

Le « match ressources » des transports

par Laurent Castaignède, ingénieur, conseiller en impact environnemental, auteur de *La bougeotte, nouveau mal du siècle?* (Ecosociété, 2021) et *Airvore ou le mythe des transports propres* (Ecosociété, 2022) et Philippe Bihouix, ingénieur, directeur général d'AREP.

Il y a quelques mois, les déclarations d'Augustin de Romanet, le patron d'Aéroports de Paris, invitant « *les gens à être plus raisonnables* » et à faire preuve de modération dans leur usage du transport aérien, ont été remarquées, voire saluées. Dans le même temps, il ajoutait que « *sur le long terme, c'est le transport aérien qui sera le système le moins émetteur de CO₂* », car « *l'infrastructure de l'avion, c'est l'air* » et si « *vous analysez la quantité de CO₂ émise pour faire des voies de chemin de fer, du ballast, vous savez que sur le long terme, le transport aérien est extrêmement vertueux* »¹.

Cela nous a donné l'envie de creuser un peu cette idée. Une fois « réglé » le problème de l'énergie – une gageure cependant, mais cette question nous emmènerait trop loin! –, jusqu'à quel point l'avion serait effectivement plus vertueux que le train, ou la voiture et le vélo tant qu'on y est? Quand on évoque l'impact environnemental des transports, c'est d'abord la consommation de carburants, et non de ressources, qui vient à l'esprit. Dans la comptabilité des émissions de gaz à effet de serre, aux niveaux national ou international, on retrouve, au titre des « transports », les émissions directes (de fonctionnement), mais jamais celles de la fabrication des véhicules ou de la construction de l'infra-

structure qui les héberge et les supporte, qui sont noyées dans le chapitre « industrie ».

Il y a une exception notable, celle des véhicules électriques, pour lesquels une analyse complète de cycle de vie est nécessaire. En effet, tandis que 20 % du CO₂ émis par une voiture thermique durant sa durée de vie l'est lors de sa fabrication et 80 % par les pleins de carburant à l'usage, la voiture électrique est moitié plus émettrice à la fabrication, essentiellement à cause des batteries, tandis que pour les recharges, le contenu en CO₂ est très dépendant de la nature de l'électricité retenue. L'exercice est alors délicat, entre les calculs qui présupposent que les recharges seront proportionnelles au mix électrique moyen du pays où elles roulent, hypothèse particulièrement favorable en France métropolitaine, et celles qui, au contraire, y voient la stimulation fréquente du maintien de centrales au charbon particulièrement polluantes.

Mais revenons à nos ressources. L'exercice que nous avons souhaité mener vise à donner un *ordre de grandeur* de la « matérialité » des systèmes de transports. Non pas avec les chiffres de consommation globale du secteur, sa contribution à l'extractivisme planétaire permettant d'augmenter, chaque année, le parc automobile de 30 millions de véhicules²,

la flotte de trains de 5 000 locomotives et 12 000 automotrices³, celle d'avions de ligne de 800 unités⁴... et de construire, d'ici 2050, quelque chose comme 25 millions de kilomètres de routes⁵ et 500 000 kilomètres de voies ferrées⁶; mais plutôt de comparer ce que «coûte» en ressources, par kilomètre parcouru, le fait d'emprunter tel ou tel mode de transport.

Un ordre de grandeur seulement, tant les paramètres sont complexes à appréhender. Pour les véhicules, il est assez simple de récupérer les compositions moyennes des différents types, un nombre de kilomètres parcourus moyen pendant leur durée de vie, un taux de remplissage moyen (voilà déjà trois façons de faire varier votre consommation «réelle» de ressources quand vous parcourez un kilomètre). Pour l'infrastructure, c'est un peu plus complexe, car il faut prendre en compte la durée d'amortissement mais aussi «allouer» une proportion de l'infrastructure quand celle-ci est mutualisée entre différents modes, comme c'est le cas de la route⁷.

Fabrication des véhicules

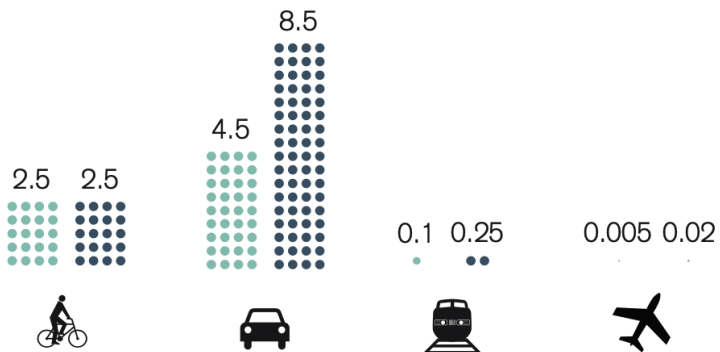
Prenons l'exemple du TGV. Une rame duplex pèse 390 tonnes et comporte environ 550 places, soit près de 400 passagers embarqués avec un taux de remplissage de 70% – on peut noter au passage qu'il faut donc mobiliser une tonne de matière par passager, le même ordre de grandeur qu'une voiture!

Pendant sa durée de vie, cette rame parcourra 10 millions de kilomètres, en réalisant donc 4 milliards de «km-passagers»⁸, (pour environ 400 millions de grammes mobilisés⁹), soit 0,1 g/pas.km. Lors d'un aller-retour Paris-Bordeaux, chaque passager consomme ainsi 120 grammes de matières premières!

L'avion moyen transporte deux fois moins de passagers, mais parcourt dans sa vie cinq fois plus de kilomètres et est dix fois moins lourd. Il est donc vingt fois plus «efficace». Les transports intensifs, aux véhicules très utilisés, bien remplis, sont donc peu mobilisateurs de matière. La voiture fait pâle figure, avec une «efficacité» 50 à 1 000 fois plus faible... Le vélo est très léger (disons 15 kilos), mais bien sûr il parcourt, dans sa vie, bien moins de kilomètres, ce qui le pénalise.

Aux matières incorporées dans les véhicules, on peut ajouter les matières «extraites», car les minerais de métaux ont des concentrations variables, environ 50% pour l'acier et 20% pour l'aluminium, mais moins de 2% pour le cuivre... il faut donc extraire au moins 50 tonnes des mines pour en récupérer une. Enfin, rappelons qu'il ne s'agit ici que de la vision «ressources»; s'il fallait parler énergie «grise» (incorporée) ou émissions de CO₂, l'image se déformerait: l'aluminium du TGV duplex (environ 20% de sa masse) ou de l'aéronef (environ 50%), et encore plus le titane (environ 10% de la masse d'un avion) sont bien plus énergivores que l'acier!

Matière mobilisée dans les véhicules



grammes par passager-kilomètre

- Matières incorporées
- Résidus miniers

○○○○ = 1 gramme par passager-kilomètre

Construction des infrastructures

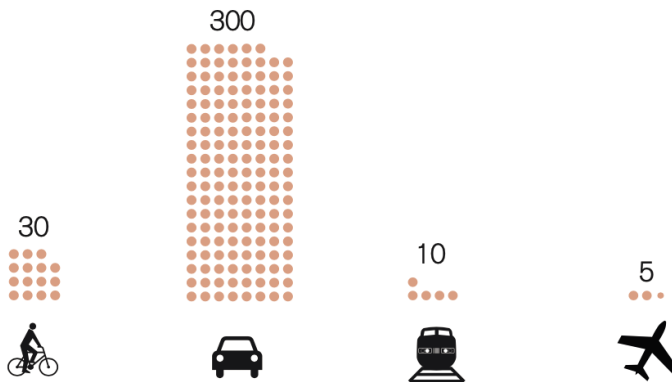
En termes d'infrastructures, les différences sont aussi particulièrement frappantes. Certains moyens de transport, comme la marche ou le vélo, aux pistes cyclables près, peuvent n'en nécessiter presque aucune, quand d'autres mobilisent leur propre réseau linéaire (voiries dédiées, réseaux ferrés) ou leurs propres points d'appui ponctuels (pistes d'atterrissage). À cela s'ajoutent de multiples ouvrages d'art (ponts, viaducs, tunnels) et les infrastructures d'accueil (parkings, gares, aéro-gares) et de maintenance et remisage (ateliers, hangars).

De façon surprenante, l'aérien n'est ici que deux fois plus efficace que le TGV... et même si les infrastructures ferroviaires sont imposantes, c'est encore la route, particulièrement répandue et subdivisée, qui est des dizaines de fois plus consommatrice de ressources

(granulats d'abord, ciment et acier ensuite) pour les chaussées et les ouvrages. Il faudrait, pour faire bonne mesure, ajouter tous les parkings incorporés dans les bâtiments! Le vélo, lorsqu'il a ses voies dédiées (cyclables et vertes), n'est pas négligeable, mais bien sûr, dans de nombreux cas, il partage des infrastructures existantes (rues, routes) ou très légères (chemins de terre).

Dans tous les cas, la masse de l'infrastructure l'emporte largement sur celle des véhicules. On peut se faire une autre idée de cet écart important en «positionnant» les véhicules les uns derrière les autres sur leur propre infrastructure. À l'échelle française¹⁰, l'ensemble des vélos occuperait environ la moitié de la longueur totale des pistes cyclables, les voitures 15 % des routes, les TGV seulement 3,5 % des lignes à grande vitesse, mais les pistes ne seraient pas tout à fait assez longues pour y stationner les avions...

Matière mobilisée dans les infrastructures



grammes par passager-kilomètre

- Matières incorporées
- = 2 grammes par passager-kilomètre

Une comparaison « injuste » ?

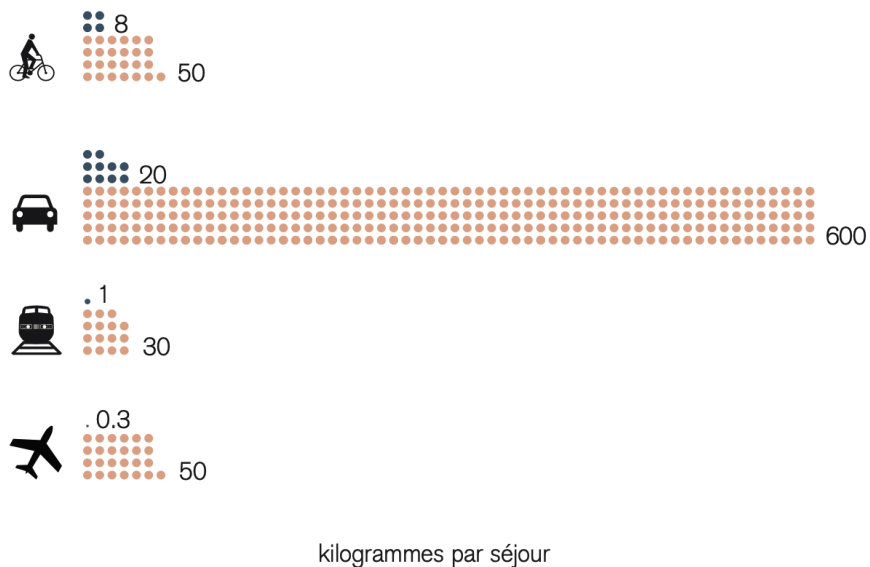
Alors vive le transport aérien? Évidemment, la comparaison par km.passager est très biaisée. Le secteur aérien se targue, vis-à-vis de la voiture au moins, de bons résultats unitaires de consommation de carburant ou d'émission de CO₂; mais cela passe sous

silence qu'en avion, on parcourt en général une bien plus longue distance! À ce compte-là, par kilomètre, un séjour dans la station spatiale internationale est très économe en énergie: la consommation d'énergie phénoménale pour s'extraire de la gravité terrestre est amortie sur des millions de kilomètres parcourus en orbite.

Pour être véritablement équitable, il faut donc se ramener à des cas d'usages courants. Prenons d'abord le trajet d'une famille de trois personnes prenant des vacances. Pour un budget du même ordre de grandeur, ils pourront se rendre, à partir de la région parisienne, en voiture ou en TGV sur le bassin d'Arcachon (600 kilomètres), ou au Maroc en avion (retenons Agadir, 2 300 kilomètres)¹¹. En cyclotourisme, nous avons supposé qu'ils

réalisent une boucle de 500 kilomètres. Le recours à la voiture demeure, compte tenu du très fort impact de la construction et de l'entretien des routes, le moyen le plus consommateur de matière; mais l'avion, qui permet de couvrir facilement de longues distances, rejoint assez vite le TGV! Prévoyez quand même quelques dizaines à quelques centaines de kilogrammes selon les cas...

Matière mobilisée pour un séjour type de vacances



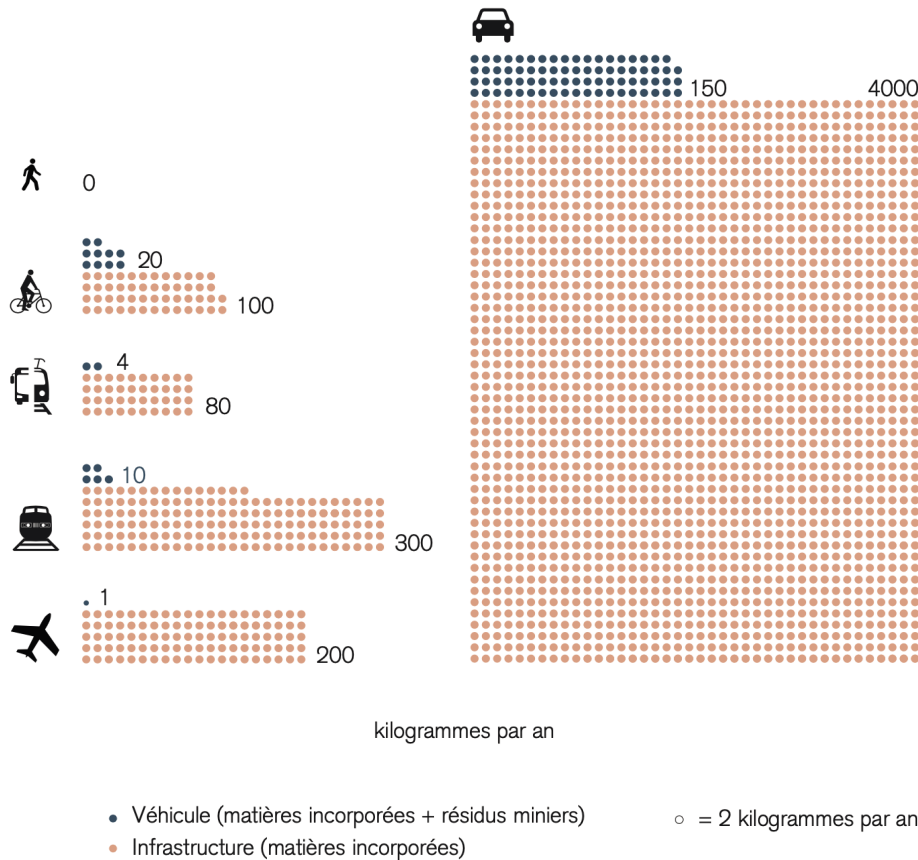
- Véhicule (matières incorporées + résidus miniers)
- = 2 kilogrammes par séjour
- Infrastructure (matières incorporées)

Prenons maintenant le cas du trajet domicile-travail, en rappelant qu'historiquement, la mise à disposition massive de nouveaux moyens de transports plus rapides et meilleur marché (au kilomètre) a plutôt conduit à augmenter les distances parcourues que réduire les temps de trajet¹². Un salarié consacrant un peu plus d'une heure par jour aller-retour porte à porte pourra parcourir deux fois par jour environ 3 kilomètres à pied, 10 kilomètres à vélo ou en autobus, 12 kilomètres en tramway, 15 kilomètres en métro, 25 kilomètres en voiture et 30 kilomètres dans un train de banlieue. S'ajoutent les possibilités récentes offertes par le télétravail

pérenne, avec des distances plus longues et moins de trajets: s'installer au Mans et travailler un jour sur deux à Paris, s'installer à Nice et faire un aller-retour par semaine à Paris en avion... soit, ramené en distance moyenne quotidienne, respectivement 100 et 140 kilomètres.

De nouveau, le recours à l'automobile mobilise énormément de matière – plusieurs tonnes par an. Les autres moyens, à l'exception de la marche dont l'usage se limite au renouvellement de semelles de chaussures, sont, étonnamment, du même ordre de grandeur, avec une bonne centaine de kilos par an.

Matière mobilisée pour un an de trajets domicile-travail



Complément d'éclairage énergétique

Ces résultats pourraient vous laisser dubitatif: le cycliste régulier en sort inquiet, le lobbyiste aérien enthousiaste. C'est qu'il n'y a pas que les ressources de fabrication dans la vie, mais aussi... la consommation énergétique! Si on réintègre les émissions de CO₂ (et, pour l'aviation, l'effet des traînées de condensation¹³), l'avion, qui jusqu'ici s'en sortait plutôt bien grâce à des infrastructures ponctuelles et des aéronefs intensément utilisés, passe largement en tête des impacts.

Les vacances à Agadir représentent alors 2,5 tonnes équivalent CO₂ pour la famille, et l'année de domicile-travail Nice-Paris de papa ou maman 12 tonnes. Comparativement, la voiture a un impact dix fois moindre (respectivement 200 kilos et 1,5 tonne) et les autres

moyens motorisés sont encore meilleurs (respectivement quelques dizaines et quelques centaines de kilos). Quant à la bicyclette, elle retrouve légitimement sa place de (petite) reine.

Bilan

L'avion est, de bien loin, le moyen le plus émissif en gaz à effet de serre, même si les ressources pour le fabriquer, construire et entretenir les aéroports, sont proportionnellement faibles. L'automobile, quoique pire choix pour les matières mobilisées, demeure bien moins carbonée que l'avion. Le transport ferroviaire s'en sort correctement, même s'il n'atteint pas la performance des autres transports en commun ou du vélo.

Augustin de Romanet pourrait légitimement nous reprocher d'avoir sauté directement au critère «équivalent CO₂» alors que son idée

est justement qu'on pourra, à terme, décarboner l'énergie qui sera utilisée dans les avions (ou les voitures): électricité, hydrogène, carburants «durables¹⁴»... Mais, comme on commence à s'en rendre compte, l'accès à une énergie décarbonée à profusion réclamerait aussi une mobilisation sans précédent, encore bien théorique, de ressources dans les énergies renouvelables, les systèmes de transformation, d'acheminement et de stockage..

Si, pour cette raison ou d'autres, il faut, dans le futur, économiser l'énergie eu égard à la *fin de l'abondance*, les transports guidés par rail, énergétiquement imbattables s'ils sont bien remplis, tireront leur épingle du jeu. Réduire ou limiter la vitesse des moyens de transport sera aussi un levier très efficace, et l'on peut même imaginer, de façon un peu disruptive, que, parallèlement à la limitation sur (auto) route et à la baisse de la vitesse commerciale des TGV, les avions seront de moins en moins pertinents, et/ou repasseront à des vitesses de vol inférieures et une propulsion à hélice¹⁵. Enfin, le levier le plus efficace pour dématérialiser ou décarboner les transports, serait de réduire les besoins, de mettre en œuvre une organisation spatiale et économique qui permette une certaine *démobilité*, en particulier pour les besoins de transport du quotidien, contraints par les trajets domicile-travail mais aussi les courses, les activités sociales et culturelles, les loisirs... en bref par une réduction de la furieuse tendance de nos sociétés à une bougeotte chronique. •

-
1. «Augustin de Romanet, le PDG d'ADP, prône un usage modéré de l'avion», La Tribune, 22 septembre 2022.
 2. Production annuelle neuve de 50 millions d'unités.
 3. Union internationale des chemins de fer, Railisa UIC statistics, comparaison des éditions 2017 et 2022.
 4. Airbus, «Global Market Forecast 2019-2038», 2019, p. 8.
 5. International Energy Agency (IEA), «Global land transport infrastructure requirements», 2013, p. 16.
 6. IEA, «The future of rail», janvier 2019, p. 72-74.
 7. Les hypothèses et les sources que nous avons retenues sont disponibles sur le site www.bco2.fr.

8. Un «km-passager» (abréviation usuelle «pas.km») représente la distance d'un kilomètre parcouru par le passager d'un moyen de transport (hors personnel assurant le service). Un véhicule transportant 10 passagers (et son chauffeur) sur 10 kilomètres parcourt donc 100 pas.km.
9. Il faudrait ajouter le poids de toutes les pièces qui seront renouvelées lors des opérations de maintenance... ce qui ne modifiera pas l'ordre de grandeur.
10. Chacun dans un seul sens de circulation; l'aéroport de Roissy accueillant des avions au prorata mondial de son trafic passager.
11. Toute autre destination est envisageable évidemment, proportionnellement à la distance. Les trajets routiers pour se rendre aux gares et aux aéroports ont été négligés en première approximation, car d'un impact nettement inférieur en ordre de grandeur à celui du recours à la voiture (quoiqu'il soit de nature à augmenter proportionnellement ceux des dits moyens qui en mobilisent peu).
12. Voir Yves Crozet et Iragaël Joly, La "Loi de Zahavi": quelle pertinence pour comprendre la construction et la dilatation des espaces-temps de la ville?, *Plan urbanisme construction architecture* (Puca), 2006.
13. Les fins nuages qui apparaissent derrière les aéronefs évoluant à haute altitude ont un effet radiatif sur le réchauffement planétaire au moins aussi important que celui du CO₂ de combustion du kérosène.
14. Ou SAF, pour sustainable aviation fuels; version actualisée des bio (ou agro) carburants.
15. Il s'agit en fait de turbopropulseurs, plus modernes et efficaces que les hélices conventionnelles. Cela pourra s'accompagner d'une baisse de leur altitude de croisière pour qu'elle passe sous celle de la formation des traînées de condensation.



Airvore ou le mythe des transports propres : Chronique d'une pollution annoncée,
Laurent Castaignède,
Éditions Ecosociété,
2022, 423 pages