

Réflexion sur la problématique du réchauffement climatique et la contribution de l'aviation (au problème et aux solutions)

Alain Joselzon – 9 décembre 2021

« Le temps de la réflexion est une économie de temps. » (Publilius Syrus)

« Il faut agir en homme de pensée et penser en homme d'action. » (Henri Bergson - Ecrits et paroles - message au congrès Descartes - 1937)

Comment aborder la problématique du réchauffement climatique ?

La phrase de Bergson s'applique à toutes les situations, et notamment aux plus ardues. Face à un problème d'une telle complexité, réfléchir au préalable, allant dans un sens guidé par la visée des résultats à atteindre, donc des actions nécessaires, et agir efficacement dans un sens guidé par la réflexion, sont les deux faces du même combat, difficile mais crucial, qu'est la lutte contre le réchauffement climatique.

Après avoir rappelé très brièvement les dimensions de la problématique, les éléments qui participent de sa dynamique et conditionnent les solutions, nous aborderons le sujet à partir d'un schéma simple, qui évidemment ne saurait se substituer à une ébauche de plan d'action, mais qui pourrait servir de support à des réflexions préalables.

Cette étude pourrait constituer un brouillon de lettre ouverte aux spécialistes du réchauffement climatique, aux institutions et aux décideurs concernés.

Problème crucial

Il est clair que le réchauffement climatique est un problème fondamental, global, qui concerne tous les secteurs et toutes les régions du Monde, nécessitant de prendre des actions vigoureuses, cohérentes et efficaces à court, moyen et long terme, dans de nombreux domaines.

Les premières parties du sixième rapport du GIEC qui viennent d'être publiées soulignent comme c'était attendu la gravité extrême du phénomène, de ses conséquences, et l'urgence absolue des actions à prendre pour espérer en diminuer l'ampleur et minimiser les effets irréversibles.

La pression va donc encore s'amplifier sur tous les secteurs, et cela indépendamment de leur niveau de contribution. Le transport aérien est une cible traditionnelle facile, objet d'un fractionnement intellectuel, si ce n'est une tendance schizophrène, entre d'une part les besoins et aspirations individuels en termes de mobilité et d'autre part les préoccupations théorisées et les sentiments vagues de culpabilité humaine et sociétale partagée sur le climat. Ces derniers sont accrus naturellement par les taux de croissance élevés du trafic aérien des dernières années et par des effets non-CO₂ potentiels significatifs bien que très incertains.

Problème global

Il faut d'abord réaliser que seules des solutions appliquées et coordonnées à l'échelle mondiale sont en mesure de juguler un problème global par nature, multidimensionnel, ardu et complexe.

Dans une perspective holistique portant sur l'écosystème-monde, avec l'objectif de satisfaire la trajectoire de température moyenne visée, plutôt que de fixer des objectifs uniformes à tous les

Avertissement : Ce texte reflète uniquement l'opinion de son auteur et n'engage en aucune manière la parole officielle de l'Académie de l'air et de l'espace.

secteurs et de prendre des mesures restrictives qui en découlent, sous la très forte pression (compréhensible et justifiée) liée à la hantise omniprésente, obsessionnelle, croissante du problème, il faut éviter de se précipiter aveuglément sur les solutions « évidentes » : il faut résister aux pressions immédiates, prendre du recul, tenant compte, *au préalable*, de *tous* les facteurs et critères majeurs en jeu, incluant les aspects énergétiques, les conséquences industrielles et socio-économiques régionales et globales, les besoins et aspirations de la société notamment en matière de mobilité, les contraintes et exigences propres à chaque secteur, l'acceptabilité sociétale : il est primordial d'agrée celle-ci au niveau international, compte tenu que le stade de développement, les besoins et les aspirations sont très variables dans le monde. (Transparaît ici la nécessité de prendre aussi en compte les dimensions régionales, nationales, territoriales et individuelles de la problématique, qui ont chacune leur importance, mais sur lesquelles cette étude très sommaire n'est pas focalisée). Dans la perspective évoquée, des critères objectifs et mesurables devront être proposés - prenant en compte les « bénéfiques » et les « coûts » économiques, sociaux et environnementaux des solutions, *au sens le plus large*, traduits par des indicateurs et des ratios pertinents, élaborés, évalués et agréés par la communauté internationale, combinant les facteurs en jeu avec une pondération bien dosée.

Il peut y avoir des combinaisons de solutions et d'objectifs sectoriels en fonction du temps plus optimales que d'autres pour aboutir à la trajectoire de température visée, si l'on définit des indicateurs et des ratios cohérents avec les critères sélectionnés.

La figure 1 est une première ébauche schématique d'un processus général qui pourrait être suivi articulant les études, décisions, actions et communications concernant l'enjeu du réchauffement climatique.

Étude, décision, action & communication sur le réchauffement climatique 1^{ère} ébauche d'un processus général

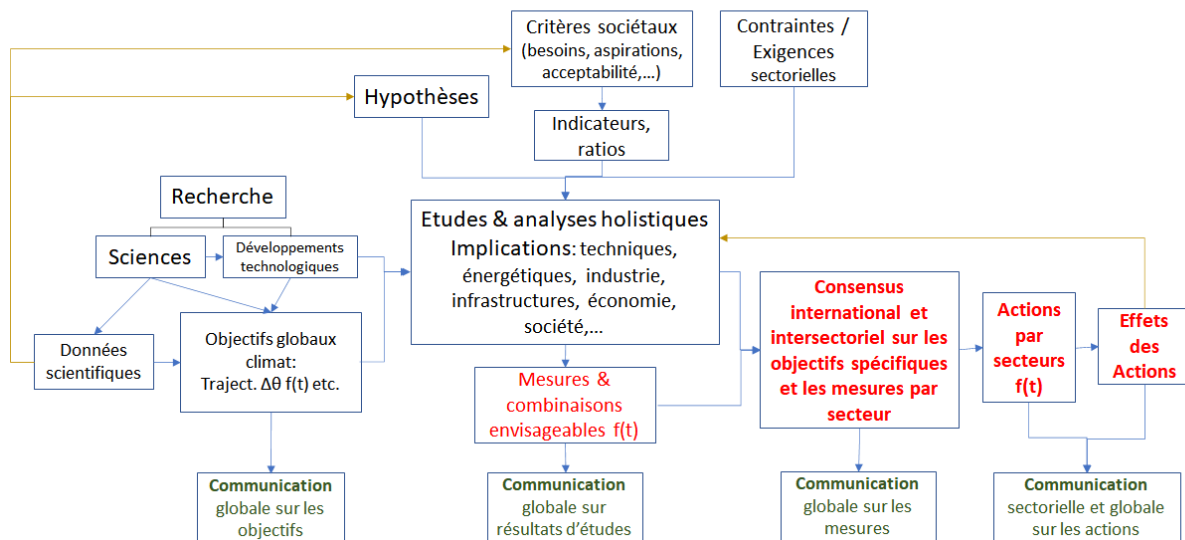


Figure 1 – Etude, Décision, Action et Communication concernant l'enjeu climatique

Cette figure est très simplifiée, voire simpliste ; il faudrait en particulier lui ajouter diverses boucles de rétroaction, notamment en direction des hypothèses, des objectifs globaux climatiques et des activités de recherche. Sans entrer dans le détail, nous tentons ci-après de développer très succinctement

certaines éléments-clés de la figure 1, en guise d'esquisse d'approche pour aborder les multiples facettes de la problématique.

Un tel schéma articulant le sujet de manière organisée n'est certes pas un plan d'action, comme cela a été dit en introduction. Mais un plan d'action, pour qu'il ait une chance de réussir, a besoin de s'appuyer sur un schéma organisé. Tel est le contexte ici.

- **Données scientifiques et recherche scientifique relative au climat**

Ces données, tributaires de très nombreux facteurs et processus concernant des aspects multiples et complexes, sont capitales pour poser correctement le problème du réchauffement climatique. Elles font appel à des études et analyses approfondies, des modélisations, des mesures. Elles impliquent de très nombreux spécialistes, des centres de recherche, des organismes regroupant et synthétisant les résultats d'innombrables d'études et travaux de recherche (GIEC en particulier au niveau international), des organismes politiques et des décideurs gouvernementaux et internationaux (UNEP, UNFCCC, OACI pour l'aviation, OMI pour le maritime, etc.). D'autres acteurs sont en général impliqués, du fait de leurs connaissances techniques, de leurs moyens d'essais et de mesures : c'est le cas avec l'industrie et les spécialistes de l'aéronautique.

Les incertitudes restent très grandes sur certaines données, malgré les progrès accomplis. Ceci est notamment le cas pour les rétroactions et les effets « non-CO₂ », comme par exemple l'effet des émissions de vapeur d'eau, via les traînées de condensation et les cirrus induits, susceptibles de jouer un rôle important dans le cas de l'aviation, ainsi que l'effet des émissions de particules. Tous ces phénomènes, dont certains sont propres à l'aviation, sont très complexes à modéliser, et des investissements importants sont nécessaires pour accélérer autant que possible l'ensemble de ces recherches, clés incontournables pour analyser les phénomènes en jeu, réduire les zones d'incertitude et apporter des solutions appropriées, efficaces, à ce problème par ailleurs urgent.

Plusieurs paramètres sont utilisés pour caractériser le réchauffement climatique qui lui-même se manifeste de différentes manières. Le forçage radiatif, le pouvoir de réchauffement global en font partie, et bien d'autres sont utilisés, mais aucun ne suffit seul à traduire le phénomène dans toute sa complexité et toutes ses dimensions.

Il faut par ailleurs distinguer les actions pour limiter le phénomène et celles pour se protéger de ses effets.

- **Recherche et développements technologiques**

La recherche de technologies capables d'augmenter l'efficacité en termes de ratios d'énergie utile disponible par rapport à l'énergie totale mise en œuvre ou en termes de réduction d'émissions pour une tâche ou une mission donnée est cruciale : elle a fait l'objet de travaux intensifs et accompli des progrès considérables dans tous les secteurs de l'industrie, dans le transport et dans l'aviation en particulier.

Les améliorations aérodynamiques, de la propulsion, des structures - allégées - ont permis de réduire considérablement la consommation de carburant des avions, avec des réductions

complémentaires significatives au niveau de l'optimisation des opérations et de la gestion du trafic.

Cependant, ces améliorations ne suffisent pas à compenser la croissance du trafic, et l'aviation s'est fixé des objectifs très ambitieux de croissance neutre en carbone à partir de 2020, et de réduction des émissions totales de CO₂ par un facteur 2 à l'horizon 2050.

En outre, compte tenu des efforts nécessaires pour ne pas dépasser les seuils de 2°C ou 1.5°C d'augmentation de la température moyenne à la surface de la terre, pour contenir les effets du réchauffement climatique - dont la sévérité apparaît de plus en plus critique d'un rapport du GIEC au suivant - l'aviation vise des objectifs d'émissions de CO₂ nulles ou très faibles à l'horizon 2050, par sens de responsabilité et solidarité, afin d'aligner son budget carbone sur les objectifs globaux à respecter, et envisage de mettre en service des appareils capables de telles performances, ou de performances intermédiaires à partir de 2030-2035.

Certaines technologies et configurations innovantes sont explorées visant des améliorations significatives au-delà des gains incrémentiels déjà obtenus par les moyens plus conventionnels, lesquels approchent des limitations physiques. Par ailleurs, les technologies qu'impliquent les objectifs d'émissions zéro ou faibles mettent en jeu des facteurs clés et des problématiques qui se combinent avec les facteurs aéronautiques seuls et/ou les affectent profondément, en particulier avec les questions énergétiques, d'infrastructure, de logistique, les questions réglementaires, politiques et économiques, liées à l'utilisation de l'électricité, aux carburants renouvelables, et à l'hydrogène. A ces catégories d'améliorations (configurations innovantes et utilisation de nouvelles sources d'énergie) sont inévitablement associées de grandes incertitudes, quant à leur faisabilité et à leurs gains environnementaux potentiels, compte tenu notamment des questions de faisabilité et d'efficacité technique, de sécurité, de certification, d'interdépendances, de compromis, de viabilité économique en jeu, compte tenu aussi des réponses variables selon le type et la taille des aéronefs. Sous l'angle environnemental doivent être prises en compte les analyses de cycles de vie complets des carburants et des matériels, ce qui représente un volume de travail considérable et des sources d'incertitudes très importantes.

Les axes des activités de recherche sont et vont être de plus en plus diversifiés, multidimensionnels et multidisciplinaires, et vont devoir se frayer des chemins optimisés faisant appel à des technologies très diverses. Des investissements très importants seront nécessaires dans la recherche, pour développer ces technologies, parfois partant de niveaux bas, et leur faire atteindre les niveaux de maturité nécessaires. La part des investissements en recherches consacrés aux technologies « traditionnelles » (turbomachines par exemple) doit rester correctement dosée par rapport à celle dédiée aux recherches innovantes, afin de maximiser les gains environnementaux globaux au niveau de la flotte future, en fonction du temps. En effet, les carburants consommés et les émissions, quels qu'ils soient, ainsi que les coûts opérationnels, seront toujours dépendants de technologies « classiques » (de turbomachines en particulier). Par ailleurs les objectifs de gains doivent être calibrés, ambitieux mais réalistes, répondant aux critères « S.M.A.R.T. » (spécifiques, mesurables, atteignables, réalistes et temporellement définis). Il faut éviter les effets pervers d'objectifs surdimensionnés impliquant un forçage technologique qui risquerait d'injecter indirectement des « pratiques déviantes » vis-à-vis des exigences de sécurité, notamment en introduisant des

technologies innovantes qui ne seraient pas suffisamment mûres (celles-ci sont critiques vis-à-vis de la sécurité, dans la mesure où elles apportent a priori des problématiques nouvelles et des conditions moins bien explorées, exigeant d'ailleurs que le cadre réglementaire soit revu et complété). De tels effets peuvent se propager à partir d'objectifs de recherche irréalistes, dans un contexte de fortes pressions conjuguées (économique et environnementale) pour introduire le plus tôt possible des technologies apportant des gains substantiels (voir annexe).

- **Hypothèses**

Comme pour tout problème dépendant de multiples facteurs et soumis à des incertitudes importantes, les hypothèses et les périmètres des études jouent un rôle majeur et doivent être parfaitement définis, explicités qualitativement et quantitativement. Ils doivent évidemment être vraisemblables et vérifiables.

- **Critères sociétaux**

Des actions appropriées à la lutte contre le changement climatique ainsi qu'à l'adaptation nécessaire devraient se baser sur des critères soigneusement établis, ayant trait aux domaines socio-économiques - dont une composante se situe au niveau des besoins et des aspirations fondamentaux de mobilité - et environnementaux (voir la section « Problème global » ci-dessus).

De tels critères doivent se traduire à travers des ratios concrets, significatifs, mesurables.

Ces critères et ces ratios doivent être agréés au niveau international, par des organismes reconnus, compétents et efficaces, techniquement et politiquement.

La prise en compte correcte des critères sociétaux est un prérequis essentiel pour aboutir à des plans d'actions équilibrés et partagés par la majorité des parties en jeu. Une réflexion approfondie doit être menée sur ces sujets, où il sera difficile de minimiser les facteurs subjectifs, mais qui devra néanmoins déboucher sur des éléments concrets. On peut anticiper que cette réflexion conduira à des travaux conséquents.

- **Contraintes et exigences sectorielles**

Les actions envisagées doivent être optimisées de façon à répondre le plus efficacement possible aux critères définis, tout en répondant aux exigences propres aux divers secteurs concernés. Pour le transport, et pour l'aviation en particulier, les exigences de sécurité et sûreté sont particulièrement élevées : elles font partie en fait des critères insurpassables à respecter. Compte tenu de l'augmentation des trafics concernés, ceci se répercute sur des exigences sociétales plus rigoureuses en termes de nombre d'accidents par mission ou par heure de transport, pour maintenir un taux d'accident par période de temps supportable.

L'importance des enjeux d'efficacité et de sécurité a été soulignée dans le paragraphe « Recherche et développements technologiques » ci-dessus.

- **Objectifs globaux climatiques**

Les objectifs globaux climatiques découlent des analyses des climatologues, en particulier de celles provenant du GIEC et dont les conclusions sont fournies dans leurs rapports les plus récents (6^{ème} rapport partiellement publié à ce jour).

Ces objectifs sont la traduction des objectifs d'augmentation de température de surface à ne pas dépasser, 2°C, ou de préférence 1.5°C, pour limiter les conséquences du réchauffement

climatique et empêcher autant que possible des phénomènes irréversibles / incontrôlables, de se produire. Il leur correspond des paramètres tels que le budget carbone (ou CO₂) associé, et un / des budgets correspondant aux gaz à effet de serre. Ces objectifs sont nécessairement associés à des dates-cibles.

Une question fondamentale se pose concernant la déclinaison de ces objectifs par secteur, notamment pour l'aviation, laquelle, comme les autres secteurs, produit des émissions non-CO₂, et celles de l'aviation lui sont propres (voir les sections suivantes).

- **Études & Analyses**

Ces études et analyses seront dans le prolongement, voire parfois menées de pair avec les activités de recherche et développement technologique. Il est essentiel, pour parvenir à des solutions pertinentes, efficaces, que ces études et analyses soient suffisamment approfondies et complètes, dans tous les domaines clés, dans des périmètres englobant tous les aspects concernés, qui peuvent dépasser largement celui de l'aviation dans certains cas. Les hypothèses précédemment évoquées devront être soigneusement fixées dans la même perspective, de même que les résultats et les conclusions, ceci conditionnant l'optimisation des solutions combinées possibles.

- **Solutions/Mesures (et combinaisons) possibles**

Les solutions, les mesures envisagées et les combinaisons éventuelles doivent elles-mêmes faire l'objet d'études et analyses approfondies de toutes les implications, effets positifs et contre-productifs à court, moyen et long-terme, et dans tous les domaines qui peuvent être concernés. Les solutions possibles retenues pourront être des solutions de compromis optimisées, en fonction de critères clairement définis, à travers des méthodologies et outils éprouvés.

- **Consensus intersectoriel sur objectifs spécifiques et mesures par secteurs**

Le choix final des solutions ou combinaisons de solutions est une phase capitale, qui, pour déboucher sur des actions coordonnées efficaces agréées par l'ensemble de la communauté mondiale, impose un consensus intersectoriel préalable concernant la répartition des efforts par secteur, traduite en termes d'objectifs spécifiques pour chaque secteur. Ce consensus sera la plupart du temps lié à des politiques nationales, et pour aboutir d'une manière plus sûre et avec des modalités plus efficaces, le consensus intersectoriel devrait être en harmonie avec le consensus international autour des mêmes enjeux. Il est à prévoir que cette étape, aussi bien pour le consensus intersectoriel que pour le consensus international, sera cruciale dans le processus. Cela nécessitera des études complémentaires, en commençant par l'inventaire des facteurs à prendre en compte dans de multiples domaines, la définition de critères et indicateurs pertinents reconnus et agréés par tous. Cette phase mobilisera inmanquablement un grand nombre de spécialistes qui devront se coordonner pour calibrer leurs échelles et se mettre d'accord sur l'ensemble des méthodologies et outils impliqués, selon les trois axes concernés : par secteur, par pays et par discipline. Il est à prévoir que l'élaboration de coefficients de pondération, de critères de compromis et d'optimisation pourront poser des questions complexes, nécessitant dans certains cas de trancher à partir de « critères de remplacement par défaut » (par exemple de temps, de coût, ou d'autres, éventuellement combinés).

On retiendra, comme cela a été déjà exprimé dans la section « Problème global » ci-dessus, que des combinaisons de solutions en fonction du temps, associées aux objectifs sectoriels, différentes de celles considérées de manière indépendante par secteur, peuvent s'avérer optimales, pour aboutir à la trajectoire de température visée, en fonction des indicateurs et des ratios définis au niveau global en cohérence avec les critères sélectionnés.

- **Actions par secteur et effets**

Les actions devront faire l'objet de documents complets et détaillés décrivant l'ensemble des processus qui y ont conduit. Ces documents décriront les plans d'action et moyens à mettre en œuvre concernés, également les moyens et procédures de surveillance et de suivi associés, qui devront avoir été mis en place en temps voulu, après avoir été eux-mêmes agréés, optimisés et harmonisés. Les résultats des actions seront consignés dans des documents appropriés.

- **Boucles de rétroaction**

De très nombreuses boucles de rétroaction sont prévisibles, reliant les hypothèses, les objectifs, les critères, les sujets de recherche, les résultats des études, les actions à prendre, les résultats des actions, etc. Ces boucles de rétroaction jouent un rôle essentiel en apportant la souplesse, la cohérence et l'adaptabilité indispensables, contribuant ainsi à l'optimisation des processus et à leur efficacité globale.

- **Communication dans diverses phases et à divers niveaux**

Une communication « qui porte » doit s'appuyer sur une base solide et des arguments bien étayés (par des analyses idoines). Elle ne doit pas être une agitation frénétique synchrone avec les argumentaires simplistes, tronqués, biaisés (volontairement ou non), que certains « lancent contre l'aviation », surtout à ne pas imiter, en en donnant une image en miroir inversée!

Il faut « se battre » sur des bases techniques robustes, rigoureuses, « inattaquables ». Cela exige du recul, de la réflexion, un travail sérieux d'analyse et de synthèse, et une communication bien élaborée, pour déployer les arguments de manière « lisible », transparente, compréhensible, cohérente et convaincante, sans déformer ni enjoliver.

« Ceux qui savent ne parlent pas, ceux qui parlent ne savent pas » (Lao Tseu)

« Pense avant de parler et pèse avant d'agir. » (William Shakespeare - Hamlet)

ANNEXE

Recherche, Développement et Sécurité

Dans le domaine de la recherche aéronautique, et dans une certaine mesure, plus largement aussi (ceci incluant l'ensemble de l'industrie aéronautique, et au-delà), les facteurs déterminants ont progressivement migré du domaine technique vers les domaines politico-économiques. Ceci s'est amplifié au fil des ans, sous le double poids croissant des enjeux économiques et des problématiques environnementales (réchauffement climatique en tête), avec des effets interactifs et cumulatifs. Ceci s'est accompagné d'une évolution au niveau du langage, de la phraséologie et du vocabulaire, avec une certaine standardisation qui hélas souvent a du mal à masquer un manque de substance, lorsque la connaissance robuste et l'expérience approfondie sont remplacés par des raisonnements superficiels autour de vocables abstraits mais creux, même si par ailleurs les concepts sont développés et manipulés avec dextérité, prestement et de manière sophistiquée.

Pour autant, les avancées technologiques, les configurations et systèmes innovants requièrent des approches, des processus et des actions permettant de conduire des activités de développement dans des conditions de sécurité adéquates, suivies d'une entrée en service de l'avion, puis d'un maintien de la navigabilité également sûrs : des méthodologies nouvelles adaptées doivent être développées, elles-mêmes validées et optimisées, des infrastructures doivent permettre des processus complets d'essais, validation et vérification et le déploiement sûr à échelle industrielle ; le cadre de certification tout entier, incluant le parcours complet d'analyses de sécurité et de démonstrations, complété comme nécessaire, couvrant la globalité des composants, sous-systèmes et systèmes de l'avion, en accordant une attention spéciale aux nouveaux équipements, systèmes et caractéristiques, aux combinaisons et interactions nouvelles, sans rien négliger. La sécurité doit demeurer une exigence primordiale, omniprésente et permanente, sans faire de concession aux pressions économiques et environnementales, aussi légitimes et urgentes soient-elles.

Les niveaux de sécurité très hauts atteints par l'aviation aujourd'hui ont été le résultat de nombreuses années où les leçons de l'expérience ont été accumulées petit à petit, parfois de façon douloureuse. L'objectif de maintien, ou si possible de poursuite de l'amélioration des niveaux de sécurité, s'appuyant sur des méthodologies fiables, éprouvées et des bases de données robustes, en particulier autour des technologies, configurations et caractéristiques nouvelles, ne va pas pouvoir être satisfait dans un délai très court, même si les méthodes numériques et de simulation progressent très rapidement. Des objectifs ambitieux sont de bons stimulants du progrès, mais les niveaux de réflexion, les stratégies planifiées et mises en œuvre doivent être à la hauteur des ambitions, soutenus par des investissements adéquats. Même si c'est le cas, les objectifs, comme cela a déjà été souligné plus haut, ne doivent pas être hyper-ambitieux. Ils doivent être conformes aux objectifs « S.M.A.R.T. » (spécifiques, mesurables, atteignables, réalistes et temporellement définis).