

ANNEXE 4

Ordres de grandeur et chiffres-clé.

Extraits du Référentiel ISAE-Sup'Aéro « Aviation et climat » (mai 2022)

Extrait du rapport de la DGAC « Les émissions gazeuses du transport aérien en France en 2018 »

Extraits du Rapport du Shift Project « Pouvoir voler en 2050 : quelle aviation dans un monde constraint ? » (mars 2021)

Un énoncé d'exercice

Quelques conseils pour aborder cette annexe : Séparer votre groupe en deux. Une moitié s'attaquera à l'exercice. L'autre moitié prendra connaissance des autres documents. Si vous avez du temps, vous pouvez comparer les résultats de l'exercice (fait à l'échelle de la France) aux calculs de Sup'Aéro (niveau mondial). Vous pouvez également chercher à élargir les calculs effectués sur Blagnac et Charles-de-Gaulle au cas de l'aviation française dans son ensemble (c'est rapide). N'oubliez pas de noter quelques chiffres-clé qui vous paraissent utiles pour alimenter la table-ronde.

6.4 Comparaison du potentiel de décarbonation aux ressources énergétiques en 2018

Nous concluons ce chapitre par des calculs qui donnent des tendances sur le lien entre émissions de CO₂ et énergie pour les nouveaux vecteurs énergétiques qui ont été présentés. Il s'agit de calculs d'ordre de grandeur qui visent à illustrer deux points principaux concernant ces différentes solutions de décarbonation :

1. leur impact climatique dépend du facteur d'émission et du rendement des différentes voies de production ;
2. la question de la quantité d'énergie primaire nécessaire est importante, car des contraintes physiques de disponibilité pourraient se poser.

Aborder ces questions sur un horizon futur (par exemple, 2050) est une question délicate qui nécessite de faire de nombreuses hypothèses, par exemple sur l'évolution du mix électrique, de la biomasse disponible ou encore l'échelle et la vitesse à laquelle ces nouveaux vecteurs énergétiques seront déployés. Des éléments de réflexion dans ce sens seront présentés dans le chapitre 9. Pour obtenir des ordres de grandeur significatifs sans avoir à faire ces hypothèses, nous présentons à ce stade les résultats de calculs **en l'état actuel de la situation**. En d'autres termes, nous effectuons des calculs où toutes les valeurs que nous considérons sont celles de 2018, par exemple le niveau de trafic aérien, le facteur d'émission de l'électricité ou encore la disponibilité en énergie primaire. Pour chacun des quatre vecteurs énergétiques considérés (électricité, hydrogène, électrocarburant et biocarburant), nous calculons comment les émissions de CO₂ et l'énergie primaire nécessaire varieraient si l'intégralité du kérósène d'origine fossile utilisé par l'aviation en 2018 était remplacée, dans les conditions de 2018, par ce vecteur énergétique.

Ces calculs ont des limitations évidentes. D'une part, comme nous l'avons expliqué dans le reste du chapitre, ces nouveaux vecteurs énergétiques ne seront disponibles qu'à plus ou moins longue échéance : ainsi, si certains biocarburants sont déjà disponibles, un avion commercial long-courrier tout électrique semble hors d'atteinte dans les décennies qui viennent. Par ailleurs, la consommation énergétique des potentiels futurs avions tout électriques et à hydrogène est soumise à de fortes incertitudes (cf. le tableau 6.3 pour l'hydrogène). Enfin, quand bien même ces solutions seraient disponibles, il serait plus pertinent d'envisager un mix de ces solutions, par exemple électricité pour des avions régionaux, hydrogène pour des courts et moyen courrier et carburants alternatifs pour des long

courrier, avec pour ces derniers un mix entre électro- et biocarburants, et pour les biocarburants une diversité de matières premières et voies de production.

Bien que ces calculs effectués dans les conditions de 2018 mériteraient d'être affinés pour pallier les limitations énoncées ci-dessus, ils permettent néanmoins de mettre en valeur le lien entre émissions de CO₂ et énergie. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau 6.5, dont il ressort que :

1. pour décarboner l'aviation, il ne suffit pas de changer de vecteur énergétique, il faut que ce vecteur soit bas-carbone. À défaut, ces nouveaux vecteurs énergétiques pourraient **augmenter** les émissions de CO₂. Pour les solutions à base d'électricité, ce serait par exemple le cas s'ils étaient déployés dans les conditions de 2018 ;
2. en 2018, la quantité d'énergie bas-carbone disponible (électricité bas-carbone et bioénergie) est du même ordre de grandeur que les besoins énergétiques de l'aviation, et ces énergie bas-carbone ont été utilisées à d'autres fins que l'aviation. Décarboner l'aviation nécessite donc d'augmenter fortement leur production (cf. section 9.4.3 où de possibles limites sont discutées).

Calcul #1. Vecteur énergétique : électricité

On suppose que la flotte mondiale est remplacée en intégralité par des avions tout électriques. Nous considérons que la demande énergétique augmente de 58 %, qui est l'évolution pour l'avion court-courrier tout électrique étudié par Gnadt *et al.*⁵³. La demande énergétique de l'aviation se monte ainsi à 23,2 EJ. À partir du mix mondial actuel dont le facteur d'émission vaut 132 gCO₂-eq/MJ, cela engendrerait 3,0 GtCO₂-eq d'émissions, soit une hausse de 139 % par rapport aux émissions de 2018, et représenterait 23 % de la production mondiale d'électricité de 2018. À partir du mix bas-carbone actuel dont le facteur d'émission vaut 5,5 gCO₂-eq/MJ^a, cela engendrerait 0,1 GtCO₂-eq d'émissions, soit une baisse de 90 % par rapport aux émissions de 2018. En revanche, cela nécessiterait d'utiliser 70 % de l'électricité bas-carbone produite en 2018.

Ce calcul permet de mettre en lumière la tension entre énergie disponible et potentiel de décarbonation. On voit ainsi sur cet exemple que soit on utilise une énergie abondante (l'électricité globale) mais relativement carbonée, soit une énergie moins abondante (l'électricité bas-carbone) mais moins carbonée.

Calcul #2. Vecteur énergétique : électrocarburant

On suppose maintenant que l'intégralité du kérosène fourni aux avions est de l'électrocarburant produit par la voie Fischer-Tropsch à partir de CO₂ industriel et d'hydrogène produit par électrolyse de l'eau. Cette production nécessite 42,9 EJ d'électricité en considérant un rendement pour le processus global de 40 % et une sélectivité élevée de 70 %. Soit cette électricité est prélevée sur le mix global, ce qui représente 45 % de la ressource disponible, et les émissions de CO₂ sont multipliées par 4,5 : soit l'électricité est bas-carbone, ce qui nécessiterait 1,3 fois la quantité totale d'électricité bas-carbone produite en 2018 mais qui permettrait de réduire les émissions de CO₂ de plus de 80 %^b.

a. Voir note de bas de page b en page 112.

b. Trois remarques méthodologiques concernant ce calcul. D'une part, par simplicité nous n'avons pas pris en compte les co-produits, ce qui a donc pour effet de surestimer les émissions.

Scénario		Émissions CO ₂	Valeur brute (GtCO ₂ -eq)	Valeur brute (EJ)	Énergie nécessaire (% de la ressource)
Situation en 2018		1,2	—	14,1	—
	Calcul #1 : électricité (énergie primaire = électricité)				
Mix mondial	3,0	+139 %	22,3	23 %	
Mix bas-carbone	0,1	-90 %	22,3	70 %	
	Calcul #2 : électrocarburant (énergie primaire = électricité)				
Mix mondial	5,7	+359 %	42,9	45 %	
Mix bas-carbone	0,2	-81 %	42,9	134 %	
	Calcul #3 : hydrogène (énergie primaire = électricité)				
Méthodes actuelles de production	2,2	+76 %	—	—	
Électrolyse, mix mondial	3,3	+164 %	24,6	26 %	
Électrolyse, mix bas-carbone	0,1	-89 %	24,6	77 %	
	Calcul #4 : biocarburant (énergie primaire = biomasse)				
HEFA/huile de palme	0,5 à 1,5	-61 à +18 %	23,7	43 %	
FT/résidus forestiers	0,1 à 0,4	-89 à -71 %	50,4	91 %	

TABLEAU 6.5 – Tableau récapitulatif des émissions de CO₂ et des besoins énergétiques pour différents calculs illustratifs, si les 14,1 EJ d'énergie utilisée par l'aviation en 2018 sous forme de kérosène l'était sous forme d'électricité, de biocarburant, d'électrocarburant ou d'hydrogène. On voit qu'à l'heure actuelle, les méthodes de décarbonation les plus efficaces (électrocarburant, hydrogène ou biocarburants) permettraient une réduction drastique des émissions (entre -70 et -90 %) mais nécessiteraient une augmentation significative des ressources énergétiques : doublement de l'électricité bas-carbone pour les électrocarburants et l'hydrogène, et entre 40% et 90% de la biomasse disponible pour les biocarburants.

Calcul #3. Vecteur énergétique : hydrogène

On suppose maintenant que tous les avions utilisent de l'hydrogène brûlé dans une turbine à combustion et qu'ils ont besoin de la même quantité d'énergie^a, soit 14,1 EJ. Avec les techniques de production actuelles et en prenant en compte que la phase de liquéfaction nécessite 45 MJ/kgH₂, cela augmenterait les émissions de CO₂ de 76 %. Si on produisait l'hydrogène liquide via l'électrolyse de l'eau, le résultat dépend de l'électricité utilisée. À partir du mix mondial, cela nécessiterait 26 % de l'électricité mondiale et multiplierait les émissions de l'aviation par 2,6 ; à partir du mix bas-carbone, cela demanderait les trois quarts de l'électricité bas-carbone de 2018, et aurait un impact significatif en faisant chuter les émissions de 89 %.

Calcul #4. Vecteur énergétique : biocarburant

On considère pour finir les voies de production HEFA et FT. Pour la voie HEFA nous considérons un rendement de 85 % et des facteurs d'émissions entre 34 gCO₂-eq/MJ et 103 gCO₂-eq/MJ, et pour la voie FT nous considérons un rendement de 40 % et des facteurs d'émission entre 10 gCO₂-eq/MJ et 25 gCO₂-eq/MJ. Dans les deux cas nous considérons une sélectivité de 70 % : cette valeur influence la quantité de bioénergie nécessaire mais n'est pas prise en compte dans les émissions de gaz à effet de serre. Concernant la voie HEFA on voit d'une part l'importance de la matière première : nous n'avons considéré ici que de l'huile de palme, qui peut augmenter ou diminuer les émissions selon le changement de l'usage des sols. Cette voie nécessiterait d'utiliser plus de 40 % de la bioénergie disponible en 2018. La voie FT réduit les émissions mais exacerbé la pression sur les ressources énergétiques : elle permet une réduction des émissions de 71 à 89 %, mais nécessite deux fois plus de bioénergie que la voie HEFA, soit plus de 90 % de la bioénergie totale disponible en 2018.

D'autre part, nous n'avons pas considéré d'émissions liées à la combustion, considérant ainsi qu'elles doivent être attribuées à la source industrielle. Enfin, nous avons fait ce calcul en considérant l'index d'émission de l'électricité (renouvelable ou pas) en 2018, cf. section 6.3.3. Dans le cadre des calculs effectués ici, si l'on considérait que l'électricité était produite pendant des heures « hors-pic », il faudrait comparer les besoins à ce gisement énergétique, cf. par exemple le rapport de l'ICCT où un tel gisement est évalué^{CP17}.

a. Cette hypothèse se justifie notamment par les incertitudes qui pèsent actuellement sur la consommation énergétique des futurs avions à hydrogène, cf. le tableau 6.3. C'est aussi l'hypothèse effectuée par Ponater *et al.*⁹² dans leur étude de scénarios prospectifs de déploiement d'une flotte d'avions à hydrogène.

Extrait du rapport " Les émissions gazeuses liées au transport aérien en France en 2018"

Résumé

Depuis plusieurs années, la DGAC, très impliquée dans la lutte contre les nuisances liées à l'aviation, réalise le calcul des émissions de CO₂ imputables à l'activité de l'aviation en France. Elle utilise pour cela le calculateur **Tarmaac**, qui permet de quantifier les émissions de CO₂ selon le type d'avion, le type de moteur, la liaison (origine-destination), le temps de roulage, etc.

Ces travaux ont permis de réaliser le présent bilan et d'alimenter **Ecocal, l'outil en ligne de la DGAC** pour le calcul des émissions de CO₂ et gaz à effet de serre, avec lequel tout citoyen peut connaître les émissions liées à son vol :

<https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr/>

Quelques chiffres clés illustrent le poids du trafic aérien dans les émissions de CO₂ en France et mettent en évidence les progrès continus du secteur en matière de lutte contre les émissions de gaz polluants et de gaz à effet de serre :

- en 2018, les émissions de CO₂ pour le transport aérien en France selon les estimations Tarmaac se sont élevées à 22,7 Mt (millions de tonnes) ; elles sont en progression de +3,8% par rapport à 2017, alors que le trafic a progressé de +5,1% en passagers-équivalents et de 5,5% en passagers-équivalents-km-transportés ;
- avec 4,8 Mt en 2018, la part du transport intérieur dans les émissions de CO₂ du transport aérien est de 20,9%, dont une proportion importante liée à la desserte de l'Outre-mer (2,5 Mt). Depuis 2000, les émissions de CO₂ pour le trafic intérieur métropole sont en nette diminution (-28%) ;
- les émissions du transport aérien international 2018 (17,9 Mt de CO₂) représentent 79,1% des émissions du transport aérien, et sont en progression de +36% par rapport à 2000, pour un trafic à +75% (en PKTeq) ;
- entre 2000 et 2018, le nombre de passagers équivalents-kilomètres-transportés a augmenté de 62% tandis que la croissance des émissions de CO₂ du transport aérien en France a été limitée à 21%, soit une diminution de -25% des émissions unitaire (en kg de CO₂ par passager-équivalents-km-transporté), correspondant à une décroissance moyenne de -1,6% /an (estimation Tarmaac) ;
- en 2018, les émissions de CO₂ pour le trafic aérien (aviation commerciale et non commerciale) sont évaluées, après recalage par les ventes de carburant aviation en France, à 23,2 Mt (estimation DGAC d'après ventes 2018) ;
- selon l'inventaire national des émissions 2017 (chiffres CITEPA, édition mars 2019, périmètre CNUCC France entière), le secteur aérien (5,0 Mt) représentait respectivement 3,7% des émissions de CO₂ du secteur des transports (134,3 Mt) et 1,4% des émissions de la France (352,3 Mt).

tives pour l'économie locale.» Il s'agit d'un argument important pour le désenclavement économique de nos régions, puisque le développement du secteur aérien semble être un levier d'action direct justifiant le recours aux subventions publiques dans la politique d'aménagement des territoires.

5.3 Missions

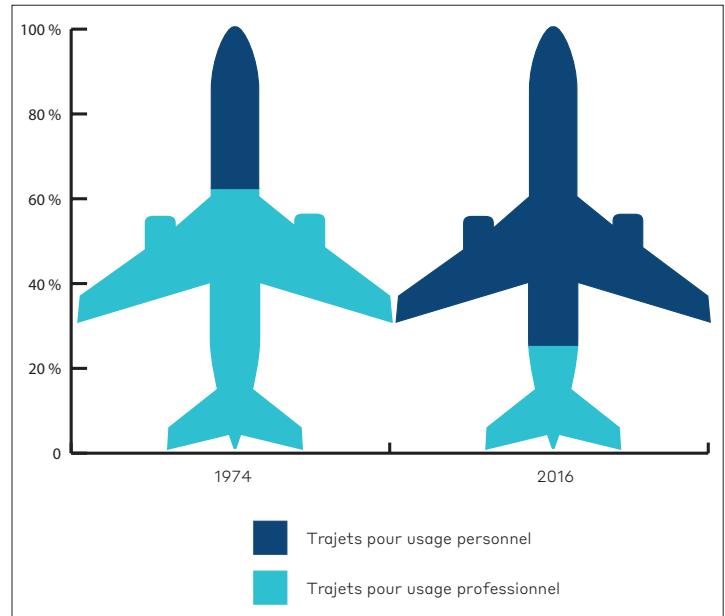
À quoi sert l'avion ? Outre les usages militaires, sécuritaires (par exemple les Canadair), sanitaires (typiquement le rapatriement) et diplomatiques, l'avion joue un rôle important dans le désenclavement des territoires et l'animation des échanges nationaux et internationaux, qu'ils soient de nature commerciale ou touristique.

L'aviation participe ainsi au positionnement de la France comme première destination touristique mondiale. Notre pays a accueilli 89,4 millions de visiteurs en 2018⁵³, et visait avant la crise du COVID le cap des 100 millions à l'horizon 2020, sachant que le tourisme représente, au total, plus de 7% du PIB national. En 2018, les visiteurs internationaux ont généré 56,2 milliards de recettes (+5 %), là encore à un niveau historique.

Un récent rapport d'information du Sénat sur la *Contribution du transport aérien au désenclavement et à la cohésion des territoires*⁵⁴ souligne **l'importance des dessertes périphériques**. À titre d'exemple, la ligne Quimper-Paris y est ainsi identifiée comme essentielle au tissu économique local du Finistère Sud, et les retombées économiques des liaisons Dublin-Rodez et Charleroi-Rodez y sont chiffrées à 2,14 millions d'euros pour le territoire aveyronnais.

S'appuyant sur les travaux de recherche d'économistes spécialistes du transport aérien, le même rapport met en lumière la corrélation entre la croissance du trafic aérien d'une part, celle du PIB, du niveau de salaire, des investissements directs à l'étranger et de la démographie locale d'autre part. **Des boucles de rétroaction positives entre croissance économique et croissance du secteur aérien y sont identifiées**⁵⁵, dont le sens de causalité est lié à la typologie des régions concernées. Si dans les régions centrales, c'est la croissance économique qui attire le transport aérien, la stimulation agit dans le sens opposé pour les régions périphériques: c'est le transport aérien qui stimule l'économie locale⁵⁶. «Le trafic n'est pas induit, mais il est moteur et porteur d'externalités posi-

5.4 Usages et clientèle



Une enquête réalisée en 2015-2016 par la DGAC⁵⁷ met en lumière une inversion des usages en France en 40 ans: alors qu'en 1974, 62% des usagers prenaient l'avion pour des raisons professionnelles contre 38% pour des usages privés, ces derniers représentent en 2016 72% des vols, dont 48% pour des activités de loisirs, le trafic affinitaire (visites à la famille) comptant lui pour 25% des vols⁵⁸.

La même enquête révèle par ailleurs que **les cadres supérieurs français volent 17 fois plus que leurs compatriotes ouvriers**, alors que ces derniers sont plus représentés dans la population (12,1%) que les premiers (9,4%). Comme le rappelle une publication récente du GIFAS⁵⁹, 40% des Français n'ont jamais pris l'avion, et seuls 30% le prennent une fois par an ou plus, et d'après les statistiques ministrielles⁶⁰, la moitié des déplacements par avion des Français est le fait des 20% dont les revenus par unité de consommation sont les plus élevés. En France toujours, les 5% des personnes qui voyagent le plus émettent 50% des émissions de gaz à effet de serre en lien avec le transport. Ce groupe comporte une très forte surreprésentation des personnes dont les revenus dépassent 7 500€/mois.

51 FNAM, rapport de branche 2019. <https://www.fnam.fr/files/download/52ad76e1f84ae6b>

52 Nomenclature d'activités française. <https://www.insee.fr/fr/information/2406147>

53 <https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/la-france-reste-la-premiere-destination-touristique-mondiale-1021925#:~:text=La%20France%20demeure%20la%20premi%C3%A8re,d%C3%A8s%20tablir%20un%20nouveau%20record.>

54 <http://www.senat.fr/rap/r18-734/r18-7344.html>

55 E. Van De Vijver, B. Derudder, F. Witlox, «Air passenger transport and regional development: Cause and effect in Europe», Promet - Traffic & Transportation, 2016.

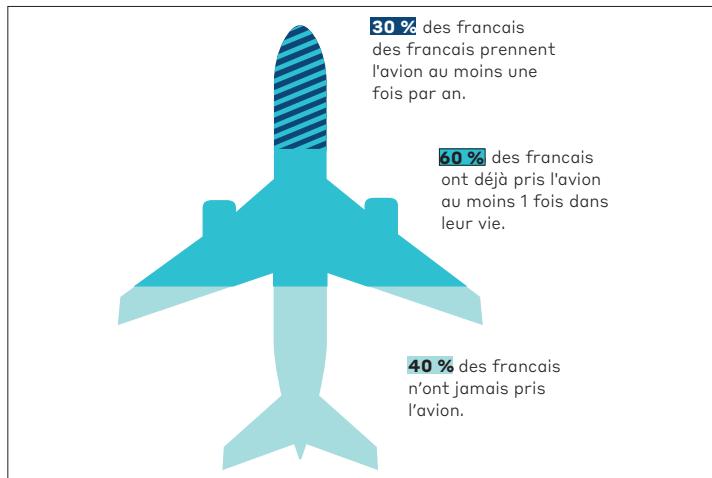
56 K. Mukkala, H. Tervo, «Air transportation and regional growth: which way does the causality run?», Environment and Planning A, vol. n°45, 2013.

57 https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ENPA_2015_2016.pdf

58 Selon une étude récente d'AMADEUS, menée sur un panel de voyageurs internationaux, rendre visite à sa famille et ses amis serait un motif premier pour 52 % des répondants prévoyant de réserver un voyage d'agrément après la levée des restrictions de déplacement dus à la crise sanitaire du COVID-19. <https://amadeus.com/documents/en/retail-travel-agencies/info-graphics/destination-wheretonext-travelplanning-1-infographic.pdf>

59 https://res.cloudinary.com/gifas/image/upload/v1582625311/Documents/GIFAS_DOC_VRAI_FAUX_bd_pap_rotzzf.pdf

60 <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-nationale-transports-et-deplacements-entd-2008>



Cette polarisation de l'usage de l'avion vers les catégories socio-professionnelles les plus élevées n'est pas une exception française. Aujourd'hui, environ la moitié des habitants de pays riches et développés ne prennent jamais l'avion. Si ce mode de transport se développe auprès de tous les segments de population, il demeure l'apanage des plus aisés : au Royaume-Uni et aux États-Unis par exemple, entre 12% et 15% des personnes réalisent entre 65% et 70% des vols⁶¹. Au Royaume-Uni toujours, 75% des vols de tourisme sont empruntés par les CSP les plus élevées⁶². Ces disparités se généralisent également à grande échelle, comme le montre très clairement le graphique ci-dessous tiré d'une étude récente consacrée aux pays émergents :

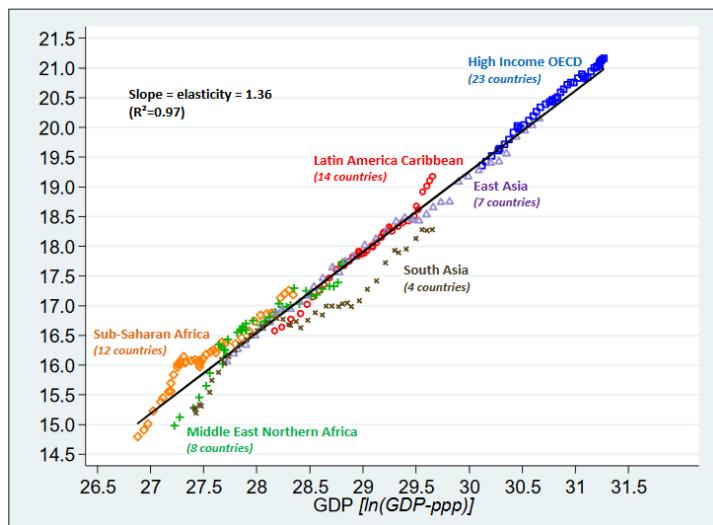


Figure 7 - Source du graphique : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01305412/document>, François Bourguignon, Pierre-Emmanuel Darpeix, Air traffic and economic growth: the case of developing countries (2016)

Il est enfin estimé que seule 10% de la population mondiale prend au moins une fois l'avion chaque année⁶³ et selon le CEO de Boeing lui-même, 80% de la population mondiale

n'a jamais volé⁶⁴. L'aérien n'échappe donc pas plus que n'importe quel autre mode de transport au modèle de Schäfer⁶⁵, selon lequel il existe une forte corrélation entre la distance moyenne parcourue et le niveau de revenus.

L'explication de ces disparités réside dans le fait que les déplacements longue distance sont limités en partie par le coût du transport aérien, même s'il est aujourd'hui très bas, mais aussi par le coût de l'hébergement et des activités sur place et par la possibilité de disposer de temps libre à consacrer à des voyages. Ainsi **la diminution du prix du transport aérien n'a ouvert que très peu, en pratique, les voyages aux catégories sociales modestes ; mais elle a permis aux catégories aisées de multiplier les voyages de courte durée**, pour les loisirs comme pour les affaires. Pour un voyageur sur quatre, le low-cost est certes une nécessité face à un budget vacances qui se réduit. Les autres, en revanche, privilégient les voyages à bas coût pour profiter davantage des loisirs sur place, mais aussi pour partir plus souvent et plus loin⁶⁶.

En conséquence, au niveau mondial, en 2018, 1 % de la population était responsable de 50 % des émissions de GES de l'aviation⁶⁷, avec un groupe de voyageurs fréquents parcourant environ 56 000 km en avion par an.

61 <https://www.nytimes.com/interactive/2019/10/17/climate/flying-shame-emissions.html>.

62 Hopkinson, L., Sloman, L., Newson, C., & Hiblin, B. (2019). Curbing aviation with a Frequent Flyer Levy and aviation fuel duty – a fair tax package.

63 https://www.lemonde.fr/idees/article/2011/11/01/7-milliards-en-avion_1596821_3232.html

64 <https://www.cnbc.com/2017/12/07/boeing-ceo-80-percent-of-people-never-flown-for-us-that-means-growth.html>

65 SCHÄFER A., HEYWOOD J., JACOBY H., WAITZ I., 2009, Transportation in a Climate-Constrained World , Cambridge (Ma.), MIT Press, 329 p.

66 <https://www.lefigaro.fr/conso/2015/01/28/05007-20150128ART-FIG00138-portrait-du-voyageur-low-cost-en-cinq-chiffres.php>

67 The Guardian, 1% of people cause half of global aviation emissions – study, 2020. <https://www.theguardian.com/business/2020/nov/17/people-cause-global-aviation-emissions-study-covid-19>

Une sur-représentation des CSP+ dans les avions

En France



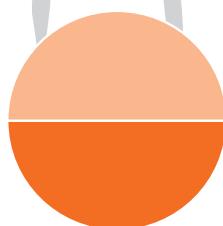
Cadres supérieurs

Part dans la population totale : 9,4%

 Ouvriers

 Part dans la population totale : 12,1%

17x
plus de trajets



50%
des émissions
de gaz à effet de serre
sont relachées par les

5%
des Français qui
voyagent le plus.

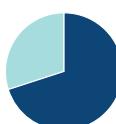
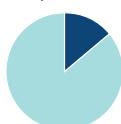


50%

des déplacements en avion sont effectués par les **20%** dont les revenus sont les plus élevés par unités de consommation



Au Royaume-Uni et aux USA



75% des vols de tourisme sont empruntés par les CSP les plus élevées.

L'usage de l'avion est enfin à résister par rapport à l'ensemble du secteur des transports. Aux États-Unis, la distance moyenne parcourue par habitant était en l'an 2000 d'environ 80 km par jour dont 10 km en avion⁶⁸, la voiture pourvoyant à l'essentiel de la demande de transport.

En France, la voiture reste le moyen de transport permettant de réaliser 80% des 38 km par jour (soit 14 000 km par an) parcourus par chacun de nos concitoyens. L'avion y est fortement minoritaire (moins de 5% des kilomètres parcourus dans le trans-

68 <https://www.alternatives-economiques.fr/economie-de-vitesse-ivan-illich-revisite/00081433>

port intérieur⁶⁹) mais sa part dans les voyages longue distance ne cesse de croître, passant de 8,0 % en 2009 à 9,5 % en 2016. L'avion est principalement utilisé pour des voyages à plus de 1 000 km, et les distances parcourues lors de ces voyages augmentent de 5 %, passant de 97 à 102 milliards de km entre 2015 et 2016⁷⁰.

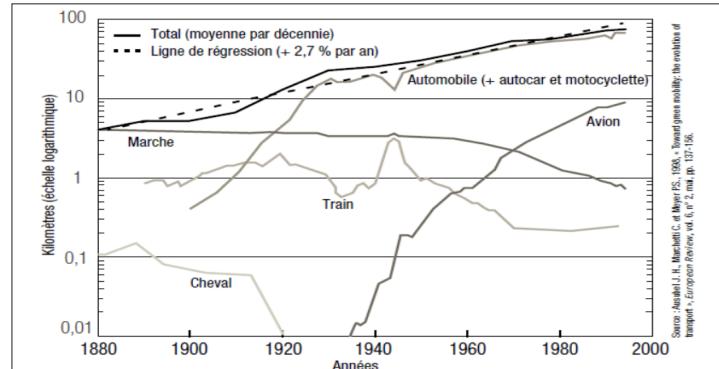


Figure 8- Source: AUSUBEL J.H., C. MARCHETTI, P.S. MEYER, (1998), Toward green mobility: the evolution of transport, European Review, Vol. 6, N. 2, pp.137-156.

69 https://www.culture.gouv.fr/Media/Thematiques/Etudes-et-statistiques/Files/Publications/Questions-de-culture/Culture-medias-2030_variables/Culture-medias-2030_fiche-21_Mobilites-geographiques, et compilation des Comptes des transports 2007 et 2020.

70 <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-11/datalab-essentiel-138-mobilite-longue-distance-2016-fevrier2018.pdf>

71 Lee, 2010. Can we accelerate the improvement of energy efficiency in aircraft systems? Energy conversion and management. Le rapport de l'ICCT de 2015 montre toutefois que les gains sont de plus en plus faibles : -2% entre 1970 et 90 puis -0.8% entre 1990 et 2015.

72 C'est-à-dire la diminution de la proportion de sièges voyageant vides.

Quelques calculs de coin de table

L'objectif de cet exercice est de faire une estimation des infrastructures nécessaires à la production d'énergie pour une éventuelle aviation bas-carbone. Il s'agit juste ici de trouver les ordres de grandeurs, en utilisant les chiffres actuels de trafic et en utilisant les technologies actuelles.

Pour cela, on suivra une approche énergétique : on commencera par calculer l'énergie actuellement consommée pour faire voler les avions dans deux aéroports typiques : celui de Blagnac, petit aéroport régional, et l'aéroport de Roissy Charles-de-Gaulle, qui est le principal aéroport international français. On supposera ensuite que cette énergie est soit fournie par de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau, soit issue d'agrocarburants. La première voie nécessite donc de produire de l'électricité, et la seconde de consacrer des terres agricoles à de la culture énergétique. Dans le cas de la production électrique, histoire de faire parler les chiffres, on comparera ces valeurs à la production électrique française actuelle, et on pourra également la convertir en nombres de réacteurs nucléaires, en surface de fermes photovoltaïques ou éoliennes. Il s'agira dans les cas des agro-carburants de comparer les surfaces agricoles nécessaires à la surface agricole utile (S.A.U.) de la France.

Chiffres sur l'aviation actuelle

- En 2018, les vols de l'aéroport de Blagnac ont été à l'origine de l'émission de 498 ktCO₂. Ceux de Roissy Charles-de-Gaulle de 13,1 MtCO₂.
- Lorsque l'on brûle du kérosène, la relation entre l'énergie libérée et les émissions de CO₂ est donnée par relation 1 MJ \leftrightarrow 71 gCO₂.

Chiffres sur l'hydrogène

- La quantité d'énergie maximale que l'on peut récupérer en brulant de l'hydrogène est 39,7 kWh/kgH₂.
- L'énergie nécessaire pour liquéfier l'hydrogène est de 11,5 kWh/kgH₂
- L'électricité nécessaire pour produire de l'hydrogène gazeux par électrolyse est de 56,8 kWh/kgH₂

Chiffres sur la production d'électricité et les agro-carburants

- Une surface d'1 km² produit entre 15 et 25 GWh avec des éoliennes et entre 40 et 100 GWh avec des panneaux photovoltaïques. Un réacteur nucléaire typique produit 6,5 TWh par an. Un hectare de colza permet de produire environ 1200 litres de bio-diesel. Le bio-diesel contient une énergie d'environ 9,8 kWh/litre.
- En France métropolitaine, la surface agricole utilisée (S.A.U) représente 45 % du pays, et donc 26,8 millions d'hectare.
- La production d'électricité française est d'environ 480 TWh/an.