

## **Les moteurs et l'environnement** (mis à jour le 10/12/2021)

Les moteurs et plus généralement l'ensemble propulsif, sont un système fondamental pour l'avion, auquel ils apportent la poussée nécessaire au mouvement, à partir de la source d'énergie que constitue le carburant transporté. Ce faisant, ils produisent du bruit et des émissions qui ont un impact sur l'environnement, mais cet impact n'est pas indépendant des caractéristiques de l'avion lui-même...

### **Avions et Moteurs : très étroite interdépendance**

Le degré d'intégration des moteurs dans les avions est extrêmement élevé. En fonction d'exigences de plus en plus fortes, d'objectifs de plus en plus ambitieux, associés à des challenges toujours plus difficiles, dans un champ de plus en plus étendu, avec des problèmes complexes à résoudre, la criticité de cette intégration ne peut que croître.

Les performances des avions dépendent des performances intrinsèques des moteurs (consommation spécifique, poussée, bruit) et aussi de la manière dont les systèmes propulsifs sont installés, en termes d'aérodynamique en incluant les interactions avec la cellule, les mâts-supports ; en outre leur masse est un facteur important. Les multiples interconnexions des systèmes entre avion et moteur (électrique, hydraulique, circuit carburant, air) influent aussi sur les performances avion.

Le bruit des avions est directement influencé par celui des moteurs, en particulier au décollage. La consommation de carburant de l'avion dépend à la fois de l'efficacité des moteurs, de l'efficacité aérodynamique et structurale (masse) de la cellule.

Les caractéristiques environnementales des moteurs et des avions sont ainsi très liées, et les prévisions comme les garanties de performances et de bruit entre compagnie cliente et avionneur, entre avionneur et motoriste sont étroitement coordonnées. Dans toute la période couvrant un projet, le développement et la certification moteur, le développement avion, les essais en vol et la certification avion, les équipes techniques de l'avionneur et du motoriste doivent se coordonner intensivement, et cette coopération se poursuit pendant toute la vie des matériels en service.

*En résumé, l'empreinte environnementale d'un avion est tributaire des performances intrinsèques des moteurs, de la cellule et de l'intégration des systèmes propulsifs. Dans toutes les solutions envisagées pour limiter cette empreinte, les moteurs sont au premier rang.*

### **En produisant la poussée indispensable au vol, les moteurs émettent :**

#### **a. Du bruit**

Le bruit est un son perturbant produit par un phénomène de « vibration de l'air » (onde de surpression), caractérisé par sa fréquence, son amplitude et une séquence temporelle qui module sa « tonalité », car c'est aussi une sensation physiologique. Le bruit est produit par une source ou la superposition de plusieurs, qui se propagent jusqu'aux récepteurs que sont les oreilles qui le perçoivent. Le bruit peut créer une gêne, perturber des échanges oraux, l'apprentissage, le sommeil, et dans certains cas, provoquer des effets néfastes sur la santé.

Le bruit d'un avion, gênant essentiellement au voisinage des aéroports, provient de plusieurs sources au niveau du (des) moteur(s) et de la cellule (bruit aérodynamique lié au train d'atterrissage, aux volets et aux becs). La source de bruit nettement dominante à l'origine, au décollage et à l'atterrissage, était le bruit de jet des moteurs, lié au frottement des gaz éjectés à grande vitesse par rapport à l'air ambiant.

L'avènement des moteurs à double flux (turbofans) a réduit fortement le bruit des moteurs, tout en réduisant aussi beaucoup leur consommation de carburant (rendement propulsif amélioré), le bruit de jet restant dominant dans les premières générations de turbofan.

Cependant, la distribution du bruit des moteurs selon les diverses sources a beaucoup évolué avec les dernières générations de moteur à haut taux de dilution (rapport de pression fan diminué), comme le montre le schéma de la figure 1, qui indique aussi la directivité des sources de bruit.

**Précédente génération de turbofan**  
(rapport pression fan élevé)

**Nouvelle génération de turbofan**  
(rapport pression fan bas/fort taux de dilution)

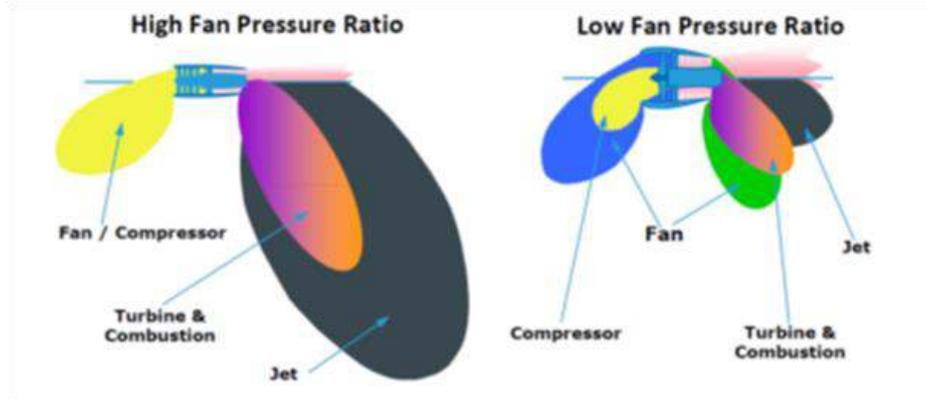


Figure 1. Évolution des sources de bruit des moteurs

Le fan (la soufflante) est devenu la source de bruit dominante pour les moteurs actuels, et la tendance va s'accroître avec les moteurs futurs à très haut taux de dilution (rapport de compression fan très bas). De ce fait, le bruit dominant des avions récents, au décollage, provient des moteurs (fan et jet), mais en approche, le bruit de cellule dépasse celui des moteurs, comme le montre un cas typique sur le diagramme de la figure 2.

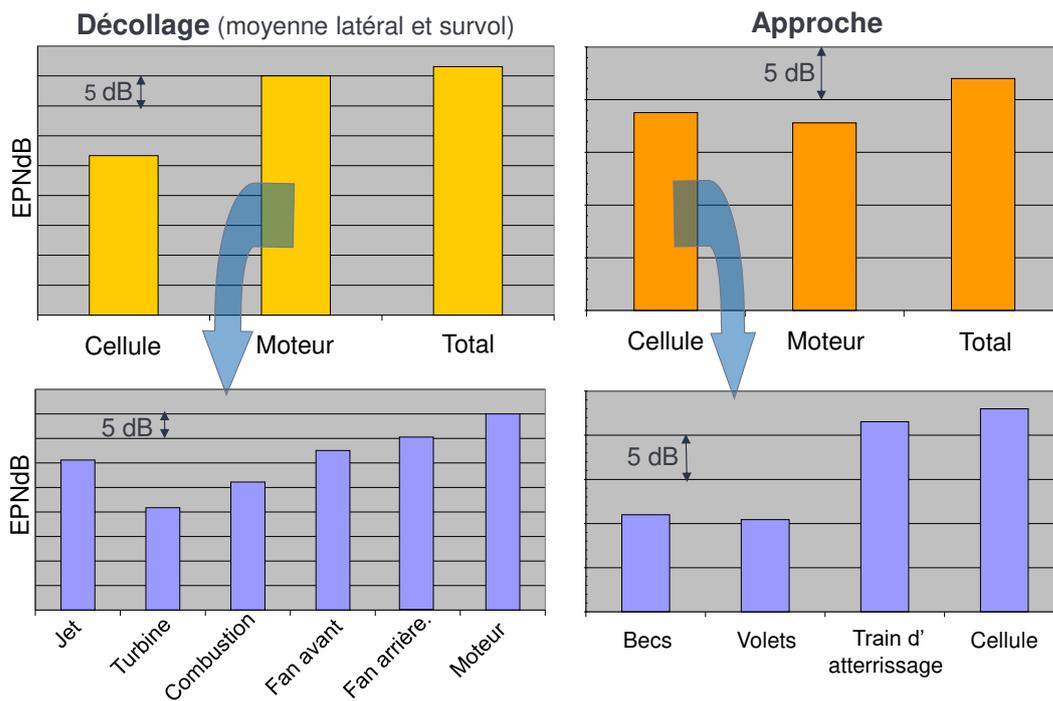


Figure 2. Sources de bruit typiques d'un bimoteur à long rayon d'action  
Unité de bruit : dB = décibel (échelle logarithmique - EPNdB = utilisés en certification)

Le bruit des avions n'a cessé de diminuer au fil des décennies, notamment grâce à la réduction des sources de bruit des moteurs (bruit de jet réduit par l'architecture, les technologies des moteurs avec optimisation acoustique des modules), de la cellule (bruit aérodynamique du train d'atterrissage, des volets et des becs, avec optimisation des cinématiques pour diminuer la signature acoustique) et également grâce à l'ensemble des améliorations de performances avion (y compris la réduction de consommation spécifique des moteurs), lesquelles conduisent à limiter les besoins de poussée des moteurs en vol, donc à réduire le bruit émis par un avion d'une masse donnée en opération. Ceci explique par exemple qu'un A380 soit moins bruyant au décollage qu'un A340-300, malgré une masse maximale qui est plus du double.

La réduction du bruit est en partie obtenue aussi en atténuant le bruit au moyen de traitements acoustiques appropriés sur divers composants du moteur et de la nacelle.

La réduction du bruit des moteurs par augmentation du taux de dilution (visant par ailleurs une réduction de la consommation spécifique de carburant) ne peut pas être facilement poursuivie au-delà d'un certain seuil, car d'une part le bruit de fan tend à augmenter avec un diamètre plus grand, d'autre part parce que certaines configurations plus compactes des moteurs, et/ou à rotors ouverts (sans capots de nacelle ou d'entrée d'air), limitent les possibilités d'atténuation du bruit. Enfin parce que les « trade-offs » entre bruit et consommation de carburant deviennent de plus en plus critiques : avec l'augmentation de la taille des moteurs, l'installation du système propulsif peut avoir un impact plus sévère sur l'aérodynamique, la masse totale de l'avion et le bilan global.

La communauté aéronautique a mis en œuvre depuis une vingtaine d'années, via l'OACI<sup>1</sup>, le principe d'une « approche équilibrée » de la gestion du bruit au voisinage des aéroports, reposant sur 4 piliers : la réduction du bruit à la source (aéronefs plus silencieux), la planification/gestion de l'utilisation des terrains, les procédures opérationnelles d'atténuation de bruit et les restrictions à l'exploitation. Le principe consiste à mettre en œuvre des combinaisons optimales de solutions y compris du point de vue économique. Le but visé est que le bruit individuel des avions et le bruit cumulé du trafic autour des aéroports soient les plus faibles possibles (au-dessous des critères de gêne), là où il atteint les zones habitées, où résident, dorment, travaillent ou étudient des personnes. Ceci est d'autant plus difficile à atteindre que la réduction du bruit est mise à profit parfois pour des implantations se rapprochant des pistes. À cela s'ajoutent des redevances liées au bruit, et des exigences spécifiques mises en place par les aéroports « critiques ».

On notera que des unités de bruit et des critères / indicateurs à base d'indices acoustiques énergétiques et de surfaces à l'intérieur d'iso-contours de bruit sont utilisés pour gérer les questions de bruit global cumulé du trafic aérien sur un aéroport donné au cours d'une période donnée (jour, soir, nuit, 24 heures ou année).

Des normes de bruit ont été mises en place tôt dans l'histoire de l'aviation, aux États-Unis et en Europe, elles ont été harmonisées au niveau international par l'OACI. La norme a été et continue d'être mise à jour régulièrement, notamment en ce qui concerne son niveau de sévérité, avec des limites de certification de plus en plus exigeantes pour les nouveaux appareils, et des restrictions d'exploitation pour les appareils anciennement certifiés. Ceci entre dans la spirale vertueuse alimentée par les aviateurs qui s'imposent des marges confortables par rapport à la norme en vigueur pour tout nouveau projet (soumis à la pression des clients potentiels, et dans un contexte très concurrentiel, eux-mêmes exigeant des garanties de bruit permettant de satisfaire les règlements aéroportuaires locaux), marges automatiquement répercutées au niveau des motoristes.

L'OACI, les constructeurs et les organismes de recherche visent des objectifs de réduction de bruit dans chaque catégorie d'avions, typiquement à l'horizon de 10 ans et 20 ans pour l'OACI. Depuis l'avènement des premiers avions à réaction, le bruit perçu a d'ores et déjà été divisé par 4 environ. Malgré le challenge grandissant pour continuer à réduire le bruit des moteurs et des avions, les objectifs demeurent ambitieux pour le futur, s'appuyant sur des développements technologiques, des configurations avion et systèmes propulsifs non-conventionnelles, des progrès dans les outils et méthodes, à l'intérieur d'un cadre fortement modulé par les nécessaires « trade-offs » compte tenu de l'ensemble des critères à satisfaire, et contraint par les exigences de sécurité incontournables.

#### **b. Des émissions gazeuses et d'autres polluants**

Les moteurs produisent outre le bruit, diverses émissions, comme le montre la figure 3. La combustion produit de la vapeur d'eau et du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), auxquels s'ajoutent des oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>), ainsi que des quantités résiduelles d'hydrocarbures, de monoxyde de carbone (CO) et d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), enfin de suies et de particules.

---

<sup>1</sup> OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale, rattachée à l'Organisation des Nations Unies, créée par la Convention de Chicago en 1944.

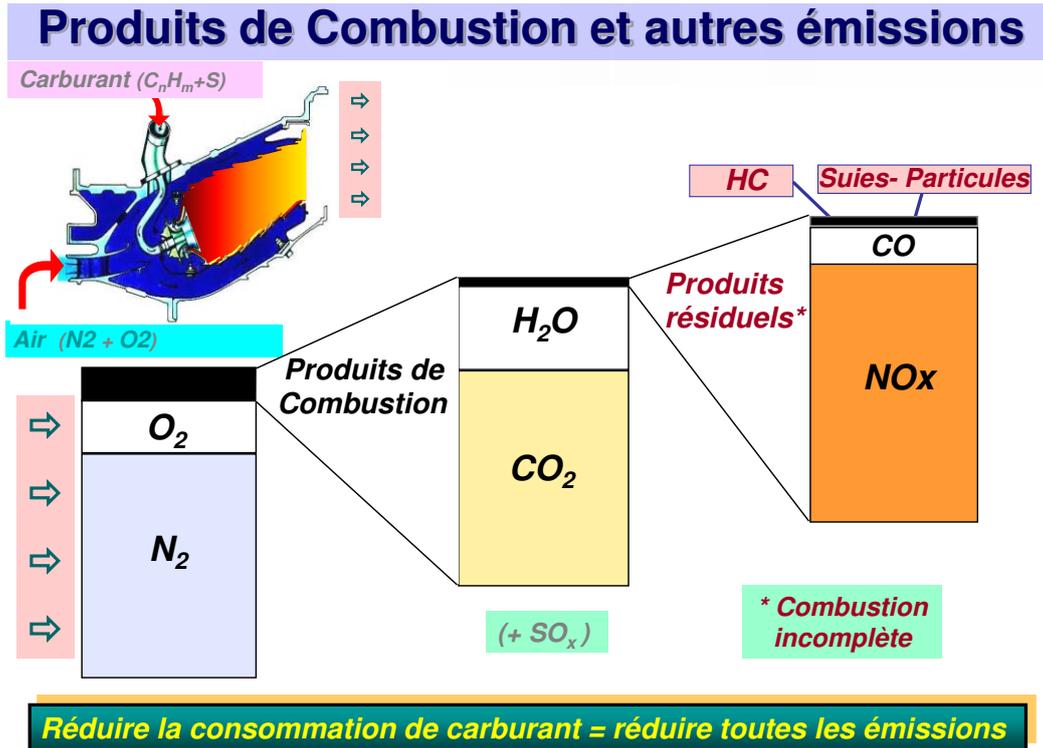


Figure 3. Principales émissions des moteurs d'avion

Ces émissions ont différents effets sur l'environnement : au niveau de la qualité de l'air (d'où un impact potentiel sur la santé des êtres humains et des autres êtres vivants), et d'une contribution au réchauffement climatique. Ces effets sont précisés dans le diagramme de la figure 4.

Impact environnemental des émissions des moteurs d'avion			
Type d'émissions		Problématiques principales	
		Qualité de l'Air	Réchauffement climatique
Oxydes d'azote* ( $NO_x$ )		Production d'ozone $\Rightarrow$ effet sur la <u>santé</u> , la visibilité	Effet de serre $\nearrow$ (ozone $\nearrow$ et méthane $\searrow$ ) $\Rightarrow$ FR $\nearrow$
Hydrocarbures (HC) imbrûlés*, polluants nocifs		Production d'ozone $\Rightarrow$ effet sur la <u>santé</u> , la visibilité	---
Monoxyde de carbone* (CO)		Production d'ozone $\Rightarrow$ effet sur la <u>santé</u>	---
Suies (indice de fumée : SN*) Particules*		Aérosols, particules $\Rightarrow$ effet sur la <u>santé</u>	Traînées de condensation/ Cirrus induits $\Rightarrow$ effet de serre $\nearrow$ $\Rightarrow$ FR $\nearrow$
Vapeur d'eau ( $H_2O$ )		---	Traînées de condensation/ Cirrus induits $\Rightarrow$ effet de serre $\nearrow$ $\Rightarrow$ FR $\nearrow$
Gaz carbonique* ( $CO_2$ )		---	Effet de serre $\nearrow$ $\Rightarrow$ FR $\nearrow$
*sujet à réglementation moteur (norme/certification) OACI SN = « Smoke Number »		FR = Forçage Radiatif	

Figure 4. Impact des émissions des moteurs d'avion sur l'environnement

Comme indiqué par le code couleur utilisé dans ce diagramme, certaines émissions ( $\text{NO}_x$  et particules) agissent sur les deux domaines.

Comme pour le bruit, les émissions gazeuses et les particules produites par les moteurs sont fonction du niveau de poussée utilisé, et dépendent donc des performances globales de l'avion. Par ailleurs, à niveau de poussée donné, le débit de carburant et les émissions dépendent directement de la consommation spécifique des moteurs. En particulier, les émissions de gaz carbonique sont directement proportionnelles à la consommation de carburant : à 1 kg de kérosène aviation (Jet A1) correspondent environ 3,16 kg de  $\text{CO}_2$ .

Toute amélioration des performances moteurs conduisant à une réduction de leur consommation de carburant bénéficie à toutes les émissions.

Les émissions de gaz ( $\text{NO}_x$ , HC, CO, fumées) des moteurs sont soumises à une réglementation internationale (OACI) intégrée dans le processus de certification des moteurs, appliqué avec des mesures spécifiques lors d'essais dédiés au banc. La sévérité de la norme a été progressivement accrue pour les  $\text{NO}_x$ . Une norme provisoire a été créée par l'OACI pour les particules non volatiles, qui préfigure une norme définitive à venir. Une attention de plus en plus grande est portée aux particules, qui ont un impact de plus en plus préoccupant sur la qualité de l'air et la santé des populations dans le monde, et jouent aussi un rôle dans le réchauffement climatique (voir ci-dessous).

Une norme applicable aux avions a également été élaborée par l'OACI limitant les émissions de  $\text{CO}_2$  des nouveaux types d'appareils devant être certifiés.

Comme pour le bruit, l'OACI, les constructeurs et les organismes de recherche visent des objectifs de marges pour les moteurs et les avions futurs par rapport aux normes relatives aux émissions. Prenant en compte les « trade-offs » impliqués, pour la première fois, des objectifs *intégrés* pour le bruit, les émissions de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{NO}_x$ , à 10 et 20 ans, ont été agréés au niveau de l'OACI, en 2019.

### **Aviation et effet de serre**

L'effet de serre d'origine naturelle est dû pour une grande part à la vapeur d'eau dans l'atmosphère. C'est le phénomène équilibré énergétiquement entre radiations incidentes et radiations réfléchies qui rend la planète habitable pour les êtres vivants. Le problème survient à cause des gaz à effet de serre d'origine anthropique qui créent un déséquilibre du phénomène dans l'atmosphère terrestre conduisant au réchauffement climatique et à son cortège de méfaits.

De façon très simpliste, les principaux gaz à effet de serre d'origine anthropique sont le gaz carbonique, le méthane, les halocarbones et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) auxquels s'ajoutent divers autres effets, résumés dans la figure 5. Les phénomènes en jeu sont extrêmement complexes, impliquant de très nombreux composants, facteurs, actions et rétroactions non décrits ici.

L'effet du gaz carbonique est problématique, en raison de la résidence prolongée d'une part significative des émissions de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère (jusqu'à plusieurs siècles), avec un effet cumulatif sur sa concentration, qui est passée de 280 ppmv<sup>2</sup> environ pendant la période préindustrielle (1750) à 417 ppmv en 2021, une augmentation d'environ 50%, avec une accélération de plus en plus notable au cours des dernières décennies.

---

<sup>2</sup> ppmv: partie par million en volume

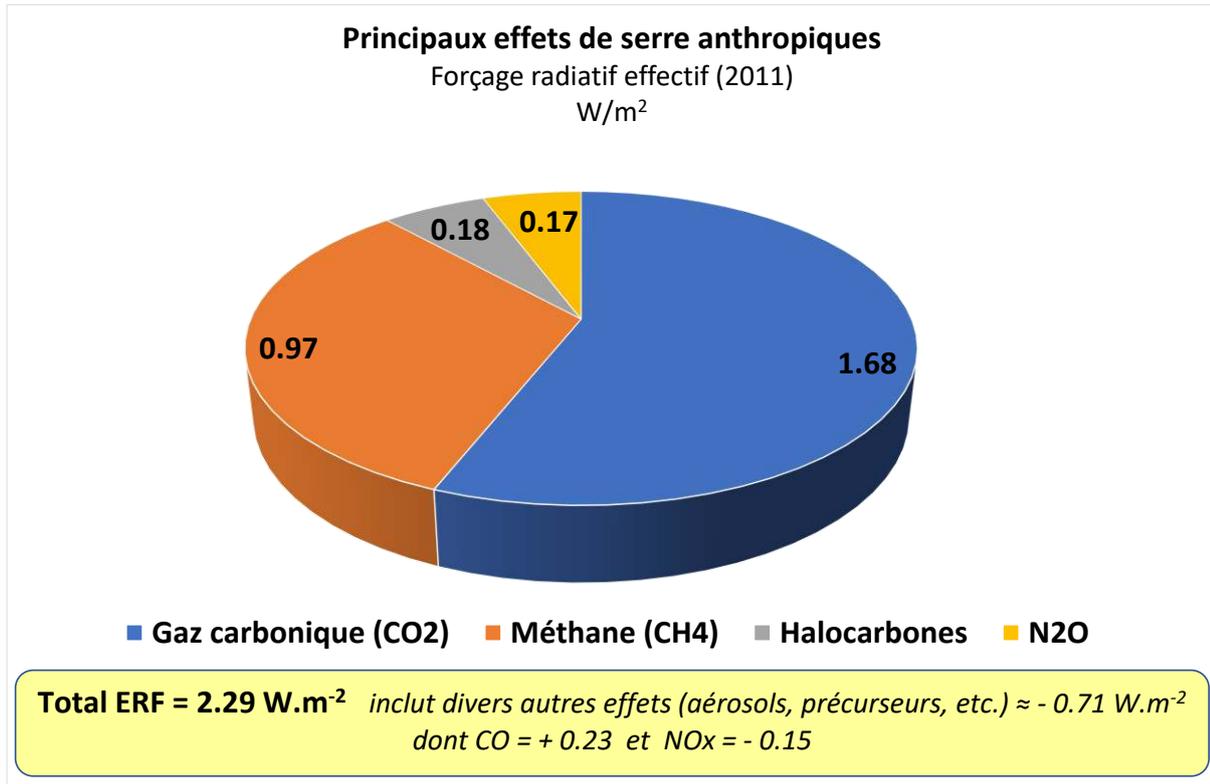


Figure 5. Principaux effets de serre anthropiques

Les effets de serre liés aux émissions de l'aviation se distinguent des effets anthropiques globaux non seulement par les niveaux, beaucoup plus faibles en ce qui concerne l'aviation, mais aussi par une hiérarchie très différente des effets, ou le sens même de leur influence pour certains. On notera notamment que le méthane, le second effet de serre le plus important dans le bilan global, a un effet opposé via les NO<sub>x</sub> dans le bilan de l'aviation, tandis que les NO<sub>x</sub>, qui ont un effet de serre net dans le bilan de l'aviation, ont un effet opposé dans le bilan global. Cependant, le gaz carbonique en tant que gaz à effet de serre figure au premier plan dans chaque bilan.

En 2018, l'aviation a émis environ 2,4% du CO<sub>2</sub> global. En 2011, le forçage radiatif effectif (ERF) de l'aviation représentait environ 3,5% de l'ERF global anthropique (respectivement 80,4 et 2290 mW.m<sup>-2</sup>). Il est possible que ces pourcentages augmentent dans le futur, en fonction du taux de croissance du trafic aérien, ainsi évidemment que de l'évolution des niveaux d'activité et des actions prises dans les différents secteurs.

En 2018, les émissions de CO<sub>2</sub> de l'aviation ont dépassé 1 milliard de tonnes. En 2019, les émissions globales de CO<sub>2</sub> atteignaient environ 42 milliards de tonnes.

Les modes d'action et l'impact des émissions de l'aviation sur le climat diffèrent beaucoup d'un type d'émissions à un autre, les mécanismes sont souvent complexes et affectés de larges incertitudes, notamment concernant les effets de serre « non-CO<sub>2</sub> », à la différence de l'impact du gaz carbonique, qui lui est assez bien cerné.

Les principaux effets de serre de l'aviation sont résumés dans le graphique suivant.

Les effets non-CO<sub>2</sub> sont prédominants (2/3) mais leur niveau n'est estimé qu'avec un très faible niveau de confiance. C'est le cas en particulier pour les traînées de condensation persistantes et les cirrus induits par elles – dont l'effet radiatif est environ 1,7 fois celui du CO<sub>2</sub> – mais dont le temps de résidence est court dans l'atmosphère (entre quelques heures et quelques jours). En outre, leur effet radiatif n'est pas associé à un effet cumulatif comme pour le CO<sub>2</sub>.

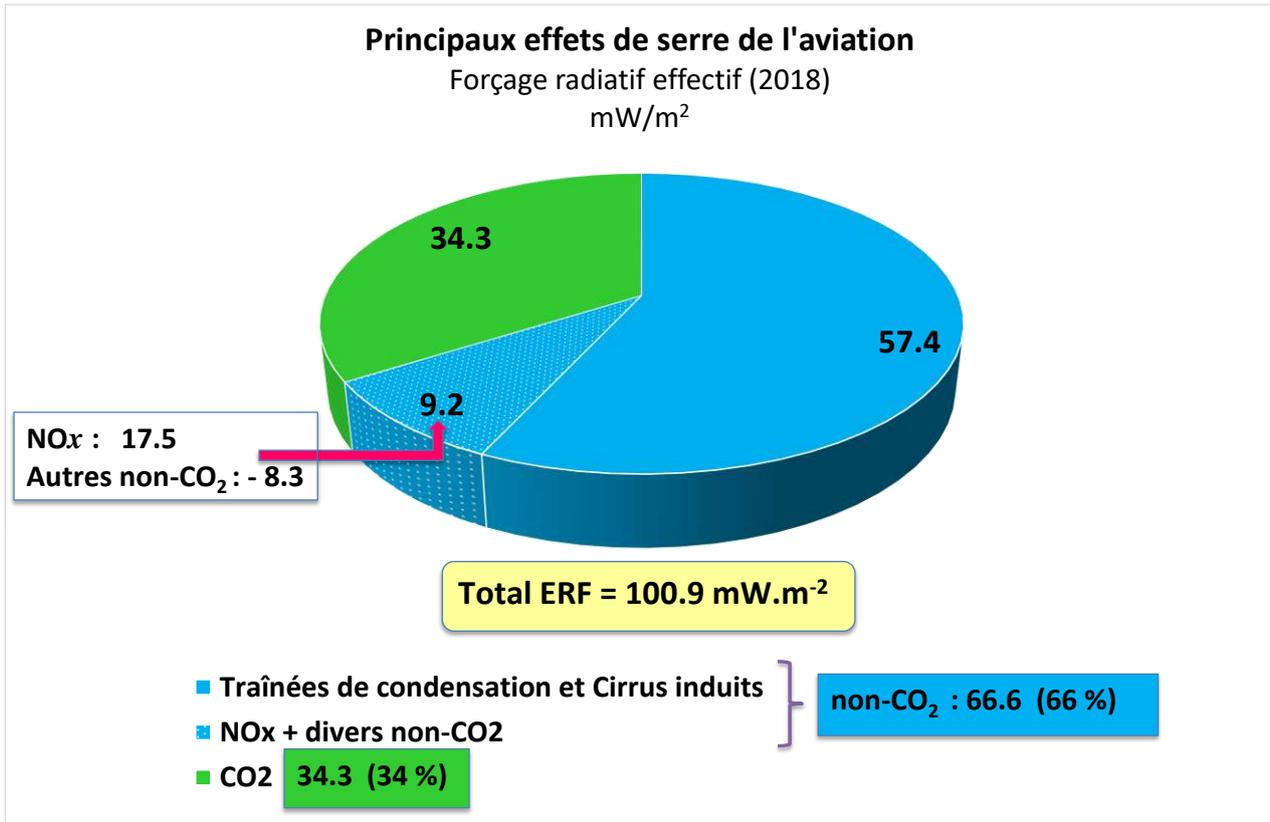


Figure 6. Principaux effets de serre attribués à l'aviation

D'autres indicateurs que le forçage radiatif sont utilisés pour caractériser l'effet temporel des émissions sur le climat (très variable selon les gaz), comme le pouvoir de réchauffement global, obligatoirement associé à un horizon de temps. Le réchauffement climatique est par ailleurs caractérisé par l'élévation de la température moyenne de surface et l'élévation du niveau des mers, parmi les paramètres fondamentaux.

Bien que l'effet direct des émissions de vapeur d'eau soit négligeable par rapport aux flux naturels du cycle de l'eau, ceux-ci étant 100000 fois plus forts, l'impact potentiel significatif des traînes de condensation et des cirrus à court terme sur le forçage radiatif provoqué par l'aviation est à prendre en compte, d'autant plus que si on pouvait le diminuer à court terme, cela permettrait de gagner du temps, en attendant l'introduction de moyens plus longs à mettre en œuvre pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de l'aviation. Tout ceci justifie que cet effet fasse l'objet de recherches très approfondies par les scientifiques, dont les progrès sont cependant ralentis par la complexité des phénomènes physico-chimiques en jeu. Enfin, on notera que les particules émises par les moteurs ont probablement un effet d'ensemencement des nuages qui favorise la formation des cirrus induits, là encore un phénomène complexe nécessitant des recherches spécifiques.

### Moteurs et avions face aux enjeux climatiques

Comme pour le bruit, une approche holistique est adoptée par les acteurs de l'aviation depuis de nombreuses années en vue de réduire la consommation de carburant, les émissions de CO<sub>2</sub> et les autres, en combinant les technologies, stimulées par des normes déjà évoquées, l'optimisation des opérations, de la gestion du trafic aérien, des infrastructures, et le développement de carburants à moindre émission de CO<sub>2</sub>, ou plus proche de la neutralité carbone, comme certains biocarburants.

Pour compléter le dispositif, des mesures « basées sur le marché » sont envisagées, qui peuvent comprendre des taxes, des redevances, et des systèmes de compensation carbone par échanges intersectoriels de quotas de CO<sub>2</sub> destinés à compenser les surplus de consommation liés à l'augmentation du trafic. Un tel système a été mis en place au niveau européen dans la dernière décennie, dans lequel l'aviation a été incluse, puis plus récemment au niveau des émissions du trafic international par l'OACI.

Les progrès technologiques accomplis à la fois au niveau des moteurs, de l'intégration des systèmes propulsifs, de l'aérodynamique, des matériaux et de l'allègement des structures, ont permis de diviser par 4 environ la consommation de carburant des avions depuis les débuts de l'aviation commerciale équipée de

turboréacteurs, avec notamment l'étape importante des moteurs à double flux, qui, comme on l'a vu, réduisaient aussi le bruit.

Au fur et à mesure de la montée des préoccupations concernant le réchauffement climatique, la pression sur tous les secteurs s'est accrue en vue de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et de gaz à effet de serre. Ceci s'est traduit initialement par les Conventions de Rio<sup>3</sup> et le protocole de Kyoto<sup>4</sup> au niveau international, poursuivi par la CCNUCC<sup>5</sup>.

L'aviation, cible traditionnellement facile à viser, n'a pas attendu d'être « montrée du doigt », pour se fixer des objectifs ambitieux de réduction de ses émissions, afin de contribuer aux efforts de l'ensemble des secteurs. De tels objectifs ont été ou sont affichés aux horizons 2020, 2035, 2050, au niveau de l'industrie (constructeurs et opérateurs), de gouvernements ou entités nationales (NASA), européennes (ACARE<sup>6</sup>, Eurocontrol<sup>7</sup>, SESAR<sup>8</sup>, Clean Sky<sup>9</sup> et Clean Aviation<sup>10</sup>) et internationales (IATA, OACI, CCNUCC). Ces objectifs sont aussi discutés au sein de nombreuses et diverses organisations, associations et académies.

Les objectifs climatiques globaux des dernières années se sont focalisés autour de la nécessité de prendre des mesures urgentes pour que la trajectoire de l'augmentation de température terrestre ne dépasse pas 2°C ou préférablement 1,5 °C, afin d'éviter des conséquences catastrophiques irréversibles avant la fin du siècle. L'alerte a été donnée notamment dans les derniers rapports du GIEC<sup>5</sup>.

Beaucoup de réflexions ont été stimulées par la pandémie de covid-19, portant sur l'opportunité à saisir de rafraîchir un certain nombre de paradigmes socio-économiques et environnementaux pour mieux prendre en compte les effets environnementaux au moment de la reprise économique. La Commission Européenne a lancé en 2020 le Pacte Vert pour l'Europe (European Green Deal), vaste plan d'action visant notamment la neutralité climatique en 2050, tous secteurs confondus.

En lien avec les objectifs globaux, et dans le sillage des questions posées par les conditions de reprise du trafic aérien après la pandémie qui l'a massivement affecté, le secteur de l'aviation affiche des objectifs encore plus ambitieux que par le passé, visant « zéro-émission » de CO<sub>2</sub> en 2050, avec une étape intermédiaire prévoyant des émissions minimales de CO<sub>2</sub> pour les nouveaux avions commerciaux entrant en service à partir de 2035. Ces objectifs, qui se déclinent de manière différenciée selon les catégories d'avions, reposent sur la poursuite des améliorations technologiques et opérationnelles, le développement, la certification et l'utilisation massive de carburants durables, des configurations d'avions électriques ou hybrides-électriques (essentiellement pour les petits avions), enfin l'utilisation de l'**hydrogène** sous diverse formes : piles à combustibles pour des avions de petite taille et certains systèmes d'appoint, moteurs à combustion d'hydrogène et carburants synthétiques fabriqués à partir d'hydrogène. Des combinaisons des diverses technologies mentionnées, sont envisagées, selon les applications possibles. Les multiples configurations concernées impliquent le développement de nouveaux équipements, critères, méthodologies, outils, processus d'essais, validation et certification (complétés ou nouveaux), infrastructures, adaptés aux

<sup>3</sup> Conventions de Rio : adoptées lors du Sommet de la Terre, de Rio de 1992, pour développer des synergies sur les questions d'intérêt mutuel (dont le réchauffement climatique fait partie).

<sup>4</sup> Protocole de Kyoto : accord international signé en 1997 visant à réduire les émissions des principaux gaz à effet de serre

<sup>5</sup> CCNUCC : la **Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques**, organisme de l'ONU, est l'une des Conventions de Rio, ayant pour objectif de prévenir les actions humaines menaçant le système climatique. Elle organise des réunions annuelles depuis son entrée en vigueur (1994): les Conférences des Parties (COP). Cet organisme se base notamment sur les travaux du **GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat)**, dont les rapports font périodiquement la synthèse des travaux au niveau mondial des experts scientifiques et techniques les plus pointus relatifs à l'atmosphère, au climat, aux effets du réchauffement climatique, aux prévisions, émettant des recommandations en matière d'actions préventives ou d'atténuation.

<sup>6</sup> ACARE : **Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe** (conseil de la recherche pour l'aviation et l'innovation en Europe).

<sup>7</sup> Eurocontrol : Organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne fondée en 1960

<sup>8</sup> SESAR : **Single European Sky ATM Research**: programme du "ciel unique" de la Commission Européenne

<sup>9</sup> Clean Sky: initiative technologique conjointes de recherche aéronautique visant des objectifs dérivés d'ACARE, cofinancées par la Commission Européenne et les constructeurs aéronautiques.

<sup>10</sup> Clean Aviation: nouvelle initiative technologique conjointe de recherche aéronautique visant des objectifs très exigeants pour l'aviation, afin de contribuer aux objectifs globaux très ambitieux du Pacte Vert pour l'Europe...

catégories d'aéronefs, à leurs besoins de puissance, et à l'ensemble des exigences propres au domaine aéronautique.

Au niveau des engagements officiels découlant des textes législatifs européens, les objectifs sont déclinés au niveau européen à travers les objectifs du programme *Clean Aviation* de la Commission Européenne, officiellement lancé en novembre 2021, faisant suite au programme Clean Sky 2. Ils se résument ainsi : *développement de technologies de l'avion contribuant à la neutralité climatique en 2050; le développement et la démonstration devront permettre l'introduction d'avions, au plus tard en 2035, émettant 30% à 50% de moins d'émissions par rapport aux meilleurs avions actuels, et le remplacement de 75% de la flotte mondiale de l'aviation civile d'ici à 2050. Ceci, combiné avec l'utilisation de carburants durables, permettra de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des avions jusqu'à 90%, ou zéro émission de CO<sub>2</sub> en utilisant l'hydrogène comme source d'énergie.* Les objectifs ainsi affichés sont d'un niveau d'ambition extrêmement élevé, impliquant de franchir de nombreux obstacles et lever de nombreuses incertitudes de nature technique, réglementaire, infrastructurelle, industrielle, logistique, économique et financière. Il est important de rappeler que les bénéfices environnementaux et le calendrier correspondant à ces évolutions sont conditionnés par plusieurs facteurs clés, comprenant notamment :

- capacité de production des quantités nécessaires de carburants durables ou d'hydrogène,
- capacité de production des carburants synthétiques et de l'hydrogène à partir d'énergie décarbonée,
- capacité d'investissement, réalisation et certification pour les infrastructures de production, transport et aéroportuaires nécessaires,
- capacité d'organisation logistique,
- support réglementaire et mesures incitatives appropriés fourni par les gouvernements et organismes concernés,
- ressources appropriées pour concevoir, développer et construire les nouveaux moteurs et avions, avec le plus haut degré d'exigence maintenu dans la conception pour réduire la consommation d'énergie, quel que soit le vecteur énergétique utilisé, car même sans CO<sub>2</sub>, l'énergie a un prix (supérieur à celui du carburant aviation traditionnel), et la vapeur d'eau n'est pas neutre par rapport à l'environnement, comme on l'a vu,
- conditions économiques viables pour l'ensemble des acteurs concernés, avec les supports financiers nécessaires (pour rendre les prix abordables, inciter),
- conditions de transition viables avec un trafic mixte entre avions actuels et ceux de nouvelle génération.
- niveau de sécurité maximal pour les opérations au sol et en vol, égal ou supérieur au niveau actuel : ceci est une exigence absolue, qui ne doit en aucun cas être infléchie ou contournée, malgré les fortes pressions économiques et environnementales (climat) qui ne cessent de croître.

Cela représente autant de défis de grande ampleur, et qui s'étendent bien au-delà du champ traditionnel des acteurs du secteur aérien.

Cela est en train d'entraîner des évolutions considérables dans tout le domaine de la recherche, du développement et de l'industrialisation du secteur aéronautique, qui nécessiteront une sérieuse mise à jour de toutes les données exposées précédemment, sans toutefois bouleverser les réalités physiques fondamentales sous-jacentes.

### **La dimension environnementale dans l'aviation**

La dimension environnementale de l'aviation, qui est multiple, est illustrée par les diagrammes schématiques en annexe :

- l'annexe 1 décrit la scène sur laquelle de nombreux acteurs jouent la « partition » environnementale de l'aviation,
- l'annexe 2 représente les multiples dimensions des activités liées au bruit des avions,
- l'annexe 3 représente les multiples dimensions des activités liées aux émissions des avions.

Ces diagrammes représentent la situation « classique » précédant le développement des nouvelles technologies de rupture évoquées ci-dessus, qui viendront inévitablement ajouter de nouveaux axes, de nouvelles interactions et des degrés de complexité supplémentaires.

Cette dimension environnementale est quasi-naturelle pour l'aviation, appelée depuis ses origines à satisfaire des exigences de moindre bruit et de sobriété de consommation d'énergie, les constructeurs devant satisfaire

une demande sans cesse plus exigeante et concurrentielle pour des appareils capables d'emporter la charge marchande maximale pour la plus longue mission possible, en consommant le moins de carburant possible (poste de dépense très important pour l'opérateur), capables de desservir des aéroports à fort trafic, aux règlements de bruit et taxes discriminants, pour satisfaire des opérateurs fonctionnant dans un contexte comportant de nombreux aléas et des marges économique-financières restreintes.

Les exigences de sécurité et de certification sont dans tous les cas une priorité absolue, quels que soient les développements futurs envisagés. Les nécessaires « trade-offs » environnementaux et tous ceux qui conditionnent la faisabilité, les performances et la viabilité des moteurs et des avions constituent des contraintes, en particulier pour certaines configurations utilisant des fans de grand diamètre. Ces « trade-offs » ne sont pas simples à gérer dans la mesure où ils correspondent à des problématiques très différentes mais avec des causes en partie communes, mélangeant des problèmes locaux distincts (bruit des avions au voisinage d'aéroports), des problèmes locaux diffus (mélange de sources aviation et hors aviation) et de qualité de l'air (NO<sub>x</sub>, particules), effets globaux sur le climat (CO<sub>2</sub>, vapeur d'eau, NO<sub>x</sub> et particules). Pour la conception de nouveaux moteurs, se pose la question de la température entrée turbine : plus elle est élevée, moindre est la consommation spécifique, mais cela favorise les émissions de NO<sub>x</sub>, obligeant à recourir à des technologies de chambre de combustion et d'injection du carburant plus performantes. L'utilisation de carburants durables ou de l'hydrogène nécessitera des investigations et développements appropriés afin d'aboutir à des solutions optimales en termes d'émissions.

Pour réduire les impacts environnementaux, les technologies et configurations optimales dépendront dans tous les cas de la classe (taille) d'avion ou moteur considérée.

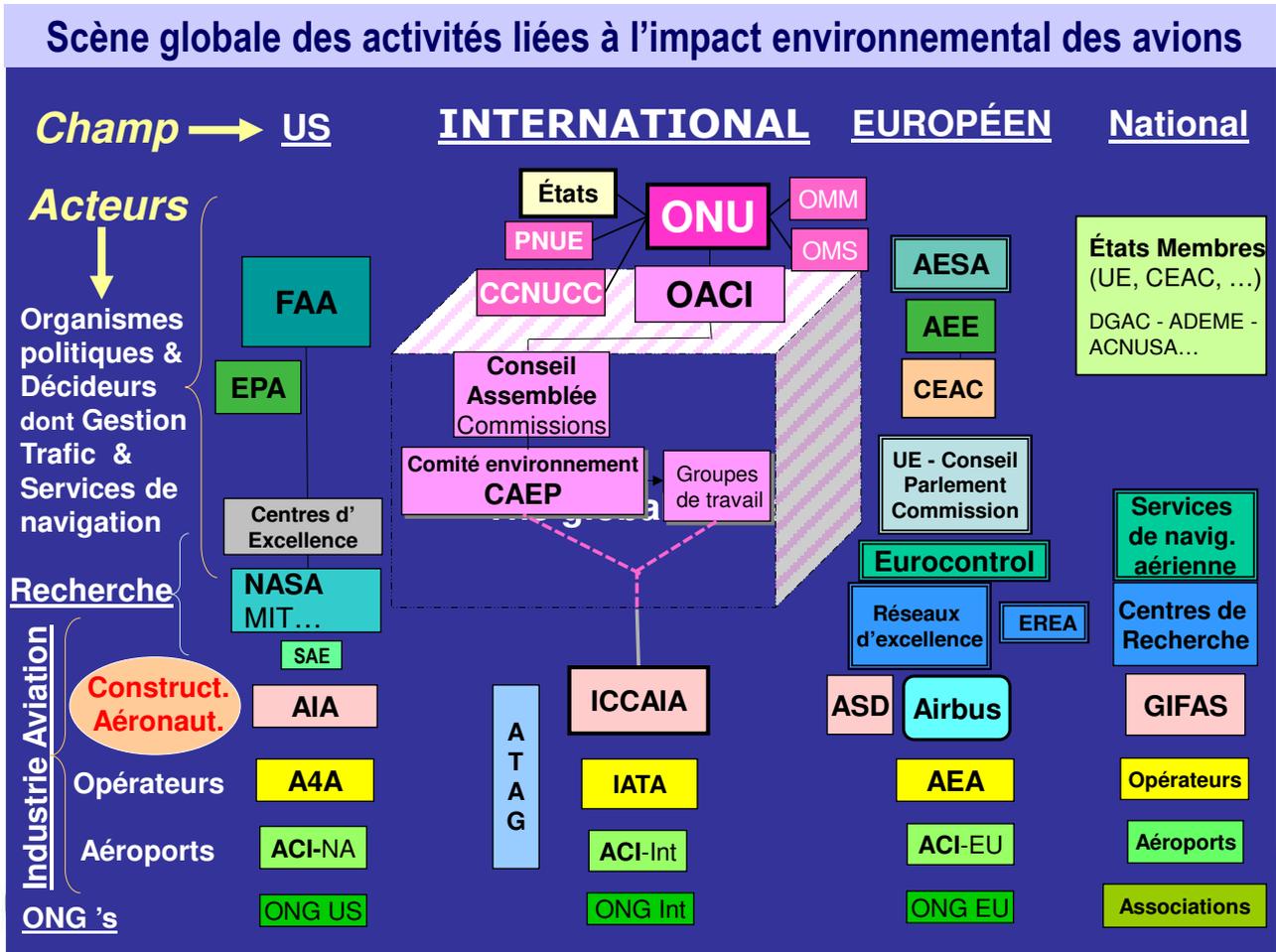
Tous les avions et moteurs récents ont été conçus avec des objectifs environnementaux ambitieux intégrés dans les exigences de base dès le stade de la conception, et cela va s'accroître fortement dans le futur, en particulier concernant la réduction des émissions en rapport avec le réchauffement climatique, et le niveau d'ambition, très difficile à atteindre aux dates annoncées, ne dépend pas que d'eux.

Le secteur aérien doit évidemment partager les préoccupations de l'ensemble de la société humaine concernant le climat, et contribuer aux solutions à mettre en œuvre. Il le fait, car la forte pression sur ce sujet est compréhensible et justifiée. Cependant, le problème est *global* et doit être traité globalement, en prenant en compte tous les critères et facteurs importants. Il serait très contreproductif de céder, sous les fortes pressions, aux réflexes primaires en faveur d'un repli systématique de l'activité aérienne, en adoptant des mesures imposées a priori, répartissant uniformément les efforts des secteurs. Pour être efficaces, les mesures à prendre doivent être précédées d'études approfondies, holistiques, dans lesquelles entrent évidemment les problématiques environnementales et énergétiques, mais aussi les critères de choix de société, les priorités, les impacts économiques, sociaux et sociétaux. Les mesures qui en sortiront ne peuvent être prises qu'à un niveau *mondial*, acceptables pour tous les pays en fonction des aspirations et de la situation de chacun d'eux.

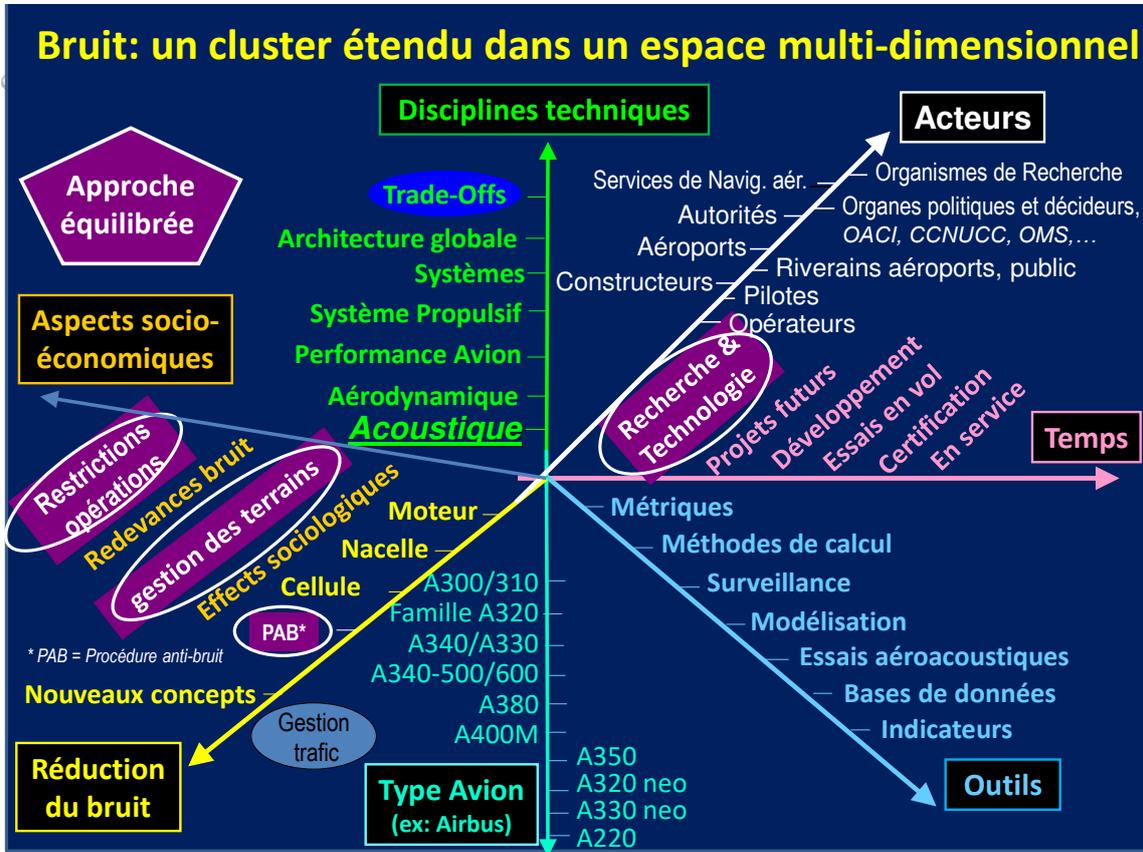
*Ce qu'on appelle « sagesse » n'est au fond qu'une perpétuelle « réflexion faite », c'est-à-dire la non-action comme premier mouvement.*

*Emil Michel Cioran*

## Annexe 1 – Scène des activités environnementales liées aux avions



## Annexe 2 – Espace multi-dimensionnel du bruit des avions



## Annexe 3 – Espace multi-dimensionnel des émissions des avions

