

ANNEXE 3

Les scénarios.

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

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

Quelques conseils pour aborder cette annexe : séparer votre groupe de travail en deux. La moitié travaillera sur la partie sur les scénarios de Sup'Aéro (parties 9.2 et 9.3). L'autre moitié travaillera sur les scénarios du Shift Project (parties 7.2.3 et 7.2.4). Quand vous aurez terminé, essayer de comparer les résultats et conclusions principales.

9.2 Exemples de scénarios durables

Dans cette section, différents scénarios technologiques de transition du secteur aérien sont étudiés et des analyses de sensibilité sur plusieurs variables sont menées. L'étude se focalise ici sur les émissions de CO₂, les effets non-CO₂ étant traités dans la section suivante. L'analyse se base sur la méthodologie présentée dans le chapitre 8 et sur l'utilisation de l'outil CAST.

9.2.1 Caractérisation des scénarios technologiques

L'objectif de cette section est d'illustrer différents scénarios durables pour l'aviation, qui ont été traités plus en détail dans Planès *et al.*¹⁴¹. Ces scénarios technologiques sont décrits par les quatre caractéristiques suivantes :

1. efficacité énergétique des avions ;
2. taux de remplissage ;
3. opérations en vol et au sol ;
4. taux de décarbonation de la flotte.

a. L'outil CAST est disponible à l'adresse suivante : <https://cast.isae-superaero.fr/>.

On notera en particulier que le taux de croissance du trafic ne fait pas partie de la description d'un scénario. Ce taux sera calculé pour respecter les budgets carbone pour l'aviation (à +1,5 et +2 °C) définis dans la section 8.3, en considérant différentes allocations pour l'aviation. Une méthode alternative sera, à partir d'un taux de croissance du trafic fixé, de calculer la part du budget carbone mondial consommée. Concernant l'impact de l'épidémie Covid-19, on suppose que le trafic aérien retrouvera son niveau de 2019 en 2024.

Les trois premiers leviers concernent l'amélioration de l'efficacité énergétique globale afin de consommer moins de carburant par passager-kilomètre. D'une part, cela peut se faire au travers des moyens détaillés dans le chapitre 5, à savoir des améliorations incrémentales ou des ruptures technologiques sur les avions. L'évolution de cette efficacité par avion dépend à la fois des performances des futures architectures avion mais aussi de la rapidité de renouvellement de la flotte mondiale. D'autre part, l'amélioration de l'efficacité énergétique globale peut se faire en améliorant le taux de remplissage des avions (moins de sièges vides) mais aussi les opérations en vol et au sol. Ce dernier levier, non traité spécifiquement dans les leviers d'action de ce rapport, permet par exemple de réduire l'impact de la consommation des phases au sol et d'améliorer les trajectoires de vol pour minimiser la consommation de carburant.

Concernant la décarbonation, différentes notions doivent être définies. Nous introduisons tout d'abord la notion de taux de décarbonation d'un carburant comme la réduction du contenu en CO₂ de l'énergie utilisée par rapport au kérosène conventionnel. Ainsi, un taux de décarbonation de 50 % pour un carburant signifie qu'il émet 50 % de CO₂ en moins par rapport au kérosène, c'est-à-dire qu'il émet 43,4 gCO₂-eq/MJ en comparaison des 86,7 gCO₂/MJ du kérosène ^a d'après les données de l'ADEME ^b.

Nous définissons ensuite plus globalement le taux de décarbonation de la flotte comme la réduction du contenu en CO₂ moyen de l'énergie utilisée par l'ensemble de la flotte par rapport au kérosène conventionnel. Par conséquent, un taux de décarbonation de la flotte de 50 % peut avoir plusieurs significations, par exemple que l'ensemble de la flotte utilise un carburant dont le taux de décarbonation est de 50 % ou alors que la moitié de la flotte utilise un carburant dont le taux de décarbonation est de 100 % quand l'autre moitié utilise du kérosène.

Pour simplifier les analyses à venir, nous considérons que le seul carburant bas-carbone potentiellement utilisé par la flotte d'avions est un biocarburant obtenu par la voie Fischer-Tropsch, en considérant un rendement de production de 40 %. Nous considérons que le taux de décarbonation de ce carburant est de 75 %, soit environ 21,7 gCO₂-eq/MJ et par ailleurs, nous ne considérons pas de limite sur son taux d'incorporation. Par conséquent, il suffit de faire varier la part de la flotte qui utilise ce biocarburant d'ici 2050 pour obtenir le taux de décarbonation de la flotte. Par exemple, si la moitié de la flotte

a. Dans ce chapitre, les émissions de l'aviation sont exprimées en CO₂-eq puisqu'elles sont en partie dues à des biocarburants. Néanmoins, par simplicité et afin de ne pas avoir à rentrer dans le détail des proportions de ces émissions qui sont dues au CO₂ par rapport aux autres gaz à effet de serre, dans le reste du chapitre nous comparerons les émissions de l'aviation à différents budgets carbone même lorsque les émissions de l'aviation comprennent une partie d'autres gaz à effet de serre que le CO₂. Pour avoir un ordre de grandeur, Stratton *et al.* [SWH10, table 40] évaluent que pour un biocarburant produit à partir de millet vivace et de charbon, les émissions de CO₂ représentent de l'ordre de 90 % des émissions de CO₂-eq.

b. Une discussion sur les facteurs d'émission du kérosène est disponible dans l'annexe B.5.

Scénario	T	TD	RT
Amélioration annuelle de l'efficacité énergétique entre 2020 et 2050	1 %	1 %	1,5 %
Taux de remplissage moyen en 2050	89 %	89 %	92 %
Réduction de consommation via les opérations en 2050 par rapport à 2020	0 %	8 %	12 %
Taux de décarbonation de la flotte en 2050	0 %	37,5 %	75 %
Facteur d'émission en 2050 (gCO ₂ -eq/pass·km)	89	52	17

TABLEAU 9.1 – Principales hypothèses technologiques pour les trois scénarios illustratifs étudiés à l'aide de CAST.

utilise ce biocarburant (et le reste du kérosène), le taux de décarbonation de la flotte est de 37,5 %. En particulier, dans tous nos résultats, le taux maximal de décarbonation de la flotte vaut 75 %.

Au-delà de ces quatre caractéristiques, des paramètres supplémentaires sont disponibles pour régler la temporalité des différents leviers d'action, tels que l'année de démarrage ou la vitesse de transition. La vitesse à laquelle ces différents leviers sont actionnés est discutée dans la partie 9.4.1, et les valeurs par défaut de CAST seront utilisées.

9.2.2 Description des scénarios technologiques

Nous considérons trois scénarios technologiques T, TD et RT, correspondant aux hypothèses suivantes :

Scénario tendanciel sans décarbonation (T) : amélioration tendancielle du taux de remplissage et de l'efficacité énergétique prenant en compte un ralentissement à cause de limites technologiques, pas d'amélioration des opérations ni d'utilisation de carburant bas-carbone ;

Scénario tendanciel avec décarbonation partielle (TD) : amélioration tendancielle du taux de remplissage et de l'efficacité énergétique prenant en compte un ralentissement à cause de limites technologiques, amélioration des opérations et utilisation de carburant bas-carbone pour la moitié de la flotte ;

Scénario rupture technologique et décarbonation totale (RT) : amélioration et ruptures technologiques pour l'efficacité énergétique, amélioration importante du taux de remplissage et des opérations et utilisation de carburant bas-carbone pour l'ensemble de la flotte.

Ces hypothèses sont décrites de manière quantitative dans les tableaux 9.1 et 9.2.

Ces hypothèses déterminent le facteur d'émission global de la flotte^a, exprimé en gramme de CO₂-eq par passager-kilomètre (gCO₂-eq/pass·km). Le scénario T est le moins ambitieux, avec un facteur d'émission de 89 gCO₂-eq/pass·km à horizon 2050 et le scénario RT est le plus ambitieux, avec un facteur d'émission de 17 gCO₂-eq/pass·km. À titre de comparaison, pour la flotte mondiale, le facteur d'émission moyen en 2019 était de 131 gCO₂-eq/pass·km quand les avions

a. Nous rappelons que, selon la méthodologie adoptée, ce facteur d'émission concerne l'aviation commerciale et les effets CO₂ incluant les émissions liées à la production du carburant.

Scénario	T	TD	RT
Efficacité énergétique			
Amélioration annuelle	1 %	1 %	1,5 %
Amélioration cumulée en 2035	14 %	14 %	20 %
Amélioration cumulée en 2050	26 %	26 %	36 %
Opérations			
Amélioration annuelle	0 %	0,28 %	0,43 %
Amélioration cumulée en 2035	0 %	6 %	9 %
Amélioration cumulée en 2050	0 %	8 %	12 %
Efficacité + Opérations			
Amélioration annuelle	1 %	1,28 %	1,92 %
Amélioration cumulée en 2035	14 %	19 %	27 %
Amélioration cumulée en 2050	26 %	32 %	44 %

TABLEAU 9.2 – Détails pour les scénarios T, TD et RT concernant l'amélioration de l'efficacité et des opérations.

de dernière génération permettent d'obtenir des facteurs d'émission inférieurs à 100 gCO₂-eq/pass·km.

Concernant les valeurs considérées pour l'efficacité énergétique, elles correspondent à une baisse de la consommation en 2050 de 26, 26 et 36 % pour les scénarios T, TD et RT, respectivement (cf. tableau 9.2). Dans le chapitre 5, nous avons vu que les différents leviers pour améliorer l'efficacité énergétique permettaient d'envisager de nouveaux avions à horizon 2035 consommant de l'ordre de 20 à 30 % de moins que les meilleurs avions actuels. Les hypothèses que nous faisons sont donc cohérentes avec ces chiffres, en prenant en compte le temps nécessaire pour le renouvellement de la flotte. Ensuite, les hypothèses faites concernant l'amélioration des opérations se basent sur des valeurs proches de celles de l'ATAG, autour de 10 %^{ATA20}. Les hypothèses sur le taux de remplissage correspondent à des hypothèses tendanciennes, un peu plus optimistes pour RT, prolongeant ainsi les tendances de la figure 3.2 (en 2018, le taux de remplissage moyen valait 82 %^a). Quant aux hypothèses faites sur le taux de décarbonation de la flotte, celles-ci sont plus délicates à interpréter car elles mélangent deux éléments. D'un côté, des carburants présentant un taux de décarbonation de 75 % existent déjà (des taux plus élevés sont même possibles) et des vols avec 100 % de biocarburants ont été effectués, ce qui permet d'envisager à très court terme un avion avec un taux de décarbonation de 75 %. Le passage à l'échelle pour toute une flotte dépend par contre d'autres facteurs, notamment le taux d'incorporation maximal autorisé, la capacité industrielle de production, la disponibilité en ressources énergétiques ainsi que l'évolution du trafic. Ces différents éléments sont discutés dans la section 9.4.3 et suggèrent qu'un taux de décarbonation de la flotte nul pour le scénario T est extrêmement pessimiste et qu'à l'inverse, l'hypothèse de 75 % pour RT est extrêmement optimiste notamment dans le cas d'un trafic en forte croissance.

L'intérêt d'établir plusieurs scénarios tient au fait que les améliorations technologiques futures sont très incertaines, tant en termes de gain que de temporalité. Ces scénarios illustratifs permettent donc de fournir des plages de variation envisageables.

a. Source : OACI via le site airlines.org, consulté le 25 août 2021.

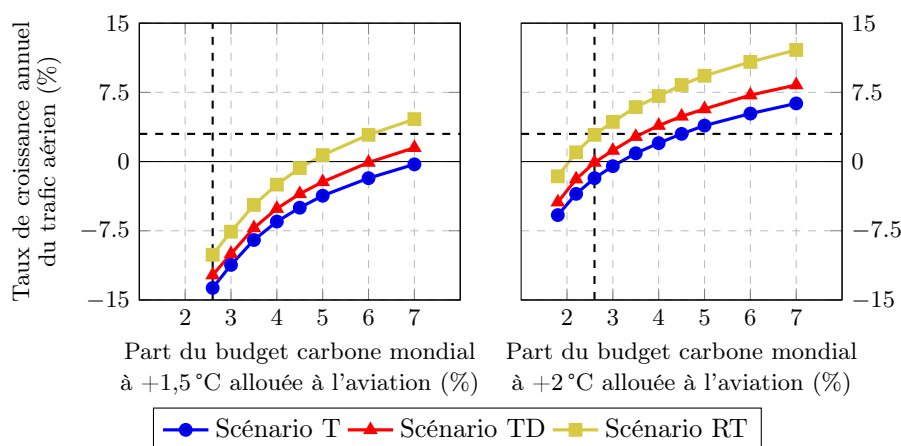


FIGURE 9.1 – Taux de croissance du trafic aérien en fonction de la part du budget carbone mondial allouée à l’aviation commerciale pour les scénarios T, TD et RT. Résultats donnés pour les budgets carbone médians pour $+1,5^{\circ}\text{C}$ (figure de gauche) et $+2^{\circ}\text{C}$ (figure de droite), sans considérer l’utilisation de BECSC. La ligne pointillée verticale représente la part de référence de 2,6 %, et la ligne pointillée horizontale représente le taux de croissance de 3 % annoncé par le secteur industriel. Résultats obtenus avec CAST.

9.2.3 Analyse de scénarios

Une fois les scénarios technologiques définis, plusieurs analyses peuvent être réalisées. Dans un premier temps, nous considérons le cadre du scénario P1 du GIEC, sans utilisation de BECSC. Les budgets carbone médians pour $+1,5^{\circ}\text{C}$ et $+2^{\circ}\text{C}$ sont considérés et la méthodologie présentée dans le chapitre 8 est utilisée. Une analyse de sensibilité est effectuée sur la part du budget carbone mondial allouée à l’aviation. Dans chaque cas et pour les trois scénarios technologiques illustratifs, le taux de croissance annuel maximal du trafic aérien est calculé afin d’équilibrer les émissions cumulées de l’aviation avec le budget carbone alloué jusqu’en 2050.

La figure 9.1 récapitule les résultats obtenus. On voit que, de façon logique, les scénarios technologiques plus ambitieux (par exemple RT au lieu de T) ou un objectif climatique moins contraignant ($+2^{\circ}\text{C}$ au lieu de $+1,5^{\circ}\text{C}$) permettent d’obtenir des taux de croissance plus importants.

Pour un objectif climatique de $+1,5^{\circ}\text{C}$, allouer à l’aviation une part plus importante que sa part actuelle de 2,6 % est nécessaire pour maintenir ou augmenter le trafic aérien, et ce quel que soit le scénario illustratif considéré. Ainsi, dans le cas du scénario RT, il faudrait doubler le budget carbone alloué à l’aviation pour espérer un taux de croissance tendanciel du trafic aérien, de l’ordre de 3 % par an. La valeur exacte, ainsi que d’autres valeurs de la part du budget carbone consommée par l’aviation pour permettre une croissance du trafic de 3 % par an, sont fournies dans le tableau 9.3. En considérant la part de référence de 2,6 %, une forte décroissance du trafic aérien est nécessaire pour respecter le budget carbone alloué pour $+1,5^{\circ}\text{C}$.

Pour un objectif à $+2^{\circ}\text{C}$, les résultats sont plus nuancés. Une décroissance

Scénario	T	TD	RT
Budget carbone médian à +1,5 °C	10,2 %	8,2 %	6,0 %
Budget carbone médian à +2 °C	4,5 %	3,6 %	2,6 %

TABLEAU 9.3 – Part du budget carbone mondial consommée par l’aviation lorsque le trafic aérien croît de 3 % par an. Les budgets carbone médians sont utilisés sans considérer l’utilisation de BECSC.

du trafic aérien est nécessaire pour le scénario technologique le moins ambitieux T. En revanche, pour le scénario technologique le plus ambitieux RT, une croissance du trafic aérien proche de celle tendancielle est envisageable en allouant à l’aviation la part de référence de 2,6 % (cf. tableau 9.3). Cela correspond à un doublement du trafic par rapport à 2018 à horizon 2050. Avec le scénario RT, une stagnation ou une légère augmentation du trafic serait même possible en allouant à l’aviation une part plus faible que la part de référence, laissant ainsi des marges de manœuvre à d’autres secteurs.

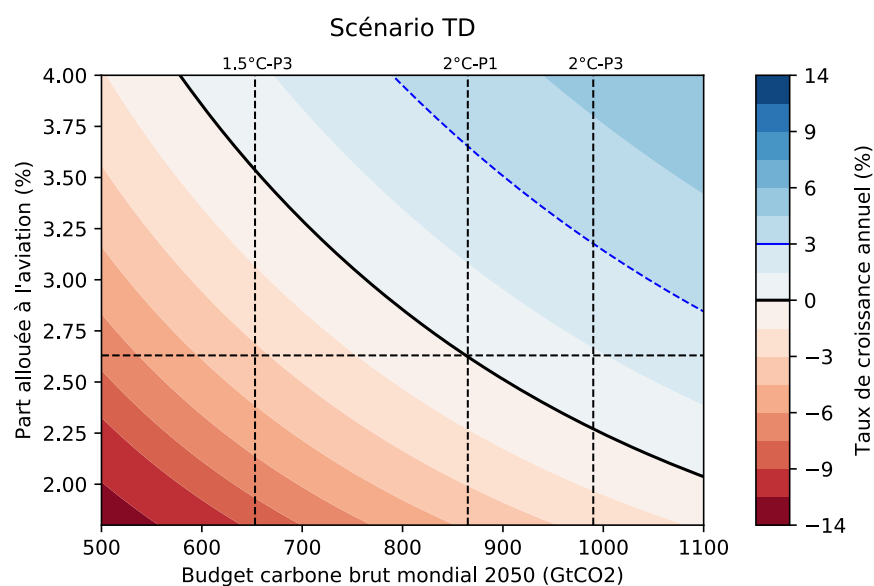
Les résultats ci-dessus se placent dans le cadre du scénario P1 du GIEC et ne prennent donc pas en compte l’utilisation potentielle de BECSC. Ceux-ci ont pour influence d’augmenter le budget carbone brut (cf. tableau 8.1), ce qui justifie de faire une analyse de sensibilité pour différents budgets carbone bruts. Outre la prise en compte de BECSC, cela permet aussi de considérer de multiples cibles de température ainsi que des probabilités de réalisation différentes. La figure 9.2 récapitule les résultats dans le cas des scénarios technologiques TD et RT. Les résultats sont présentés sous la forme d’une figure reliant les budgets carbone brut mondiaux, la part allouée à l’aviation et les taux de croissance du trafic aérien. Ces figures permettent de retrouver les résultats obtenus pour les budgets carbone médians sans BECSC et de les étendre à d’autres budgets carbone brut avec BECSC. Ils permettent aussi de faciliter des arbitrages entre plusieurs variables. Il est intéressant de noter que, pour un scénario technologique plus ambitieux, les lignes de niveau sont décalées vers le coin inférieur gauche du graphe. Cela permet par exemple de respecter un objectif climatique plus contraignant à part allouée et taux de croissance du trafic aérien fixes.

Néanmoins, deux limites demeurent sur l’analyse de ces scénarios illustratifs. D’une part, ces scénarios ne considèrent que les émissions de CO₂. Une étude synthétique et illustrative incluant l’ensemble des effets non-CO₂ est fournie dans la section 9.4.2. D’autre part, les scénarios TD et RT nécessitent l’utilisation de carburants bas-carbone pour alimenter la flotte d’avions. Pour chaque scénario, il est alors nécessaire d’évaluer la quantité de ressources énergétiques nécessaires pour l’aviation et de comparer cette valeur avec les disponibilités prévues au niveau mondial à horizon 2050. Ces aspects-là sont étudiés dans la section 9.4.3.

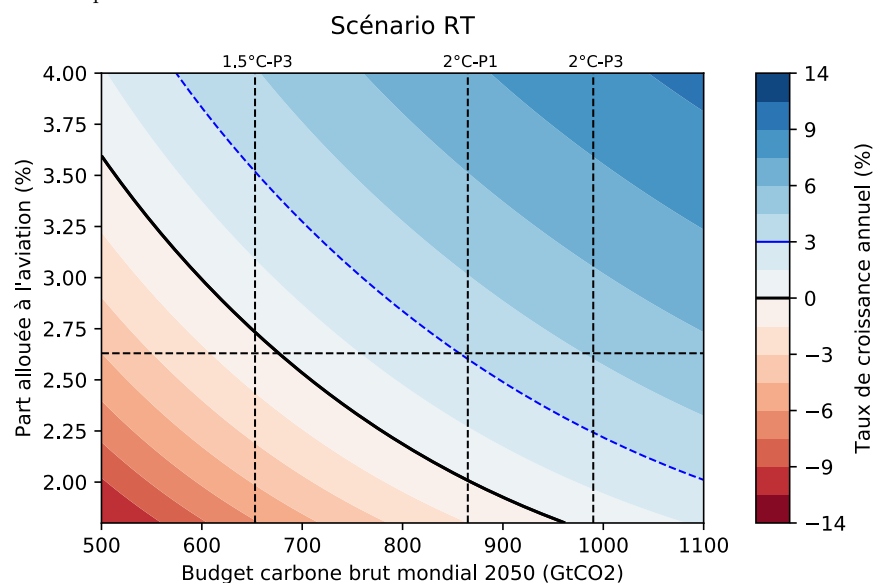
9.3 Analyse d’un scénario industriel

9.3.1 Scénario 1 de Waypoint 2050

Nous analysons dans cette section un scénario proposé par l’ATAG dans son récent rapport Waypoint 2050^{ATA20}, à savoir le scénario 1, « pushing technology and operations ». Les scénarios industriels sont importants car ils sont souvent



(a) Taux de croissance annuel durable du trafic aérien en fonction des budgets carbone bruts considérés pour le scénario TD.



(b) Taux de croissance annuel durable du trafic aérien en fonction des budgets carbone bruts considérés pour le scénario RT.

FIGURE 9.2 – Analyse de sensibilité sur les budgets carbone bruts mondiaux pour les deux scénarios de transition TD et RT. Pour un budget carbone brut mondial considéré et une part allouée à l'aviation, les simulations réalisées avec CAST donnent le taux de croissance annuel du trafic aérien correspondant. La ligne horizontale en pointillé indique la part des émissions de CO₂ du transport aérien en 2018 qui s'établit à 2,6 %. Les lignes verticales en pointillé indiquent différents budgets carbone bruts médians calculés à horizon 2050 : celui pour +2°C sans BECSC utilisé précédemment (noté 2°C-P1) et ceux pour +1,5°C et +2°C avec les valeurs des BECSC du scénario P3 du GIEC (notés 1,5°C-P3 et 2°C-P3). La ligne bleue en pointillé indique le taux de croissance annuel tendanciel de 3 % prévu par le secteur industriel.

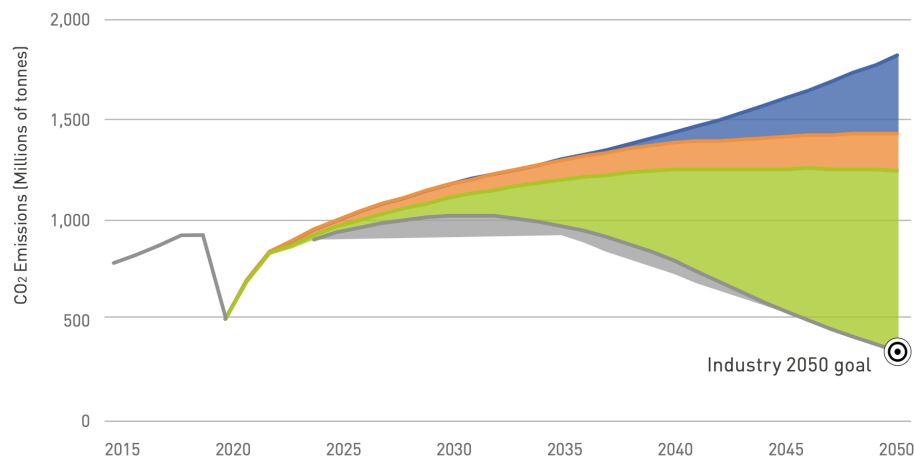


FIGURE 9.3 – Scénario 1 « Pushing technology and operations » du rapport Waypoint 2050 d'ATAG, avec une croissance annuelle du trafic prise à +3 %. Les améliorations technologiques (bleu), des opérations (orange), l'utilisation de SAF (vert) et la compensation carbone (gris) permettent de faire diminuer les émissions. D'après ATAG^{ATA20} (p. 24).

convergentes avec ceux de l'OACI. L'OACI a par exemple repris en 2019 l'objectif exprimé par l'IATA en 2009 d'une croissance neutre en carbone à partir de 2020^a et a notamment mis CORSIA en place dans ce but. Ce scénario, dont les émissions sont représentées sur la figure 9.3, repose sur cinq hypothèses :

1. croissance du trafic de 3 % par an^b ;
2. amélioration des opérations (décarbonation du roulage, optimisation des routes, ...) ;
3. amélioration du taux de remplissage ;
4. développement prioritaire d'avions électriques et hybrides dans la catégorie des avions de courte distance franchissable et de moins de 100 places avec une entrée en service à partir de 2035/2040 ;
5. approche rétrospective^c de l'effort restant (réduction de CO₂ d'environ 900 Mt) pour atteindre l'objectif : une fourchette de 290 Mt à 390 Mt (360 Gt à 490 Gt) de SAF avec un facteur de réduction des émissions de 74 % à 100 % d'ici 2050.

Par ailleurs, des mesures de compensation carbone (en gris sur la figure 9.3) sont aussi envisagées mais jouent un rôle marginal puisque, par définition de l'approche rétrospective, le taux de décarbonation est vu comme une variable

a. Pour l'OACI, cf. le *Working Paper* ICAO A40-WP/54, [ICAO Global Environmental Trends – Present And Future Aircraft Noise And Emissions](#), du 5 juillet 2019. IATA s'est fixé en 2009 l'objectif plus ambitieux de réduction des émissions de 50 % en 2050 par rapport au niveau de 2005^{IAT19}.

b. Cette prévision de croissance correspond à une révision des objectifs pré-Covid, qui étaient de l'ordre de +4,5 %.

c. L'approche rétrospective, ou *backcasting*, consiste à estimer la quantité de SAF nécessaire pour atteindre l'objectif climatique fixé. Elle s'oppose donc à l'approche prospective qui consiste à partir d'estimations de la quantité de SAF disponible, et d'en déduire les conséquences climatiques.

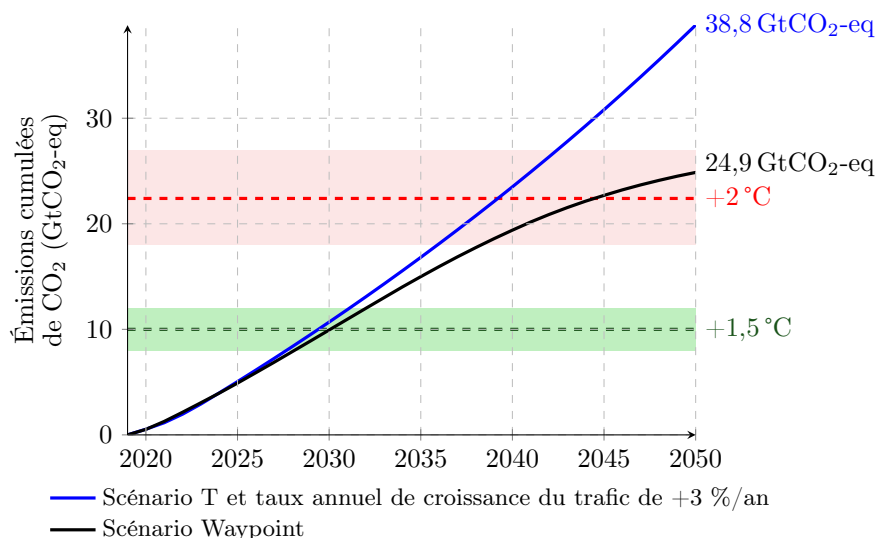


FIGURE 9.4 – Évolution des émissions de CO₂ cumulées pour le scénario industriel présenté (courbe noire). Le scénario technologique tendanciel (T), présenté dans la section précédente, avec une croissance annuelle de 3 %, est fourni en comparaison (courbe bleue). Les zones horizontales colorées correspondent à des intervalles de budget carbone alloué à l’aviation. Ces intervalles sont calculés en allouant entre 2,1 et 3,1 % du budget mondial à l’aviation et en partant des budgets carbone à +1,5°C (zone verte) et +2°C (zone rouge) avec 50 % de chance de réussite. Les lignes pointillées représentent le budget carbone de référence correspondant à une allocation de 2,6 % du budget carbone mondial à l’aviation.

d’ajustement pour remplir les objectifs climatiques. Qualitativement, ce scénario se rapproche du scénario RT présenté précédemment.

9.3.2 Analyse climatique du scénario industriel

À partir de la figure 9.3, les émissions cumulées de CO₂ générées par l’aviation ont été estimées pour ce scénario industriel. Afin d’avoir une base de comparaison pour mesurer l’impact des améliorations technologiques prévues, ces émissions sont comparées sur la figure 9.4 au scénario T avec la même croissance du trafic aérien (3 % par an).

Il est intéressant de remarquer que le scénario industriel permet de réduire significativement les émissions cumulées du transport aérien jusqu’en 2050 en comparaison avec le scénario tendanciel, mais que des différences significatives entre les deux scénarios n’apparaissent qu’après 2030. Néanmoins, malgré les améliorations technologiques, ce scénario requiert une allocation différenciée des budgets carbone pour +1,5°C et pour +2°C. En effet, dans le cadre de ce scénario, il faudrait allouer à l’aviation 6,6 % et 2,9 % des budgets carbone médians pour +1,5°C et +2°C respectivement, soit plus que la part de référence de 2,6 %. Avec l’allocation de référence de 2,6 %, le budget carbone pour +1,5°C serait entièrement consommé en 2030 pour le scénario industriel.

9.3.3 Critiques méthodologiques

Le scénario industriel analysé présente plusieurs problèmes méthodologiques. Tout d’abord, les émissions rapportées sont uniquement celles liées à la combustion^a. Or, comme expliqué dans la section 2.2.2, l’impact des biocarburants n’est pertinent que sur l’ensemble du cycle de vie du kérosène, *i.e.* lorsque l’on considère aussi les émissions de CO₂ hors combustion, ce qui rajoute environ 20 %. Les émissions de ce scénario sont donc sous-évaluées.

Ensuite, ATAG compare les émissions de 2050 à des émissions définies dans deux scénarios de l’AIE limitant le réchauffement à +2 °C pour justifier que la trajectoire proposée est compatible avec l’accord de Paris. Or, +2 °C n’est qu’une borne supérieure mentionnée dans l’accord de Paris, et ce sont bien les émissions cumulées, et non celles d’une année donnée, qui comptent.

Par ailleurs, certaines données nécessaires à l’évaluation du scénario Waypoint 2050 sont manquantes, comme par exemple les hypothèses faites sur l’amélioration de l’efficacité avant 2035 ou encore l’évolution du taux de remplissage. Cela empêche une modélisation précise de ce scénario dans CAST et nous ne pouvons donc pas l’analyser aussi finement que les scénarios T, TD et RT. Il n’est par exemple pas possible d’opérer une analyse de sensibilité sur la part du budget carbone allouée à l’aviation et le taux de croissance du trafic comme nous l’avons fait dans le tableau 9.3.

Pour finir, l’approche rétrospective ne rend pas fidèlement compte du réalisme de la trajectoire en sur-estimant l’impact de la décarbonation : nous reviendrons plus en détails sur ce point dans la section suivante.

7.2.3 Scénarios convergents²⁷¹

L'étude des différents axes techniques pour réduire les émissions de CO₂ du transport aérien est conditionnée par un ensemble d'hypothèses structurantes qui, en fonction de leur niveau de réalisation pourraient changer significativement les trajectoires d'émissions. En particulier les axes 6 Innovation (7.2.2.2), 7 Carburants alternatifs (7.2.2.3), et 8 Renouvellement des flottes (7.2.2.4) sont fortement inter-dépendants les uns des autres, et fortement dépendants du contexte de crise et de reprise, de décisions stratégiques à venir, de financements, d'arbitrages inter-secteurs, du succès de projets industriels, de politiques énergétiques...

Ainsi, s'il n'est pas raisonnable de prédire l'avenir dans ce contexte, il est possible de regarder l'influence des paramètres structurants du modèle et influant sur les trajectoires d'émissions du transport aérien.

Pour ce faire nous avons fait varier ces paramètres au travers de 2 scénarios, dits scénarios convergents: les scénarios « MAVERICK » et « ICEMAN »²⁷², pour en analyser les résultats et les externalités associées.

Dans ce paragraphe, l'hypothèse de trafic ne varie pas : retour du trafic du niveau de 2019 en 2024 puis augmentation de 4% par an entre 2025 et 2050. L'objectif est bien de regarder l'influence des paramètres techniques pour un trafic donné. Les hypothèses de trafic seront ajustées si nécessaire dans la suite afin d'atteindre le budget carbone défini en 5.9.3.

Retrouver le tableau récapitulatif des hypothèses des deux scénarios en annexe 13.3.4 en page 130.

7.2.3.1 Scénario « MAVERICK »

Scénario « MAVERICK »

Définitions et Hypothèses

Dans le scénario « MAVERICK », les paramètres de performance technique sont poussés à leur maximum. C'est un scénario dans lequel :

- La roadmap avion optimiste de l'industrie est au rendez-vous (Roadmap « INDUS », définie en 7.2.2.2). La production de carburants alternatifs France va en priorité au transport aérien (Hypothèse « CAPA 100 » définie en 7.2.2.3).
- Les flottes de toutes les compagnies contribuant aux émissions du périmètre France sont renouvelées en 15 ans à partir de 2025 (Hypothèse « 15 ans » définie en 7.2.2.4).

270 https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ClimateChange_TechnologyStandards.aspx

271 Le détail des données, calculs et sources associés à l'établissement de ces scénarios est disponible dans la note de calcul

272 S'il ne mourait pas, ce scénario aurait été nommé GOOSE

- L'hydrogène nécessaire aux avions à hydrogène ou à la synthèse des PTL est produit par électrolyse et le mix électrique associé est 100% éolien, avec les performances de l'éolien français de 2019.

- Le programme CORSIA* (CORSIA sur toutes les routes y compris domestiques, toutes compagnies) est appliqué et la compensation est effectivement décomptée des émissions.

C'est un scénario à forts risques, dont on peut discuter le réalisme, qui maximise l'efficacité de réduction des émissions par la voie technique, qui maximise le potentiel de CORSIA au-delà de son périmètre réel, qui maximise les emplois du secteur et qui nécessite le plus d'investissement.

Trajectoires carbone

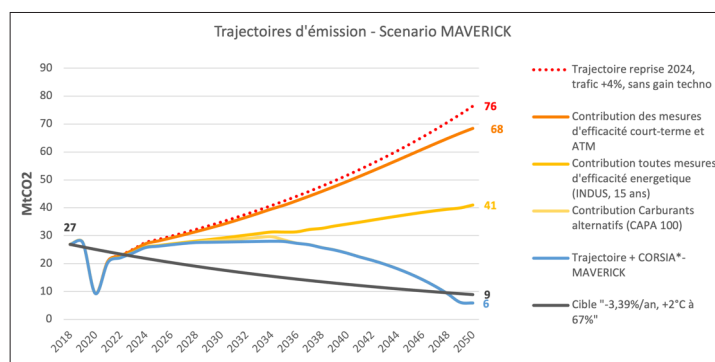


Figure 42 - Émissions annuelles, Scénario « MAVERICK » - France

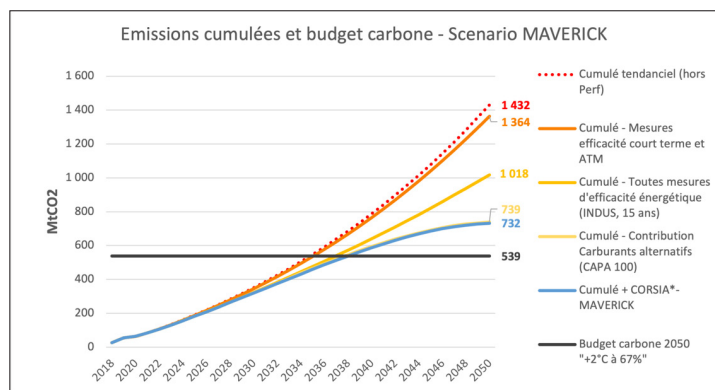


Figure 43 - Émissions cumulées et budget carbone, Scénario « MAVERICK » - France

Faits marquants

Le renouvellement de la flotte en 15 ans à partir de 2035 avec des court/moyen-courriers à Hydrogène et des long-courriers à 100% de taux d'incorporation de carburant alternatif et améliorant les performances de 25% permet d'infléchir la courbe d'émissions de manière déterminante.

En 2050, toute la flotte Régionale, court et moyen-courrier est renouvelée avec des avions à Hydrogène, toute la flotte long-courrier est renouvelée avec le nouvel avion et vole avec 100% de carburants alternatifs dans les réservoirs.

La trajectoire d'amélioration ultra-performante fait que CORSIA* ne joue que très peu (6 Mt CO₂ compensées entre 2028 et 2034).

Résultats et Impacts CO₂

La progression de l'efficacité énergétique annuelle moyenne est de 2,14% à partir de 2024, soit au-delà des scénarios optimistes du secteur.

Pourtant, le budget est dépassé autour de 2038 et les émissions cumulées le dépassent d'environ 36% in fine.

L'inflexion significative de la courbe des émissions arrive presque au moment où le budget est atteint, le rythme de décarbonation ne suffit pas à rester dans le budget.

Consommation et externalités énergétiques

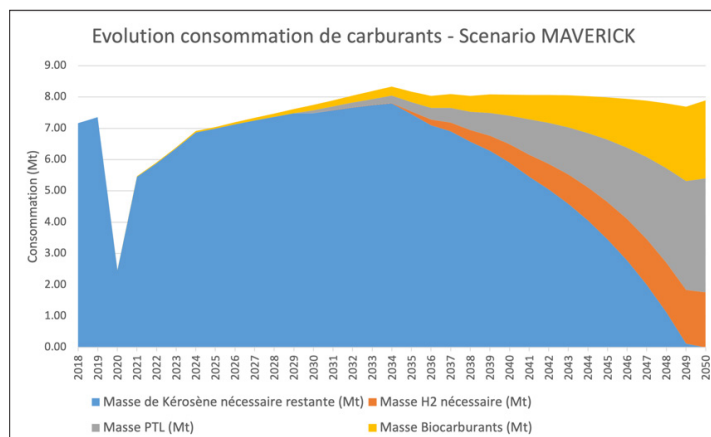


Figure 44 - Trajectoire de consommation de carburants dans le Scénario « MAVERICK » - France

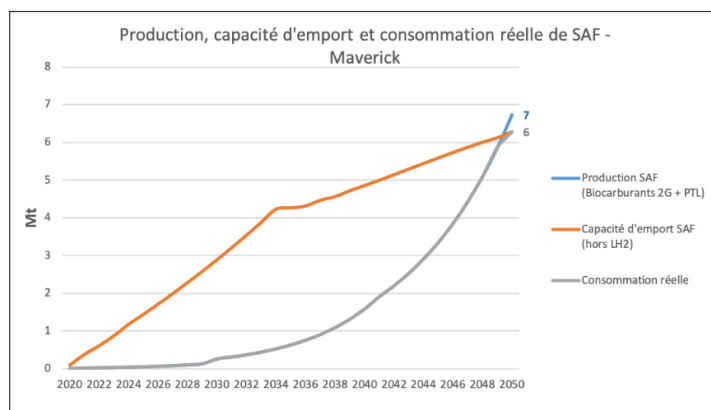


Figure 45 - Production, capacité d'emport et consommation réelle SAF (Biocarb 2G et PTL) - « MAVERICK » - France

Consommation de carburant en 2050 (Mt)			
Jet A-1	Biocarburant	PtL	H ₂ (hors PtL)
0	2,49	3,65	1,76

Tableau 9 - Consommation de carburants en 2050 dans le Scénario « MAVERICK » - France

Les quantités cibles ne sont pas limitées par les hypothèses prises en production de carburant. En revanche, avant 2049, les quantités disponibles restent inférieures aux besoins (cf. Figure 45). Accélérer la production de carburant alternatifs pour arriver plus rapidement à la cible, c'est-à-dire aller au-delà d'une croissance de 25% puis 15% par an, permettrait d'améliorer les émissions carbone de ce scénario.

L'énergie électrique nécessaire pour produire ces quantités de PtL et d'H₂ est de 265 TWh (165 TWh pour les PtL et 100 TWh pour l'H₂), ce qui nécessiterait un parc éolien dédié au transport aérien environ 8 fois supérieur au parc éolien français total installé en 2019.

Concernant la production d'hydrogène, l'objectif de 1Mt/an (cf. 7.2.2.3) est largement dépassé dans ce scénario (d'autant plus si l'on inclut l'hydrogène nécessaire à la synthèse de PtL).

Les externalités énergétiques de ce scénario sont donc considérables, en particulier du point de vue de la production électrique. Afin de la réduire, une piste pourrait être d'augmenter le niveau de biocarburant et de baisser la production de PtL. Il faudrait alors regarder les solutions d'importation ou miser sur d'autres types de carburants (3ème génération, ...). Dans tous les cas, il apparaît que le dimensionnement prévu par la filière énergétique française ne suffit significativement pas à satisfaire les besoins d'un tel scénario.

Externalités emplois

Ce scénario est plus favorable aux emplois de l'industrie. Les impacts emplois des scénarios sont étudiés plus en détail au paragraphe 9.

Pousser encore plus loin ?

En simulant la disponibilité de la production cible (2,73 Mt) dès 2030 pour les biocarburants et dès 2040 pour le PtL, les émissions cumulées passent de 732 MtCO₂ à 555 MtCO₂. Avec 2,73 Mt de biocarburant en 2030, nous serions à ~34%, soit ~7 fois plus que l'objectif fixé dans la feuille de route du gouvernement en décembre 2020²⁷³. Dans cette hypothèse, de fait plus qu'irréaliste en l'état des prévisions, l'économie est conséquente, mais encore insuffisante. La production est dans ce cas supérieure aux besoins dès 2030. Il faudrait alors avancer la date de mise en service du long-courrier à 2032 pour rester dans le budget. Les externalités organisationnelles et énergétiques ne sont pas regardées ici car ce scénario est plus qu'irréaliste. Il permet en revanche d'apprécier la hauteur du mur qu'il faudrait franchir dans une solution purement technologique.

273 7,98 Mt de kérosène nécessaires en 2030 dans le scénario « MAVERICK » France (voir note de calcul), objectif de 5% de biocarburant en 2030 pour l'aérien fixé dans la feuille de route de décembre 2020 : <https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants#e6>

Conclusions

Le scénario « MAVERICK » en l'état ne permet pas d'atteindre les objectifs de décarbonation et génère des externalités énergétiques considérables, à un niveau vraisemblablement non anticipé à ce jour par la filière Hydrogène et énergie française. Accélérer la cadence de production de carburant alternatif permettrait néanmoins de l'améliorer, sans pour autant respecter le budget carbone. Il est donc très risqué et peu réaliste en l'état.

7.2.3.2 Scénario « ICEMAN »

SCÉNARIO ICEMAN

Définitions et Hypothèses

Dans le scénario « ICEMAN », les hypothèses de réalisation technique sont plus prudentes. C'est un scénario dans lequel :

- La roadmap avion optimiste de l'industrie affiche un décalage de 5ans (Roadmap « INDUS+5 », définie en 7.2.2.2).
- Le transport aérien ne peut bénéficier « que » de 50% de la production de carburants alternatifs français (Hypothèse « CAPA 50 » définie en 7.2.2.3).
- Les flottes de toutes les compagnies contribuant aux émissions du périmètre France sont renouvelées en 25 ans (Hypothèse « 25 ans » définie en 7.2.2.4).
- L'hydrogène nécessaire aux avions à hydrogène ou à la synthèse des PtL est produit par électrolyse et le mix électrique associé est 100% éolien, avec les performances de l'éolien France de 2019.
- Le programme CORSIA* (CORSIA sur toutes les routes y compris domestiques, toutes compagnies) est appliqué et la compensation est effectivement décomptée des émissions

Trajectoires carbone

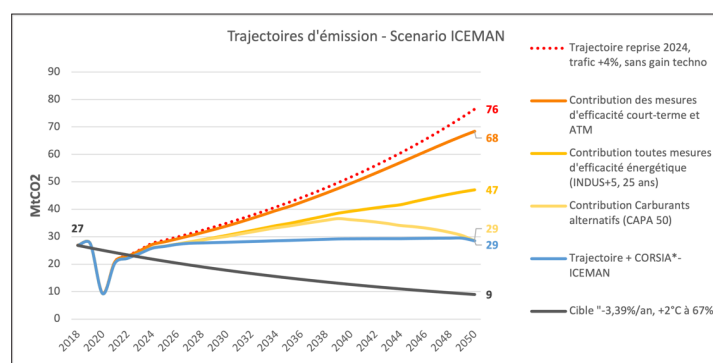


Figure 46 - Émissions annuelles, Scénario « ICEMAN » - France

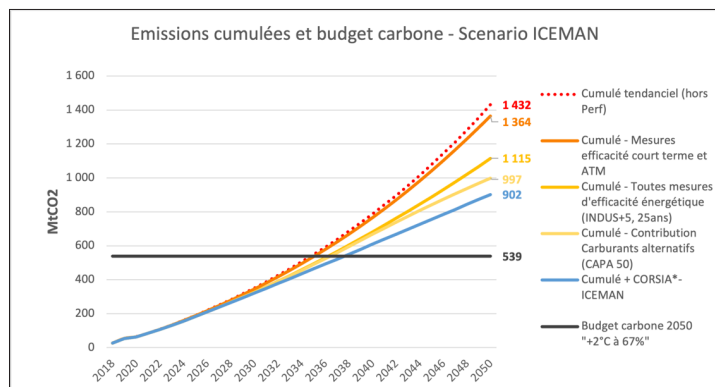


Figure 47 - Émissions cumulées et budget carbone, Scenario « ICEMAN » - France

Faits marquants

Le processus de décarbonation est trop lent, le niveau d'émissions de 2019 n'est retrouvé qu'en 2050.

En 2050, le renouvellement des flottes Moyen-courrier et Long courrier n'est pas terminé, seule 40% de la flotte est renouvelée. En effet, la nouvelle génération d'appareils a été mise en service en 2040 et le renouvellement se fait en 25 ans.

Les émissions sont tout le temps au-dessus du niveau de 2019, la compensation CORSIA* permet de compenser 95 MtCO₂ entre 2027 et 2049, engendrant des coûts importants pour les compagnies.

Résultats et Impacts CO₂

La progression de l'efficacité énergétique annuelle moyenne est de 1,61% à partir de 2024, c'est en-dessous des scénarios les plus optimistes du secteur mais cela reste un objectif ambitieux, loin d'être acquis d'avance.

Le budget est dépassé autour de 2038 et les émissions cumulées le dépassent d'environ 67% in fine. Ce chiffre est atteint en grande partie grâce à la compensation

Si le rythme de décarbonation est ralenti, notamment en début de période, le budget est inatteignable dans ces hypothèses.

Consommation et externalités énergétiques

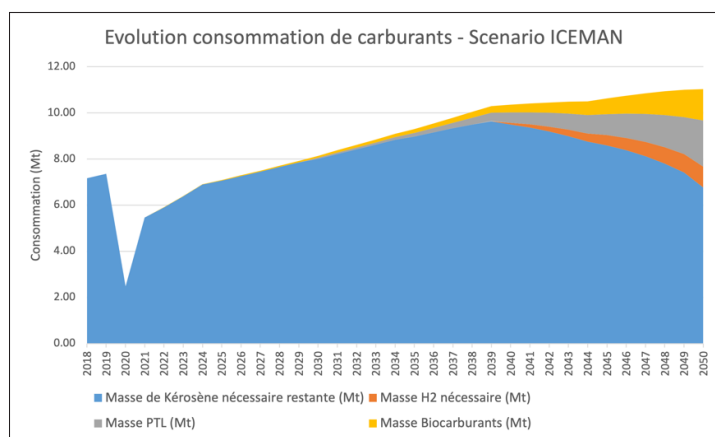


Figure 48 - Trajectoire de consommation de carburants dans le Scenario « ICEMAN » - France

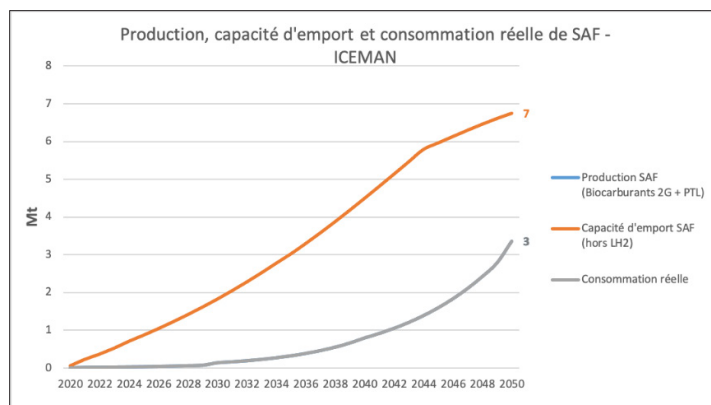


Figure 49 - Production, capacité d'emport et consommation réelle SAF (Biocarb 2G et PTL) - « ICEMAN » - France

Consommation de carburant en 2050 (Mt)

Jet A-1	Biocarburant	PtL	H ₂ (hors PtL)
6,77	1,37	2	0,9

Tableau 10 - Consommation de carburants en 2050 dans le Scenario « ICEMAN » - France

La production disponible ne répond pas aux besoins dans ce scénario, elle est utilisée à 100% durant toute la période (cf. Figure 49). Accélérer la production améliorerait le résultat du scénario mais ne permettrait pas d'atteindre la cible dans tous les cas.

L'énergie électrique nécessaire pour produire ces quantités de PtL et d'H₂ est de 141 TWh (91TWh pour les PtL et 50 TWh pour l'H₂), ce qui nécessiterait un parc éolien dédié au transport aérien environ 4 fois supérieur au parc éolien français total installé en 2019, soit 2 fois moins que dans le scénario « MAVERICK »

Concernant la production d'hydrogène, l'objectif de 1Mt/an (cf. 7.2.2.3) est dans l'ordre de grandeur, néanmoins, cela signifierait que 90% de cette production devrait être dédiée au transport aérien à la cible.

Les externalités énergétiques de ce scénario sont plus raisonnables. Néanmoins, elles ne sont pas négligeables et nécessitent un alignement à l'échelle de la filière énergétique et un arbitrage favorable au transport aérien.

Conclusions

Le scénario « ICEMAN » présente plus de marges pour la gestion des risques industriels, pour l'approvisionnement en carburants alternatifs et la gestion des externalités énergétiques. Cependant, tout en représentant un défi important pour sa mise en œuvre, il s'éloigne fortement de la cible de décarbonation malgré une forte sollicitation du système de compensation. Il n'est donc pas acceptable seul en l'état.

7.2.4 Conclusion

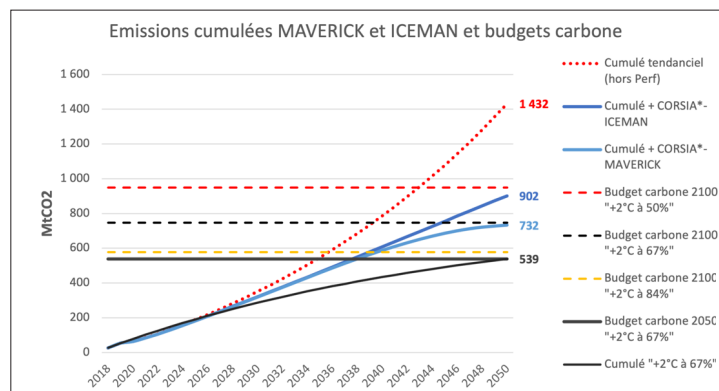


Figure 50 - Cumulés « MAVERICK » et « ICEMAN » France comparés aux budgets carbone

Même dans le scénario le plus optimiste, engendrant des externalités énergétiques considérables, si le trafic reprend une croissance de 4% à partir de 2024, le progrès technique seul n'est pas assez rapide pour contenir la croissance des émissions de GES et rester dans un budget carbone permettant de rester sous les +2°C avec une probabilité de 67% à horizon 2050.

Dans le scénario le plus prudent, on atteint quasiment le budget total disponible à horizon 2100 en abaissant la probabilité à 50%, avec donc aucune possibilité d'émission entre 2050 et 2100.

Il reste donc théoriquement 3 options pour rester dans le budget :

- **Parier sur encore plus d'améliorations techniques, plus rapides.** Le scénario « MAVERICK » pousse déjà les paramètres d'amélioration au-delà des projections du Secteur. **Il n'est manifestement pas acceptable au vu des enjeux climatiques, de ne parier que sur cette piste.**

- **Augmenter le budget carbone pour le secteur aérien.** Le budget total n'étant pas négociable, sauf en cas de révision des prévisions du GIEC, l'augmentation du budget carbone du secteur aérien ne peut se faire qu'au détriment d'autres secteurs. Dans la mise en œuvre des scénarios techniques, le secteur aérien est déjà en arbitrage fort avec les autres secteurs sur l'accès aux ressources et aux énergies bas carbone, le financement de l'innovation et de l'accélération des cadences de production. Un arbitrage sur le budget carbone reste possible théoriquement (c'est le cas dans la SNBC pour le transport national uniquement), mais nécessite une gouvernance légitime, basée sur l'analyse des budgets carbone et englobant le périmètre complet de l'activité et des émissions du transport aérien (cf. Proposition 0 au paragraphe 6). Cette gouvernance n'existe pas à ce jour.

- **Revoir l'hypothèse de trafic à la baisse.**

C'est cette dernière piste que nous nous proposons d'étudier maintenant.

La réduction du trafic peut être subie, comme c'est le cas actuellement, ou anticipée dans une dynamique de sobriété des usages permettant au transport aérien de se maintenir sur le long terme en maîtrisant ses émissions de GES. La **sobriété des usages** peut venir d'une réduction de l'offre de transport ou peut se traduire en une baisse de la demande. Ce sont ces 2 pistes que nous nous proposons d'étudier dans la suite, en évaluant les conséquences sur l'emploi dans le secteur.