la planète.

Le moteur biologique comporte une autre caractéristique très intéressante. S'il est correctement exploité,

71. Calcul réalisé pour un cycliste roulant à 23 km/h sur le plat et fournissant 100 W de puissance mécanique avec un rendement métabolique de 24%. Sa dépense énergétique (hors dépense énergétique de repos) est de 65,2 kJ/km. Avec un équivalent énergétique de l'oxygène de 21,1 MJ/m³, un volume molaire du dioxygène de 0,0224 m³/mol, un quotient respiratoire de 1 (rapport entre le volume de CO_2 rejeté et le volume d' O_2 consommé) et connaissant la masse molaire du CO_2 (44 g/mol), on peut en déduire la masse de CO_2 émise par kilomètre : 6,1 g.

entretenu et alimenté, ses capacités s'améliorent au fil de son utilisation. Et ce n'est pas tout : son fonctionnement contribue à la santé globale de son propriétaire ! De quoi faire rêver tout détenteur d'un véhicule motorisé classique, lequel se dégrade et perd de la valeur au fil des kilomètres, sans pour autant renforcer les fonctions vitales des personnes transportées, bien au contraire ! Enfin, la nourriture, carburant de nos muscles, est disponible presque partout à la surface du globe et ne nécessite, *a priori*, ni extraction polluante ni raffinage énergivore. Parlons-en plus en détail.

Le carburant des vivants

Nous appelons ici « bio-aliments » les denrées qui rechargent nos batteries biologiques dans le respect de notre santé et de notre environnement. Dressons une liste de critères nécessaires pour mériter cette dénomination.

Se déplacer grâce à la force musculaire perdrait une grande partie de sa vertu si, avant d'être ingurgitée, la nourriture parcourait de grandes distances à bord de moyens de transport polluants. Les bio-aliments doivent donc être produits le plus localement possible. Il faut aussi que leurs méthodes de production ne consomment pas plus d'énergie que les calories apportées aux consommateurs, qu'elles n'utilisent ni produits chimiques (agriculture biologique) ni organismes génétiquement modifiés, qu'elles soient favorables à la biodiversité, en phase avec les saisons, bonnes pour le climat et respectueuses des producteurs (commerce équitable). Par ailleurs, les bio-aliments ne doivent pas être suremballés avec des matières

qui s'amoncelleront tôt ou tard dans la nature (démarche zéro déchet). Le gaspillage alimentaire, qui détruit honteusement presque un tiers de ce que nous produisons, est une habitude intolérable au sein des bio-aliments. Du côté de la santé, la composition des bio-aliments doit être adaptée à la biologie du corps humain. La nourriture déséquilibrée, addictive, ultraraffinée, ultratransformée et frelatée aux additifs chimiques est donc exclue!

Les bio-aliments embrassent une dernière grande cause. En plus des souffrances insoutenables qu'elle engendre, la consommation importante de produits d'origine animale par de très nombreux humains menace l'équilibre du monde vivant: aucun écosystème ne peut fonctionner durablement avec autant de grands carnivores au sommet de la chaîne alimentaire. En outre, le bilan énergétique de la chair animale est très mauvais. En effet, ce sont les végétaux qui, à la base, produisent la matière organique. Ils utilisent pour cela l'énergie du Soleil pour convertir eau (H_2O), dioxyde de carbone (CO_2) et nutriments en molécules complexes, tout en libérant du dioxygène (O_2). Les animaux tirent leur énergie de la dégradation de ces molécules, mais ils en perdent énormément en cours de route. Et tout au long du processus, leur exploitation consomme de grandes quantités d'eau, mobilise d'immenses surfaces de terres agricoles et est très émettrice de gaz à effet de serre. L'élevage bovin, à cause notamment des émissions de méthane, est le secteur de l'agriculture qui contribue le plus

au réchauffement climatique⁷². Côté mer, l'immensité des eaux ne doit pas nous faire oublier la fragilité de leurs écosystèmes. La pêche industrielle est pourtant en train de vider les océans d'une grande partie de leurs habitants⁷³, avec des conséquences probablement catastrophiques sur ce milieu encore mal connu... Finalement, lorsque l'on a la possibilité de se nourrir directement de végétaux, passer par l'intermédiaire d'animaux, en leur infligeant au passage d'intolérables supplices, représente globalement un tragique gâchis. Les bio-aliments ne méritent donc définitivement leur titre que s'ils sont très majoritairement d'origine végétale⁷⁴.

La frontière est mince entre les bio-aliments et les biocarburants. Par exemple, le colza, le tournesol, la betterave et le palmier à huile peuvent aussi bien servir à l'alimentation humaine qu'à celle des moteurs thermiques. Or les surfaces agricoles ne sont pas illimitées. Elles sont d'une part grignotées par l'urbanisation, et d'autre part enjointes de ne pas trop empiéter sur les espaces naturels, afin de préserver l'équilibre du monde vivant.

72. Émilie Massemin, « Climat: l'agriculture est la source d'un quart des émissions mondiales de gaz à effet de serre », *Reporterre*, 19 février 2015. <https://reporterre.net/Climat-l-agriculture-est-la-source>

73. J. M., « Pêche industrielle : quand innovation rime avec destruction », *Mr Mondialisation*, 1^{er} janvier 2020. <https://mrmondialisation.org/peche-industrielle-quand-innovation-rime-avec-destruction/>

74. Loïc Chauveau, « Végétarien, végan : pourquoi l'alimentation végétale serait-elle moins polluante ? », *Sciences et Avenir*, 11 février 2022. https://www.sciencesetavenir.fr/nutrition/aliments/vegetarien-vegan-pourquoi-l-alimentation-vegetale-serait-elle-moins-polluante_161353

Les bio-aliments et les biocarburants se retrouvent donc en concurrence pour les surfaces nécessaires à leur production. Alors, est-il préférable de gaver de biocarburants des machines très voraces ou de régaler de bio-aliments des êtres vivants économes? Un être humain qui aime la vie devrait facilement choisir son camp, et son véhicule.

Traction animale

À défaut d'alimenter des machines, les bio-aliments ne pourraient-ils pas nourrir d'autres êtres vivants? Très habiles pour exploiter la nature depuis des milliers d'années, les humains savent utiliser la force motrice d'espèces animales sélectionnées. L'arrivée de la mécanisation fonctionnant aux énergies fossiles a quasiment fait disparaître ces pratiques. Faut-il à nouveau mettre les bêtes à contribution pour nos déplacements? Pourquoi pas, mais dans le respect total de l'animal et de son environnement.

Ainsi, la traction animale ne doit en aucun cas se substituer à notre capacité naturelle à nous mouvoir. Elle ne doit être utilisée que comme une assistance écologique pour les transports qu'il nous est difficile de réaliser par nos propres moyens et qui ont une réelle utilité. L'animal doit être bien traité. Il doit vivre dans un environnement ressemblant à son habitat naturel. Il doit bénéficier d'avantages à la hauteur des services qu'il nous rend. Il doit pouvoir vivre la vie sociale et biologique propre à son espèce. Il doit être libre! Est-il vraiment possible de remplir toutes ces conditions? Si ce n'est pas le cas, contentons-nous de nos propres jambes, voire de celles de nos congénères. Dans cette dernière éventualité, veillons

bien sûr à appliquer les mêmes exigences drastiques de bien-être à l'égard de nos semblables. Que nous soyons humains ou d'une autre espèce animale, nous ne sommes pas des machines! Mais ne pourrions-nous pas aussi coopérer avec ces créatures technologiques?

HYBRIDE : POUR LE PIRE ET POUR LE MEILLEUR

Après avoir écouté le ronronnement de tous ces moteurs, nous commençons à identifier quelques prétendants pour nous emmener vers demain, et nous sentons bien que le favori a... deux jambes. Mais il n'est toujours pas facile de s'engager définitivement pour LA force de traction idéale, celle qui serait capable de répondre fidèlement à tous nos besoins de mobilité. Nous serions bien tentés d'en adopter plusieurs au sein d'un même véhicule. C'est ce que propose la motorisation hybride, qui associe deux moteurs de technologie différente pour en cumuler les avantages, mais aussi les inconvénients.

Une relation toxique avec l'essence

Commençons par le pire. Très séduisante, la voiture hybride combine un moteur à essence et un moteur électrique sur batteries. Ce dernier assure les démarrages ainsi que les déplacements à faible vitesse et à courte distance. Le moteur à essence assure la motricité en vitesse de croisière et/ou la recharge des batteries. Lors d'une demande accrue de puissance, les deux moteurs fonctionnent à l'unisson.

Hélas, aucun miracle ne se produit au sein de ce couple! En effet, en l'absence d'une prise électrique, c'est le polluant moteur à essence qui doit fournir une part supplémentaire d'énergie pour recharger les batteries, ce qui augmente sa consommation. Et sur de longs trajets, cette union ne présente aucun avantage puisque le moteur à essence fait tout le boulot. Ce n'est finalement qu'en milieu urbain que le moteur électrique peut exhiber ses pseudo-atouts: absence d'émissions à l'échappement, silence à basse vitesse, complaisance envers les arrêts fréquents, récupération partielle d'énergie de décélération. Mais rappelons qu'«électrique» et «écologique» ne sont pas des synonymes, et que la ville offre des possibilités de déplacement beaucoup plus vertueuses et bien mieux adaptées: marche, vélo, transport en commun. Le seul véritable intérêt des voitures hybrides est commercial: il permet de continuer à vendre de grosses voitures tout en entretenant la confusion dans l'esprit de leurs utilisateurs, qui croient s'acheter une bonne conscience...

Le courant passe avec les pédales

Heureusement, il existe une hybridation bien plus prometteuse: l'assistance au pédalage. Elle combine notre propre moteur biologique et un moteur auxiliaire. Le premier est toujours présent à bord, qu'on le veuille ou non. Alors, autant le faire fonctionner dès que possible, sachant que cela ne peut lui faire que du bien! Le second est là pour lui donner un surplus de puissance, bien appréciable sur les trajets qui demandent de gros efforts.

À ses débuts, l'assistance était assurée par des moteurs à essence deux temps montés sur des vélos (bicyclettes à moteur auxiliaire, VéloSolex, puis cyclomoteurs). L'augmentation de la puissance des moteurs a fait perdre les pédales à ces cycles, qui sont peu à peu devenus les deux-roues motorisés actuels, lesquels peinent à réduire les émissions à la sortie du pot d'échappement. Heureusement, leurs ventes déclinent au profit de vrais deux-roues hybrides bien plus écologiques : les vélos à assistance électrique !

Certes, tous les problèmes cités auparavant et liés à l'énergie électrique sont toujours présents, mais à une échelle bien plus réduite. Pour preuve, un vélo à assistance électrique pèse soixante fois moins lourd, a une batterie quatre-vingts fois plus petite et consomme trente fois moins d'électricité au kilomètre qu'une voiture électrique⁷⁵. Cela change tout ! Car les quantités de matières premières à extraire pour fabriquer carcasses, moteurs et batteries redeviennent soutenables et les quantités d'énergie électrique à produire restent compatibles avec des sources 100 % renouvelables. Grâce à une limitation de la puissance du moteur (250 watts en France) et de la vitesse (coupure de l'assistance au-delà de 25 km/h

75. Voiture électrique (type ZOE) de 1 500 kg consommant 15 kWh d'électricité aux 100 km équipée d'une batterie de 40 kWh. Vélo à assistance électrique de 25 kg avec batterie de 500 Wh pouvant parcourir 100 km en mode « éco ». Le vélo à assistance électrique pèse donc 60 fois moins lourd, a une batterie 80 fois plus petite et consomme 30 fois moins d'électricité au kilomètre que la voiture électrique.

en France), l'assistance électrique se protège des dérives qu'ont connues les autres engins routiers motorisés. Et comme l'assistance ne s'active que lorsque l'on pédale, cela oblige l'utilisateur à donner un peu de sa personne, sans se reposer intégralement sur la motorisation. Outre des bienfaits pour la santé, cela donne une certaine consistance aux déplacements : nous sommes un peu moins tentés d'abuser d'un véhicule qui ne fait pas la totalité du travail à notre place. Gardons quand même à l'esprit que cet ajout de technologie constitue un risque additionnel de panne et une consommation supplémentaire (certes modérée) de ressources : le vélo 100% musculaire restera donc toujours plus fiable et plus écologique que son cousin assisté.

Pour le reste, l'hybridation ne se limite pas forcément à l'ajout d'un moteur électrique et d'une batterie. Sur des engins à roues (voire flottants ou aériens), intrinsèquement légers et efficaces du fait de la propulsion semi-humaine, des cellules photovoltaïques embarquées peuvent soulager et même recharger les batteries ! Et lorsque les conditions s'y prêtent, une voile peut exploiter directement la force du vent pour venir en renfort de la puissance musculaire.

Nous tenons là une alliance pleine de promesses pour la lune de miel des déplacements : des machines légères entraînées par des êtres humains avec le soutien des énergies renouvelables. Serions-nous prêts à partir en voyage de noces ?

IV. MIRAGES, FANTASMES ET FAUSSES PROMESSES

Restons prudents, car la route vers les transports de demain est semée d'embûches ! Ne nous perdons pas dans des voies dangereuses qui nous feraient passer à côté de vraies solutions et nous précipiteraient vers une inévitable catastrophe. Armé-es des quelques notions précédentes, partons pour l'heure à l'assaut des croyances sans lendemain, des promesses intenables et des projets insoutenables.

PRINCIPES ET ÉNERGIES OCCULTES

À cause des faux espoirs qu'elles suscitent, certaines croyances encore tenaces nous éloignent de l'indispensable mutation de nos moyens de transport. Une petite séance de désenvoûtement énergétique est nécessaire pour que nos rêves de transports d'avenir deviennent réalisables...

Mouvement perpétuel, éternelle supercherie

N'y allons pas par quatre chemins : le mouvement perpétuel n'existe pas ! Tout corps qui bouge perd plus ou moins d'énergie. Si l'on ne compense pas ces pertes par un apport d'énergie, il finira par s'arrêter. Inutile de rajouter des masselottes et des aimants par-ci, par-là : ils finiront eux aussi irrémédiablement immobiles. Rien ne

nous empêche, cependant, d'essayer de limiter les pertes pour faire tourner le manège un peu plus longtemps.

Dans le même registre, le moteur surproducteur ou « surnuméraire », qui produirait plus d'énergie qu'il n'en consomme, n'est qu'une supercherie ! Par des jeux d'engrenages ou de pignons, on peut augmenter la force au détriment de la vitesse, ou augmenter la vitesse au détriment de la force. Mais la puissance de sortie n'est jamais supérieure à celle de départ. Elle est même toujours inférieure, à cause de quelques pertes. Placer des aimants dans tous les sens ne change rien à l'affaire : si l'on veut de la puissance en plus, il faut soit pédaler plus fort et/ou plus vite, soit se faire aider par une autre source d'énergie bien réelle.

Les lignes qui précèdent font aussi tomber une autre légende : on ne peut pas alimenter un véhicule électrique (vélo ou voiture) uniquement avec l'énergie générée par son propre mouvement. Si l'on prélève de l'énergie sur les roues en rotation du véhicule pour recharger ses batteries, cela le ralentit et finira par l'immobiliser. Et l'énergie récupérée sera toujours inférieure à celle consommée auparavant par la mise en mouvement du véhicule.

Donc les vélos électriques qui se rechargent sans effort en roulant n'existent pas ! Certes, il existe des systèmes de régénération de la batterie grâce au moteur électrique du vélo, mais ils tirent leur énergie soit du cycliste qui devra pédaler plus fort, soit du ralentissement du vélo qu'il faudra ensuite relancer. Par conséquent, il arrivera toujours un moment où, pour recharger la batterie, il faudra se brancher sur une prise de courant ou appuyer plus sur les pédales. De même, une voiture électrique ou hybride aura

toujours besoin d'une prise de courant ou de son moteur à essence pour recharger ses batteries.

Par la même occasion, abandonnons l'idée de placer une éolienne sur le toit d'un véhicule qui roule, car les pertes par frottements aérodynamiques le ralentiraient et seraient supérieures à l'énergie produite. Le bilan pourrait être positif sous un vent favorable, mais, dans ce cas, une voile serait beaucoup plus efficace. La seule façon éprouvée pour qu'un véhicule électrique à batteries très sobre se recharge « tout seul » est de l'équiper de panneaux photovoltaïques et de bien l'exposer au soleil.

L'insubmersible moteur à eau

Et si la potion magique était tout simplement de l'eau ? Cette ressource propre et abondante ne pourrait-elle pas nous mettre à l'abri de la pénurie, du moins pour un certain temps ? Hélas, non, car le moteur à eau n'est qu'une chimère, mais qui a la vie dure ! Au-delà du mythe, nous avons vu qu'il était très difficile de tirer de l'énergie de cette molécule et de ses atomes, car ils sont remarquablement stables. La pile à hydrogène et la fusion nucléaire tentent bien d'utiliser l'eau, mais seulement après des transformations très coûteuses en énergie et, pour la seconde, des décennies de recherches incertaines et extrêmement onéreuses. Évitions donc de croire les bricoleurs fous qui prétendent tirer de l'énergie de l'hydrolyse de l'eau et faire de la fusion froide dans leur garage.

Battons en brèche une utilisation beaucoup plus basique de notre liquide quasi inépuisable. Si l'on cherchait à installer de petits moulins à aubes sous

nos capots, chaque véhicule se baladerait avec un véritable château d'eau à son bord¹ et inonderait la route par son tuyau d'échappement. Il faudrait alors trouver une autre énergie miraculeuse pour pomper ce déversement et l'acheminer vers les stations-service qui seraient de gigantesques réservoirs perchés en hauteur. Inutile d'aller plus loin, cette voie est impraticable.

À défaut de constituer un carburant, l'eau ne pourrait-elle pas être utilisée comme additif? C'est l'argument de vente de certains systèmes que l'on peut adapter sur des moteurs à combustion interne. L'ajout de vapeur d'eau au mélange air-carburant améliorerait les performances de 10% à 30%... sans aucune preuve scientifique! Quand bien même ces résultats seraient avérés, ce serait respectable, mais cela ne nous débarrasserait pas des terribles nuisances de l'utilisation des hydrocarbures. Encore un rêve qui tombe à l'eau.

Le mythe de l'énergie libre

Décidément, quelle déception! On ne peut ni se passer totalement d'énergie, ni en obtenir sans effort, ni même se reposer sur l'eau. N'existe-t-il vraiment aucune énergie miraculeuse? Mystérieuse, illimitée, gratuite, propre et

1. Une voiture classique a besoin d'environ 100 Wh (360 kJ) d'énergie mécanique pour parcourir 1 km. Sous forme d'énergie potentielle de pesanteur, cela représente 3 671 l d'eau élevés de 10 m. Pour parcourir 100 km, il « suffit » d'avoir 100 fois plus de hauteur ou 100 fois plus d'eau, ou encore 10 fois plus de chacune.

disponible partout, l'«énergie libre²», selon certains, émanerait du néant. Elle permettrait de fournir mouvement, chaleur et électricité à volonté. Des chercheurs malheureusement disparus et des inventeurs indépendants l'auraient touchée du doigt, mais auraient été coupés dans leur élan par un complot politico-militaro-scientifico-industriel... On aimerait bien en savoir un peu plus sur cette force insaisissable, mais comme elle ne repose sur aucune vérité scientifique, on ne peut se fier qu'aux théories fumeuses de ceux qui prétendent la connaître. En réalité, ce concept vaporeux sert de base d'inexplication à tous les imposteurs qui présentent leurs machines miraculeuses, celles-ci allant du moteur à mouvement perpétuel au générateur surunitaire, en passant par le réacteur à eau.

À qui profite la supercherie ? Pour le découvrir, constatons que ces fausses informations sont en grande majorité diffusées sur des médias en ligne dont le modèle économique repose sur la vente d'espaces publicitaires. Plus une vidéo est regardée, plus elle rapporte à son auteur, à la plateforme qui l'héberge et potentiellement aux annonceurs. Et comme beaucoup d'entre nous aiment bien les belles histoires extraordinaires, même si elles sont fausses, ce genre de contenu est très scruté. Qui sont les victimes ? Ce sont d'abord celles et ceux qui ont perdu du temps de cerveau disponible à ingurgiter de la désinformation et

2. Clément Fournier, « Et s'il existait une énergie libre, infinie et facile à produire... mais qu'on nous le cachait ? », *Youmatter*, 29 juin 2017. <https://youmatter.world/fr/energie-libre-explications-ecologie/>

qui, éventuellement, auront cédé aux sirènes de la publicité en achetant des produits inutiles. Pour certain-es, cela va plus loin, car ces croyances sont une porte d'entrée vers l'enfermement mental dans des théories complotistes parfois dangereuses, dont le climatoscpticisme fait partie. Et pour la société dans son ensemble, ce sont des illusions qui retardent encore l'adhésion généralisée à des mesures efficaces pour atténuer les graves crises climatiques et écologiques. Remettons donc les pieds sur Terre, où toutes les sources d'énergie ont leur prix et leurs impacts. Même si nous trouvions une potion magique pour faire fonctionner à volonté nos véhicules, imaginons les dégâts que nous serions capables de causer avec un tel superpouvoir ! Alors, au lieu de rêver de la voiture à énergie libre, songeons plutôt à nous libérer de la voiture.

SOLUTIONS DÉMESURÉES

En l'absence d'énergie magique, dans un contexte de crise écologique globale et de raréfaction des ressources, la seule voie raisonnable semble être une rapide décroissance énergétique du secteur du transport. Pourtant, beaucoup de projets sont encore sur la mauvaise pente : plus vite, plus loin, plus gros, plus confortable, plus sophistiqué, plus nombreux... Levons un peu le pied pour prendre le temps d'éviter les pistes trop glissantes, celles qui ne sont pas à la mesure des défis que nous devons relever !

Déplacer la population

Prenons du recul. Si nous nous déplaçons, c'est bien pour relier entre eux différents lieux. Il est donc tentant de regrouper tous ces lieux au même endroit pour limiter la longueur des allers-retours. C'est un peu ce qui se produit dans les villes et encore plus dans les grandes métropoles. Au sein de ces zones urbaines denses, la plupart des trajets sont envisageables à pied, à vélo ou en transport en commun. Faudrait-il donc regrouper tout le monde aux mêmes endroits ? Même si plus de la moitié de la population mondiale vit déjà en ville, il est totalement illusoire de penser déplacer autoritairement les quelques milliards d'individus restants. Sans oublier que l'hyperconcentration de l'habitat a par ailleurs de nombreux effets pervers. Si l'on s'en tient au domaine des déplacements, on imagine que les citadins entassés auront envie de prendre l'air de temps en temps dans la campagne lointaine. Et faute de surfaces agricoles intra-muros, plus les villes seront peuplées, plus elles devront faire venir leur nourriture d'une large couronne, ce qui n'est pas optimal en termes de transport. On constatera le même phénomène pour les matières premières.

Ne faudrait-il pas au contraire répartir la population sur tout le territoire ? Une telle dispersion de l'habitat pose des problèmes encore plus graves. La campagne serait totalement quadrillée de routes pour relier les bâtiments entre eux. À moins que chaque foyer ne vive en autarcie, les déplacements motorisés seraient incessants et erratiques. L'optimisation par transport en commun serait un casse-tête inextricable. La vie sauvage n'aurait plus de vastes espaces indispensables à son fonctionnement et à son maintien.

Le juste milieu entre concentration et dispersion n'est finalement pas si loin de la répartition actuelle. Notre territoire s'est lentement organisé au cours d'une longue histoire pour en arriver à sa physionomie d'aujourd'hui. On peut donc se dire que son aménagement répond déjà à certaines logiques d'usage. Cependant, les graves crises que nous avons déclenchées ne justifient-elles pas un grand chamboulement de nos façons d'occuper l'espace? Soyons réalistes, nous ne pouvons pas tout casser pour tout reconstruire. Contentons-nous de réaffecter certains lieux, de rénover les installations et d'optimiser les flux de déplacements. Réparons, ou tout au moins ne reproduisons pas, les erreurs de notre récent passé motorisé: fini les vastes centres commerciaux excentrés, les nouvelles zones pavillonnaires à la périphérie des villes et les parcs d'activités économiques entre autoroutes et champs de betteraves. Chaque réorganisation qui réussira à réduire significativement la longueur des trajets aura un double bénéfice: non seulement les distances à parcourir seront bien plus courtes, mais elles deviendront aussi accessibles à des modes de déplacement plus lents et beaucoup plus écologiques! Certes, les politiques d'aménagement du territoire ne peuvent pas tout résoudre, mais elles doivent orienter dès maintenant les façons de nous déplacer de demain. De leur côté, les moyens de transport que nous avons à notre disposition ont aussi leur propre influence sur l'organisation de l'espace.

Les effets pervers de la grande vitesse

Encore aujourd'hui, la vitesse est une qualité très recherchée dans nos différents moyens de transport.

Pourtant, lorsqu'on la pousse à la limite du raisonnable, elle a de lourdes conséquences !

En rapprochant temporellement des points éloignés, elle encourage de nouveaux déplacements à longue distance, qui ne sont pas compatibles avec une indispensable relocalisation des échanges. Une des répercussions est un déséquilibre des territoires, avec des régions qui se vident de leurs activités alors que d'autres concentrent emplois, services, administrations, loisirs... La vitesse autorise la construction de zones résidentielles excentrées, loin des commodités. C'est un cercle vicieux, car une telle répartition nécessite toujours plus de déplacements rapides et lointains. Finalement, la vitesse éloigne, et les usagers passent toujours autant de temps dans les transports³.

Comme nous l'avons vu, la vitesse augmente très significativement la consommation au kilomètre, principalement à cause de la résistance de l'air. Pour atteindre des vitesses élevées, il faut un moteur surpuissant, donc lourd, gourmand en carburant, et souvent peu efficace aux vitesses autorisées les plus courantes. Par ailleurs, lorsqu'on roule vite, il faut aussi être capable de s'arrêter rapidement. Le système de freinage doit être dimensionné en conséquence, ce qui augmente son poids. Le châssis

3. Marie Astier, « En France, l'automobile règne sans partage », *Reporterre*, 12 janvier 2022 (<https://reporterre.net/En-France-l-automobile-regne-sans-partage>) ; Aurélien Bigo, « Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement. », thèse de doctorat de l'Institut polytechnique de Paris préparée à l'École polytechnique, novembre 2020 (www.chair-energy-prosperity.org/wp-content/uploads/2019/01/These-Aurelien-Bigo.pdf)

des engins rapides doit aussi être plus résistant pour supporter les sollicitations dues à la vitesse, ce qui augmente également le poids (et/ou le prix, suivant les matériaux utilisés). Ensuite, le risque et la gravité des accidents sont fonction de la vitesse. On tente de protéger les occupants du véhicule (mais pas les autres usagers de la route...) en renforçant l'habitacle, ce qui accroît d'autant le poids et la taille du véhicule. D'autre part, les voies rapides excluent les moyens de déplacement plus lents, plus légers et plus vertueux, car ils ne peuvent pas y trouver leur place sans s'exposer au danger.

Autre élément à prendre en compte : la vitesse accroît aussi l'emprise au sol et la complexité des infrastructures. En effet, plus on va vite, plus il faut de grandes distances de sécurité autour et entre les véhicules. Les intersections sont beaucoup plus complexes à gérer car elles nécessitent de longues bretelles d'accès et des passages dénivelés par-dessus ou par-dessous les autres voies. Des itinéraires de substitution doivent être créés pour les véhicules plus lents qui sont exclus du réseau rapide. Les dangers de la vitesse font que les emprises doivent être clôturées, coupant les voies naturelles de communication de certaines espèces vivantes (dont les humains). Quand on va vite, les arrêts et les redémarrages sont coûteux en temps et en énergie. On fait alors le moins de haltes possibles, et seules sont desservies les grandes métropoles. Le reste du territoire doit se contenter de regarder passer les convois et d'en subir les nuisances, dont le bruit fait partie. Ce dernier augmente fortement avec la vitesse, qu'il vienne du moteur, du roulement ou des frottements

aérodynamiques. Pour cause de nuisances et de taille des infrastructures, les gares de train à grande vitesse, les aéroports et les nœuds autoroutiers sont souvent à l'écart des populations, rendant les utilisateurs toujours dépendants de transports individuels motorisés pour les atteindre. Enfin, les moyens de déplacement les plus rapides sont souvent les plus chers (hors exonérations injustifiables de taxes et subventions abusives), autant pour les usagers (prix du véhicule, entretien, consommation, prix du billet) que pour la collectivité (emprise foncière, infrastructures à créer et à entretenir, véhicules à acquérir et à maintenir en état). Réservés à des privilégiés, ils font subir leurs impacts à tous les autres, tout en accaparant l'espace et les fonds publics au détriment de façons plus raisonnables et plus abordables de se déplacer.

Oublions donc les trains sur coussin d'air ou à sustentation magnétique, dont l'unique intérêt est d'atteindre des vitesses très élevées au prix d'une consommation d'énergie démesurée et d'un coût exorbitant. Laissons aussi tomber l'idée de l'Hyperloop, cette capsule hermétique filant à plus de 1 000 km/h dans un tube sous vide. Étant donné la complexité des remises à l'air libre, inutile de dire qu'il n'y aurait pas de gares intermédiaires entre deux mégapoles. En guise de paysage, il faudrait se contenter d'écrans diffusant de la publicité. Un tel système exigerait une infrastructure extrêmement onéreuse et poserait d'énormes contraintes de sécurité pour les voyageurs. C'est un beau défi technologique, mais ce n'est pas une solution pour l'avenir.

Même les lignes de train à grande vitesse actuelles doivent cesser leur expansion pour permettre de réinvestir sur les lignes classiques, plus vertueuses à bien des égards. Les chiffres d'émissions de CO₂ par kilomètre et par passager des différents types de trains français semblent indiquer le contraire, mais ils sont trompeurs ! Tout d'abord, même si le réchauffement climatique est un problème primordial, il ne devrait pas être le seul élément pris en compte. Dans ce calcul partiel et partiel, les lignes à grande vitesse, intégralement électrifiées dès leur construction, sont avantagées par une électricité nucléaire peu émettrice de CO₂. À l'opposé, les lignes régionales n'ont pas toujours la chance de bénéficier de travaux d'électrification. Beaucoup fonctionnent donc encore avec des moteurs Diesel vieillissants qui rejettent inévitablement du dioxyde de carbone. Ensuite, calculées par voyageur, les émissions prennent en compte les données moyennes de fréquentation des différents types de trains. Or tous les efforts commerciaux des dernières années ont été dirigés vers la grande vitesse, alors que les petites lignes ont été délaissées, avec des conditions de circulation très dégradées qui rebutent les usagers. Dans ces circonstances, il n'est pas étonnant que les trains à grande vitesse, remplis à 100 %, affichent des chiffres plus avantageux que des trains régionaux, vidés de leurs voyageurs. Puis, comme la grande vitesse n'assure pas l'indispensable desserte fine du territoire, elle s'économise de coûteux arrêts et redémarrages qui doivent être supportés par les autres trains. Enfin, le calcul rapporté au kilomètre est fallacieux puisque la grande vitesse implique et encourage

des trajets beaucoup plus longs. Bon, ne dénigrons quand même pas trop les trains rapides, car ils restent beaucoup plus vertueux que d'autres moyens de transport, comme la voiture et l'avion, qui devraient d'ailleurs coûter beaucoup plus cher au kilomètre, voire disparaître des radars ! Justement, parlons-en.

Quittons donc la bataille du rail pour nous attaquer au secteur du transport qui a l'impact environnemental global le plus lourd : la route ! Au sein de ce réseau tentaculaire, les autoroutes et autres voies rapides concentrent tous les excès. Extrêmement gourmandes en espace et en infrastructures, théâtre de consommations effrénées de carburant, elles ont déjà connu un développement bien trop important au regard de l'impérieuse nécessité de préserver notre climat et notre environnement. Les vitesses autorisées sur ces couloirs ont une incidence considérable sur l'ensemble du parc automobile mondial ! En effet, quasiment toutes les voitures que l'on nous vend sont taillées pour les quelques autoroutes allemandes sans limitation de vitesse. Or nos bolides capables de rouler à plus de 150 km/h⁴, voire 300 km/h⁵, sont très souvent utilisés à moins de 20 km/h de moyenne en milieu urbain. L'incitation à la vitesse sur une petite partie du réseau

4. Selon les données du constructeur, la nouvelle Fiat 500 électrique avec batterie mixte a une vitesse maximale de 150 km/h. La version avec batterie urbaine a une vitesse maximale de « seulement » 135 km/h.

5. Selon les données du constructeur, la Tesla modèle S Plaid a une vitesse maximale de 322 km/h !

routier a conduit à surdimensionner presque tous les véhicules du marché! Peut-on encore faire machine arrière? Pour les voitures, on peut seulement attendre qu'elles arrivent en fin de vie et qu'elles soient remplacées par des engins beaucoup plus rationnels. Quant aux infrastructures, sans aller jusqu'à les détruire, il est souhaitable d'y réduire significativement la vitesse maximale autorisée. Une limitation à 90 km/h sur la voie de gauche permettrait de rendre les autres voies accessibles aux véhicules lents, aux convois exceptionnels, aux vélos et aux piétons. Maintenant qu'ils sont là, autant que ces aménagements démesurés rendent service au plus grand nombre, avec une attention particulière pour les modes de transport les moins polluants! Face à la réduction des déplacements qu'exige l'avenir, ces multivoies vont devenir tellement surdimensionnées que de nouveaux usages sont encore à imaginer sur leurs immenses surfaces goudronnées. La production d'électricité photovoltaïque pourrait être une idée. L'apaisement de ces vastes chaussées autoriserait aussi la suppression de leurs interminables clôtures néfastes pour la faune sauvage.

Après avoir réglé leur compte aux autoroutes, restons conscient-es qu'elles n'ont pas l'apanage de la vitesse excessive. Même s'il est moins large, et donc moins propice à la célérité, le reste du réseau routier souffre encore d'une circulation bien trop rapide pour que les modes de déplacements «doux» puissent s'y sentir à l'aise et y prendre leur essor. La limitation à 80 km/h sans dérogation sur les routes françaises serait déjà une avancée, mais c'est à court terme vers 50 km/h qu'il faut se diriger. Visons aussi

à ne pas dépasser 30 km/h en agglomération et 20 km/h en ville. Et ne soyons pas en proie à la frustration, car tout est relatif en matière de vitesse : dans un monde qui aura su adapter son Code de la route à des rythmes plus naturels, un simple vélo deviendra un moyen de déplacement rapide, s'il ne l'est pas déjà, notamment en milieu urbain.

Envolons-nous maintenant pour voir ce qu'il se passe au-dessus de nos têtes. Les avions de ligne supersoniques ne volent plus depuis une vingtaine d'années, et c'est une bonne chose, car leurs nuisances étaient à la hauteur de leur vitesse. Pourtant, guère en dessous du mur du son, avec des moyennes entre 800 et 900 km/h, le transport aérien actuel reste un mode à très grande vitesse. Il ne fonctionne donc qu'à gros débit de carburant et à longue distance. Autant dire qu'il n'a quasiment plus de légitimité pour l'avenir, tant son impact par passager est négatif. Certes, la consommation de carburant par siège et par kilomètre d'un avion plein est comparable à celle d'une personne seule dans sa voiture. Mais d'une part, l'auto-solisme n'est pas une référence en matière de sobriété. Et d'autre part, la voie des airs engendre des trajets beaucoup plus longs. Si au niveau mondial le trafic aérien ne représente qu'une dizaine de pourcents des émissions du secteur des transports⁶, c'est parce qu'il n'est encore réservé

6. IEA, "Global CO₂ emissions from transport by sub-sector in the Net Zero Scenario, 2000-2030", mis à jour 26 octobre 2022. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-transport-by-sub-sector-in-the-net-zero-scenario-2000-2030>

qu'à des privilégiés (à l'échelle de la population mondiale). Une démocratisation de ces vols nous précipiterait encore plus rapidement vers la catastrophe environnementale ! Ne nous laissons pas tromper par les promesses des biocarburants et de l'avion électrique à batteries ou à hydrogène. Déjà évoquées auparavant, les limites de ces technologies sont encore plus vite atteintes sur des engins volants qui sont par nature très gourmands en énergie et très sensibles au moindre surpoids ! Avec une autonomie d'environ une heure de vol, les avions électriques à batteries ne dépassent guère 100 à 200 kilomètres de rayon d'action. L'hydrogène permettrait d'aller sensiblement plus loin, au prix d'une orgie énergétique pour le produire. Les biocarburants pourraient autoriser des autonomies en vol comparables à ce que permet le kérosène, mais tout en affamant les populations au sol. La voie aérienne n'offre donc pas d'échappatoire : pour éviter le crash global, les voyageurs et les voyageuses des airs sont invité-es à utiliser des alternatives terrestres ou maritimes beaucoup plus sobres. Qu'on se le dise, les avions rapides du futur ne seront réservés qu'à de rares cas de force majeure ! Les désirs de quelques milliardaires de faire des voyages intercontinentaux en moins de deux heures à bord de vaisseaux spatiaux en font-ils partie ? Évidemment non ! Ce ne sont que des caprices d'adultes gâtés dont la réalisation nuirait à l'ensemble des êtres vivants de ce globe.

Le véritable poids des véhicules

Dans le jargon automobile, SUV signifie en anglais *Sport Utility Vehicle*. Ces voitures ont des allures de véhicules

tout-terrain, mais roulent sur la route. Cela leur confère inutilement un certain nombre de tares environnementales : surpoids, gros pneus moins roulants, prise au vent due à la hauteur et à la largeur. Il faut croire que cela ne gêne pas beaucoup les consommateurs puisque ce segment automobile représente la majorité des ventes⁷. Faut-il voir de la démesure dans ces véhicules un peu enrobés ? Oui, sans hésitation, mais ne faisons pas porter le chapeau à une seule catégorie. En réalité, toutes les automobiles du marché versent dans l'excès. Entre la plus petite citadine biplace, qui pèse tout de même plus de 700 kilogrammes, et le plus gros SUV, qui frise les 3 tonnes, le poids moyen des voitures neuves vendues en France en 2020 dépasse les 1 200 kilogrammes⁸ ! Et ces chiffres sont appelés à grimper avec l'arrivée des véhicules électriques⁹. Tous ces engins roulants entrent pourtant dans la catégorie des « véhicules légers » (VL) au prétexte qu'ils pèsent moins de 3,5 tonnes... Tout est relatif dans une société où les alternatives beaucoup plus légères restent encore très marginales.

Alors, que dire des gros camions qui sont classés dans la catégorie « poids lourds » (PL) ? Les plus imposants pèsent

7. MarieLizak, « 50 % de parts de marché pour les SUV en Europe », auto-moto.com, 8 mars 2022. <https://www.auto-moto.com/actualite/societe/50-de-parts-de-marche-suv-europe-325703.html>

8. Ademe, « Car Labelling – Évolution de la masse moyenne ». <https://carlabelling.ademe.fr/chiffrescles/r/evolutionMasseMoyenne>

9. Par exemple, selon les données du constructeur, pourtant considérée comme une petite voiture, la Fiat 500 électrique pèse au minimum 1 180 kg. Souvenons-nous que son ancêtre des années 1960 ne pesait « que » 470 kg.

plus de 15 tonnes à vide et 44 tonnes en charge! On peut et on doit les critiquer lorsqu'ils acheminent des marchandises superflues sur des distances aberrantes. Leur impact est significatif sur l'état des routes, sur la sécurité et sur l'environnement. Une grande partie de leur cargaison ne devrait même pas exister ou devrait être transférée vers le rail ou le fleuve, à bord d'un matériel roulant ou flottant certes encore plus massif, mais beaucoup plus économe en énergie! Cependant, sans pour autant les réhabiliter, on doit reconnaître aux poids lourds routiers un certain nombre d'efforts d'optimisation. Tout d'abord, ils évitent, autant que possible, de rouler à vide. Ensuite, les véhicules sont deux à trois fois moins lourds que leur charge utile. Enfin, au royaume décadent de la combustion, les moteurs Diesel des gros porteurs routiers sont à l'avant-garde des normes de consommation et d'émissions.

En comparaison, la plupart des « véhicules légers » pèsent quinze fois plus lourd que leur « charge utile » la plus courante : une seule personne munie de jambes en état de marche! Cela revient presque à rouler à vide. L'automobiliste devrait donc balayer devant sa portière et changer son regard sur « le gros camion qui gêne tout le monde sur la route ». D'autant plus que les poids lourds ne font souvent, hélas, que satisfaire notre propre demande de produits de surconsommation à flux tendu. N'oublions pas non plus que, même individuellement plus légères, les voitures sont beaucoup plus nombreuses sur les routes. Notre pays compte presque 40 millions

de voitures en circulation¹⁰, soit quasiment une par personne en âge de conduire (certains individus en possèdent même plusieurs). Chacune d'elles parcourt en moyenne environ 10 000 kilomètres par an¹¹, soit de quoi faire le tour de la Terre en quatre ans ! Paradoxalement, 41 % des trajets en voiture font moins de 5 kilomètres¹². Dans le même temps, le manque d'activité physique est un problème de santé publique. Cherchez l'erreur ! En Europe, du point de vue du CO₂, les « véhicules légers » pèsent deux tiers des émissions du transport routier, lui-même responsable de plus de 70 % des émissions de tous les moyens de transport confondus¹³ !

En fait, notre vie est façonnée par la voiture, qui fait partie intégrante de notre quotidien. Mais derrière cette grande banalité et derrière le vocable trompeur de « véhicule léger », se cache un véritable poids lourd qui

10. Ministère de la Transition écologique, « Données sur le parc automobile français au 1^{er} janvier 2021 », Service des données et études statistiques, 12 août 2021. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-le-parc-automobile-francais-au-1er-janvier-2021>

11. Laurence Jaluzot et Charline Babet, *Datalab – Bilan annuel des transports en 2020*, ministère de la Transition écologique, Service des données et études statistiques, décembre 2021. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-12/datalab_97_bilan_annuel_transports_2020_decembre2021.pdf

12. Mathieu Chassignet, « Enquête nationale sur la mobilité des Français : quelques enseignements de la nouvelle édition et évolutions récentes », blog d'*Alternatives économiques*, 3 janvier 2022. <https://blogs.alternatives-economiques.fr/chassignet/2022/01/03/enquete-nationale-sur-la-mobilite-des-francais-quelques-enseignements-de-la-nouvelle-edition-et-evolutions-recentes>

13. Aurore Colin et al., *Datalab – Chiffres clés du climat – France, Europe et Monde*, ministère de la Transition écologique / I4CE, édition 2022.

compromet gravement notre avenir ! En prenant un peu de recul, on voit que cet engin à quatre roues occupe beaucoup trop de place dans notre existence, au sens propre comme au sens figuré. Pensons à tout ce que nous pourrions faire éclore sur les espaces libérés de l'occupation automobile... Alors oui, on a bien eu raison de dénigrer les 4 x 4. On a aujourd'hui encore raison de montrer du doigt les SUV. Mais dès demain, c'est l'ensemble du parc automobile qui doit être profondément remis en question ! Changer de technologie de moteur ne suffira pas, loin de là, car les améliorations sont mathématiquement limitées par les lois de la physique. On aura donc beau affubler nos chères voitures de divers qualificatifs à la mode comme « électrique », « hybride », « à hydrogène », « connectée », « autonome », cela ne réglera pas le problème de base : nos voitures sont trop lourdes, trop grosses, trop rapides, trop puissantes, trop nombreuses et elles sont utilisées abusivement ! Le « véhicule léger » ne trouvera sa légitimité qu'après une cure drastique d'amaigrissement, assortie d'un usage parcimonieux.

Les voiturettes, aussi appelées « voitures sans permis », ont une masse et une vitesse plus raisonnables que celles de leurs grandes sœurs. Seraient-elles l'avenir de l'automobile ? Pas tout à fait, car 350 à 500 kilogrammes, c'est encore beaucoup de poids mort pour transporter un ou deux êtres vivants d'une centaine de kilogrammes... Alors, enlevons deux roues et l'habitacle pour arriver aux 100 à 300 kilogrammes des deux-roues motorisés ! Pour autant, avec des consommations d'essence tournant autour de 5 litres pour 100 kilomètres, motos et scooters

sont à peine plus économes que les voitures. Pourquoi ? Parce que, trop occupés à satisfaire des envies de vitesse et d'adrénaline, les concepteurs ont longtemps laissé de côté l'efficacité énergétique ainsi que la propreté de leurs machines. Ils essayent tout de même de rattraper leur retard en proposant des modèles plus sobres, notamment avec des motorisations électriques.

Les trottinettes électriques, skateboards électriques et autres gyroroues poussent beaucoup plus loin la compacité. Cinquante à cent fois plus légers qu'une voiture, ces accessoires motorisés sont aussi dix à vingt fois plus économes ! Serait-ce la véritable alternative à nos véhicules faussement légers ? En milieu urbain, où elles sont déjà bien présentes, ces « nouvelles mobilités » pourraient remplacer très avantageusement les automobiles. Mais elles conservent toujours un inconvénient majeur : elles ne mettent pas à contribution la merveilleuse mécanique vivante de leurs usagers ! L'avenir de la mobilité est donc encore ailleurs...

Transports de grande capacité

N'y aurait-il pas d'autres voies que le rétrécissement des engins mobiles ? En effet, techniquement, il est souvent vrai qu'en augmentant la capacité de chargement d'un véhicule et en le remplissant à son maximum, on bénéficie d'effets d'échelle positifs : rapportée au nombre de passagers (ou de tonnes transportées), la consommation au kilomètre se trouve allégée. Ce n'est pourtant pas une solution universelle. Car même avec une cargaison optimisée, tout moyen de transport a un impact sur

l'environnement. Et lorsqu'un bus, un train ou un bateau a pour conséquence d'engendrer de nouveaux déplacements dont notre planète se serait bien passée, on ne peut pas dire qu'il soit vertueux. En revanche, s'il évite massivement l'utilisation de nombreuses petites embarcations polluantes, il a toute sa raison d'être.

Alors, que penser des navires de croisière, véritables villes flottantes de 8 000 habitants, des porte-conteneurs de 400 mètres de long pouvant transporter 18 000 « boîtes » de 33 mètres cubes et des avions gros-porteurs de 800 places ? En réalité, ces vaisseaux démesurés ne font qu'augmenter l'impact global du secteur du transport puisqu'ils justifient l'excès en permettant de nouveaux flux insoutenables de marchandises et de passagers ! Ce gigantisme se répercute sur les aéroports, les ports, les canaux et les écluses. La rentabilité de ces moyens de transport XXL n'est assurée que pour d'énormes volumes et de très longues distances. Cela va donc à l'encontre de l'indispensable retour aux échanges de proximité.

Les transports en commun de notre quotidien semblent beaucoup plus raisonnables. Un autocar de 50 places consomme environ cinq fois plus qu'une voiture de 5 places¹⁴, mais peut transporter dix fois plus de passagers. Si les deux véhicules sont remplis au maximum et que l'on calcule la consommation par passager, l'autocar

14. Un autocar de 50 places consomme en moyenne environ 30 l de carburant aux 100 km et une voiture moyenne de 5 places consomme environ 6 l aux 100 km. Ce qui représente 0,6 l par siège pour l'autocar et 1,2 l par siège pour la voiture.

est donc deux fois plus économe que la voiture. Même si ce n'est pas spectaculaire, c'est toujours cela de gagné. Mais ce chiffre peut varier énormément en fonction du taux de remplissage de chacun des véhicules, et tourner en faveur de la voiture si l'autocar circule presque à vide. Et rappelons à toutes fins utiles que, même en rapportant la consommation d'énergie au nombre de passagers, un vélo (à une place) reste cinq fois plus efficace qu'une voiture (à 5 places) bien remplie et deux fois et demie plus efficace qu'un autocar au complet¹⁵.

Faut-il chercher à remplir à tout prix les transports en commun? La réponse n'est pas évidente. Comblers les places libres avec des personnes qui utilisaient auparavant des modes plus écologiques, comme la marche et le vélo, n'a pas d'intérêt. Occuper les sièges avec des usagers qui n'en ont pas vraiment besoin n'est pas non plus une bonne idée. Ces deux exemples sont des effets pervers possibles de la gratuité des transports en commun (gratuité toute relative puisque les coûts sont payés par la collectivité), qui fait débat dans de nombreuses collectivités. Des tarifs sociaux et plus avantageux que ceux de l'automobile semblent être un meilleur compromis.

On peut améliorer le taux d'occupation en limitant l'offre aux seuls trajets les plus rentables (ceux qui relient

15. Nous avons déjà calculé que sur le plat et en vitesse de croisière, un vélo consommait 25 fois moins d'énergie au kilomètre qu'une voiture. Si la voiture transporte 5 personnes, le vélo reste 5 fois plus efficace que la voiture. Et comme l'autocar avec 50 passagers est 2 fois plus efficace que la voiture, le vélo reste encore 2,5 fois plus efficace que l'autocar.

uniquement les grandes villes), mais en faisant cela, on maintient le règne du véhicule individuel motorisé, qui reste incontournable pour tous les autres trajets. À l'inverse, une offre de transports en commun étendue et étoffée, autant en termes d'horaires que de destinations, rend l'automobile caduque, mais laisse des sièges vides à certaines heures et sur certaines lignes. Cette seconde option semble pourtant être une des étapes nécessaires pour se débarrasser des problématiques voitures individuelles. Et même s'il n'est ni possible ni pertinent de desservir les moindres coins reculés du territoire, le transport collectif doit aspirer à un développement suffisant pour que le complément puisse se faire à pied ou à pédales.

Pour espérer rouler à pleine charge, on pourrait aussi créer de nouvelles grandes lignes très attrayantes par leur prix, leur rapidité ou leur confort. Mais elles risqueraient de créer de nouveaux besoins de déplacements à longue distance, sans se substituer aux véhicules polluants sur les trajets du quotidien. Et en cas de doublon avec les lignes existantes, cela pourrait vider ces dernières de leurs usagers, ce que l'on cherche justement à éviter. Ce n'est donc pas souhaitable.

Finalement, pour remplir les transports en commun avec d'anciens automobilistes, il reste une méthode très efficace, mais souvent impopulaire, du moins dans les premiers temps. Elle consiste à brider l'utilisation de la voiture: restrictions de circulation, baisse de l'offre de stationnement, péages, taxes... Cela peut paraître un peu « punitif », mais notre véritable punition serait de subir des catastrophes que nous aurions pu éviter. Alors, dès

maintenant, un minimum de coercition s'impose, et pour tout le monde. Il serait en effet profondément inégalitaire que ceux qui ont les moyens de se payer un gros SUV dernier cri, prétendument écologique, puissent continuer à rouler là où les véhicules plus anciens sont interdits de séjour. Quel que soit leur ex-véhicule encombrant, les mécontents de la première heure finiront par changer d'avis en comprenant qu'ils gagnent eux aussi à profiter d'espaces apaisés et respirables, où il fait bon se déplacer à pied ou à vélo.

Pour conclure, sans être forcément la panacée, le transport en masse de passagers et de marchandises a une carte importante à jouer dans la mobilité de demain. Il doit cependant se cantonner à des trajets strictement nécessaires et déjà bien empruntés. En parallèle, il doit être accompagné de mesures restrictives à l'encontre des véhicules individuels polluants et de politiques très incitatives en faveur des petits modes de déplacement écologiques !

Nouvelles voies, sans issue

Dans un monde idéal, pour tous les trajets, les piétons aimeraient de larges trottoirs, les vélos des pistes cyclables rien que pour eux, les voitures des quatre-voies, les camions des voies de droite, les motos des voies de gauche, les bus des voies dédiées, les trains rapides des voies à grande vitesse... Le tout sans se croiser les uns les autres ! Imaginons un instant que cette profusion d'infrastructures soit possible. Cela réglerait-il les problèmes que posent nos déplacements actuels ? Non ! D'une part, la place qu'occuperaient ces innombrables voies exercerait

une énorme pression sur les écosystèmes. D'autre part, l'augmentation du trafic ainsi facilité entraînerait des consommations, des pollutions et des nuisances insupportables. Une offre pléthorique de possibilités de transport, même si certaines sont vertueuses, n'aurait donc pour effet qu'une augmentation globale des impacts négatifs.

Avec un esprit plus optimiste, on pourrait croire que, grâce à un réseau de pistes cyclables très dense, tous les automobilistes se mettraient miraculeusement à laisser leur grosse voiture au profit du vélo. On pourrait aussi penser qu'un réseau ferré augmenté attirerait comme un aimant les cargaisons des camions et les passagers des avions, et que des canaux creusés à travers tout le pays finiraient de vider les semi-remorques. Mais dans la réalité, tant qu'on laisse de l'espace aux déplacements les plus polluants, ils le remplissent inévitablement, même si des alternatives plus écologiques sont proposées.

La solution serait-elle donc de détruire les infrastructures les moins vertueuses et, à côté de cela, d'en créer de nouvelles, plus adaptées aux transports du futur? Ce serait oublier que notre monde réel comporte certaines limites que nous avons déjà bien approchées, voire dépassées. L'argent public, les matières premières, les surfaces de terre vivante, les ressources énergétiques, et la main-d'œuvre ne sont pas infinis. Nous et notre planète n'avons tout simplement ni les moyens ni le temps de rebâtir de toutes nouvelles voies de circulation! En revanche, dès maintenant, nous pouvons donner de nouveaux usages aux infrastructures existantes.

Nous devons donc, dès aujourd'hui, arrêter d'investir des milliards dans des projets routiers et, encore pire, autoroutiers, car, dans un avenir souhaitable, ces artères flamboyantes sont toutes vouées à devenir désertes ! Nous devons aussi arrêter de rêver d'avoir une nouvelle piste cyclable en parallèle de chaque route. Un tel rêve annonce un monde où rien n'a vraiment changé, où les modes de déplacement dominants sont toujours les mêmes : des véhicules trop rapides et trop gros pour s'accommoder de la présence d'un vélo ou d'un piéton sur leur chemin. Ce rêve vire au cauchemar quand on pense au désastre écologique que l'on n'aura pas su éviter. Alors, ayons une vision à la fois plus réalisable et plus ambitieuse : apaiser nos routes pour qu'elles deviennent elles-mêmes un immense réseau cyclable et pédestre ! En effet, notre dédale routier surdimensionné constitue déjà un terrain idéal pour la mobilité de demain. Il faut simplement que nous ayons le courage de l'adapter pour qu'il donne la priorité absolue à un écosystème d'engins légers, sobres, à taille et à vitesse humaine.

Côté rail, nous avons déjà évoqué les effets pervers qu'aurait la construction de nouvelles lignes à grande vitesse. Mais n'oublions pas que nous avons hérité d'un trésor ! Le réseau ferré de la première moitié du ^{xx}e siècle avait de quoi faire rougir celui d'aujourd'hui, qui ne relie plus que les grandes villes à la capitale. Nos ancêtres ont travaillé dur, souvent à la seule force de leurs bras, pour tailler les voies dans le paysage. Nous n'avons même pas besoin de tracer de nouveaux sillons à grand renfort de bulldozers ! Cet héritage du passé ne demande qu'à revivre avec du matériel roulant à la hauteur des nouveaux défis

environnementaux. Et pour les cas où le train ne voudrait vraiment pas passer une seconde fois, une fois réaménagées, ces voies en pentes douces sont idéales pour les cycles à pédales, les rollers et les paires de baskets!

Nos prédécesseurs nous ont légué un autre cadeau encore plus ancien : un système de voies navigables ! Autrefois principal moyen de transport de marchandises, il est réduit aujourd'hui à du tourisme fluvial à moteur, dont les consommations de carburant par passager sont indécentes. Pourtant, ces canaux sont toujours en capacité de recevoir les cargaisons lourdes qui deviendront indésirables sur nos routes apaisées. Et les ex-croisiéristes pourront encore mieux profiter du paysage en empruntant les chemins de halage à vélo ou à pied !

Beaucoup plus récent dans notre histoire, après avoir connu une croissance dangereusement rapide, le trafic aérien est voué à diminuer considérablement. Il va donc sans dire que tout nouvel aéroport, ou ne serait-ce qu'un agrandissement, deviendrait un fardeau insupportable pour l'avenir ! Alors, réfléchissons dès maintenant à toutes les activités vertueuses qui pourraient occuper les futures friches aéroportuaires...

Une relance sans fin

Nous sommes plus que jamais au pied du mur. L'industrie conventionnelle du transport doit dès maintenant se transformer en profondeur, sans quoi elle est vouée à la faillite, et nous à l'extinction ! Sous couvert de « transition écologique », est-il vertueux de subventionner ce secteur, et tout particulièrement celui de l'automobile ?

On pourrait le croire si les usines s'orientaient vers des solutions de déplacement radicalement écologiques. Or, sous un maquillage de nouvelles technologies, les aides diverses ne font que soutenir la production de véhicules toujours incompatibles avec les enjeux de demain! Nous continuons à nous épuiser (nous et notre planète) avec des demi-mesures aussi coûteuses que néfastes. Inciter à remplacer des voitures qui fonctionnent encore par de nouveaux modèles, à peine plus écologiques, ne fait qu'aggraver notre situation en confortant des modes de déplacement qui ne devraient plus avoir lieu d'être. Cela prolonge encore d'une quinzaine d'années des habitudes qui ne sont déjà plus tenables. En outre, les anciens véhicules risquent de continuer leur course polluante dans des pays moins riches qui ne sont pas encore surmotorisés. Dans le meilleur des cas, les vieilles voitures en fin de vie seront mises hors d'état de nuire dans des filières de destruction adaptées. Et après? En toute bonne conscience, nous repartirons avec des véhicules tout neufs qui n'auront pas fondamentalement changé (juste un peu plus lourd) et qui largueront chacun au moins une trentaine de tonnes d'équivalent CO₂ sur l'ensemble de leur cycle de vie¹⁶. Si tous les automobilistes se relancent dans ce pacte

16. Nous prenons l'exemple de trois véhicules électriques de taille «raisonnable» sur lesquels Green NCAP a fait une analyse du cycle de vie avec un mix énergétique européen : Fiat 500 87 kW, Renault ZOE R110 ZE50, Hyundai KONA 39.2 kWh. Leurs bilans carbone estimés moyens sont respectivement : 29, 32 et 31 t d'équivalent CO₂ par véhicule. <https://www.greenncap.com/european-lca-results/>

infernale, notre budget carbone pour rester sous la barre de sécurité des 1,5°C sera bien vite épuisé...

Force est de constater que la politique des petits pas n'a pas fonctionné. Insignifiants, de côté ou dans le mauvais sens, ces pas innombrables n'ont fait que déclencher et aggraver les crises qui nous guettaient. Ils ont aussi terriblement retardé la mise en place de solutions efficaces. Si nous ne voulons pas que notre monde devienne invivable, nous n'avons plus le choix : il faut faire des pas de géants (qui, paradoxalement, sont souvent d'une grande simplicité...), et tout de suite ! Au point où nous en sommes, seule une révolution dans nos façons de nous déplacer est à la mesure de ce qu'exige notre futur.

RÉVOLUTION NUMÉRIQUE

Face à des chiffres sans équivoque sur son impact, au lieu de se remettre en question, le secteur des transports cherche des voies de contournement. S'engouffrer dans la brèche ouverte par les promesses virtuelles des technologies numériques est une manière habile de faire diversion et d'occulter les vrais problèmes. Mais nous ne sommes pas dupes !

Véhicule autonome, à nos dépens

Un véhicule est dit « autonome » lorsqu'il peut se passer d'un chauffeur humain. Le pilotage est alors assuré par de nombreux calculateurs en liaison avec de multiples capteurs. On le qualifie parfois de « connecté », tant il doit échanger de données avec l'extérieur. Cette technologie

fonctionne très bien pour des transports guidés par rail dans un environnement très maîtrisé. C'est le cas de certaines lignes de métro. Mais sur des parcours partagés par d'autres usagers au comportement naturellement imprévisible, le défi devient beaucoup plus difficile à relever. Même si, sur le papier, elles ne paraissent pas complètement insurmontables, d'importantes questions de sécurité restent en suspens.

Quelles sont les « promesses » du véhicule autonome ? Faire l'économie du salaire d'un chauffeur en l'évinçant au profit d'un énorme bagage électronique très cher et très gourmand en énergie ? Remplacer les erreurs humaines par des bugs informatiques ? Mieux optimiser les parcours et le remplissage des véhicules, ce que permettent déjà les systèmes d'aide à la navigation et de covoiturage ? Se garer automatiquement à des endroits où les places sont vouées à être rendues aux piétons ? Faire rouler des véhicules lourds à la queue leu leu, comme le fait déjà très bien le train ? Reporter sur des machines la responsabilité des accidents ? Mais où sont les réponses aux vrais enjeux de la mobilité de demain ? Caché derrière son intelligence artificielle, le véhicule autonome n'est en réalité qu'un gadget technologique d'une grande complexité, qui ne règle aucun des problèmes majeurs liés aux véhicules classiques : poids, encombrement, consommation énergétique, santé publique... Des défauts qui n'ont d'ailleurs rien à voir avec l'ancien conducteur mis au chômage !

Pour se débrouiller « tout seul », en plus de son nouveau cerveau digital et de ses sens électroniques, le véhicule doit être assisté de l'extérieur via diverses communications

à distance : informations routières et de trafic, panneaux de signalisation communicants, surveillance vidéo, données transmises par d'autres véhicules, puissance de calcul supplémentaire et espace de stockage additionnel dans des centres de données (*data centers*), le tout transporté par les ondes invasives du réseau 5G... L'engin à quatre roues que l'on prétend « autonome » est donc en réalité très dépendant d'un énorme système informatique, lui-même avide d'énergie et d'investissements publics, et géré par quelques multinationales assoiffées de bénéfices ! Il a même besoin d'opérateurs humains pour le piloter à distance lorsqu'il se met à bugger¹⁷...

Et que dire de l'utilisateur qui se laissera balader d'une porte à l'autre, avec tout le loisir d'être rivé sur des écrans ? Sera-t-il encore en pleine possession de ses jambes et de son sens de l'orientation ? Combien de temps de cerveau disponible et de données personnelles cédera-t-il à un système dont la rentabilité reposera en partie sur des revenus publicitaires et sur de la vente d'informations ? Imaginons que ce concept fonctionne techniquement et qu'il suscite l'intérêt des utilisateurs. Sera-t-il emprunté par d'anciens automobilistes ou par de potentiels piétons, cyclistes ou usagers des transports en commun ? Et si l'engouement était réellement au rendez-vous, ne risquerait-on pas d'assister à des bouchons de véhicules autonomes ?

17. Cécile Dumas et Jean-Christophe Ribot, « Autopsie d'une intelligence artificielle », Arte, 23 octobre 2022. Look at Sciences et Arte France, 2022. <https://site.lookatsciences.com/artificielles-intelligences/>

Non content de ne pas répondre aux défis environnementaux, le véhicule sans chauffeur nous promet en prime de nombreux effets pervers¹⁸ ! La véritable autonomie ne serait-elle pas de se déplacer par ses propres moyens, avec de vraies jambes et un vrai cerveau, libres comme l'air ?

Taxis volants sans volant

Avec déjà du plomb dans l'aile, les véhicules sans chauffeur tentent maintenant la voie des airs pour se racheter une conduite... Certes, pour des prises de vues aériennes, les petits drones à hélices multiples ont très avantageusement remplacé le lourd hélicoptère avec pilote et équipe de tournage. Mais pour le transport de personnes, c'est une autre histoire : envoyer et maintenir en l'air un véhicule avec des passagers représente une dépense d'énergie très importante. Les moteurs électriques, qui sont actuellement les plus préconisés, ont besoin de batteries dont le poids est très pénalisant. L'autonomie ne serait donc que de quelques dizaines de kilomètres entre deux recharges¹⁹. Et au vu des défis technologiques à relever, on sent bien

18. Julie Thoin-Bousquié, « Véhicule autonome et transition écologique, l'équation impossible ? », *L'Usine nouvelle*, 6 avril 2021. <https://www.usinenouvelle.com/article/mobil-idees-vehicule-autonome-et-transition-ecologique-l-equation-impossible>. N1077359

19. V. Fauroux – Reportage vidéo : Pierre Gallaccio, Maud Gatineau et Vincent Pierron, « Paris 2024 : voici à quoi ressembleront les futurs taxis volants », TF1 Info, 11 novembre 2022. <https://www.tf1info.fr/high-tech/video-innovation-jo-de-paris-2024-voici-a-quoi-ressembleront-les-futurs-taxis-volants-volocity-2238296.html>

qu'un tel service de transport ne serait pas à la portée de tout le monde.

Au-delà de la faisabilité technique se pose la question de l'acceptabilité. Est-il admissible que quelques privilégiés fassent des sauts de puce énergivores d'un « vertiport » à l'autre ? Quel est l'intérêt pour les autres habitants de voir le ciel des villes sillonné par des aéronefs bourdonnants qui peuvent potentiellement leur tomber sur la tête ? Prévue pour connecter les aéroports aux lieux stratégiques, cette innovation n'est-elle pas une dangereuse extension du transport aérien dont le bilan est déjà catastrophique ?

Livraison déshumanisée

Avec un brin d'imagination, on pourrait identifier des trajets pour lesquels la présence humaine est superflue et avantageusement remplaçable par un automate. On pense notamment aux cas où l'objet à transporter est beaucoup plus léger que son livreur, qui devient donc un fardeau. Alors, la pizza déposée devant la fenêtre par un drone, est-ce pour bientôt ? Probablement pas. Les problèmes de sécurité sont à peu près les mêmes que pour les véhicules autonomes sur roues : la jungle urbaine est semée d'embûches pour un petit engin à l'intelligence toute relative. Capable de transporter plus de colis tout en étant plus adapté à ce milieu, le livreur à vélo est beaucoup plus pertinent, s'il est payé décemment ! La livraison automatisée ne serait donc vouée qu'à des cas très particuliers de lieux isolés et difficiles d'accès pour un humain. Donc pas de quoi révolutionner le transport de marchandises...

Quoi qu'il en soit, avec ou sans livreur en chair et en os, nous devons en premier lieu remettre en question la livraison tous azimuts d'une multitude d'objets futiles qui, avant d'atteindre leur cible, ont souvent des parcours longs et chaotiques et qui, dans bien des cas, finissent leur courte vie matérielle à la poubelle.

L'illusion de la dématérialisation

Grâce aux progrès de l'informatique et des télécommunications, nous pouvons envoyer de grandes quantités d'informations presque partout sur le globe et à la vitesse de la lumière. Ces flux intangibles remplacent parfois certains déplacements physiques : la lettre en papier a trouvé son substitut électronique et il est possible de travailler à distance sans se rendre systématiquement dans les locaux de sa société. L'intelligence cybernétique nous offre aussi une ribambelle d'applications censées nous aider à mieux nous déplacer...

L'avènement du numérique a-t-il pour autant infléchi la courbe du transport ? Visiblement non, puisque, hors crise financière, sanitaire ou pétrolière, les émissions de CO₂ de ce secteur n'ont pas cessé de croître depuis le boum des télécommunications. Pire, le monde numérique est venu ajouter son impact à celui du transport ! Car, bien que stockant et transmettant des données « immatérielles », nos systèmes informatiques reposent sur un grand nombre d'équipements et d'infrastructures, bel et bien réels, dont la fabrication monopolise d'énormes ressources et dont l'utilisation consomme beaucoup

d'énergie²⁰. À mesure que les performances du matériel augmentent, de nouveaux usages viennent réclamer une augmentation des capacités. Le secteur du numérique est donc en très forte croissance et, avec à son passif 4% des émissions mondiales de gaz à effet de serre, il a déjà dépassé le transport aérien dans son ensemble²¹ ! Si nous devons pédaler pour produire l'énergie qu'ils consomment, nous serions bien moins friands de nos services numériques... Alors, un conseil : si, pour vous évader, vous hésitez entre prendre l'avion ou regarder une vidéo haute définition en ligne, sélectionnée par votre algorithme favori, choisissez plutôt d'aller faire une balade à pied ou à vélo, avec une bonne vieille carte ! En prime, vous trouverez peut-être sur votre chemin un bon bouquin dans une boîte à livres. Et si vous aimez les mauvais romans d'anticipation, vous pouvez toujours lire le chapitre suivant.

PLANS SUR LA COMÈTE

Notre plan A, c'est de tout faire pour rendre nos déplacements compatibles avec le système-Terre. Mais cela ne plaît pas à tout le monde ! Certains membres de l'humanité souhaiteraient conserver (voire augmenter) leur

20. Mathieu Brand, « Impact du numérique sur l'environnement : quelles sont les 3 sources de pollution ? », Carbo Academy, mis à jour en octobre 2022. <https://www.hellocarbo.com/blog/calculer/impact-du-numerique-sur-l-environnement/>

21. Anaïs Fleury, « Qu'est-ce que la pollution numérique, et comment lutter contre ? », Carbo Academy, mis à jour en juin 2022. <https://www.hellocarbo.com/blog/reduire/pollution-numerique/>

façon actuelle de bouger. Et comme il devient de plus en plus difficile de nier les graves conséquences déjà visibles de ce comportement, ils proposent des plans B qui permettraient de mettre la catastrophe de côté.

On pourrait naïvement penser que les deux démarches ne sont pas incompatibles et sont même complémentaires. Pourtant, les faux espoirs colportés par la seconde ralentissent considérablement la mise en œuvre de mesures réellement efficaces. En fait, ce sont deux façons d’agir qui s’affrontent : ralentir notre course vers le précipice tout en essayant de trouver d’autres chemins (plan A) ou continuer de foncer à toute vitesse en croyant trouver en cours de route un moyen de survivre (ou pas) à la chute (plan B). Pour éviter de tomber dans le piège, décryptons un assortiment de plans B au dénouement calamiteux.

Se défausser

Le plan B le plus facile à mettre en œuvre est l’absence totale de plan... et c’est un très mauvais plan ! Cette apathie est pourtant motivée par un ensemble de fausses excuses qui nous incitent à ne rien changer.

Presque plus personne ne nie l’existence du réchauffement climatique : il faut dire qu’on commence franchement à en ressentir les effets. Malgré des preuves scientifiques incontestables, le doute s’est reporté sur l’origine humaine de la crise climatique et écologique. Est-ce de l’ignorance ou de la mauvaise foi ? Ce déni est peut-être un mécanisme de défense de certains cerveaux face à une réalité trop difficile à accepter... Mais cela n’évite pas

le danger ! Bien au contraire, le scepticisme dans ce domaine est l'antichambre du cataclysme.

Il existe d'autres façons de ne pas voir la réalité en face, sans pour autant remettre en question les phénomènes globaux qui sont à l'œuvre et leurs causes. C'est le pari des optimistes qui pensent que tout va bien se passer, même si nous continuons notre course effrénée sans nous préparer aux bouleversements. Ce petit jeu dangereux est, hélas, perdu d'avance et il n'y aura, en définitive, aucun heureux gagnant. À l'opposé, les fatalistes admettent que nous sommes bien face à un grave problème, mais ils pensent que tout est déjà perdu et qu'il est donc inutile de s'évertuer à changer nos mauvaises habitudes. Alors, à ce compte-là, autant s'amuser une dernière fois en polluant un bon coup avant la fin du monde. L'erreur, c'est que nous ne sommes pas là face à une météorite vouée à désintégrer notre planète. Bien que déjà trop rapide, le cataclysme reste progressif. Il ne nous conduira pas vers une fin explosive, mais vers un certain degré de dégradation des conditions de vie sur Terre, qui dépendra de notre capacité actuelle à en limiter les causes. Même si nous sommes déjà engagé-es vers des seuils dangereusement élevés, toutes les actions immédiates et significatives que nous pourrons mener en faveur du climat et de la biodiversité auront pour effet de modérer la gravité de notre situation à venir. Et pour nous rediriger vers des conditions de vie acceptables, moins nous attendons, moins les changements à opérer seront abrupts. Il n'est donc pas trop tard pour agir, mais il est plus que temps !

Il serait par conséquent totalement irresponsable de continuer à repousser les problèmes pour en laisser

la charge cumulée aux plus jeunes et à celles et ceux qui viendront après ! Personne n'est trop vieux ou trop vieille pour changer, et nous sommes tous et toutes assez matures pour assumer la responsabilité de nos erreurs passées. Les crises climatiques et environnementales, qui nous paraissaient lointaines il y a quelques décennies, sont bel et bien là. Et jusqu'à présent, nous n'avons pas fait grand-chose pour les éviter... Au stade où nous en sommes, même les plus âgé-es d'entre nous subiront les conséquences du réchauffement climatique, comme nous subissons déjà les problèmes de santé dus à la pollution et à la sédentarité. Alors, toutes générations confondues, commençons dès maintenant notre cure de jouvence en adoptant dès aujourd'hui les transports pour demain !

Pour sortir de l'immobilisme qui nous enferme dans notre hypermobilité, arrêtons de penser que nous ne pouvons rien faire à notre échelle et que tout vient d'en haut. Car celles et ceux que l'on nomme les « puissants », les « riches », les « décideurs », les « politiciens », les « grandes entreprises », les « lobbies », l'« État » ou le « gouvernement » ne sont rien de plus que des membres de notre propre société humaine. Ne cherchons donc pas à faire porter l'intégralité de la responsabilité à un camp de « méchants », dont nous sommes aussi en réalité les complices. Dans cette bataille du siècle, nous sommes tous et toutes ensemble notre propre ennemi-e, mais aussi notre propre allié-e. Individuellement et collectivement, nous avons tous et toutes des pouvoirs : nos votes, nos choix de déplacement et de consommation, nos orientations professionnelles, nos voix dans la rue, notre force de persuasion, nos moyens

de pression... Alors utilisons-les, au lieu d'attendre que cela bouge à l'étage d'au-dessus!

D'autant que tout est relatif: nous sommes chacun-e le/la « riche » d'un-e autre. Dans les pays « développés » à faible croissance démographique, il est confortable de penser que les problèmes viennent des pays émergents très peuplés ou qui ont une forte natalité. On entend souvent: « Que représentent 70 millions de Français face à 1,4 milliard de Chinois? » ou: « La France, ce n'est que 1% des émissions mondiales! » Cette manière de se décharger s'effondre lorsque l'on fait des calculs par habitant. Pour ses déplacements, le Français moyen émet presque trois fois plus de CO₂ que le Chinois moyen. Et l'Américain moyen presque huit fois plus²²! N'oublions pas non plus que les pays dits « riches » ont externalisé les industries les plus sales hors de leur territoire tout en continuant à profiter de leur production. En réalité, même avec des véhicules qui semblent plus propres, c'est bien la minorité des plus riches qui consomme le plus de kilomètres de déplacements polluants par personne, et ce, depuis plus d'un siècle! Ce ne serait pas si grave si le mode de vie dit « occidental » était marginal. Mais à eux seuls, les pays riches (France incluse), bien que minoritaires d'un point de vue démographique, dépassent déjà les capacités de notre planète! Et le modèle consumériste et surmotorisé qu'ils exhibent a tendance à se propager dans

22. Aurore Colin et al., *Datalab – Chiffres clés du climat – France, Europe et Monde*, op. cit. Émissions de CO₂ par habitant pondérées par le pourcentage des transports.

tous les pays qui commencent à s'industrialiser. Même avec un nombre d'habitants réduit, des déplacements en perpétuelle croissance finiraient toujours par franchir de dangereuses limites. Il serait donc inutile et dangereux de vouloir éliminer les trois quarts de la population humaine en espérant ainsi sauver la planète. Il faut au contraire nous préparer à accueillir des réfugié-es climatiques, victimes collatérales de notre orgie énergétique. Il faudra aussi songer à aider les pays pauvres les plus touchés par des catastrophes engendrées par d'autres, dont nous faisons partie. Certes, nous devons réfléchir à des méthodes douces pour contenir le nombre d'individus humains qui peuplera notre planète dans les décennies à venir, mais nous devons avant tout imaginer de nouvelles façons de vivre et de nous déplacer ! Il serait donc opportun que celles et ceux qui en ont les moyens se convertissent rapidement à la sobriété en matière de déplacements (ainsi que dans d'autres domaines...) ²³, d'une part pour réduire notre impact très significatif à l'échelle mondiale, et d'autre part pour offrir un bel exemple à suivre aux autres, beaucoup plus nombreux, qui aspirent à la même « richesse ».

Sur notre trajet vers l'avenir, toute tentative de nous défausser aurait pour conséquence d'envoyer tout le monde dans le fossé ! Tous et toutes embarqué-es dans la même biosphère, nous devons œuvrer conjointement pour éviter l'accident grave.

23. Association négaWatt, *Synthèse du scénario négaWatt 2022*, octobre 2021. <https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese-scenario-negawatt-2022.pdf>

L'impossible compensation

Sans vouloir nous débarrasser du problème, ne pourrions-nous pas compenser les gros dégâts que nous causons en restaurant, ailleurs et plus tard, des conditions plus propices à la biodiversité et à l'absorption de carbone? Les promoteurs de projets autoroutiers et de l'urbanisation galopante voudraient bien nous le faire croire. Les compagnies aériennes aussi. Les uns promettent de rétablir, en un lieu hypothétique, autant de vie sauvage qu'ils en détruiraient sur leurs chantiers. Les autres font miroiter des plantations d'arbres qui avaleraient tout le CO₂ émis par leurs activités polluantes...

Mais on en revient toujours à la dimension finie de notre planète! Sur quelles terres peut-on réintroduire la nature? Dans l'idéal, il faudrait transformer, quelque part, des surfaces bitumées équivalentes en espaces naturels. Hélas, à court terme, il est impossible de rétablir la richesse du vivant sur d'anciennes surfaces stérilisées! Et de toute façon, la pression foncière est telle qu'il est rarissime que l'on abandonne du terrain à la vie spontanée, sauf quand celui-ci est tellement pollué qu'il en devient inutilisable... Alors, on se contente le plus souvent d'acheter des terrains déjà ensauvagés qui ne servent que de faire-valoir environnemental. On ne compense donc absolument rien! Pour les arbres, le problème est le même. Où les plante-t-on? Sur des prairies sauvages, elles-mêmes déjà captatrices de carbone et riches en biodiversité? Sur des terres agricoles indispensables pour nourrir des populations locales? Et quelles essences fait-on pousser? Des monocultures sylvicoles destinées à une exploitation industrielle, qui ne

laissent aucune place à d'autres formes de vie? Et combien de décennies faut-il à combien d'arbres qui n'ont pas encore poussé pour absorber le gaz carbonique qu'un seul réacteur d'avion crache en quelques heures de vol? Au lieu de s'embêter à planter, certaines compagnies se contentent même, sans états d'âme, de promettre de soi-disant limiter la déforestation... Mais qui a déjà vu de ses yeux le fruit de la compensation du billet qu'on lui a vendu? Selon quels calculs fallacieux arrive-t-on à faire croire que l'on parvient, on ne sait ni où ni comment, à absorber tout le CO₂ que l'on déverse? Ces forêts invisibles ne sont en réalité que des indulgences accordées à celles et ceux qui ont les moyens de s'offrir des voyages polluants. Ne soyons pas crédules! Ce n'est pas en nous achetant une bonne conscience que nous accéderons à la vie terrestre éternelle et que nous éviterons les flammes de l'enfer climatique!

Si nous ne voulons pas tout détruire sur notre passage, nous ne pouvons plus continuer à voyager comme maintenant. La compensation étant illusoire, nous n'avons qu'une option: réduire directement notre impact²⁴. S'agissant de nos infrastructures, la seule façon fiable de préserver la biodiversité est donc tout simplement de ne pas l'ensevelir sous le goudron! Et pour atténuer à coup sûr les émissions du transport aérien, il suffit de ne pas prendre l'avion!

24. Sylvie Bukhari-de Pontual, Myrto Tilianaki, Maureen Jorand, *Compensation carbone : tout sauf neutre!*, CCFD-Terre Solidaire, octobre 2021. https://ccfd-terresolidaire.org/IMG/pdf/rapport_neutralitecarbone_ccfd-terresolidaire.pdf

Géo-ingénierie, des effets pas si secondaires

Malgré tout, ne pourrions-nous pas trouver quelques idées de génie pour nous affranchir des effets néfastes de nos déplacements voraces ? C'est ce que voudrait promettre la géo-ingénierie²⁵, qui englobe diverses méthodes artificielles censées corriger à notre guise le climat global de notre planète. Une sorte de médicament que l'on administrerait à la Terre pour soigner une maladie que nous aurions refusé de prévenir. Cela rappelle une stratégie très lucrative, utilisée dans l'industrie chimique, qui consiste à vendre à la fois les produits dangereux qui rendent malade et les médicaments censés guérir. Notons au passage que cette médecine géo-ingénierique ne s'intéresse qu'au climat et oublie tous les autres effets délétères de nos transports pathogènes.

Parmi ces traitements miracles, il y a la séquestration du carbone. L'idée, très théorique, est de capturer le CO₂ à la sortie des cheminées et des pots d'échappement, ou même dans l'air ambiant, où il est très dilué, et de l'enfermer dans d'immenses cavités souterraines... En réalité, il est d'une part très difficile et très énergivore d'isoler le CO₂. Donc le peu que l'on serait capable d'attraper serait totalement insignifiant par rapport à nos émissions.

25. Petra Thurn, « La géoingénierie va-t-elle sauver le climat ? », 42 - *La réponse à presque tout*, Arte, 22 janvier 2022. <https://www.arte.tv/fr/videos/101938-006-A/42-la-reponse-a-presque-tout/>. *La Terre au carré*, "Les fausses promesses de la géo-ingénierie du climat", France Inter, 21 décembre 2022. <https://www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/la-terre-au-carre/la-terre-au-carre-du-mercredi-21-decembre-2022-1133246>

D'autre part, aucun type de stockage ne garantit une étanchéité à long terme, pourtant indispensable pour ne pas engendrer de nouvelles vagues de bouleversements climatiques et d'autres effets indésirables. La seule séquestration du carbone éprouvée est celle qui est assurée par les milieux naturels (forêts, prairies, océans...), mais encore faut-il les laisser vivre sans les détruire ni les surexploiter.

L'écosystème terrien a mis des millions d'années à capturer et à fossiliser du carbone. Il ne pourra, hélas, pas le réabsorber en quelques décennies, surtout si nous continuons à en larguer massivement dans l'atmosphère ! Certains proposent donc de lui donner un grand coup de fouet en fertilisant artificiellement les océans, avec une incertitude totale sur les effets, désirés ou pas. On est en droit d'imaginer les catastrophes écologiques que cela pourrait entraîner, à l'instar de ce que provoque l'agriculture chimico-industrielle terrestre (la prolifération des algues vertes en Bretagne en est un exemple éloquent). Notre seul salut est donc bien de laisser tranquille le carbone qui est encore originellement séquestré dans le sol et de laisser fonctionner les pompes à carbone naturelles.

Face à la surchauffe globale, d'autres proposent le parasol global : l'injection d'aérosols dans la stratosphère pour stopper une part du rayonnement solaire. Ce remède hasardeux serait un traitement curatif à vie, puisque tout arrêt signifierait un retour rapide aux températures inhérentes à l'accumulation de nos émissions de gaz à effet de serre ! Notons par ailleurs que nous ignorons totalement les effets secondaires que cela pourrait avoir. Et pour cause, avant la mise sur le marché, il n'y a pas d'essais cliniques possibles

sur des échantillons de patients volontaires. Car, jusqu'à preuve du contraire, nous n'avons qu'une seule planète.

Conquête spatiale et désolation terrestre

Des esprits audacieux nous promettent des voyages dans l'espace, en orbite autour de la Terre, vers la Lune, vers Mars et vers des astéroïdes riches en ressources minières! Certains voient même la planète Mars comme une solution de remplacement de la Terre, que nous aurions rendue inhabitable...

Certes, nous avons réussi d'incroyables prouesses en envoyant des stations spatiales en orbite autour de la Terre, des hommes sur la Lune, des robots sur Mars et des sondes aux confins du système solaire. Toutefois, chaque lancement d'engin spatial requiert une telle quantité d'énergie que les ressources de notre planète ne supporteraient pas la démocratisation des voyages extraterrestres²⁶. Quant à la colonisation de Mars, corps céleste assurément inhospitalier, elle pose tellement de problèmes insolubles²⁷ qu'il est infiniment plus simple et plus raisonnable de préserver la vie sur notre propre planète.

Évitons donc la stratégie de la terre brûlée. Laissons l'espace à la recherche scientifique, celle qui nous aide à

26. Wolfgang Zündel, « Allons-nous voyager jusqu'à Mars ? », 42 – *La réponse à presque tout*, Arte, 16 juillet 2022. <https://www.arte.tv/fr/videos/104839-002-A/allons-nous-voayer-jusqu-a-mars/>

27. Mirella Pappalardo, « Notre corps est-il prêt pour Mars ? », 42 – *La réponse à presque tout*, Arte, 12 juin 2022. <https://www.arte.tv/fr/videos/104840-002-A/notre-corps-est-il-pret-pour-mars/>

comprendre d'où nous venons et où nous allons. À défaut de nous satelliser, contentons-nous de nous déplacer plus intelligemment à la surface de la Terre.

Miracle technologique

En deux siècles, la technologie humaine a connu un extraordinaire développement. Ses possibilités sont si fascinantes que nous lui vouons parfois une confiance aveugle. Nous pensons pouvoir régler chaque nouveau problème par une innovation technologique. Hélas, cela a souvent des effets indésirables, parfois plus graves que les symptômes que l'on pensait traiter. N'oublions pas que la technologie est à l'origine de la majorité des déséquilibres actuels sur notre planète !

Le domaine des transports est déjà le théâtre de ce que les spécialistes nomment l'« effet rebond²⁸ ». Lorsqu'une avancée technologique améliore l'efficacité d'un véhicule, elle conduit le plus souvent à une utilisation plus intensive de ce dernier, ce qui annule les gains environnementaux que l'on attendait. Ce paradoxe est par exemple à l'œuvre sur les routes, où des moteurs de plus en plus économes entraînent des véhicules de plus en plus gros, de plus en plus nombreux et qui parcourent de plus en plus de kilomètres. Finalement, la consommation énergétique globale du secteur du transport continue d'augmenter.

28. « Effet rebond (écologie) : définition, principe, exemples et solutions », *Youmatter*, mis à jour le 5 juin 2020. <https://youmatter.world/fr/definition/effet-rebond-ecologie-definition-principe-exemples-solutions/>

Par ailleurs, ne croyons pas que les bonds technologiques se font du jour au lendemain, juste en claquant des doigts. En coulisses, il y a des années de réflexion, de recherche, de travail et d'essais plus ou moins concluants, qui mobilisent un grand nombre de personnes qualifiées ainsi que des fonds importants. Comme celles de la planète, ces ressources humaines et financières sont limitées, et il convient de les utiliser à bon escient. Au stade très avancé de notre cancer terrestre globalisé, nous manquons tout simplement de temps et de moyens pour nous lancer dans de longs et vastes programmes de développement de solutions techniques de pointe, dont l'issue est très incertaine et dont les conséquences pourraient s'avérer désastreuses.

La fuite en avant technologique n'est donc pas une réponse crédible pour rendre nos déplacements compatibles avec la vie sur Terre. Nos machines « high-tech » restent fragiles, éphémères, complexes, peu fiables, limitées, difficiles à fabriquer et à recycler, consommatrices de ressources, envahissantes. Elles n'ont pas encore passé le filtre de l'évolution, qui ne conserve que ce qui fonctionne bien avec le milieu environnant.

Faut-il retourner à l'âge de pierre ? Non, car nous n'avons pas encore réussi à fabriquer des machines à remonter le temps. En revanche, le génie humain est tout à fait capable de redécouvrir, de revisiter, d'améliorer et de réinventer des solutions de déplacement astucieuses, simples, sobres et efficaces. Et il doit le faire dès maintenant, sans attendre le miracle technologique.

V. LES PISTES À EMPRUNTER

Nous venons d'éviter de dangereuses sorties de route. Mais il nous reste encore du chemin à parcourir ! Pour trouver un équilibre viable à la surface de notre planète, la plupart des humains des pays industrialisés doivent rapidement (en deux ou trois décennies) diviser au minimum par cinq leur consommation d'énergie¹, dans tous les domaines, et particulièrement celui du transport. Le défi peut paraître immense, pourtant il ne comporte rien d'irréalisable.

En premier lieu, il nous faut revoir la distance, la vitesse et la fréquence de nos déplacements. Nous devons en parallèle utiliser des véhicules sobres, efficaces et dimensionnés pour nos besoins réels. Après deux siècles de surexploitation des ressources terrestres, c'est au tour de nos moyens de transport de s'adapter à notre planète. Et très égoïstement, il est dans notre intérêt de pratiquer des façons de bouger bénéfiques pour notre santé. Préparés à éteindre le feu dans nos moteurs, nous pouvons maintenant découvrir les meilleurs moyens de nous laisser porter en douceur par les autres éléments.

1. Datagir/Ademe, « Le budget et l'empreinte carbone, c'est quoi ? », blog Datagir, 16 mai 2020. <https://datagir.ademe.fr/blog/budget-empreinte-carbone-c-est-quoi/>

VERS D'AUTRES VOIES AÉRIENNES

Plus qu'un rêve, voler permet certains déplacements que les autres modes peuvent difficilement réaliser. Bien que les aéronefs actuels aient bien obscurci la voie des airs, celle-ci offre encore quelques rares couloirs vers l'avenir. Les objets volants du futur ne seront peut-être pas ceux que nous imaginions...

Planer

Les avions ne sont pas tous des gouffres énergétiques ! Grâce à une extrême légèreté, à un aérodynamisme irréprochable et à une grande envergure, certains arrivent à assurer leur portance sans débauche de vitesse et de turbulences. Regardons, par exemple, ce que peut accomplir un planeur. Après avoir bénéficié, certes, de la puissance d'un autre avion, d'un véhicule au sol ou d'un treuil, il glisse sur l'air en perdant très peu d'altitude et profite de courants ascendants pour reprendre de la hauteur.

Encore plus impressionnant, l'avion Solar Impulse 2 a fait le tour du monde en plusieurs étapes en utilisant seulement l'énergie solaire ! Mais avec des ailes d'une envergure de 63 mètres couvertes de cellules photovoltaïques, des batteries au lithium et quatre moteurs électriques à hélice, le tout pour un poids total de « seulement » 1 600 kilogrammes, c'est un aéronef très délicat qui ne supporte pas la moindre perturbation météorologique, qui ne voyage qu'à des latitudes et des saisons ensoleillées, qui ne transporte qu'une seule personne et qui nécessite toute une équipe d'assistance au sol. Son tour du monde

s'est étalé sur plus d'un an². Un tel exploit peut aussi se faire à vélo, moyennant quelques passages en bateau, ce qui nécessite des moyens bien plus réduits...

Et si l'on pédalait pour faire décoller et avancer un avion ? Cela a déjà été tenté et cela fonctionne, mais seulement sur de courtes distances, sous réserve d'une excellente condition physique et toujours avec un avion ultraléger de très grande envergure, donc très fragile.

Mais on peut aussi voler sans aucun moteur ni coup de pédale ! Suspendus à leur parapente, à leur deltaplane ou à leur aile rigide, les adeptes du vol libre se contentent des courants d'air ascendants pour s'élever dans les cieux et ensuite se laisser planer. Ils partent tout de même d'une hauteur bien placée pour se lancer. Leur matériel ne pèse que de 10 à 60 kilogrammes et peut, du moins dans le cas des parapentes, être acheminé à dos d'humain. Les distances qu'ils peuvent parcourir et les destinations sont très largement dictées par le terrain et la météo. Des records de 600 kilomètres dans une journée ont été établis par des pilotes aguerris³ !

Pour le moment incapables d'assurer de vraies fonctions de transport, tous ces aérodynes (avions) élancés ont

2. RTS Découverte avec l'ATS, « Solar Impulse 2 a bouclé son tour du monde », 19 octobre 2017. <https://www.rts.ch/decouverte/sciences-et-environnement/environnement/solar-impulse/9012761-solar-impulse-2-a-boucle-son-tour-du-monde.html>

3. Freedom-parapente, « Le record du monde de parapente de distance battu par Sébastien Kayrouz avec 612 km ! », Freedom'blog, 22 juin 2021. <https://www.freedom-parapente.fr/blog/le-record-du-monde-de-parapente-de-distance-battu-par-sebastien-kayrouz-avec-612-km>

quand même le mérite de montrer la voie aux avions du futur, ceux qui ne voleront qu'à la faveur de conditions météorologiques avantageuses, en se contentant de l'énergie renouvelable disponible durant le vol et en emportant des charges minimalistes. Autant dire que l'on n'utilisera plus l'avion à tout bout de champ...

Le retour des aérostats

Alors que les aérodynes ont besoin de forces dynamiques (liées au mouvement) pour se maintenir en hauteur, d'autres engins peuvent littéralement flotter dans les airs en profitant de forces statiques : les aérostats. Remplis d'un gaz plus léger que l'air environnant, ils utilisent la poussée d'Archimède⁴ pour s'élever au-dessus du sol.

Ce gaz peut être de l'air chaud, car il est moins dense que l'air frais ambiant. À bord d'une montgolfière, on l'obtient en brûlant un combustible, ce qui n'est pas très écologique. Mais on peut aussi profiter de la chaleur du soleil captée par l'enveloppe noire du ballon. Un temps à la fois frais et très ensoleillé est conseillé ! La différence de densité entre l'air chauffé et l'air ambiant étant assez limitée, il faut un ballon d'environ 1 000 mètres cubes pour

4. $F = \rho \cdot V \cdot g$ avec F : force vers le haut due à la poussée d'Archimède en newtons, ρ : densité du fluide dans lequel baigne l'objet en kilogrammes par mètre cube, V : volume de fluide déplacé par l'objet en mètres cubes, g : accélération de la pesanteur (en mètres par seconde carré).

porter un humain⁵, soit une sphère de plus de 12 mètres de diamètre⁶ ! Ces ballons solaires ont cependant le gros avantage de pouvoir être fabriqués assez simplement avec des matériaux abordables.

Pour rendre les ballons plus compacts, on utilise un gaz beaucoup plus léger que l'air : l'hélium. Mais il est relativement rare et cher, et il en faut tout de même plus d'une centaine de mètres cubes pour soulever une personne⁷ ! L'enveloppe du ballon doit donc être très étanche pour éviter les fuites. Cela fonctionne aussi avec l'hydrogène, encore plus léger⁸ et plus abondant (même si, comme

5. Si $V = 1000 \text{ m}^3$ dans un air ambiant à $15 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1,013 \text{ bar}$, de densité $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, la poussée d'Archimède est $F = 12\,020 \text{ N}$. Il faut retirer à cela le poids de l'air réchauffé dans le ballon. S'il monte à $70 \text{ }^\circ\text{C}$, toujours à $1,013 \text{ bar}$, sa densité est $\rho = 1,029 \text{ kg/m}^3$, et le poids du volume total est $P = 10\,090 \text{ N}$. Si on considère que tout le matériau composant le ballon à une masse d'environ 100 kg , soit un poids de 981 N , il ne reste plus qu'environ 940 N pour porter une personne de 96 kg . Source: Laurent Besset (<https://ballonsolaire.pagesperso-orange.fr/index.htm>).

6. Volume d'une sphère : $V = \pi \cdot \varnothing^3 / 6$ avec V : volume en mètres cubes, \varnothing : diamètre en mètres. Si $\varnothing = 12,4 \text{ m}$, $V = 998 \text{ m}^3$.

7. Si $V = 115 \text{ m}^3$ dans un air ambiant à $15 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1,013 \text{ bar}$, de densité $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, la poussée d'Archimède est $F = 1\,382 \text{ N}$. Il faut retirer à cela le poids de l'hélium dans le ballon. À $15 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1,013 \text{ bar}$, la densité de l'hélium est $\rho = 0,1692 \text{ kg/m}^3$, et le poids du volume total est $P = 191 \text{ N}$. Si on considère que tout le matériau composant le ballon à une masse d'environ 25 kg , soit un poids de 245 N , il ne reste plus qu'environ 950 N pour porter une personne de 96 kg . Sources: Laurent Besset (<https://ballonsolaire.pagesperso-orange.fr/index.htm>) et Air Liquide Encyclopédie des gaz (<https://encyclopedia.airliquide.com/fr/helium>).

8. À $15 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1,013 \text{ bar}$, la densité du dihydrogène est de $0,0852 \text{ kg/m}^3$. Ce gaz est donc deux fois plus léger que l'hélium. Mais ça ne change pas beaucoup la donne puisque l'hélium est déjà six fois plus léger que l'air. Source: Air Liquide Encyclopédie des gaz (<https://encyclopedia.airliquide.com/fr/hydrogene>).

nous l'avons vu, il faut de l'énergie pour le produire), mais sa très haute inflammabilité l'a rendu indésirable. On peut enfin combiner hélium et air plus ou moins chaud, l'un assurant le gros de la portance, l'autre se chargeant des changements d'altitude.

Les ballons de forme quasi sphérique n'ont pas de système de propulsion pour assurer les déplacements horizontaux. Ils se contentent de faire varier leur altitude pour rejoindre des courants d'air favorables. Une connaissance très fine des phénomènes météorologiques est donc indispensable ! Grâce à des courants rapides à haute altitude, des aventuriers ont accompli des tours du monde en une quinzaine de jours⁹ ! Mais ils ont tout de même utilisé une trentaine de bouteilles de propane pour chauffer l'air du ballon.

En leur donnant une forme allongée, grâce à une enveloppe plus ou moins rigide, et en les équipant d'ailerons et de moteurs, on peut rendre les ballons dirigeables. Le gaz léger se charge de la portance (modulée par des poches d'air que l'on remplit plus ou moins avec des ventilateurs et du lest que l'on peut lâcher) pendant que les moteurs à hélices assurent les déplacements. Dans les années 1920-1930, avec des tailles démesurées, ces engins ont connu leurs heures de gloire en permettant le transport aérien au long cours de passagers fortunés. Très sensibles aux conditions

9. « Le tour du monde en ballon en onze jours : un aventurier russe bat le record de Steve Fossett », *Le Monde*, 23 juillet 2016. https://www.lemonde.fr/sport/article/2016/07/23/le-tour-du-monde-en-ballon-en-onze-jours-un-aventurier-russe-bat-le-record-de-steve-fossett_4973875_3242.html

météorologiques, remplis d'hydrogène hautement inflammable, ces colosses du ciel à la structure fragile ont subi des accidents tragiques qui ont mis fin à leur exploitation commerciale¹⁰... au profit des avions ! De nos jours, conscient de son impact, le transport aérien s'intéresse de nouveau aux dirigeables. À charge utile égale, ces aéronefs sont en effet plus économes en énergie que les autres engins volants. Certains sont même propulsés par la force humaine¹¹, sans être réservés à des sportifs de haut niveau !

Ronds ou allongés, les ballons sont tous très volumineux et nécessitent une équipe au sol pour les décollages et les atterrissages. Les immenses surfaces de leurs enveloppes leur interdisent toute lutte contre le vent. En revanche, elles les autorisent à recevoir de nombreuses cellules photovoltaïques qui peuvent produire une bonne part des besoins en énergie. Les aérostats sont donc tout indiqués pour les vols lents de longue durée et pour les vols stationnaires.

Les maîtres du ciel

Aérodynes (avions) et aérostats (ballons) présentent chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Les premiers, plus maniables, ont besoin de vitesse pour que

10. Dominique Gallois, « La fin des zeppelins », *Le Monde*, 26 août 2006. https://www.lemonde.fr/vous/article/2006/08/26/la-fin-des-zeppelins_806730_3238.html

11. Fabien Binacchi, « VIDÉO. Nice : C'est quoi ce ballon dirigeable à pédales au-dessus de la mer ? », *20 minutes Nice*, 16 février 2018. <https://www.20minutes.fr/nice/2222051-20180216-video-nice-incroyable-aventure-pilote-sous-dirigeable-pedaes>

leurs ailes les maintiennent en l'air. Les seconds, lents et volumineux, peuvent emmener des charges plus lourdes avec moins d'énergie. En hybridant ces deux catégories, on obtient des aéronefs qui prennent et gardent de la hauteur grâce à la fois à un gaz léger et à une forme en profil d'aile d'avion. Poussée d'Archimède et force aérodynamique se complètent, l'une assurant une réserve permanente d'attraction vers le haut, l'autre fournissant une portance supplémentaire grâce à la vitesse.

Quelle que soit la technique mise en œuvre, pour être économes en énergie, tous les objets volants du futur auront des dimensions importantes rapportées à leur poids plume. Ils seront donc très encombrants et très sensibles aux conditions météorologiques. Ils se déplaceront à de faibles vitesses; les pointes au-dessus de 100 km/h seront rares. Ils se contenteront de la force humaine et des énergies renouvelables disponibles en vol. Dans tous les cas, leur fabrication sera toujours bien plus complexe et exigeante que celle des engins terrestres et maritimes. On imagine donc mal le vol comme un moyen de transport de masse pour l'avenir. Il sera réservé à de rares cas où les voies autres que celle des airs ne sont pas praticables, ou bien à une pratique de loisirs. Oiseaux, chauves-souris et insectes volants resteront donc les véritables maîtres du ciel.

À LA SURFACE DE L'EAU

Nous n'avons pas besoin de monter dans les cieux pour parcourir les étendues d'eau. Notre maîtrise des flots est très ancienne et cela fait déjà bien longtemps que

les navires transportent la grande majorité du tonnage des marchandises. En revanche, cela fait moins de deux siècles qu'ils fonctionnent quasi exclusivement aux énergies fossiles! Même si les bateaux ne comptent que pour à peine plus de 10% des émissions carbone du transport¹², ils doivent aussi prendre part au grand défi planétaire. Il nous reste deux ou trois décennies pour redresser la barre. Si nous partons maintenant, nous pouvons encore gagner la course!

Rattraper le vent perdu

Bien que très largement délaissée par le transport maritime actuel, la voile a su rester dans le vent grâce aux bateaux de compétition et de plaisance. Elle a au passage bénéficié d'améliorations techniques qui sont transposables sur nos futurs navires commerciaux. Il faudra simplement que nous apprenions à accepter que la durée des trajets varie en fonction de la météo.

Les techniques pour attraper le vent ne manquent pas! Souples, rigides, tubulaires, rotatives, télescopiques, enroulables, les voiles s'adaptent à chaque type de bateau prêt à se passer des hydrocarbures. Même la forme de la partie émergée de la coque peut elle aussi tirer parti du vent. En effet, comme le fait une aile d'avion qui génère de la portance, une coque judicieusement dessinée peut, à condition de n'être pas trop face au vent, générer

12. IEA, "Global CO₂ emissions from transport by sub-sector in the Net Zero Scenario, 2000-2030".

une force favorable à l'avancement¹³. Ce coup de pouce serait très appréciable pour les futurs navires transportant de très gros volumes, même si les volumes sont appelés globalement à diminuer.

Pour les bateaux actuels qui ne sont pas équipés de mâts, il est possible d'aller chercher le vent en hauteur grâce à un immense cerf-volant en forme d'aile de parapente (*kite*, en anglais). Cette solution souple et légère fonctionne déjà et permet des économies substantielles de carburant¹⁴!

En attendant la transformation de notre parc de navires, sans forcément s'appuyer sur les dernières innovations technologiques, les anciens bateaux à voiles fonctionnent toujours et ne demandent qu'à voguer. Certaines entreprises de transport éthiques les utilisent pour acheminer des marchandises à la seule force du vent¹⁵.

Entre air et eau

C'est donc bien la force de l'air qui est appelée à redevenir le moteur principal de nos déplacements sur l'eau.

13. La rédaction, «Vindskip, un concept de cargo hybride éolien-gaz naturel liquéfié», *L'Usine nouvelle*, 31 août 2017. <https://www.usinenouvelle.com/editorial/vindskip-un-concept-de-cargo-hybride-eolien-gaz-naturel-liquefie.N580323>

14. Claude Uruganda, «Le kite géant d'Airseas testé sur un navire transportant des pièces d'Airbus A320», *L'Usine nouvelle*, 22 décembre 2022. <https://www.usinenouvelle.com/article/en-images-le-kite-geant-d-airseas-teste-sur-un-navire-transportant-des-pieces-d-airbus-a320.N2080436>

15. Pierre Lemerle, «Le transport de marchandises à la voile a le vent en poupe», *Reporterre*, 12 janvier 2021. <https://reporterre.net/Le-transport-de-marchandises-a-la-voile-a-le-vent-en-poupe#nb2>

Mais pour accroître son efficacité, on peut aussi s'arranger pour que l'eau ne soit (presque) plus une force à vaincre.

L'air est beaucoup moins dense que l'eau, donc plus facile à pénétrer. L'avenir serait-il donc au transport aérien ? Non, car, comme nous l'avons vu, il est très compliqué de maintenir des charges lourdes dans les airs, puisque ce milieu très ténu assure peu de portance. En revanche, étant à l'interface entre les deux fluides, les bateaux ont le loisir de profiter des propriétés de chacun d'eux. Utiliser la forte portance permise par l'eau pour se hisser autant que possible dans l'air est en partie réalisable grâce à certaines formes de carènes. Mais un accessoire le fait à la perfection : l'hydrofoil ! Placée sous le bateau, cette « lame immergée dans l'eau » a un profil qui fonctionne comme celui d'une aile d'avion¹⁶. Comme l'eau est bien plus dense que l'air, la portance générée par le foil est très importante au regard de sa taille¹⁷ ! À partir d'une certaine vitesse, cela permet de soulever le bateau totalement hors de l'eau et, par la même occasion, de s'affranchir de la traînée dans ce liquide.

16. François-Philippe Gallois et Romain Blanc-Tailleur, « La planche à foil et la portance », *Culture physique*, Arte, 2021. <https://www.arte.tv/fr/videos/100100-010-A/culture-physique/>

17. Équation de Bernoulli : $p + 1/2 \rho v^2 = \text{constante}$. Avec p : pression en pascals, ρ : densité du fluide en kilogrammes par mètre cube, v : vitesse d'écoulement du fluide en mètres par seconde. Cette équation exprime que la pression diminue au sein d'un fluide qui s'écoule vite. Sur un profil d'aile, le fluide s'écoule plus vite le long de la partie supérieure que le long de la partie inférieure. Cela crée une aspiration vers le haut. Nous voyons que la densité intervient dans cette formule. L'eau étant environ 1 000 fois plus dense que l'air, on comprend que, dans l'eau, une aile de faible surface permet d'atteindre une importante dépression, donc une grande force de portance.

Placées au bon endroit et au bon moment, en plus de le soulever, les ailes immergées stabilisent le bateau et l'empêchent de trop pencher lorsque le vent souffle dans ses voiles. Cette technologie équipe déjà presque tous les bateaux à voiles de course récents. Avec des économies d'énergie pouvant atteindre 50 %¹⁸, elle est vouée à se généraliser sur tous les navires un tant soit peu rapides, et légers !

Sur des bateaux très lourds, il est difficile d'atteindre des vitesses suffisantes pour se sortir de l'eau. Dans ce cas, il suffit de se contenter d'une allure modérée qui, associée à une coque au bon profil, génère très peu de turbulences. Pour qui sait prendre son temps, l'eau devient un excellent tapis roulant ! Sur les fleuves, les bateaux à fond plat peuvent profiter des vents dominants qui viennent de la mer pour remonter le courant et n'ont plus qu'à se laisser porter par les flots pour redescendre vers l'embouchure. Rappelons que, dans tous les cas, il est judicieux de ne pas s'encombrer de poids superflu, car cela a pour conséquence d'enfoncer un peu plus le bateau dans l'eau. Ce n'est pas si grave pour les navigateurs expérimentés qui savent adapter leur trajet pour tirer profit des courants marins.

Nouvelles croisières

Mais il y a des jours où c'est le calme plat, autant dans l'air que dans l'eau. Saurons-nous quand même nous passer

18. D'après l'entreprise SEAir, spécialiste international de l'hydrofoil. <https://www.seair-boat.com/fr/specialiste-international-hydrofoil/>

des énergies carbonées (ou atomiques) du passé? Le plus simple serait d'attendre avec patience un temps plus agité. Les armateurs qui ne supporteraient pas de voir leurs marins se prélasser au soleil pourront toujours couvrir leurs navires de panneaux photovoltaïques, à l'instar du catamaran *PlanetSolar* qui a fait un tour du monde rien qu'à l'énergie solaire¹⁹! Certes, c'est beaucoup moins efficace que le vent pour avancer, mais cela permet de ne pas rester totalement immobile et de fournir de l'énergie électrique à bord.

De toute façon, quelle que soit la météo, il y a toujours de la force humaine dans les embarcations. Rames, pagaies, hélices ou roues à aubes sur pédaliers restent d'excellents moyens d'en tirer parti, pour le plus grand bien des utilisateurs! Un nouveau style de croisière verra le jour. Chaque passager pourra occuper sagement son temps au maniement des voiles ou à la propulsion active du bateau. N'est-ce pas plus réjouissant qu'un naufrage global? Alors, ramons gaiement dans la bonne direction, car nous sommes tous dans la même galère!

RETOUR SUR LA TERRE FERME

Même si nous avons appris à évoluer dans d'autres milieux, nous restons des animaux principalement terrestres! Et ce sol que nous foulons est un terreau

19. « *PlanetSolar* a bouclé son premier tour du monde à l'énergie solaire », RTS Info, mis à jour le 4 mai 2012. <https://www.rts.ch/info/sciences-tech/3969794-planetsolar-a-boucle-son-premier-tour-du-monde-a-lenergie-solaire.html>

extrêmement fertile pour une multitude de façons très astucieuses de nous déplacer.

Bipédie

Depuis plus de 7 millions d'années, la bipédie est notre façon la plus naturelle de nous déplacer²⁰. Ce n'est pas un insignifiant demi-siècle de sous-utilisation qui va nous faire perdre cette fabuleuse caractéristique anatomique! Qu'on le veuille ou non, c'est encore le mode de locomotion de base de notre espèce et cela le restera pour des millénaires, à moins que nous ne disparaissions prématurément... Alors, profitons-en!

Dans les milieux naturels terrestres, nos deux pieds sont redoutables. Nus ou chaussés de façon rudimentaire, presque aucun terrain ne les arrête. Nos ancêtres nous ont transmis la capacité génétique de parcourir une centaine de kilomètres à pied dans une journée! À nous de réveiller ce superpouvoir en marchant (ou en courant) aussi souvent que possible pour nous déplacer, tout en prenant le temps de redécouvrir le monde qui nous entoure.

Dans les environnements nivelés par le béton et le bitume, nos pieds fonctionnent aussi très bien. Ils peuvent même y bénéficier d'une efficacité accrue grâce à de simples accessoires à roulettes tels que rollers, trottinette ou skateboard. Associé à des aménagements adaptés,

20. François Druelle et Guillaume Daver, « Bipédie : ça marche ! », *La Science, CQFD*, France Culture, 12 septembre 2022. <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-science-cqfd/bipedie-ca-marche-7369517?>

le fauteuil roulant peut même pallier le dysfonctionnement des jambes.

Pour beaucoup de personnes qui ont le plein usage de leurs membres, certaines charges à porter servent de prétexte à l'utilisation d'un gros véhicule motorisé. Pourtant, un simple accessoire comme un sac à dos ou un chariot à roulettes permet de porter aisément une dizaine de kilogrammes, et ainsi d'éviter de mobiliser un engin de plus d'une tonne! Pour les charges plus lourdes, jusqu'à une centaine de kilogrammes, sur de courtes distances sans dénivelés importants, une charrette que l'on tire à la main rend la tâche tout à fait surmontable. Ne sous-estimons pas les capacités de notre corps!

Vélocipédie

Sur nos voies terrestres, un engin roulant cumule polyvalence, rapidité, simplicité, légèreté, efficacité et santé: le vélo! Façonné par environ deux siècles d'histoire, il bénéficie toujours de nombreuses améliorations et innovations. Il se décline en une grande variété de formes et de matériaux, pour de multiples usages.

Sans mobiliser les derniers cris de la technologie, un vélo de randonnée classique, avec un minimum d'équipement (éclairage, garde-boue, porte-bagages et sacoches), permet aussi bien de faire des voyages transcontinentaux que de se rendre au travail ou de faire ses courses. Pesant environ 15 kilogrammes, il répond à la majorité des besoins essentiels de notre vie quotidienne moderne et peut donc très avantageusement remplacer un véhicule de 1 500 kilogrammes, en consommant vingt-cinq fois moins

d'énergie au kilomètre! Et avec un peu d'entraînement, en prenant notre temps, nous sommes presque tous capables de parcourir une trentaine de kilomètres par jour!

Pour les situations de tous les jours, qui servent souvent d'excuse pour utiliser sa voiture, il existe tout un tas de solutions vélocipédiques. Les jeunes enfants peuvent prendre place à bord d'un bac à l'avant de certains vélos-cargos ou dans une remorque attelée derrière le vélo. Cela fonctionne aussi très bien pour les objets volumineux. Les intempéries trouvent facilement leur parade par des vêtements adaptés ou des pare-brise et autres protections à monter sur nos cycles. La position du cycliste est parfois inconfortable pour certaines personnes. Qu'à cela ne tienne! Le vélo existe aussi en version « couché », avec au passage un gain aérodynamique. Et si l'effort à fournir dépasse la limite subjective du raisonnable, l'assistance électrique est toujours possible!

Voitures à pédales

Le vélo remplacera-t-il totalement la voiture? Oui ou presque²¹! Il reste quand même quelques cas où, pour la stabilité et la capacité d'emport, deux roues ne suffisent pas, et quelques cas où, pour assurer protection et aérodynamisme, un carénage a son utilité. Est-ce une raison suffisante pour rester accroché-es à nos lourdes automobiles? Non, car après un règne sans partage d'environ

21. Frédéric Héran, *Le Retour de la bicyclette. Une histoire des déplacements urbains en Europe, de 1817 à 2050*, La Découverte, 2014.

soixante-dix ans, les mal nommés « véhicules légers » vont devoir laisser la place à leurs équivalents ultralégers. Ironiquement, les véritables voitures de demain s'inspirent de la technologie du vélo. Des voitures à pédales ? Ce n'est pas l'image du futur à laquelle nous sommes habitués : la science-fiction ! Et pourtant, grâce à leur poids optimal et à leur propulsion humaine, ces engins roulants cochent les cases d'un avenir souhaitable. Bien qu'encore confidentiels, ces tricycles et quadricycles répondent déjà à une large gamme d'utilisations.

Pour ceux qui veulent aller vite et loin, sur des routes bien tracées, il y a les « vélomobiles » (contraction de « vélo » et « automobile »). Le cycliste, en position plus ou moins couchée, est protégé par un carénage aérodynamique, léger et porté par trois ou quatre roues. Avec un poids d'une trentaine de kilogrammes, soit cinquante fois moins qu'une automobile, ces objets roulants non identifiés atteignent des vitesses moyennes très respectables, mais consomment trente-cinq fois moins d'énergie²² !

22. La comparaison entre la voiture et le vélomobile est effectuée sur le plat et à vitesse constante en calculant l'énergie mécanique nécessaire à leur déplacement sur une même distance. Les forces prises en compte sont la résistance au roulement et la résistance de l'air (de densité $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$). Les paramètres pour la voiture sont : $m = 1575 \text{ kg}$, $C_{rr} = 0,0065$, $S \cdot C_x = 0,75 \text{ m}^2$ et $v = 90 \text{ km/h}$. Les paramètres pour le vélomobile sont : $m = 110 \text{ kg}$, $C_{rr} = 0,006$, $S \cdot C_x = 0,05 \text{ m}^2$ (VM Quest 3 x 20» en mode cabriolet petite visière, source : <http://velorizontale1fr1.net/t22143-scx-et-crr-des-differents-velomobiles-et-velos-couches-du-marche>) et $v = 33 \text{ km/h}$. Dans ces conditions, la somme des forces de résistance à l'avancement est de 388 N pour la voiture et de 11,1 N pour le vélomobile, soit 35 fois moins.

Pour un usage plus tranquille, il existe une offre de tricycles et de quadricycles à pédales en position assise et couverte. Certains permettent d'accueillir un ou deux passagers supplémentaires. Ces véhicules, qui peuvent tout de même peser jusqu'à une centaine de kilogrammes, sont presque toujours équipés d'une assistance électrique.

La camionnette a aussi son équivalent à pédales, toujours à trois ou quatre roues. En plein boum dans les grandes villes, ces cycles-cargos sont appelés à devenir les principaux vecteurs des marchandises de l'économie relocalisée de demain. Là aussi, le poids total avec la charge utile impose une assistance électrique. Et sur tous ces poly-cycles, l'intégration de panneaux photovoltaïques constitue une source d'énergie très intéressante !

Tout le monde n'a, hélas, pas le plein usage de ses jambes. Certains cycles sont donc entraînés par un « pédalier » actionné par les bras et le haut du corps, avec, là encore, l'assistance électrique en option. Et pour les personnes qui n'ont plus assez de force, il existe des versions totalement électriques. Quelle que soit notre condition physique, on peut aussi choisir de ne pas assumer seul-e la conduite de son véhicule.

Train-sport en commun

En plus de son rôle social, qui consiste à offrir un service de déplacement à celles et ceux qui n'ont pas de véhicule individuel, le transport en commun de demain aura aussi un rôle sanitaire en mettant à contribution la force musculaire des usagers. Le pédalier reste ici encore le meilleur moyen de capter l'énergie humaine. Mais les vertus

des engins collectifs à propulsion humaine ne s'arrêtent pas là : ils sont aussi solidaires ! En effet, les plus vigoureux peuvent partager leur surplus de tonus avec ceux qui ont moins de capacités.

Ce que l'on pourrait prendre pour un doux rêve existe déjà pour du ramassage scolaire. Le bus à pédales peut accueillir un chauffeur et huit passagers... qui pédalent tous à leur niveau ! Encore une fois, le secret de la sobriété réside dans un poids optimisé et une vitesse raisonnable. Mais étant donné que les dimensions du véhicule sont tout de même liées au nombre de passagers, l'assistance électrique est indispensable pour les trajets à vide, et d'autant plus en côte. On attend même pour les « poids lourds » à pédales une réglementation qui autorise une motorisation en rapport avec la charge utile transportée, et donc supérieure à 250 watts.

Si le vélobus promet une longue vie à ses usagers et un bel avenir au transport en commun, les grands trajets très fréquentés ont besoin d'un champion. Et c'est le train qui remporte ce titre grâce à un grand nombre de qualités que nous pouvons rappeler :

- le contact fer sur fer des roues sur le rail présente une très faible résistance au roulement, ce qui diminue les pertes d'énergie correspondantes ;
- les voies ont été tracées de façon à n'avoir que des pentes très douces. Cela rend le train capable d'emporter de grosses charges avec une puissance de traction réduite ;

- la configuration en file indienne offre une très bonne pénétration dans l'air, ce qui permet d'aller vite en limitant les pertes aérodynamiques ;

- le guidage des rails rend la trajectoire du train très précise, ce qui amène celui-ci à pouvoir circuler sur des voies de faible largeur, limitant ainsi la consommation de terrain ;

- la trajectoire guidée autorise l'alimentation directe par l'énergie électrique du réseau et augmente la sécurité ;

- le grand nombre de voitures ou de wagons pouvant être attelés les uns derrière les autres donne la capacité de transporter beaucoup de passagers ou de marchandises. Ce nombre est par ailleurs modulable en fonction des besoins.

Grâce à l'héritage des voies existantes et à l'apport de technologies modernes et responsables, le rail est voué à (re)devenir la colonne vertébrale du transport de masse terrestre de demain. Loin de pouvoir s'endormir sur ses vieux lauriers, ce mode de transport devra passer par de nombreuses améliorations : électrification des lignes, électricité renouvelable, motorisation répartie, récupération d'énergie au freinage, aérodynamisme, matériel léger, panneaux photovoltaïques embarqués, verdissement des voies, meilleure accessibilité aux vélos et aux fauteuils roulants... Et comme le train transporte de nombreuses personnes valides qui souhaitent le rester, on a tout intérêt à mobiliser leur force musculaire grâce à un pédalier à chaque siège (et à des supports de type *home trainers* pour les vélos). L'auto-vélo-motrice n'existe pas encore, mais

on sait déjà faire des vélorails et des trains électriques légers. Alors, au lieu de vouloir battre des records avec le train à grande vitesse, dépêchons-nous de mettre sur les rails le train à grande vertu !

Tous ces transports pas si futuristes ne nécessitent aucune hypothétique et hasardeuse rupture technologique. Ils ne font qu'utiliser judicieusement des ressources et des connaissances que nous maîtrisons déjà relativement bien. Ils peuvent donc être déployés rapidement, du moins assez pour ne pas affoler les aiguilles du compte à rebours de la bombe climatique et écologique que nous avons nous-mêmes amorcée. Alors, qu'attendons-nous pour nous lancer dans la grande aventure collective des déplacements de demain ?

CONCLUSION

Après avoir parcouru ce bout de chemin ensemble, nous arrivons à la conclusion que l'avenir des transports soutenables repose principalement sur nos membres inférieurs, dopés aux énergies renouvelables. À quoi pourrait ressembler le tableau d'un futur pas si lointain? En scrutant patiemment le ciel, on aura peut-être la chance de voir de grands et délicats aéronefs planer ou flotter dans les airs. De hautes et larges voiles se dessineront sur l'horizon de la mer. Sur les routes se croiseront de sveltes montures aux roues étroites emmenées par des humains en pleine santé, sourire aux lèvres, saluant les marcheurs au passage. Des trains de wagons électro-musculaires sillonneront discrètement le paysage. Les toits seront décorés de damiers de cellules solaires. Des pales élancées tourneront çà et là, au gré du vent... Cette vision de carte postale paraît bien utopique dans un monde actuellement mû par de puissantes et salissantes machines à énergies fossiles. Il serait pourtant bien plus naïf de croire que nous pouvons perpétuer notre boulimie de kilomètres, de vitesse et de poids, donc de ressources énergétiques et de matières premières. Même s'ils demandent de profonds changements de comportement, les déplacements calmes, légers et rythmés par nos jambes sont bien plus réalistes que de chimériques moteurs propres montés sur des véhicules surdimensionnés. Ils sont aussi bien plus souhaitables qu'une catastrophe écologique planétaire!

N'oublions pas que nous bénéficions, en complément de notre bipédie, d'un gros cerveau et de mains agiles, ce qui nous prédispose à l'invention de nouvelles façons de vivre. Osons espérer que les facultés qui ont mené notre espèce humaine jusqu'ici seront aussi celles qui lui permettront de continuer durablement et joyeusement son aventure terrestre.

Plusieurs futurs sont envisageables. Personne ne peut prédire avec certitude lequel sera le nôtre, mais chacun-e peut orienter à sa mesure la direction de notre trajet. À travers ces lignes, nous n'avons en réalité parcouru que le début du voyage. La suite: à nous tous et toutes de la réaliser ensemble, et dès demain matin !

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	9
---------------------	---

I. VOYANTS ROUGES PLANÉTAIRES	11
--------------------------------------	----

Biodiversité : prévenir le crash	11
Surchauffe globale	15
Vers la panne sèche ?	23
Détresse sanitaire et sociale	26
Remettre en question nos habitudes et nos modes de vie	30

II. LES FORCES EN JEU LORS DE NOS DÉPLACEMENTS	41
---	----

Négocier les côtes	42
Échapper à l'inertie	45
Garder l'énergie	46
Comme sur des roulettes	48
Moins fluide qu'il n'en a l'air	50
Éviter les frictions	54
Ni lièvre ni tortue	55

III. TOUR D'HORIZON DES MOTEURS D'AUJOURD'HUI	57
--	----

Critères de choix	57
L'insoutenable moteur thermique	68
Électrique mais pas magique !	79
Revenir à l'énergie mécanique ?	109
Notre prodigieux moteur biologique	116
Hybride : pour le pire et pour le meilleur	123

IV. MIRAGES, FANTASMES ET FAUSSES PROMESSES	127
Principes et énergies occultes	127
Solutions démesurées	132
Révolution numérique	156
Plans sur la comète	162
<hr/>	
V. LES PISTES À EMPRUNTER	175
Vers d'autres voies aériennes	176
À la surface de l'eau	182
Retour sur la terre ferme	187
<hr/>	
CONCLUSION	197