

Le Mécanisme Troc Carbone Avion (TCA) Un mécanisme juste et efficace pour réduire les émissions de carbone du transport aérien.

Pierre-Henri Bono
Alain Trannoy

WP 2024 - Nr 09

Le Mécanisme Troc Carbone Avion (TCA)

Un mécanisme juste et efficace pour réduire les émissions de carbone du transport aérien. ¹

Pierre-Henri Bono² et Alain Trannoy³

Résumé

Troc Carbone Avion (TCA) est un mécanisme de répartition des quotas d'émissions pour les passagers Français du transport aérien assorti d'un mécanisme de troc au prix tutélaire du carbone de 100 € la première année et qui suit pour les années suivantes la trajectoire de croissance des prix définie dans le rapport Quinet II. En se basant sur les dernières données disponibles, chaque Français disposerait d'un quota d'émission de 0,4 tonne de carbone la première année. Le mode opératoire est une application du type *TousAntiCovid* avec QR code exigé au moment de l'enregistrement par les compagnies aériennes pour obtenir sa carte d'embarquement. Le compte carbone personnel serait rattaché à la possession de la nationalité française ou le fait de résider en France. Nous estimons que le TCA pourrait entraîner une baisse de 6 % du total des émissions la première année pour une valeur d'échange sur le marché de l'ordre d'1,5Md'€. Le TCA est aussi un mécanisme de transfert qui redistribue du pouvoir d'achat essentiellement du dernier décile au premier décile qui pourrait voir son pouvoir d'achat augmenter de 0,5 %. Nous proposons une variante du TCA pour le rendre compatible et complémentaire du système d'échange des quotas d'émission européen, SEQE-UE.

Abstract

The Airplane Carbon Barter (ACB) mechanism is a sort of Personal Carbon Trading (PCT) system for allocating emissions allowances to French air travelers, combined with a barter mechanism at the shadow carbon price of €100 in the first year, and following the price growth trajectory defined in the Quinet II report for the following years. Based on the latest available data, each French citizen would have an emission allowance of 0.4 tons of carbon in the first year. The modus operandi is similar to a *Covid*-type app, with a QR code required at check-in by airlines to obtain a boarding pass. The personal carbon account is reserved for French nationals or residents of France. We estimate that the TCA could lead to a 6% reduction in total emissions in the first year, for a market exchange value of around €1.5 billion. The TCA is also a transfer mechanism that redistributes purchasing power essentially from the last decile to the first decile, which could increase its purchasing power by 0.5%. We also propose a variant of the ACB mechanism to make it consistent with the EU-ETS.

¹ Nous remercions vivement Renaud Bourlès, Dominique Bureau, Dany Cohen, André de Palma, Charles Figuières, Christian de Perthuis, Christian Gollier, Fanny Henriët, Marc Ivaldi, Armel Prieur, Stef Proost, Emile Quinet et Katheline Schubert pour des échanges éclairants et d'utiles commentaires qui ont permis d'améliorer le contenu et la forme du texte. Nous en restons évidemment les seuls responsables.

² CEVIPOF, Sciences Po. pierrehenri.bono@sciencespo.fr

³ Aix-Marseille University, CNRS, EHESS, AMSE, Marseille France. 5 Boulevard Maurice Bourdet CS 50498 F-13205 Marseille cedex 1, France. Alain.trannoy@univ-amu.fr. We acknowledge financial support from the French government under the "France 2030" investment plan managed by the French National Research Agency Grant ANR-17-EURE-0020, and by the Excellence Initiative of Aix-Marseille University - A*MIDEX.

Mots Clés : Avion, Carbone, Emissions, droits, redistribution.

Key words : Airplane, Carbon, Emissions, permits, redistribution

JEL Codes : Q52, Q54, Q58, R48

Introduction

Nos modes de déplacement sont des outils essentiels de notre liberté de mouvement. Limiter l'usage de la voiture, du train, du bateau ou de l'avion constitue de facto une réduction de la liberté de mouvement des individus. Cette liberté a été qualifiée par les juristes de liberté fondamentale, celle d'aller et venir. Or cette liberté s'oppose fortement à une autre liberté tout aussi fondamentale : celle de vivre dans un monde durable et peu pollué. Favoriser la décarbonation des transports dans un futur proche n'est possible que par une diminution des déplacements et des changements modaux vers des transports de masse les moins carbonés possibles.

De plus, une réduction massive des déplacements à l'échelle d'un pays comme la France ne peut s'envisager comme un facteur supplémentaire d'augmentation des inégalités. Toute politique publique sur ce sujet doit avoir deux objectifs : réduire d'abord l'empreinte carbone et parallèlement ne pas augmenter les inégalités liées au transport, voire, pour ces dernières, tenter de les faire baisser.

Une telle quadrature du cercle est-elle possible ? Nous pensons que, grâce au bond dans le monde numérique que la France (et les autres sociétés) a dû faire au cours de la pandémie, il est désormais possible de faire fonctionner un mécanisme d'allocation de quotas carbone distribué à l'ensemble des Français pour leurs voyages en avion. Un tel mécanisme est de nos jours techniquement possible grâce aux nouvelles technologies et socialement envisageable. Nous ne plaidons pas l'originalité de l'idée générale connue sous le nom de *Personal Carbon Trading* (PCT) en anglais et de compte carbone⁴ en français. De multiples travaux sont recensés sur les effets théoriques des PCT et sur l'acceptation de ce type de mesure et les réponses comportementales possibles des intéressés⁵. D'autres, et en particulier Calame (2020), nous ont également précédés pour la proposer dans un contexte français (Voir Pottier (2022) pour une recension critique). Mais à notre connaissance, la déclinaison au seul transport aérien d'un compte carbone n'a jamais été plaidée et argumentée dans tous ses aspects, et là réside notre originalité. De plus, le mécanisme proposé présente une singularité dans la mesure où les achats et ventes de quotas d'émission ne se feraient pas à un prix d'équilibre mais à un prix tutélaire. Pour mettre cet aspect en avant, nous avons retenu dans le titre le mot troc pour le différencier d'un mécanisme pur de marché ou de bourse d'échanges. La vocation de ce document est de présenter une mise en œuvre possible d'un tel dispositif avec ses difficultés, ses avantages, mais aussi ses incertitudes. Ces dernières proviennent du fait que nous n'avons aucun retour d'expérience en grandeur nature, un tel mécanisme n'ayant jamais été opérationnalisé dans le secteur des transports ou ailleurs, à l'exception d'un groupe pilote en 2018-2019 de 89 personnes dans le domaine des transports du quotidien à Lahti, une ville à 100 km au nord d'Helsinki (Uusitalo, Huttunen, Kareinen, von Wright *et al.*, 2022).

Pourquoi l'aérien ?

Un déplacement sur dix loin du domicile se fait par avion. Malgré une certaine démocratisation, les émissions de carbone liées au transport aérien présentent la caractéristique marquée de porter sur un

⁴ Voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Compte_carbone pour une présentation du dispositif.

⁵ Voir pour une revue de la littérature scientifique spécialisée : Tang, *et al.* (2023).

bien qui ne peut être qualifié de première nécessité (à l'exception de certains voyages notamment entre l'outre-mer ou encore la Corse avec l'Hexagone) et qui, en vertu de cette caractéristique même, proviennent majoritairement d'une activité de consommation des catégories aisées, voire très riches si l'on pense aux jets privés⁶. Toutefois, une certaine démocratisation est en cours avec la percée des compagnies low cost sur le moyen-courrier. Selon les chiffres disponibles en provenance de la direction Générale de l'aviation civile⁷ comme de l'ADEME (Caire, Tholance, Tremeac, Barbusse *et al.*, 2022), le transport aérien de passagers a émis en 2019⁸, 24,4 millions de tonnes de CO₂, dont 23,7 millions/tonne pour le transport aérien commercial. Ceci est sans compter les effets de traînées de vapeur d'eau que laissent les avions dans le ciel et qui participent aussi aux effets de serre (Lee, Fahey, Skowron, Allen *et al.*, 2021). Pour donner un ordre de grandeur, un aller-retour Paris-New York représente environ 1 tonne d'émission de CO₂ par passager, soit l'équivalent des émissions annuelles moyennes d'un français pour le chauffage de son domicile, ou encore les émissions d'une voiture pour effectuer 5 000 km⁹. L'empreinte carbone d'un Français est en moyenne de 9 tonnes par an en comptant les importations. En 16 heures, un passager d'un vol Paris-New-York a donc émis 1/9 ième de ce qu'il émet en moyenne sur toute l'année. Bien qu'au total, la quantité émise par le transport aérien ne soit pas considérable dans le total des émissions françaises, un vingtième, 5,5 % exactement, cela représente toutefois un doublement en 30 ans (une multiplication par 2,2) et qui est très concentrée socialement (50 % des usagers de l'avion sont des CSP+¹⁰). En comptant les effets de traînées de vapeur d'eau qui seraient globalement équivalents à environ 70 % d'émissions de CO₂¹¹ en plus, on aboutit à 9 % du total des émissions françaises en 2019. En sens inverse, le changement climatique a d'ailleurs un effet sur le transport aérien en augmentant les turbulences (Storer, Williams et Joshi, 2017) et en augmentant la durée des vols (Williams, 2016).

Comme le souligne Caire, *et al.* (2022), la stratégie pour décarboner le transport aérien repose sur trois leviers, baisser l'énergie nécessaire pour transporter par avion, baisser le contenu carbone des sources d'énergie utilisées (par exemple, de l'hydrogène bas carbone) et inciter à moins utiliser l'avion. Aujourd'hui, les efforts portent sur les deux premiers leviers (et donc le progrès technique¹²) et nécessiteront le renouvellement de la flotte aérienne. Cependant, ils ne produiront leurs effets que dans 15 à 20 ans. À court terme, il est donc urgent d'imaginer des mécanismes qui puissent inciter les usagers à modérer leur recours à l'avion, d'autant plus que peu de Français se disent prêts à fournir des efforts dans ce sens. Seuls 12 % d'entre eux éprouvent de la honte lorsqu'ils empruntent (9 % sont plutôt honteux, 3 % tout à fait honteux)¹³ l'avion. L'absence actuelle de mécanismes incitatifs pour un usage raisonné et sobre de ce mode de transport est donc doublement problématique, tant sur le plan du réchauffement climatique que sur le plan de la justice sociale.

⁶ Le TCA concerne l'aviation commerciale. Évidemment, il serait inconcevable que les vols en jets privés (y compris d'ailleurs ceux des autorités publiques) acquittent une contribution carbone inférieure à celle de l'aviation commerciale. Le TCA ne concerne pas non plus le fret aérien qui lui resterait soumis au système ETS (Emission Trading System) en place en Europe.

⁷ DGAC : Les émissions gazeuses émises par le transport aérien en 2021, juillet 2023 ; tableau de la page 7, haut de page.

⁸ Dernière année normale pour laquelle nous disposons de chiffres. Le trafic aérien total en 2023 n'est pas encore revenu à son étiage de 2019 puisqu'il n'en représente que 94,5 %.

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/tendanCIEL_2023_12_124_0.pdf.

⁹ Source : <https://eco-calculateur.aviation-civile.gouv.fr/>

¹⁰ Fondation Jean Jaurès « Les Français, les voyages et l'avion ». 2022.

¹¹ Lee, *opt citée*, Tableau 5.

¹² Pour une synthèse, voir Delbecq, Fontane, Gourdain, Planès *et al.* (2023).

¹³ Source : France 2030.

Peut-on se reposer sur l'Europe ?

Depuis 2013, l'aviation commerciale (vols au dessus de l'Espace Économique Européen) est bien englobée par le marché de droits à polluer (système ETS pour *Emission Trading System* ou SEQE pour *Système d'échange de quotas d'émission*¹⁴) via les compagnies aériennes concernées. En 2024 les quotas sont distribués gratuitement à hauteur de 85 % de l'enveloppe totale allouée à chaque compagnie, quotas calculés par rapport aux émissions de la période 2004-2006. En tenant compte de la croissance du trafic aérien depuis cette période de base, la fraction des émissions allouée gratuitement par rapport aux émissions effectives est tombée maintenant en dessous de 50 % (47,5 % en 2022)¹⁵. La moyenne des prix spot sur ce marché de la tonne de carbone n'est plus négligeable (85 €¹⁶ au cours du premier semestre 2023). Ainsi, on serait tenté de croire que le prix effectif moyen d'une tonne de carbone pour le transport aérien intereuropéen est aux alentours de 44 € la tonne¹⁷. Mais cette façon de raisonner omet le coût d'opportunité que représente une allocation gratuite de droits à polluer. Si une compagnie pollue à raison d'une tonne de carbone, elle perd la possibilité de vendre son droit de polluer au prix du marché du carbone, en l'occurrence 85 € en 2023, elle perd une opportunité de gagner 85 €.

Et d'ailleurs, Fageda et Teixidó (2022) ont montré que le système ETS avait quand même permis d'économiser 3 millions de tonnes de CO2 par an entre 2013 et 2016, ce qui est tout sauf négligeable, alors même que le prix de la tonne de CO2 était faible à l'époque. Néanmoins le système n'a pas permis de faire baisser les émissions en termes absolus, ce qui est quand même l'objectif de l'accord de Paris. Si le système évoluait à l'avenir pour faire payer au transport aérien intraeuropéen un coût carbone équivalent à celui du transport routier, qui concerne l'ensemble de la population¹⁸, cela pourrait invalider la présente proposition pour ce segment du marché du transport aérien¹⁹, à la réserve importante près que le système ETS ne prend pas en compte les effets des traînées de vapeur d'eau sur le climat. Dès lors, le TCA ne concernerait plus que les liaisons intercontinentales pour lequel la bonne échelle serait évidemment l'ensemble de l'Espace Économique Européen. À cet égard, l'accord international dit CORSIA 2020 conclu sous l'égide de l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI) apparait totalement insuffisant déjà dans ses objectifs, puisque les pays signataires s'engagent simplement à limiter les émissions du secteur aérien en 2050 au niveau de celles de 2020, alors que la France doit les diviser globalement au moins par un facteur 5. Ainsi, si la France arrivait à atteindre cet objectif, le secteur aérien représenterait 1/3 des émissions totales à cette date²⁰. De plus, l'accord présente de nombreuses faiblesses bien décrites par Proost et Van der Loo (2023). Parmi celles-ci, le manque de sérieux et de contrôle sur les compensations qui consistent pour les compagnies à financer un projet de réduction des émissions de carbone dans un autre secteur de l'économie mondiale à hauteur des émissions émises au cours d'un vol donné.

Pourquoi les Français ?

¹⁴ Qui est devenu l'ETS1 avec la mise en place de l'ETS2 qui concerne le chauffage et le transport routier et qui monte en charge lentement pour être opérationnel en 2027.

¹⁵ Source, Figure 7 du *Report from the commission to the European Parliament and the council on the functioning of the European carbon market in 2022*.

¹⁶ Source : Figure 3 du *Report from the commission to the European Parliament and the council on the functioning of the European carbon market in 2022*

¹⁷ $44=85 \times 0,525$

¹⁸ Ce qui est dans l'ordre du possible, puisqu'il est prévu une extinction progressive des quotas de CO2 gratuits historiques entre 2024 et 2026, et une mise aux enchères de tous les quotas d'émission à partir de 2027. Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/marches-du-carbone>.

¹⁹ Pour une étude économique de l'effet à terme de l'ETS sur le secteur aérien européen, voir Proost (2024).

²⁰ 24 par rapport à 80 millions de tonnes de CO2.

Les Français, et plus exactement les personnes de nationalité française, ne sauraient s'absoudre du fait qu'ils émettaient 4 % des émissions de carbone du transport aérien sur les routes internationales dans le monde en 2018, soit le cinquième rang dans le monde (Hopkinson et Cairns, 2021), après le Royaume-Uni, les États-Unis, la Chine et l'Allemagne. Le peuple français a une responsabilité en la matière. Ajoutons que selon les chiffres du CITEPA²¹, « le rebond post-crise du transport aérien se poursuit toujours, avec une hausse de 21 % des émissions des vols intérieurs sur les 9 premiers mois 2023 par rapport aux 9 premiers mois 2022 ; et une hausse de 27 % pour les vols internationaux ». Ceci est en ligne avec l'augmentation de 2020 à 2019 du total des émissions de 17 %, alors que les émissions de CO₂ à l'unité de transport ont baissé de 30 % sur la même période²².

La France, et cela ne lui est pas propre, a un problème de demande concernant le transport aérien. Et la France est un pays riche et a été le pays hôte de la Cop 21 en 2015. Elle se doit de montrer l'exemple de ce qu'il est possible de faire pour peser sur la demande de transport aérien, sans attendre une décision collégiale au niveau européen qui prendra beaucoup de temps. La proposition d'une taxation du kérosène²³ portée par la Commission Européenne qui entendait réviser la directive sur la taxation de l'énergie, afin de prendre en compte les objectifs climatiques de l'UE, a été bloquée en 2023 par un certain nombre de pays, l'unanimité étant requise en matière fiscale. Une expérimentation par la France permettrait d'avoir un effet d'entraînement sur les autres pays et servirait de test en grandeur nature. Il n'est d'ailleurs pas exclu que d'autres pays se joignent à l'expérimentation d'entrée de jeu. Enfin, en étant précurseur, la France aurait plus de latitude pour exercer une influence en Europe et provoquer le débat entre continuer à impliquer l'aérien dans le système ETS ou adopter un TCA à l'échelle de l'Europe.

Choix taxe carbone/marché de droits à polluer

Pour limiter les émissions de carbone dans le transport aérien, deux types de mécanismes s'offrent aux décideurs publics, la taxe carbone ou le marché de droits à polluer qui se matérialise par des quotas d'émission échangeables. On sait que théoriquement ces deux mécanismes aboutissent à la même prise de conscience par l'utilisateur du vrai coût marginal du service qu'il utilise en intégrant les effets externes (voir Stavins (2022)). Il a été argué que l'allocation d'un crédit carbone personnel serait de nature à plus sensibiliser l'individu, à plus éveiller ses motivations intrinsèques et *in fine* serait plus efficace²⁴. De plus, la taxe carbone souffre en France d'une mauvaise réputation et est devenue une sorte de tabou politique depuis la révolte des Gilets jaunes, en raison d'un manque de confiance dans l'action publique (Dechezleprêtre, Fabre et Stantcheva, 2022). À la question de savoir si une taxe carbone avec transferts serait juste, seuls 22 % des Français répondent positivement contre 35 % dans le reste des pays occidentaux, et par suite seuls 29 % seraient favorables à une telle mesure, contre 37 % dans les autres pays (Dechezleprêtre, Fabre et Stantcheva, 2022). De plus, évoquer la création d'une taxe dans un pays où la pression fiscale est élevée n'est pas populaire²⁵, sans parler de l'érosion du pouvoir d'achat qui crée un climat peu propice à ce type de proposition²⁶. Faire appel quotas

²¹ https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/barometre-mensuel/CP-Citepa_Barometre_Emissions_GES_dec2023.pdf

²² Comparaison des différents tableaux de la p.7 de « Les émissions gazeuses... DGAC, op.citée.

²³ La taxation du kérosène utilisé dans les jets privés a été aussi bloquée au niveau européen.

²⁴ L'évidence empirique n'est pas encore solidement établie. Cf Pottier, op citée.

²⁵ Sur le plan des règles européennes, ce n'est pas non plus totalement neutre, car les recettes de la taxe carbone seraient comptabilisées au titre du taux de Prélèvements obligatoires, ce qui n'est pas le cas pour le TCA.

²⁶ Il ne faudrait pas toutefois partir du constat que le transport aérien commercial n'est pas taxé. Le taux de TVA sur le transport aérien intérieur est de 10 % comme sur le train. À cela s'ajoutent des taxes spécifiques au transport aérien, portant sur le transport de passagers comme de marchandises : la taxe de l'aviation civile

d'émission présente l'avantage immédiat de rendre visible à côté du principe pollueur-payeur, qui est efficace et qui semble immédiatement juste, un principe de non-pollueur gagnant. Les gagnants du mécanisme sont les non pollueurs, ceux qui ne voyagent pas en avion et qui se voient récompensés. Il se trouve que dans le cas du transport aérien – à contrario du chauffage ou de l'usage de la voiture – ce sont les catégories les plus modestes, les catégories populaires et le bas de la classe moyenne qui polluent le moins. Ainsi le mécanisme d'incitation à la sobriété énergétique via un marché de droits à polluer remplit à la perfection l'objectif de ne pas faire supporter le coût de la lutte contre la décarbonation de l'économie par les plus modestes, mais au contraire par les plus favorisés. Et cela va incontestablement dans le sens de ce que désirent les Français. Les deux politiques majoritairement soutenues par les Français sont la limitation de l'avion à 56 % et le changement d'attitude de la part des plus riches à 59 %. Une taxe qui augmenterait le coût du transport aérien de 20 % serait encore soutenue par 45 % des Français, contre 35 % d'un avis contraire (Dechezleprêtre, Fabre, Kruse, Planterose *et al.*, 2022).

Dans le reste de ce document, nous présentons d'abord dans la première partie une possible mise en œuvre d'un crédit de carbone pour le transport aérien. Les sciences sociales dans leur ensemble sont maintenant mieux outillées que par le passé pour montrer qu'un état du monde est meilleur qu'un autre. Pour la transition d'un état à un autre, les chercheurs préconisent la mise en place de politiques publiques, qu'ils sont capables d'évaluer de manière assez fine, *ex ante* par des modèles de simulation et *ex post* par des protocoles causaux. Cependant le design des politiques publiques en lui-même reste encore peu abordé par la communauté scientifique. C'est à quoi nous nous risquons dans la partie suivante avec une attention particulière concernant la faisabilité du dispositif et ses écueils inévitables. En nous éloignant d'un cadre purement théorique et souvent inatteignable, nous tentons de mobiliser au mieux les connaissances pour la construction d'une telle politique. La dernière partie de ce document énumère les conséquences envisagées de notre dispositif.

Le mécanisme du troc carbone avion

La traçabilité des voyages aériens

Le mécanisme du Troc Carbone Avion (TCA) repose d'une manière essentielle sur une caractéristique du transport aérien commercial : la traçabilité du consommateur-pollueur, car les billets d'avion sont nominatifs. Notons que si c'est le cas aussi pour certains billets de train, cela l'est moins pour les billets de bus, d'autocar ou de métro, et pas du tout pour les achats de carburants ni d'énergie à usage domestique. Ainsi la généralisation à tous les autres modes d'émissions diffuses de carbone par les ménages en consommant des biens et services, pour autant désirable qu'elle soit, devrait d'abord passer par une première étape qui serait de rendre nominatifs tous les achats, ventes et cessions de

(TAC) pour financer la (DGAC) (487 M€ en 2019), la taxe de sûreté et de sécurité la TA (1,6 milliard €), la taxe sur les nuisances sonores (TNSA) (50 M€), et la taxe de solidarité sur les billets d'avion encore appelée Taxe Chirac (TS) (440 M€). Cette taxe depuis 2020 ne sert plus seulement à financer des projets de développement, mais aussi pour financer des projets d'infrastructure de transport, essentiellement dans le ferroviaire. Au total, hors TVA, le transport aérien de passagers verse hors redevances aéroportuaires et hors TVA, est taxé à hauteur de 2,5 Milliards d'€. Le problème est qu'aucune de ces taxes n'est liée aux émissions de CO2 et donc aucune n'a un impact incitatif dans cette direction. Source : Réponse à la question parlementaire N° : 13090 De Mme Stéphanie Kerbarh à l'Assemblée Nationale sur la taxation du kérosène. <https://www.assemblee.nationale.fr/questions/detail/15/QE/13090>

biens (et éventuellement de services), ce qui n'a rien d'insurmontable, mais nécessite une étape préalable qui n'a pas besoin d'être franchie pour le transport aérien.

Quel champ d'application ?

Puisqu'au départ le TCA est un dispositif français, il peut être rattaché soit à la résidence en France soit à la nationalité française. Le dispositif le plus simple à mettre en place avec le moins d'évitements possible repose sur le critère de la nationalité. Toutefois sur le plan des principes, et en particulier au regard du principe d'égalité, sa seule limitation aux Français serait certainement sanctionnée par le Conseil Constitutionnel et il est donc important de parer à cette éventualité très probable en l'étendant à tous les domiciliés en France. Le dispositif concerne donc tous les nationaux français ou les étrangers résidants en France.

Le TCA s'applique aux vols intérieurs, aux vols France vers l'étranger, aux vols de l'étranger vers la France, et donc aux vols aller et retour de la France vers l'étranger pour les personnes concernées. Le dispositif ne s'applique pas aux vols entre deux villes à l'étranger, ce serait contraire aux principes du droit international. Le TCA et ses conditions d'application font l'objet d'une loi votée par le parlement et les compagnies aériennes desservant les aéroports français sont donc tenus de l'appliquer pour leurs clients de nationalité française ou résidant en France.

Comment cela marche-t-il ?

Toute personne de nationalité française ou résidente en France devient titulaire d'un compte carbone, à travers **une application que nous avons appelée Troc Carbone Avion – TCA – qui comptabilise le nombre de crédits carbone disponible de chaque individu**. Ce compte indique le nombre de tonnes qu'il peut émettre au cours de déplacements en avion sans devoir verser d'argent. À n'importe quel moment, on peut consulter son compte, acheter ou vendre des crédits carbone au prix tutélaire fixé une année donnée par la République Française en se connectant à cette application. Un crédit d'émission de CO₂ est distribué chaque année à chaque possesseur d'un compte pour des voyages en avion sans condition.

L'ADEME est chargée de rendre opérationnelle cette application. Son coût du développement est faible par rapport aux enjeux. Selon les chiffres officiels, le coût total de fonctionnement de l'application TOUSANTICOVID (développement, sensibilisation et fonctionnement) n'aurait pas dépassé 7 millions d'€. Par rapport à la somme d'argent distribuée la première année du TCA, cela représente un coût direct de fonctionnement du système de moins de 0,3 %.

Les voyages pour raison professionnelle doivent être concernés par le même type de mécanisme impliquant bien évidemment une possibilité d'achat de crédit carbone pour l'usage de l'avion au prix tutélaire du carbone de l'année courante, faute de quoi des possibilités d'évitement du TCA pourraient se mettre en place. Selon les données de la dernière enquête des passagers du transport aérien réalisée en 2015-2016 de la DGAC²⁷, les motifs professionnels représentent 28 % des voyages et de fait dans 21 % des cas, c'est l'entreprise qui a payé le billet d'avion.

L'argument comme quoi il serait préférable de procéder à l'échelle européenne a encore plus de force pour la partie voyages d'affaires. Autrement on réintroduit par la bande un impôt de production (Martin et Trannoy, 2019) sur la production en France, alors que la politique fiscale suivie depuis plusieurs années cherche à ramener le poids de cet impôt dans la moyenne européenne. La bonne solution serait un TCA au niveau de toute l'Union Européenne pour les voyages d'affaires avec le même prix tutélaire du carbone. À défaut, une autre solution serait de réserver le TCA aux voyages personnels

²⁷ <https://www.ecologie.gouv.fr/enquete-nationale-des-passagers-aeriens-enpa>

alors que les voyages professionnels seraient couverts par le marché ETS. Les entreprises devraient acheter des crédits carbone sur ce marché pour les voyages en avion de leurs collaborateurs. Le système serait efficace pourvu qu'une convergence soit assurée vers le même prix du carbone dans les deux dispositifs²⁸. Dans la suite, pour simplifier la présentation, nous supposons que le mécanisme TCA s'applique à tous les types de déplacements commerciaux en avion, quel que soit le motif.

Qu'est-ce qui change ?

a) Achat du billet

Concrètement, rien ne change pour l'achat du billet d'avion. Le crédit carbone est complètement dissocié de l'achat du billet parce que le fait générateur du mécanisme TCA est l'embarquement. Quelqu'un qui achète le billet et ne l'utilise pas ne pollue pas. Toutefois les compagnies aériennes et les plateformes d'achat de billets d'avion auront une forte incitation à mentionner à côté du prix le nombre de tonnes de CO₂²⁹ par passager qui sera émis lors du trajet. Le passager (pas l'acheteur du billet) indique les noms, prénoms, date et lieu de naissance ainsi que sa nationalité et son pays de résidence. Ces informations sont déjà quasiment toujours demandées pour un voyage en avion

Déclaration dans la plateforme TCA

L'étape supplémentaire est la déclaration du voyage dans la plateforme TCA. Le futur passager se voit alors notifier le bilan carbone de son voyage (s'il s'agit d'un vol aller et retour, il s'agit du bilan du vol aller et retour) en fonction des différentes caractéristiques comme la classe choisie, la distance, mais aussi le degré de décarbonation des vols de la compagnie choisie. Plus la classe est exclusive, plus l'équivalent carbone sera important. La plateforme TCA prendra en compte les actions vertueuses des compagnies en se basant sur une norme ISO par exemple. Les compagnies vertueuses se verront attribuer ainsi un équivalent carbone plus faible.

En cas de crédit carbone insuffisant sur son compte, l'individu devra en acheter au prix tutélaire. Une fois le quota carbone nécessaire pour le voyage réuni et après validation de l'utilisateur, TCA génère un QR code unique pour ce voyage et bloque les crédits carbone équivalents sur le compte du passager. Ils ne seront effectivement débités que lors du scan du QR code par la compagnie en charge du voyage.

b) Enregistrement du voyage

Durant l'enregistrement, qu'il soit fait en ligne ou à l'aéroport, le voyageur français devra présenter en plus des papiers justifiant de son identité, son QR code pour ce voyage -- s'il s'agit d'un voyage aller et retour la personne devra dès l'aller avoir acquitté le bilan carbone pour la totalité du voyage. Une version compagnie de l'application TCA permettra à cette dernière de scanner le QR code (en ligne ou avec un dispositif comme un smartphone ou une tablette à l'aéroport) et de vérifier qu'il correspond bien au voyage à effectuer et à la personne. Si la correspondance est bonne, la compagnie émet la carte d'embarquement et le compte carbone du voyageur est maintenant débité.

L'idéal dans la phase de croisière du dispositif serait de faire correspondre le plus fidèlement possible l'équivalent carbone au vol réellement effectué. Il faudrait alors prendre en compte le taux de remplissage de l'avion, le type de carburant, la vétusté des moteurs, etc. Pour le taux de remplissage, il n'est connu par la compagnie que peu de temps avant le vol, cela nous semble engendrer une marge d'incertitude inconfortable pour les passagers. Il est toutefois possible de progresser rapidement au

²⁸ Aujourd'hui ce sont les entreprises du secteur aérien qui sont couvertes par le système ETS. Dans cette hypothèse, il y aurait une bascule vers les entreprises qui utilisent les services du secteur aérien.

²⁹ Ici, nous faisons abstraction des effets des traînées de condensation qui sont encore mesurées d'une façon incertaine au niveau d'un trajet donné.

fur et à mesure de la mise en place du TCA pour faire en sorte que le coût carbone imputé au passager se rapproche le plus possible de la vraie empreinte carbone. Il ne faut pas en effet perdre de vue les incitations que peut présenter le TCA du côté des compagnies aériennes pour prendre des actions concrètes pour limiter les émissions par passager.

d) L'embarquement

À ce stade rien ne change. La compagnie aérienne est tenue de contrôler l'identité de la personne en partance pour n'importe quelle destination. Une personne possédant une carte d'embarquement qui aurait menti sur sa nationalité ou sa résidence s'expose évidemment à des problèmes importants, et d'abord à se voir refuser l'embarquement.

Quelles possibilités d'évitement ?

Nous nous concentrons sur les possibilités d'évitement sans fraude ou falsification de document. Dans un tel cas, les mêmes procédures et poursuites pénales sont envisageables qu'actuellement.

Pour une personne qui ne possède que la seule nationalité française, le système ne semble pas posséder de faille car les compagnies aériennes desservant la France seront tenues de respecter la loi Française. Le surcroît de travail lié au TCA est somme toute assez limité pour les compagnies puisqu'elles connaissent déjà la nationalité des voyageurs, il suffit de vérifier un QR code pour les Français. Si des compagnies sont détectées à favoriser la fraude au TCA (un voyage d'un Français sans comptabilisation du carbone sur son compte TCA) les autorités françaises pourraient procéder à des mesures de rétorsion. Pour les personnes de nationalité française, la seule parade possible est de s'embarquer d'un aéroport proche du territoire national et joignable en voiture, en car, ou en train où la loi française ne s'applique pas par définition. La liste est assez courte, Charleroi, Bruxelles, Luxembourg, Francfort, Turin, Barcelone et Londres. L'aéroport de Genève a un secteur France et donc la loi française peut s'y appliquer. Un accord entre la France et les pays concernés n'est pas à exclure.

Pour les binationaux ou plus qui n'habitent pas la France, il sera a priori tentant d'utiliser le passeport d'un autre pays pour éviter d'être touché par le TCA. Il serait même tentant pour eux de vendre leurs crédits carbone d'entrée de jeu en début d'année et après pour leur voyage en avion ne plus utiliser que leur passeport d'un pays étranger. Comme il n'existe pas de registre pour les bi-ou tri-nationaux, cela semble imparable. Un frein existe cependant pour le retour en France en provenance d'un pays pour lequel la France exige un visa. Se déclarer étranger, alors que vous avez la nationalité française, vous évite certes de payer des crédits carbone, mais en revanche vous devrez obtenir un visa, ce qui est long et coûteux. Il n'est pas évident que cela en vaille la peine dans la plupart des cas.

Pour les personnes de nationalité étrangère et habitant la France, les possibilités d'évitement seront plus importantes. Nous restons sur l'idée simple que les seules pièces que l'on peut montrer pour obtenir une carte d'embarquement sont une carte d'identité ou un passeport. Tout étranger résidant en France dispose d'un passeport étranger. Si une adresse en France figure sur ce passeport, alors cette personne ne peut échapper à l'inclusion dans l'application TCA. Dans le cas contraire – aucune adresse ne figure ou une adresse à l'étranger est présente sur le passeport étranger -- il n'est pas résident français au regard des pièces prouvant son identité au passage d'une frontière et donc il peut échapper au mécanisme TCA. De fait, des résidents étrangers en France échapperaient au mécanisme TCA. Vouloir combler ce vide entraînerait des complications en termes de croisement de fichiers. L'égalité en droit entraînera nécessairement dans le système d'information actuel une certaine inégalité de fait entre les étrangers résidant sur notre sol. Les effets de bord existent pour tout mécanisme.

Traitement des personnes mineures.

Deux optiques sont possibles s'agissant du traitement des mineurs.

L'optique unité de consommation

Globalement, les enfants sont supposés représentés par la statistique française et le traitement socio-fiscal du Gouvernement français comme une charge de consommation équivalente à la moitié d'un adulte. L'application de cette même règle conduirait à n'allouer aux jeunes de moins de 16 ans que la moitié du quota d'émissions d'un adulte.

L'optique siège d'avion.

La règle dans le transport aérien est que les enfants à partir de deux ans doivent occuper un siège³⁰. Passé ce seuil, ils émettent autant qu'un adulte, puisqu'ils occupent la même place dans l'avion. En conséquence, la proposition concurrente est que les enfants de moins de deux ans ne se voient pas attribuer de compte carbone, alors que les autres sont traités comme des adultes. C'est cette proposition qui a notre préférence.

Cas particuliers : Les Iliens, les étudiants français à l'étranger, circonstances exceptionnelles

A priori, tous les Français seraient placés sur un pied d'égalité et recevraient le même quota d'émissions. Néanmoins, il existe toujours des cas particuliers qui nécessitent d'aménager la règle commune.

Le premier cas évident est celui des ultra-marins, ou des personnes originaires d'outre-mer et vivant en métropole. Les émissions liées aux voyages en avion Outre-Mer/Métropole ou Outre-Mer/Outre-Mer représentent quand même plus de 10 % (DGAC/DTA/SDE, 2021) des émissions totales de carbone liées au transport aérien français. Néanmoins, il semble juste de leur accorder un traitement préférentiel et de leur allouer un quota d'émissions de l'ordre d'un voyage métropole/outre-mer. La situation des Corses, bien que moins aiguë, peut être aussi considérée sous ce rapport.

Le second cas qui mérite considération est celui des étudiants français étudiant à l'étranger. Là aussi, un quota plus élevé dépendant bien sûr de la localisation de leur lieu d'étude semble se justifier. La question d'un quota d'émissions supérieur pour les Français résidant à l'étranger peut également être évoquée.

Enfin, nous pensons aussi envisageable la distribution à titre gracieux de bon carbone pour des circonstances exceptionnelles. La vie est ainsi faite, qu'il est encore impossible de tout prévoir. Pour faire face à certains chocs de la vie, certains individus sous critères sociaux pourraient obtenir des bons carbone (pour un enterrement par exemple) alors que l'individu a déjà épuisé son crédit carbone. Ces bons ne seraient pas échangeables et nous pensons que les mairies sont la maille la plus efficace pour leur distribution. Ces bons à titre gracieux seraient soumis à un contrôle strict de la part des mairies et en nombre limité de sorte que chaque mairie devrait les utiliser à bon escient.

Quel prix tutélaire du Carbone ?

Comme l'explique bien le rapport Quinet II (2019), le prix tutélaire du carbone représente la valeur de l'action pour le climat. C'est le bénéfice attendu pour l'économie et la société d'une réduction des émissions de CO₂. Ce même rapport fixe une trajectoire linéaire d'évolution du prix du carbone entre le prix de 2008 établi à 56 € pour la tonne de carbone et la cible à 2030 à 250 € la tonne. Pour 2024,

³⁰ Les mineurs sont en général bien moins lourds que les personnes adultes et donc ont une empreinte plus faible. Cette caractéristique nous semble à prendre en compte de manière efficace.

cela nous donnerait un prix très proche de 200 € la tonne (196 € exactement) qui nous semble élevé pour l'introduction d'un mécanisme nouveau. Il vaut mieux un mécanisme accepté socialement à un prix moindre que le prix optimal, qu'un mécanisme avec le prix optimal et qui finalement suscite le rejet et aboutit à un abandon par les pouvoirs publics, comme malheureusement des exemples de la décennie précédente l'illustrent. Pour cette raison, nous proposons de commencer par un prix du carbone à 100 € la tonne, un chiffre rond facile à retenir, assez proche du prix moyen du marché ETS en 2023 (85 €)³¹, avec une trajectoire ascendante qui tienne compte des recommandations du rapport Quinet II, des prix du carbone utilisés dans d'autres secteurs de l'économie et enfin de l'efficacité constatée du dispositif en place. Notre trajectoire favorite serait d'arriver le plus vite possible à se mettre sur le sentier de croissance des prix du rapport Quinet II. Pour donner un ordre de grandeur, un prix de 100 € la tonne de CO₂ est équivalent à une taxe de 0,25 € le litre de kérosène à comparer avec un prix du litre du kérosène à 0,44 € le litre (Proost et Van der Loo, 2023). Soit un taux de taxe de 56 % qui commence à se comparer au taux de taxe sur l'essence en France qui est de 86 % pour la TICPE en décembre 2023³².

Une caractéristique importante qui différencie le mécanisme de troc carbone avion des marchés de permis d'émission (*cap and trade*) est la garantie du prix par la puissance publique. Le prix d'échange ne réagit pas ainsi au jour le jour à l'écart entre l'offre et la demande. La raison est à la fois technique et politique. Organiser un marché d'enchères à 69 millions de consommateurs est certes possible, les bourses mondiales montrent la voie, mais il peut être vulnérable à des tentatives de fraude ou simplement de tentatives spéculatives qui seraient certainement utilisées par les détracteurs du TCA pour mettre fin prématurément au dispositif. Comme le popularise une série bien connue, les pouvoirs publics, malgré leurs moyens, ont été impuissants à juguler une fraude à la TVA dans le dispositif du marché européen des quotas carbone. Toute intrusion informatique dans le système n'exercera aucune influence sur le prix. Le but est ici est de ne prendre aucun risque de ce côté-là, en tout cas pour les premières années du fonctionnement du mécanisme. Une seconde raison tient dans ce que l'on ne connaît pas parfaitement les réactions à l'introduction d'un tel mécanisme. Il est difficile de savoir a priori si 100 €/tonne est le prix d'équilibre du marché en prenant comme quota de départ les émissions actuelles. En retenant un prix tutélaire, on s'évite le scénario catastrophique d'un crash du marché le premier jour d'ouverture provoqué par la mise en vente des crédits carbone de tous ceux qui savent qu'ils ne vont pas prendre l'avion dans l'année qui vient. D'une manière plus générale, il peut y avoir des fluctuations de la demande et de l'offre qui provoquent des fluctuations importantes du prix et qui vont rendre tout de suite le système impopulaire. Donc sécuriser le prix nous semble être une bonne idée s'agissant d'une application de l'idée du marché d'émissions au grand public au moins dans un premier temps.

Quelle allocation de carbone pour l'année de départ ?

Il résulte de l'allocation à chaque Français ou résident en France de plus de 2 ans (69 millions³³) du même quota. Ici, nous prenons le volume de départ d'émissions l'année 2019, puisqu'on peut penser qu'en 2024 ou 2025, on sera revenu au même degré de fréquentation et donc à un volume d'émissions à peu près équivalent à cette année-là. La simple division de 24,9 millions de tonnes de CO₂ émises en

³¹ Prix du carbone également proche de celui qui était retenu dans la loi de finance de 2018 pour 2022, 86,20 € par tonne de CO₂.

³² Source FIPECO pour le prix du SP95.

³³ 69 millions de résidents sur le territoire français y compris les TOM au 1 janvier 2024 selon l'INSEE, auxquels s'ajoutent les 1,6 millions de Français habitant à l'étranger et inscrits dans un consulat auxquels ils faut soustraire les 1,4 million de jeunes Français de moins de deux ans.

par les personnes incluses dans le système TCA³⁴ par 69 millions donne un droit d'émission de 0,360 tonne de CO₂ par Français, arrondi à 0,4 tonne par souci pédagogique. Pour donner un ordre de grandeur, cela signifie qu'un Français pourra faire un aller-retour Paris-Marrakech avec son allocation carbone initiale. Si une personne désire faire un aller-retour à New York de Paris, qui représente une émission d'une tonne de carbone environ, il lui manquera par rapport à ses droits à polluer annuels 0,6 tonne et donc il devra déboursier 60 € en plus de son billet d'avion sur la plateforme TCA.

Quelle politique de report d'une année sur l'autre ?

Les crédits carbone sont strictement nominatifs et ne sont pas cessibles même à l'intérieur d'une famille. Ils ne sont pas reportables d'une année sur l'autre. Même s'il pourrait être souhaitable sur le plan de l'équité intergénérationnelle de les rendre reportables, il est imprudent de le faire au moins au démarrage du mécanisme en raison d'un risque spéculatif avec la perspective de prix très croissants. Cela pourrait conduire à un blocage du système où l'offre deviendrait inférieure à la demande et où la tutelle publique serait forcée d'émettre des crédits carbone en plus de l'émission initiale. Il est envisageable qu'après plusieurs années de fonctionnement, il soit possible d'introduire prudemment le fait que les crédits carbone soient reportables pendant une période limitée de quelques années.

Est-ce qu'on peut acheter et vendre à tout moment ?

Concrètement l'État ne peut garantir le prix d'achat et être le contrepartiste qui répond présent à la fois à toute demande d'achat et toute demande de vente. Vu que le prix d'achat va être croissant (en termes réels) d'une année sur l'autre alors que la quantité distribuée de crédits carbone va être décroissante, la demande de crédits carbone devrait être inférieure à l'offre de crédits sur l'ensemble de l'année. Concrètement, l'État (l'agence étatique) répond présent à toute demande d'achat, mais pas à toute demande de vente. Chaque jour, l'agence vend au prix tutélaire du carbone dans l'ordre d'arrivée des demandes et rachète les crédits dans l'ordre d'arrivée des offres dans la mesure où ils ne dépassent pas en nombre les crédits vendus dans la journée. Ainsi l'agence n'aura pas distribué à la fin de l'année plus de crédits qu'initialement. Une offre non satisfaite la journée précédente sera prioritaire la journée suivante, l'ordre d'arrivée étant toujours respecté aussi bien pour l'offre que pour la demande.

Donc, oui si on peut acheter et vendre à tout moment, tout désir d'achat sera satisfait dans l'immédiat, en revanche, tout désir de vente ne le sera sans doute pas. Le temps d'attente pour voir son désir de vente satisfait sera sans doute croissant au fur et à mesure que l'année s'écoule. Et au bout du compte, une année donnée, une fraction des crédits carbone n'aura ni été utilisée ni vendue. Même si cela crée un sentiment de frustration compréhensible chez les vendeurs, cette fraction qui mesurera l'excédent de l'offre sur la demande témoignera du succès du mécanisme pour réduire les émissions de carbone. Nous procédons à une estimation de la fraction des offres qui ne pourront pas être servies par la suite.

Aspects juridiques

Le TCA est donc une sorte de système de bonus-malus appliqué à l'achat de billets d'avion lié à la possession de la nationalité française ou de la résidence sur le sol français et de ce fait il ne semble pas contraire aux principes constitutionnels.

Par ailleurs, il ne semble pas que le TCA contrevient aux engagements internationaux de la France, signataire de la Convention de Chicago en 1944 concernant la non-taxation du kérosène sur les vols

³⁴ Il s'agit des émissions émises a priori par les résidents en France pour les vols commerciaux (source DGAC, les émissions gazeuses...opt citée) auxquelles s'ajoutent les émissions des 1,6 millions de Français de l'étranger en supposant deux fois plus d'émissions de leur part (niveau de vie est plus élevé et éloignement de la métropole).

internationaux, ni d'ailleurs à la directive dite « accises » (2003/96/CE) qui impose aux États membres l'exonération de taxes sur les carburants utilisés pour la navigation aérienne à l'exception de l'aviation de tourisme privée³⁵. Ainsi compte tenu des contraintes juridiques internationales, les taxes et assimilés ne peuvent porter que sur les passagers transportés et non sur le carburant comme pour les transports terrestres.

Il faut également noter que le TCA pour la partie voyages personnels ne peut apparaître que comme un simple mécanisme de transferts interindividuels qui n'entravent pas la concurrence à l'intérieur de l'Union Européenne du carbone en vigueur. À priori la France serait libre de l'instituer ou pas.

Conséquences attendues

Quelle réduction de l'émission de CO2 du transport aérien la première année ?

Ce paragraphe est écrit dans l'hypothèse d'un environnement stationnaire et en particulier d'une très faible croissance démographique et économique. S'agissant d'une augmentation structurelle de la demande pour le transport aérien pour la période post-covid, on reste encore dans l'expectative, puisque la fréquentation des aéroports français en 2022 n'a pas encore tout à fait retrouvé son niveau de 2019.

Pour tous les passagers Français, le coût des vols va donc augmenter une fois qu'ils auront dépassé leur quota d'émission. Nous supposons d'abord que les compagnies aériennes n'adaptent pas leur politique tarifaire en baissant d'autant le prix du billet.

Il faut d'abord comprendre si cette augmentation du coût est à peu près uniforme, quelle que soit la longueur du voyage, en prenant quelques exemples. Selon le tableau suivant, un voyage entre Paris et New York est 9 fois plus long qu'un voyage entre Paris et Marseille. Les émissions ne sont multipliées que par un facteur 6. L'augmentation n'est pas linéaire parce que la phase de décollage qui représente une très grosse dépense de carburant est incompressible et dépend peu de la longueur du voyage. De même Paris-Athènes est trois fois plus long que Paris-Marseille mais n'émet que deux fois plus.

Pour les prix nous nous sommes référés à des prix pour notre compagnie nationale. Ce sont des données très parcellaires, mais en tout cas, il semble que les prix tournent autour de 10 centimes du km avec un prix plus élevé pour les trajets court-courriers que pour les longs courriers. Au total, il semble que deux forces se compensent, une émission carbone plus forte pour les trajets courts, en revanche des prix plus élevés au kilomètre, pour aboutir à un résultat autour d'une augmentation du prix du billet d'avion autour de 10 %.

Tableau : Quelle augmentation de prix du coût du voyage en fonction de la destination ?³⁶

Longueur du trajet	Exemples	Distance en km Aller Retour	Émissions CO2 (tonne)	Prix Billet aller-retour sans TCA	Prix Billet avec TCA	% d'augmentation
Court courrier	Paris Marseille	1 320	0,176	140	157,6	12,5 %

³⁵ Source : Réponse à la question parlementaire N° : 13090 op cit.

³⁶ Ces exemples ne sont donnés qu'à titre indicatif pour offrir un premier repérage. Le pourcentage d'augmentation pourrait être beaucoup plus élevé pour les compagnies low cost puisque le prix de départ est plus bas. Or ces compagnies sont fréquentées d'une manière préférentielle par des personnes modestes. Cette note n'a pas pour vocation de constituer une véritable étude technique du TCA, mais de brosser à grands traits ses principales caractéristiques.

Moyen courrier	Paris Athènes	4 280	0,388	436	475	8,9 %
Long courrier	Paris New York	11 600	1	900	1000	11 %

Source : Pour les colonnes 3 et 4, <https://eco-calculateur.aviation-civile.gouv.fr/>. Pour les colonnes 5-6,7 calcul des auteurs pour un TCA à 100 € la tonne.

En reprenant dans la littérature la valeur de l'élasticité prix de -0,6 (Smyth et Pearce, 2008)³⁷ de la demande de transport aérien émanant de France (l'Aéroport de Bâle Mulhouse n'appliquerait pas la législation sur les billets achetés par des citoyens suisses), et en l'appliquant à cette augmentation d'un dixième du coût de l'ensemble des trajets, on aboutit à une baisse du trafic de 6 % et donc grosso modo, les émissions passeraient de 23,7 millions de tonnes à 22,3 millions de tonne la première année d'application. Le mécanisme permettrait donc d'éviter l'émission de 1,4 million de tonnes de CO2 sa première année de fonctionnement. Le coût d'abattement direct du mécanisme TCA sera de l'ordre de 10€ la tonne de carbone, en rapportant le coût administratif de l'application pour l'agence étatique et le coût de mise en place du dispositif pour l'ensemble des compagnies aériennes concernées.

L'ordre de grandeur est plausible si les petits usagers de l'avion intègrent bien dans leur décision d'utiliser l'avion le coût d'opportunité lié au fait de perdre la possibilité de monétiser leurs crédits carbone. Si ces usagers ou simplement une partie d'entre eux ne perçoivent pas ce coût d'opportunité, alors l'ordre de grandeur d'une réaction d'une baisse de 6 % de la demande est sans doute surestimé. En effet, en l'espèce, les petits usagers de l'avion ne se sentiront pas vraiment touchés au départ par la hausse du coût du voyage, car ils pourront puiser dans leur compte carbone. Comme les petits usagers se confondent plutôt avec les personnes modestes, l'élasticité prix de la demande de transport en avion qui compterait serait plutôt celle dans le haut de la distribution des revenus, pour laquelle nous manquons de travaux. Il est fort possible qu'elle soit inférieure à l'élasticité macro de -0,6 %. Un fait avéré est le caractère plus élastique de la classe économique que de la classe affaires. L'écart serait justement de -0,6 (Brons, Pels, Nijkamp et Rietveld, 2001). Il existe donc une marge d'incertitude sur l'ampleur de la baisse de la demande, qui ne pourra être levée que par l'expérimentation elle-même.

Quelles réactions en retour des compagnies aériennes ?

Le chiffre de baisse du trafic et donc d'émission donné à titre indicatif ne constitue qu'une borne supérieure, car face à cette augmentation du coût pour les passagers, on peut anticiper qu'au moins certaines compagnies procéderont à une baisse de prix partiellement compensatrice de la hausse du coût pour le client français. Elles seraient aussi enclines à rechercher d'autres relais de croissance avec une optimisation du remplissage des avions ou encore une « expérience client » différente.

Quels reports sur d'autres moyens de transport ?

Un substitut partiel au transport aérien au moins sur les transports à l'intérieur de la métropole (hormis la Corse) est le voyage ferroviaire. Ces voyages intramétropole ne représentent toutefois que 12 % du trafic passager et cette part est en baisse. Le report modal sur le transport ferroviaire se heurte toutefois à une politique tarifaire (et peut-être une structure des coûts) onéreuse qui est aussi un élément de l'équation.

Quels effets redistributifs ?

Au-delà de l'hétérogénéité des situations individuelles qui est importante, dans une catégorie donnée, on trouve des abstinentes de l'aérien et des gros consommateurs, les perdants sont les habitants de la

³⁷ Nous choisissons la valeur de l'élasticité dite « pan-national-level » qui est la réaction de la demande si le prix de toutes les routes nationales et internationales augmente du même facteur.

région parisienne par rapport à la province, les personnes qui ont fait des études supérieures (Demoli et Subtil, 2019), car un gradient éducatif s'ajoute au gradient monétaire, les cadres et professions libérales, à condition que le TCA soit étendu d'une façon ou d'une autre aux déplacements pour motif professionnel, car ceux-ci représentaient près de la moitié des déplacements en avion pour cette CSP en 2008³⁸. Les agriculteurs, les employés et les ouvriers, et les séniors de plus de 70 ans seraient gagnants, car leur usage de l'avion décroît fortement au-delà de cet âge. Grosso modo, le TCA va entraîner un transfert des individus des trois déciles supérieurs et plus particulièrement du dernier décile vers ceux des sept premiers déciles. En effet, les 10 % les plus aisés concentrent 60 % des déplacements de longue distance. On peut estimer un ordre de grandeur du gain de pouvoir d'achat que va représenter la vente de crédits carbone pour les ménages les plus modestes. Le niveau de vie moyen (Revenu disponible par UC) est de 8 800 € dans le premier décile en 2021 selon l'INSEE³⁹. Pour eux, la vente de leurs crédits carbone va leur rapporter 40 € par personne, soit un gain de 0,5 % de pouvoir d'achat. Même si ce n'est pas massif, ce n'est pas négligeable pour une catégorie qui a certainement vu son pouvoir d'achat baisser depuis la reprise de l'inflation. Pour aller au-delà et faire une véritable étude des effets redistributifs dans toutes les dimensions, il nous faudrait disposer de données qui ventilent la dépense de transport aérien dans toutes les dimensions pertinentes. Ces données sont manquantes aujourd'hui et cela constitue un handicap sérieux qu'il serait bien de lever⁴⁰.

Valeur des échanges la première année et estimation de l'offre excédentaire.

Au total, comme 64 % des Français selon une enquête BVA⁴¹ n'avaient pas pris l'avion au cours des 12 derniers mois précédant l'enquête, le montant des échanges de carbone sur la plateforme dédiée serait au minimum de 64 % fois 2,4 Milliards d'€ ce qui représente au bas mot 1,5 Milliard d'€, car il faudrait aussi comptabiliser en plus tous les usagers prenant des vols dans l'année émettant au total moins que 0,4 tonne de carbone. En revanche, il faut décompter des échanges l'offre excédentaire, celle qui ne trouvera pas d'acheteur. Nous avons évalué celle-ci à 1,4 million de tonnes de CO₂, soit à la valeur tutélaire initiale, 140 millions d'€. Au total nous retenons comme valeur centrale une estimation d'une valeur d'échanges effectifs d'1,5 Milliard d'€. En rapportant d'ailleurs ces deux chiffres, nous obtenons qu'en moyenne une offre sur 10 ne trouve pas preneur. C'est la mesure relative de l'offre excédentaire par rapport au total de l'offre.

Non-recours au TCA et possibilité d'une demande excédentaire

Tous les raisonnements précédents reposent sur l'hypothèse d'une parfaite rationalité économique des Français. Si une possibilité de gain financier se présente à très faible coût (un clic), ils la saisissent immédiatement. Et d'ailleurs, une parfaite rationalité conduirait tous les Français à vendre immédiatement leur quota carbone, puisqu'il y a une petite incertitude qu'ils puissent effectivement le faire dans l'année. Dans ce cas, sous l'hypothèse d'une baisse de la demande toujours estimée à 1,4 million de tonnes de CO₂, 24 millions de tonnes auraient été vendues et 22,6 millions achetées et le marché serait au maximum de sa liquidité potentielle.

³⁸ Il serait évidemment nécessaire d'actualiser ces chiffres, mais la dernière enquête « Mobilité des personnes » de 2018-2019 n'a semble-t-il pas été exploitée concernant l'usage du transport aérien, alors même que pour les voyages de longue distance, (plus de 900 km) les voyages en avion ont presque doublé entre 2008 et 2019, Source : La mobilité locale et longue distance des Français. SDES. Ministère de la Transition Ecologique.

³⁹ Insee, enquête Revenus fiscaux et sociaux 2021.

⁴⁰ Les données de l'enquête Budget des Familles 2017 auraient pu être utiles pour se faire une idée des dépenses de transport aérien par décile. Malheureusement, le faible taux de réponse des questions portant sur ce type de dépense rend les données inexploitable.

⁴¹ BVA 2019 : <https://www.bva-x-sight.com/sondages/limpact-rechauffement-climatique-habitudes-de-voyage/>.

L'hypothèse d'un non-recours de la part d'une fraction de la population est évidemment possible, citons sans chercher à être exhaustif, les personnes âgées ou celles souffrant d'un handicap ou tout simplement les individus non connectés ou non informés. Pour la puissance publique, cela signifie que des droits d'émettre auraient été distribués et non consommés. En chiffrant à au moins à 10% ce non-recours, cela signifie qu'en face d'une demande de 22,6 millions de tonnes, on n'aurait plus que 21,6 millions de tonnes du côté de l'offre, avec cette fois-ci une demande excédentaire de 1 million de tonnes, en raison d'un gel chez les particuliers de 2,4 millions de tonnes. Redisons que ce reliquat ne sert à rien puisqu'il ne peut pas être reporté l'année suivante. Nous proposons dans ce cas que la demande excédentaire soit servie pour ne pas induire d'inquiétude sur la fiabilité du mécanisme dans l'esprit des usagers. Cela ne change pas l'estimation de la réduction de la demande et donc des quotas d'émissions d'une année sur l'année.

Comment est fixé le montant total des émissions allouées une année donnée postérieure à l'année initiale ?

Le niveau des émissions autorisées une année t est égal au niveau des émissions constatées l'année précédente. Celui-ci est égal au niveau d'émission autorisé en début d'année moins l'écart entre l'offre et la demande de crédits carbone sur le marché de troc – l'offre excédentaire – constatée en fin d'année. Si l'estimation de 6 % de baisse de la demande se révélait juste, cette offre excédentaire représenterait justement 6 % du montant initial d'émissions. Comme le prix tutélaire de la tonne de carbone augmente (en euros constants) au rythme prévu par le rapport QUINET II – d'abord pour rattraper d'ici 2030 le niveau de 250 € la tonne puis en suivant l'évolution préconisé dans ce rapport – l'offre doit être supérieure à la demande chaque année et ainsi le niveau des émissions autorisées baisse d'année en année.

Si nous avons choisi le nom de troc carbone et non de marché carbone, c'est bien parce que le mécanisme imaginé ne ressemble pas tout à fait à un mécanisme de type *cap and trade*. Le prix ne change que tous les ans, et l'ordre de grandeur de la diminution des quotas est déterminé par la réaction de la demande au changement de prix, qui est lui-même déduit de la trajectoire pour atteindre la cible de réduction des émissions de carbone dans le rapport Quinet II. Le TCA ressemble à un système linéaire⁴² de bonus-malus en fonction de l'émission de carbone, où le prix du carbone serait réévalué chaque année, avec la réserve importante que dans le système de bonus-malus automobile les non-acheteurs ne reçoivent pas de bonus.

L'enchaînement des séquences annuelles de prix tutélaire du carbone, du total des émissions allouées et de la réduction progressive de celles-ci est illustrée par la Figure 1. Y sont accolés deux graphiques, le graphique de gauche offre une représentation stylisée de l'augmentation du prix du carbone selon le rapport Quinet II. Le graphique de droite représente l'évolution du déséquilibre en quantité qu'implique le mécanisme du TCA. A partir d'une situation d'équilibre donnée par le point E entre l'offre et la demande de trajet aérien représentée dans l'espace des émissions de CO₂ émises, l'introduction de prix tutélaire du carbone croissants chaque année, la suite, P_1, P_2, P_3 , introduit une réduction progressive des émissions par rapport aux émissions initiales donnée par Q_0 . Chaque année le quota distribué et le prix du carbone bougent. Le prix du carbone suit une trajectoire exogène, en revanche la rétraction du quota distribué d'année en année est endogène. Elle dépend une année donnée d'une part de la croissance du prix du carbone et d'autre part de l'élasticité de la demande. L'offre de transport aérien est supposée fixe dans la figure, mais en réalité face à la compression de la

⁴² En fait il y a une sorte de continuum de mécanismes entre la taxe carbone et le marché d'émissions (Stavins 2022) et le TCA se trouve sur ce continuum.

demande, les compagnies aériennes vont sans doute réduire leur flotte en privilégiant des avions permettant d'émettre le moins de CO2 par passager transporté.

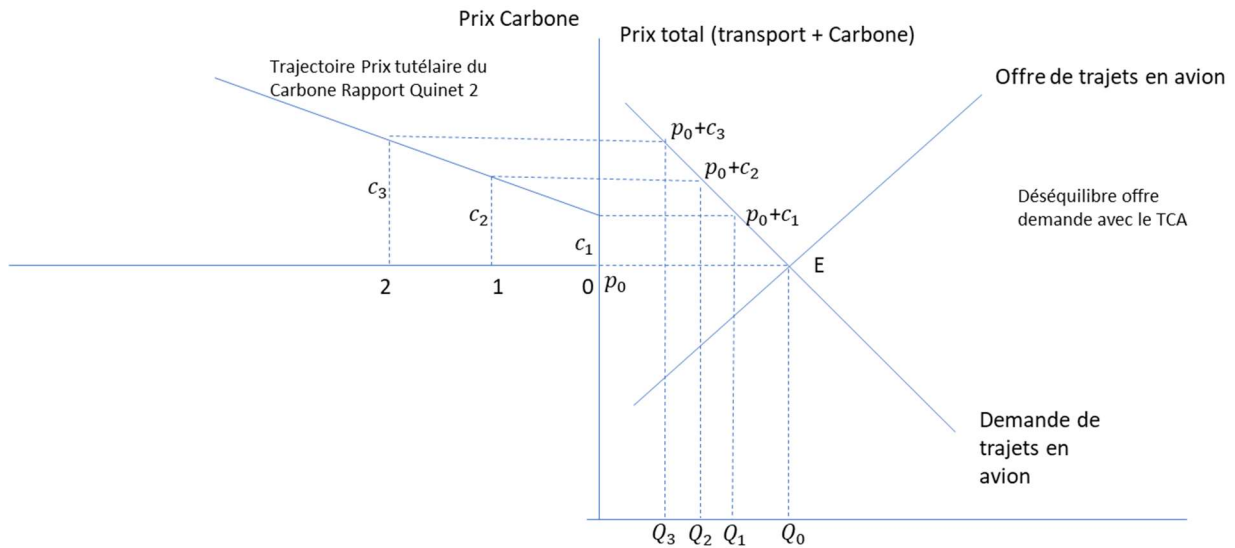


Figure 1 : L'évolution des quotas de CO2 distribués en relation avec l'évolution des prix tutélaire du carbone du Rapport Quinet II

Financement de la R&D du secteur aérien

Il est envisageable de proposer une variante du mécanisme où une partie des ventes de crédits carbone ne revienne pas directement au vendeur, mais est prélevé par l'État pour financer la R&D du secteur aéronautique. Il y a une certaine logique à ce que les premiers financeurs de la recherche pour disposer d'un transport aérien moins émetteur soient les gros usagers de l'avion. Ainsi dans cette variante, le prix d'achat serait différent du prix de vente. La vente d'une tonne de carbone serait taxée par l'État à un certain taux pour alimenter un fonds de recherche dans la décarbonation du transport aérien. Avec un volume d'échanges d'1,5 milliard d'€ sur le marché du carbone avion, une contribution d'un tiers représenterait 500 millions d'€ supplémentaire pour la recherche aéronautique française en vue de sa décarbonation. Cela représenterait un gros booster pour cette industrie.

Finances publiques

A priori, la mise en œuvre pourrait se révéler bénéficiaire ou déficitaire pour les finances publiques. Du côté des coûts, il faut escompter que structurellement la vente de quotas dépassera l'achat de quotas. Comme l'État est l'unique contrepartiste, il déboursa plus qu'il encaissera. Nous avons estimé cette possible différence à 1,4 million de tonnes de CO2 soit un coût de 140 millions d'€ la première année. Toutefois il faut compter avec le fait que certaines personnes, âgées pour la plupart, n'activeront pas leur compte et donc ne demanderont pas la liquidation de leur quota avant la fin de l'année. À titre d'exemple, 2,5 millions de Français sont en perte d'autonomie et cela pourrait déjà représenter déjà 100 millions d'€ d'économie pour le budget de l'État. On peut également imaginer que dans le cas où le système soit légèrement déficitaire, ce déficit soit soustrait de la somme qui

reviendrait aux acteurs de la recherche dans le domaine aéronautique, de façon que l'opération soit neutre pour les finances publiques.

Et la suite ?

Le TCA doit apparaître comme un embryon d'un marché d'émissions carbone lié à un compte carbone au niveau des particuliers portant sur tous leurs achats de biens et services, avec une étape suivante toute naturelle qui intégrerait tous les modes de transport⁴³. Le transport aérien constitue un candidat tout désigné pour mener l'expérience, car, au-delà du caractère symbolique, les billets d'avion sont nominatifs, les émissions de CO2 sont très concentrées sur le dernier décile et donc la question sociale ne vient pas contrer la question environnementale. Les deux causes pointent dans la même direction. Le TCA doit être vu comme un premier pas à visée pédagogique permettant de faire comprendre à l'ensemble de la population à la fois le mécanisme d'un marché de permis et la comptabilité d'un mécanisme de tarification du carbone qui soit à la fois équitable, transparent et réducteur d'inégalité.

Encore une fois, nous pensons que ce dispositif peut être lancé par un pays de taille moyenne comme la France bien enserrée dans le réseau international de mobilité. La France en mettant en place seule ce type de dispositif jouerait un rôle de pionnière. Elle assumerait son rôle de veille de la conscience universelle dont elle se pare depuis la grande révolution de 1789 et qui l'a inspirée au moment de la COP 21 de Paris.

Articulation TCA et EU-ETS

À court terme, si la France décidait de se lancer seule dans l'expérience du TCA, il faudrait penser à « un tuilage » avec l'incorporation actuelle du système aérien dans l'EU-ETS. À cet égard, on peut penser à deux dispositifs⁴⁴.

D'abord, si l'on ne change pas le mécanisme actuel de l'inclusion de l'aérien dans l'ETS, le TCA à l'échelle française n'aura aucun impact sur l'ensemble des émissions de carbone à l'intérieur du ciel européen. Les compagnies aériennes transportant des passagers entre la France et le reste de l'UE verraient leur quota d'émissions diminuer, mais comme le quota total resterait inchangé, il en résulterait plus de quotas pour les compagnies n'empruntant pas les routes entre la France et le reste de l'Europe. Du coup, pour éviter un tel effet pervers, le quota global que l'Europe alloue à l'ensemble des compagnies aériennes devrait être diminué d'un montant équivalent aux diminutions d'émissions dues au fonctionnement du TCA en France.

Ensuite, on pourrait penser le TCA comme un complément de l'ETS pour prendre en compte les effets des traînées de condensation qui doublent grosso modo l'effet de l'utilisation de l'avion en termes d'effet de serre. Selon les meilleures études, elles contribueraient à multiplier par un facteur d'1,7 l'effet du réchauffement climatique d'une tonne de CO2 (Lee, *et al.*, 2021). En conséquence, le prix du CO2 devrait être multiplié par 1,7. Il serait possible de rendre compatible les deux mécanismes, en

⁴³ Pour une étude concernant l'application au transport routier du même type de dispositif, se reporter à De Borger, Glazer et Proost (2022)

Voir Ranson et Stavins 2015 sur la question de l'articulation entre les marchés du carbone.

prenant un prix de référence du CO2 de 170 € pour l'aérien pour le mécanisme TCA au lieu des 100 € retenus dans cette présentation.

Pour les voyages aériens intra-EU, on retiendrait comme valeur du carbone le prix de 170 € moins le prix sur le marché ETS. Sur le premier semestre 2023, cela donnerait $170 \text{ €} - 85 \text{ €} = 85 \text{ €}$. Pour les voyages aériens extra-EU, on retiendrait 170 € puisqu'ils ne sont pas couverts par l'ETS. Voilà pour les prix d'achat pour un particulier. Pour le prix de vente, on retient un prix équivalent à la moyenne des deux prix pondérés par les parts du trafic européen/non européen.

À moyen terme, il reste une question pendante qui est de savoir si un système de pilotage de la demande via le mécanisme du TCA n'est pas plus efficace (en plus de ses propriétés redistributives) qu'un pilotage de l'offre via l'ETS. La question mérite au moins d'être posée.

La mise en place du TCA n'aurait de sens à terme que si cela entraînait d'autres pays à la suivre, d'abord en Europe, car nous pensons que c'est la bonne échelle pour faire fonctionner le TCA, puis sur d'autres continents en espérant un phénomène d'entraînement. C'est le sens de cette proposition dont l'objectif principal est d'induire un double effet de levier : d'abord sur la manière de traiter le transport aérien dans la politique climatique européenne ; et ensuite sur l'opinion française quant à l'acclimatation d'un mécanisme permettant de limiter la demande de biens et services en fonction de leur contribution au réchauffement climatique.

Références

Brons, Martijn; Eric Pels; Peter Nijkamp et Piet Rietveld (2001). "Price Elasticities of Demand for Passenger Air Travel," <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/85990/1/01047.pdf>.

BVA (2019). "L'impact Du Réchauffement Climatique Sur Les Habitudes De Voyage," <https://www.bva-x sight.com/sondages/limpact-rechauffement-climatique-habitudes-de-voyage/>.

Caire, Jose; Maeva Tholance; Yann Tremeac; Stephane Barbusse; Aurelien Bigo; Bertrand-Olivier Ducreux; Marc Cottignies; Romain Dewez; Gilles Aymoz et Antoine Pugliese (2022). "Elaboration De Scénarios De Transition Écologique Du Secteur Aérien," <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/5815-elaboration-de-scenarios-de-transition-ecologique-du-secteur-aerien.html>.

Calame, Pierre (2020). "L'allocation À Tous De Quotas Négociables Pour Conduire La Transition Énergétique," <https://comptecarbone.cc/wp-content/uploads/2022/06/CompteCarbone.pdf>.

CITEPA (2023). "Émissions De Gaz À Effet De Serre En France : Estimations Provisoires Sur Les Trois Premiers Trimestres 2023 Avec Le Baromètre Des Émissions Mensuelles Du Citepa," https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/barometre-mensuel/CP-Citepa_Barometre_Emissions_GES_dec2023.pdf.

Commission Européenne (2022). "The Functioning of the European Carbon Market in 2021," COM(2022) 516 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2022:516:FIN#document1>.

De Borger, Bruno; Amihai Glazer et Stef Proost (2022). "Strategic Behavior under Tradeable Driving Permits and Congestion Tolls: A Political Economy Model." *Journal of Urban Economics*, 128, 103396.

Dechezleprêtre, Antoine; Adrien Fabre; Tobias Kruse; Bluebery Planterose; Ana Sanchez Chico et Stefanie Stantcheva (2022). "Fighting Climate Change: International Attitudes toward Climate Policies,"

Dechezleprêtre, Antoine; Adrien Fabre et Stefanie Stantcheva (2022). "Les Français Et Les Politiques Climatiques." Notes du conseil d'analyse économique, 73(4), 1-12.

Delbecq, S.; J. Fontane; N. Gourdain; T. Planès et F. Simatos (2023). "Sustainable Aviation in the Context of the Paris Agreement: A Review of Prospective Scenarios and Their Technological Mitigation Levers." *Progress in Aerospace Sciences*, 141, 100920.

Demoli, Yoann et Jeanne Subtil (2019). "Boarding Classes. Mesurer La Démocratisation Du Transport Aérien En France (1974-2008)." *Sociologie*, 10(2), 131-51.

DGAC/DTA/SDE (2021). "Les Émissions Gazeuses Liées Au Trafic Aérien En France En 2021," https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Bilan_Emissions_Gazeuses_2021_trafic_aerien_france.pdf.

Douenne, Thomas et Adrien Fabre (2022). "Yellow Vests, Pessimistic Beliefs, and Carbon Tax Aversion." *American Economic Journal: Economic Policy*, 14(1), 81-110.

Fageda, Xavier et Jordi J. Teixidó (2022). "Pricing Carbon in the Aviation Sector: Evidence from the European Emissions Trading System." *Journal of Environmental Economics and Management*, 111, 102591.

Hopkinson, Lisa et Sally Cairns (2021). "Elite Status: Global Inequalities in Flying."

Lee, D. S.; D. W. Fahey; A. Skowron; M. R. Allen; U. Burkhardt; Q. Chen; S. J. Doherty; S. Freeman; P. M. Forster; J. Fuglestvedt; A. Gettelman; R. R. De León; L. L. Lim; M. T. Lund; R. J. Millar; B. Owen; J. E. Penner; G. Pitari; M. J. Prather; R. Sausen et L. J. Wilcox (2021). "The Contribution of Global Aviation to Anthropogenic Climate Forcing for 2000 to 2018." *Atmospheric Environment*, 244, 117834.

Martin, Philippe et Alain Trannoy (2019). "Les Impôts Sur (Ou Contre) La Production." Notes du conseil d'analyse économique, 53(5), 1-12.

Peltier, Jérémie (2022). "Les Français, Les Voyages Et L'avion ", <https://www.jean-jaures.org/publication/les-francais-les-voyages-et-lavion/>.

Pottier, Antonin (2022). "Carte Carbone : Les Arguments Pour En Débattre." *Revue d'économie politique*, 132(5), 723-50.

Proost, Stef (2024). "Looking for Winning Policies to Address the Climate Issue in Eu-Aviation." *Journal of Air Transport Management*, 115, 102534.

Proost, Stef et Saskia Van der Loo (2023). "The Corsia Climate Agreement on International Air Transport as a Game." Available at SSRN 4719024.

Quinet, Alain; Julien Bueb; Boris Le Hir; Bérengère Mesqui; Aude Pommeret et Matthieu Combaud (2019). "La Valeur De L'action Pour Le Climat." *France stratégie*, 3624-48.

Smyth, Mark et Brian Pearce (2008). "Air Travel Demand," *Economics Briefing*, (9), <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-travel-demand/>.

Ranson Matthew and Stavins, Robert N "Linkage of Greenhouse Gas Emissions Trading Systems: Learning from Experience." *Climate Policy*, February 4, 2015, pp. 284-300.

- Stavins, Robert N. "The Relative Merits of Carbon Pricing Instruments: Taxes versus Trading." *Review of Environmental Economics and Policy* 16, no. 1 (2022): 1-21.
- Storer, Luke N.; Paul D. Williams et Manoj M. Joshi (2017). "Global Response of Clear-Air Turbulence to Climate Change." *Geophysical Research Letters*, 44(19), 9976-84.
- Tang, Yun-En; Ru Fan; Ang-Zu Cai; Le-Yi Wang; Rui-Min Lin; Xiang-Zhou Meng; Ling Chen et Ru Guo (2023). "Rethinking Personal Carbon Trading (Pct) Mechanism: A Comprehensive Review." *Journal of Environmental Management*, 344, 118478.
- Tchen, Vincent (2021). "La Constitutionnalisation Du Droit Des Étrangers : Essai De Synthèse," C. Constitutionnel, <https://www.conseil-constitutionnel.fr/publications/titre-vii/la-constitutionnalisation-du-droit-des-etrangers-essai-de-synthese>.
- Uusitalo, V.; A. Huttunen; E. Kareinen; T. von Wright; M. Valjakka; A. Pitkänen et J. Levänen (2022). "Using Personal Carbon Trading to Reduce Mobility Emissions: A Pilot in the Finnish City of Lahti." *Transport Policy*, 126, 177-87.
- Williams, Paul D. (2016). "Transatlantic Flight Times and Climate Change." *Environmental Research Letters*, 11(2), 024008.