

L'avenir des missions aériennes dans un monde neutre en carbone

Nicolas Leprince, Thibault Ricci, Xavier Rival

Le Colonel Xavier Rival, le Colonel Nicolas Leprince et le Lieutenant-Colonel Thibault Ricci sont tous diplômés de l'École de l'air. Pilotes de chasse, ils ont pris le commandement d'escadron de combat ou d'écoles de pilotage au sein de l'armée de l'Air et de l'Espace.

Le Colonel Xavier Rival a étudié au Royaume-Uni (ACSC¹ et RCDS²) où il s'est notamment intéressé aux projets de transition énergétique portés par le ministère de la Défense britannique. Il est aujourd'hui attaché de l'Air à la mission de défense à Londres.

Alors qu'il était à l'École de guerre, le Colonel Nicolas Leprince a rédigé un mémoire sur l'impact sécuritaire lié au changement climatique, et la relation paradoxale entre la finitude des sources d'énergie et la croissance économique. Il a commandé l'École de pilotage de l'armée de l'Air. Il est aujourd'hui officier rédacteur au sein du bureau Plan Programmation et Évaluation de l'EMA.

Le Lieutenant-Colonel Thibault Ricci a proposé une analyse critique du plan stratégique «Royal Air Force Net Zéro 2040 » au cours de sa scolarité EMS2 au Royaume-Uni en 2022. Il commande aujourd'hui l'École de l'aviation de chasse qui met en œuvre l'avion PC-21 en remplacement de l'Alphajet.

La puissance aérienne confère aux responsables politiques et militaires la réactivité et l'allonge nécessaires pour collecter du renseignement, venir en aide aux populations en difficulté et si nécessaire utiliser la force, alliant alors puissance et précision de feu. Il n'est jamais acquis de gagner la guerre. Mais comme le maréchal Bernard Montgomery le déclarait, « *si nous perdons la guerre dans les airs, nous perdons la guerre et nous la perdons rapidement* »³.

Ces missions aériennes sont réalisées grâce à des vecteurs utilisant quasi-exclusivement des moteurs thermiques et des carburants fossiles, d'une densité énergétique inégalable. L'utilisation de moteurs électriques ou à vapeur est restée l'exception⁴. Qui se souvient en effet que l'Éole de Clément Ader, qui quitta

1. *Advanced Command and Staff Course*, équivalent de l'École de guerre (scolarité EMS2)

2. *Royal College of Defence Studies*, équivalent du Centre des hautes études militaires (scolarité EMS3)

3. Cité par le colonel P. S. Meilinger « Dix propositions sur l'arme aérienne », *Stratégie n°64*, 4/96, Paris, pp. 19-52.

4. En 1883, les frères Gaston et Albert Tissandier ont construit et piloté « le premier ballon vraiment dirigeable, mû par une hélice actionnée par un moteur électrique, » R. Chambe, *Histoire de l'aviation*, Paris, Flammarion, 1958, p.50.

le sol en 1890, était propulsé par un moteur à vapeur de 20ch ?⁵ Or la France, au travers de l'Union européenne (UE), a formulé des objectifs ambitieux pour limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) et notamment de dioxyde de carbone dans les trente prochaines années. Le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne ont approuvé en juin 2021 le règlement (UE) 2021/1119 « *établissant le cadre requis pour parvenir à la neutralité climatique* ». Cette loi européenne sur le climat fixe un objectif contraignant afin de faire de l'UE la première structure d'intégration régionale climatiquement neutre. Les Européens devront réduire leurs émissions de GES autant que possible et compenser les émissions restantes par des dispositifs de capture et de séquestration de carbone.

Les armées des pays membres de l'UE ne sont pas, à ce jour, affectées par ce règlement et le coût carbone des missions aériennes est aujourd'hui 'toléré' par les responsables politiques. Alors qu'en Europe la Russie a envahi une partie de l'Ukraine, que la tension monte en Asie entre les États-Unis et la Chine, et que la menace terroriste ne peut être ignorée, la France doit continuer d'être en mesure de se protéger et de défendre ses intérêts, en utilisant la force si besoin depuis les airs. Il est cependant légitime de se demander si les gouvernements continueront d'accepter ce coût carbone alors que la pression pour atteindre les objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050 est amenée à croître. La transition énergétique étant largement portée par l'innovation technologique, de nouvelles opportunités pourraient se présenter et stimuler un tel changement. La relation entre progrès technologique et puissance aérienne, constitutive de l'identité des aviateurs depuis plus de cent ans, représente à ce titre un enjeu stratégique pour l'armée de l'Air et de l'Espace (AAE) et plus généralement pour les armées.

La puissance aérienne ne repose pas seulement sur la mise en œuvre de vecteurs aériens. L'énergie, qui devra demain être largement décarbonnée, est nécessaire pour assurer le fonctionnement des bases aériennes et de ses véhicules terrestres par exemple, pour alimenter les systèmes d'information de commandement et de contrôle des opérations qui traitent le renseignement collecté depuis les airs. Ces enjeux plus génériques, liés à l'approche énergétique et environnementale des armées dans leur ensemble, sortent néanmoins du périmètre de cet article centré sur les spécificités de la puissance aérienne. Ils ne seront pas traités.

Notre propos se concentrera bien sur les vecteurs aériens, afin de démontrer que le pilotage de cette transition énergétique et opérationnelle devient un impératif pour les armées (I), qu'elle nécessitera des réajustements réguliers pour que l'AAE en particulier reste au rendez-vous des opérations (II), défi qui appelle l'introduction du principe de sobriété énergétique et d'investir dans la recherche sur les carburants alternatifs (III). Tous ces enjeux plaident pour un renforcement de la coopération interalliées, notamment sur la question de l'énergie opérationnelle.

5. Moteur à deux cylindres qui pèse 90kg, y compris 30kg d'eau et 10 kg d'alcool destiné à fournir la vapeur, R. Chambe, *Histoire de l'aviation*, art. cit. p.41. En 1933, les frères Besler installent un moteur à vapeur de 150ch sur un biplan et volent pendant 5 minutes sans encombre.

Armées et transition énergétique : vers la fin d'une relative exemption.

L'argument de la relativisation a longtemps été utilisé pour minimiser le coût carbone de l'aviation. L'aviation dans son ensemble ne pèse « que » 3% des émissions mondiales de GES annuelles, et la part relative de l'aviation militaire est donc plus réduite encore. Néanmoins, les externalités négatives de l'aviation et notamment ses émissions seront à l'avenir plus difficilement acceptées, accroissant la pression politique pour les réduire. L'été 2022 en a apporté la preuve : les vols en jet privés ont fait l'objet de vives critiques alors que le pays a particulièrement souffert des canicules et de leurs conséquences. L'écologie n'est plus l'apanage de quelques « originaux » : la cabane d'Arne Naess⁶ ou les espaces sauvages de John Muir⁷ ont en leur temps ému les opinions, suscité une forme d'introspection et de remise en cause de la modernité, sans toutefois provoquer de changements de paradigme.

C'est le rapport *Meadows*⁸ qui a marqué une rupture dans la pensée écologique en l'introduisant dans la sphère politique. Il y a 50 ans, alors que les Trente Glorieuses connaissaient leur apogée, cinq scientifiques du *Massachusetts Institute of Technology* posaient la question de la soutenabilité de notre système et affirmaient qu'une société moderne durable n'était possible qu'à condition de changer radicalement et rapidement de politique. Ce rapport sera sévèrement critiqué par les économistes jugeant les hypothèses présentées comme insuffisantes. L'absence de la prise en compte du progrès technologique était notamment stigmatisée. Graham Turner⁹ a cependant pu vérifier en 2012 que notre planète suivait scrupuleusement la trajectoire « *Business as usual* » du rapport *Meadows*¹⁰. Kenneth Boulding¹¹ résume ce débat désormais dépassé en affirmant que « *celui qui pense qu'une croissance exponentielle peut continuer indéfiniment dans un monde fini est soit un fou, soit un économiste* ».

Or aujourd'hui le rang de l'écologie augmente sensiblement parmi les pré-occupations publiques en France et en Europe notamment. En France, 47% des Français considèrent le dérèglement climatique comme un enjeu prioritaire¹². Les lanceurs d'alertes multiplient les tribunes médiatiques et les sociologues, philosophes, anthropologues et climatologues sont quotidiennement mobilisés pour questionner notre avenir. Un fossé semble se creuser entre les générations, avec d'une part des décideurs devant faire face à de fortes contraintes de court

6. Philosophe norvégien (1912-2009), fondateur du courant de l'écologie profonde.

7. Écrivain américain (1838-1914), auteurs de nombreux essais et livres racontant ses aventures dans la nature et la vie sauvage.

8. Publié par Dennis Meadows en 1972 sous le titre *'Limits to growth'*.

9. Docteur en physique appliquée, dont les travaux portent sur la durabilité physique de l'environnement et de l'économie.

10. T. Graham M. "On the cusp of global collapse? Updated Comparison of the Limits to Growth with Historical Data," *GAIA Ecological Perspectives for Sciences and Society*, 2012, 21, 2, p. 116-124.

11. Économiste et philosophe américain (1910-1993), théoricien des systèmes.

12. Sondage IPSOS du 5 février 2022.

terme, et d'autre part des jeunes diplômés rejoignant le marché du travail, et dont les préoccupations vont croissantes quant aux perspectives présentées par les rapports du Groupe d'experts Intergouvernementaux sur l'Évolution du Climat. Une lame de fond déferle jusque dans les plus grandes écoles françaises : les diplômés d'AgrolarisTech enjoignent leurs camarades à « désertter », les normaliens se mobilisent pour que la science soit à la hauteur des enjeux environnementaux, les polytechniciens appellent à rompre avec « *l'immobilisme climatique* » et les diplômés de Sciences Po à « *sortir du déni* ».

La transition énergétique s'impose aux armées, qui ne peuvent se tenir à l'écart des engagements pris ni de l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 issu de l'accord de Paris sur le climat. La pression politique en ce sens s'accroît et la tendance est ainsi au rehaussement des objectifs de réduction de GES. Le rapport annuel 2022 du Haut conseil pour le climat constate que les émissions de GES ont débuté leur lente décroissance en France dans tous les grands secteurs (bâtiment, industrie et énergie). La baisse reste toutefois à confirmer dans les domaines du transport et de l'agriculture. Par ailleurs, les objectifs de réduction de GES issus de la feuille de route « *Fit for 55* »¹³ ont été modifiés à la hausse de -40% actuellement à -55% en 2030 par rapport au volume brute d'émissions de 1990.

Dans ce cadre, il paraît évident que les postes les plus émetteurs de GES feront l'objet d'une surveillance accrue. L'utilisation des énergies fossiles présentera de plus en plus d'inconvénients. Le poids relatif des émissions de GES par les armées augmentera puisque les émissions totales diminueront. Dans le secteur de l'aviation militaire, la prise en compte des émissions évolue déjà et l'exemption historique dont les militaires ont joui vis-à-vis des questions environnementales commence à se craqueler : le 7 juin 2022, le Parlement européen a validé la « *Feuille de route sur le changement climatique et la Défense* ». La résolution rappelle que le taux de dépendance énergétique de l'Union est passé de 56% à 61% entre 2000 et 2019 et que « *l'empreinte carbone du secteur militaire relevée en 2019 dans les États membres, y compris celles des activités des forces armées nationales et des industries de technologie militaire basées dans l'Union, a été estimée à environ 24,8 millions de tonnes équivalent CO₂* ».

L'aviation militaire étant l'un des principaux émetteurs au sein du ministère, l'AAE doit rechercher dès à présent les moyens de réduire ses émissions sans toutefois compromettre ses capacités opérationnelles. Certaines personnalités y contribuent déjà. Le groupe d'experts du réseau *International Military Council on Climate and Security (IMCCS)*, dirigé par l'ancien CEMA néerlandais Tom Middendorp, et auquel participe notamment l'Institut des relations internationales et stratégiques (IRIS), a publié une nouvelle étude intitulée *Decarbonized Defense – The Need for Clean Military Power in the Age of Climate Change*¹⁴. Cette étude

13. « *Fit for 55* » est un paquet de 12 propositions législatives publié par la Commission Européenne en juillet 2021. Ce paquet n'a pour le moment pas été approuvé par le Parlement et le Conseil Européen.

14. <https://imccs.org/>

soutient que les militaires doivent accélérer leur politique de transition énergétique afin de répondre à trois défis : réduire les vulnérabilités opérationnelles liées aux carburants fossiles sans en créer toutefois de nouvelles (avec par exemple les métaux rares), diminuer notre dépendance envers les pétro-dictatures comme la Russie, et lutter contre le changement climatique.

La capacité d'adaptation, atout maître des aviateurs face aux incertitudes de la transition énergétique.

Du point de vue des armées, la poursuite de l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 constitue un pari fondamentalement incertain. Le pilotage de cette transition énergétique sera délicat et nécessitera des réajustements réguliers, notamment en fonction des futurs progrès technologiques.

D'abord, cette transition sera menée vraisemblablement sous fortes contraintes opérationnelles et budgétaires. Le contexte est au réarmement à l'échelle mondiale avec l'accroissement des tensions internationales, à la raréfaction des ressources et aux épisodes météorologiques extrêmes de plus en plus intenses et fréquents. La multiplication de ces crises rend plus probable un usage plus important de la puissance aérienne. La capacité à agir vite et loin, depuis le territoire national ou à partir de points d'appui à l'étranger, restera précieuse pour éviter que les crises ne dégénèrent en guerres et nécessitent des engagements beaucoup plus conséquents. Alors que les interventions se multiplieront, la compétition pour l'accès aux ressources primaires indispensables pour mener ces opérations, comme les énergies fossiles, engendra à son tour de nouvelles tensions. L'Agence internationale de l'énergie a acté dans son rapport annuel de 2018 le dépassement du pic de production pour les pétroles conventionnels¹⁵, et mis en évidence dans ce même document le risque de défaillance structurelle dans les chaînes d'approvisionnement en pétrole induit par l'incapacité des producteurs de pétroles non conventionnels à compenser cette contrainte¹⁶. Plus récemment et en cohérence avec ces mises en garde, la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (DGRIS) a commandé une étude auprès du *think tank The Shift Project* qui a conclu à un risque de contraction de l'approvisionnement en pétrole pour l'UE au cours des années 2020¹⁷.

Pour faire face à ces tensions, l'AAE aura certainement besoin de plus d'avions et d'équipages alors que les budgets pourraient être de plus en plus contraints. Entre autres défis, la formation de ces équipages devra passer par un entraînement optimisé. Le rôle des outils de simulation aérienne suscite un intérêt particulier

15. c'est à dire qu'à cette date le niveau d'extraction est passé par une valeur maximale et n'a fait que décroître depuis

16. International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*, IEA, Paris <https://www.iea.org>.

17. The Shift Project, *Approvisionnement pétrolier futur de l'Union européenne : état des réserves et perspectives de production des principaux pays fournisseurs*, Rapport du Shift Project, pour la Direction Générale des Relations Internationales et de la Stratégie (DGRIS), Ministère des Armées, mai 2021.

dans ce cadre et l'expertise de l'AAE ne cesse de s'accroître au travers de multiples projets innovants (simulation massive en réseau, simulation à bas coût). Le juste équilibre entre atouts et limites de l'entraînement virtuel doit néanmoins être trouvé. La simulation permet la mécanisation indispensable pour réagir aux situations particulièrement stressantes (panne d'un système critique), pour répéter les tactiques employées sans contraintes réglementaires (pratique du vol supersonique par exemple). La simulation contribue également à la protection du secret, car les moyens d'observation dont disposent nos compétiteurs compliquent l'emploi, en vol d'entraînement, des pleines capacités offertes par les systèmes de dernière génération. Mais le vol réel forge l'expérience d'une manière irremplaçable, l'équipage devant s'adapter sans cesse à des circonstances imprévues. Les conditions météorologiques, la multitude des acteurs concourant à la réussite d'une mission (mécaniciens, contrôleurs aériens, équipages de ravitaillement en vol) contribuent à créer cette 'friction' dont l'expérience est nécessaire afin d'aguerrir les équipages de combat. L'essence de leur expertise tactique tient en effet à la capacité à trouver *une* solution, sinon *la* meilleure des solutions, dans un environnement de contraintes temporelles et physiologiques que la simulation ne reproduit qu'imparfaitement. Piloter au juste niveau ce ratio entraînement simulé / entraînement réel est donc d'une importance cruciale. Il s'agit de maintenir au plus haut niveau l'expertise tactique et la sécurité des vols. L'évolution ne peut être que progressive dans ce domaine, exigeant une politique de maîtrise des risques pragmatiques tenant compte de l'expérience des équipages, du volume d'heures alloué individuellement et de la qualité de l'activité aérienne.

Il est par ailleurs probable que l'AAE adopte une posture de suivi proactif (concept de *fast follower*) plutôt qu'un rôle réellement moteur face aux innovations technologiques liées à la transition énergétique. L'émergence de ces innovations, notamment dans le domaine aérien, est marquée par l'incertitude. En termes de propulsion des aéronefs notamment, il semble peu probable qu'une solution unique prévale. Le développement d'appareils équipés de moteurs électrique, de moteurs à hydrogène, ou de réacteurs fonctionnant avec des carburants non fossiles présentent chacun leurs intérêts et leurs limites. Chacune de ces options pourraient apporter des solutions spécifiques, à même de répondre aux exigences de missions particulières (drones, avions de transport, hélicoptères, avions de combat). Mais au vu des investissements requis, ces innovations seront majoritairement conduites par le secteur aéronautique civil. L'AAE devra s'assurer que les solutions technologiques développées par les entreprises civiles soient aussi compatibles ou adaptables pour de futurs emplois opérationnels.

La nécessité de demeurer « interopérables », c'est-à-dire en mesure de combattre avec nos partenaires, apparaît également cruciale alors que les solutions retenues sont amenées à se diversifier. Les aviateurs devront suivre les différentes évolutions, qui pourraient être extrêmement dynamiques lorsqu'elles s'appuieront sur des technologies de rupture. Ils devront échanger très régulièrement avec leurs homologues des autres forces aériennes, alliances et structures

de coopération investies dans la question de la transition énergétique (États-Unis, Royaume-Uni, Canada, Pays-Bas, Suède, UE, OTAN). L'exemple du ravitaillement en vol est emblématique de ce besoin impérieux de coordination interalliée. Mais celle-ci repose sur l'emploi de carburants aux compositions chimiques standardisées (*Single Fuel Policy* de l'OTAN). Alors que la transition énergétique passera par le développement de carburants nouveaux et alternatifs, la coopération entre états-majors alliés sera essentielle pour s'assurer de leur compatibilité pour tous les types d'aéronefs

Enfin, cette transition sera vraisemblablement progressive et longue. Les solutions technologiques qui pourraient être spécifiques à chaque vecteur n'apparaîtront pas toujours au même moment et pourraient mettre du temps avant d'être effectivement transposables dans des environnements opérationnels exigeants. La fin de l'âge du pétrole impliquera pour « les plus lourds que l'air » une plus grande diversité énergétique et une complexification des enjeux logistiques. La transition concernera les drones d'abord (à horizon 20-30 ans), l'aviation de transport ensuite (à horizon 30-50 ans), et l'aviation de chasse enfin, à très long terme (peut-être avant la fin du siècle). La mise en œuvre des différentes innovations technologiques (électrique, hydrogène, carburants non fossiles) permettra peut-être des ruptures opérationnelles, comme des gains en autonomie. Les conséquences seront significatives sur les matériels déjà en service, modernisés ou retirés du service actif de manière précoce, ainsi que sur les programmes en cours en bouleversant les plans établis. Face à l'incertitude, des redondances opérationnelles devront être aménagées pour se prévenir des mauvaises surprises. De la conception au retrait du service, un cycle programmatique des matériels réduit et agile assurera le meilleur pilotage de cette phase de transition cruciale. Les conséquences seront également immédiates sur la formation du personnel. Les aviateurs devront rapidement maîtriser de nouveaux domaines énergétiques, en lien avec les experts du Service de l'énergie opérationnelle (anciennement Service des essences des armées).

Pour autant, certains systèmes d'arme majeurs actuellement développés par les puissances occidentales pour l'horizon 2050 continueront à utiliser, au moins en partie, les carburants fossiles. C'est le cas des programmes européens Système de combat aérien du futur (SCAF) et *Tempest*, ou encore du projet américain *Next Generation Air Dominance (NGAD)*. Le rôle d'un aéronef supersonique, d'une masse avoisinant les vingt tonnes et capable de croiser dans la stratosphère demeure central dans chacun de ces programmes. Plus que la question du caractère habité ou non de l'avion de combat de demain qui tend à occuper le premier rang des débats, ce sont ces simples ordres de grandeur physique qui importent d'un point de vue énergétique. Il est donc raisonnable de considérer qu'à l'horizon 2050, la mise en œuvre de ces flottes d'avions supposera des niveaux de consommation énergétique importants, voisins des ordres de grandeurs actuels.

Le SCAF ne sera vraisemblablement pas électrique, mais ni ce programme d'armement ni aucun autre dans le futur (drones, avions de transport, hélicop-

tères) ne peuvent se tenir à l'écart des innovations technologiques qui ne manqueront pas d'émerger et sur lesquelles le secteur civil et d'autres armées de l'air (*USAF, RAF*) travaillent déjà. Ces tendances lourdes invitent par ailleurs à redoubler d'efforts et d'attention pour recruter, former et fidéliser les jeunes générations d'aviateurs à même d'embrasser le contexte de transformation qui se dessine pour les prochaines décennies.

S'inscrire dans la transition énergétique pour durer sur le front des opérations.

Le contexte stratégique est un autre élément essentiel à prendre en compte pour gérer la transition énergétique. Les puissances occidentales doivent aujourd'hui pouvoir décourager, et combattre le cas échéant, des adversaires qui recourent à la force sans s'imposer aucune contrainte environnementale dans l'emploi de leurs capacités militaires. L'enjeu n'est donc pas seulement moral, éthique ou social pour les armées. Elles doivent d'abord dominer militairement un adversaire dans la durée, même dans un contexte de crise environnementale (compétition pour l'accès aux ressources, multiplication des épisodes météorologiques extrêmes, dégradation des conditions d'intervention)¹⁸.

La stratégie énergétique de défense française publiée en 2020 définit trois axes pour tenir compte de ces fortes contraintes : consommer moins, consommer mieux, consommer sûr¹⁹. Le premier axe consiste à explorer toutes les voies pour réduire la consommation d'énergie de manière immédiate et durable. Cette démarche volontariste porte le nom de « *sobriété énergétique* »²⁰. Trois lignes d'effort sont envisageables : progrès technologiques, optimisation opérationnelle, et promotion d'une culture de sobriété énergétique au sein des armées. Cependant, les perspectives offertes en la matière sont aussi nécessaires qu'insuffisantes, en ce sens qu'elles ne permettront pas à elles seules de résoudre le défi qui s'impose aux armées. Les perspectives technologiques d'amélioration des rendements des moteurs aéronautiques à l'horizon 2040/2050 sont limitées à des gains de quelques pourcents, ou de 10 % dans les scénarios les plus optimistes²¹. De même, des progrès, nécessaires et marginaux tout à la fois, sont possibles à travers l'optimisation de la planification et la conduite des opérations aériennes. L'*USAF* a réalisé des économies de l'ordre de 10% d'efficacité énergétique en réorganisant l'emploi de ses flottes de ravitailleurs.²² Le développement d'une culture, d'un éthos de sobriété énergétique doit s'imposer en fait à tous les niveaux de responsabilité dans les armées, « *from cadet to Air Marshal* » comme l'affirme l'*Air Chief Marshal* Sir Mike Wigston, chef d'état-major de la *Royal*

18. N. Regaud, B. Alex, F. Gemenne, « Dérèglement climatique : quelles conséquences sur les engagements opérationnels », *La guerre chaude*, Paris, Les Presses Science Po, 2022, p.35.

19. Ministère des Armées, *Stratégie énergétique de défense* (2020).

20. J-M Jancovici, Éléments de base sur l'énergie au XXI^e siècle - part 5, <https://jancovici.com>, (consulté le 10 juillet 2022).

21. M. Dixon, en charge du programme *ASTRA sustainability* au sein de la *Royal Air Force*, interviewé le 22 mars 2022.

22. US Air Force Operational Energy, *Annual report* (2020).

*Air Force*²³ et également lorsque l'on conçoit les équipements militaires de demain²⁴. Cet impératif vient à rebours d'une culture de l'abondance en carburant aujourd'hui parfois encore prégnante. Cette rupture est donc un défi qui suppose de redoubler d'efforts pédagogiques, en insistant aussi sur les avantages opérationnels d'une telle posture.

En complément de ces progrès indispensables mais limités, les efforts entrepris dans le secteur des carburants aéronautiques non fossiles constituent le seul moyen d'atteindre les objectifs de neutralité carbone, tout en maintenant l'emploi d'aéronefs à la pointe du progrès. De multiples solutions sont explorées dans le domaine des carburants de synthèses appelés *Sustainable Aviation Fuels (SAF)* en anglais. Il faut d'abord rappeler que ces carburants non fossiles émettent autant de CO₂ que le kérosène. C'est donc en considérant la chaîne dans son ensemble, des lignes de production jusqu'à leur expulsion par la tuyère, qu'on peut espérer obtenir un cycle neutre en CO₂. Les gains se feront donc en amont, pas lors de la combustion du carburant. Alors que la production de la plupart des biocarburants se heurte à la problématique de concurrence dans l'utilisation des surfaces de terres arables ou aux limites des stocks de biomasse, les carburants de synthèse pourraient offrir l'opportunité de dépasser ces contraintes. La filière issue du procédé *Fischer Tropsch – Power to Liquid (FT-PTL)*, véritable alchimie moderne synthétisant du carburant à partir de l'hydrogène présent dans l'eau et du carbone présent dans le CO₂, semble la plus prometteuse d'un point de vue environnemental²⁵. La *RAF* a atteint récemment des résultats spectaculaires, fruit de son partenariat avec la société *Zero Petroleum*, en réussissant le premier vol de l'histoire entièrement effectué au moyen de carburant de synthèse *FT-PTL*.

L'avantage décisif du procédé mis au point par cette entreprise britannique est qu'il ne repose ni sur la biomasse, ni sur les carburants fossiles, mais sur des ressources accessibles partout et en quantité pour ainsi dire illimitées, rompant ainsi le cycle de la dépendance aux carburants importés²⁶. Cependant, le rendement énergétique de ce procédé se situe aux alentours de 20 %. Pour disposer d'une certaine quantité d'énergie en sortie de réacteur, il faut donc en injecter cinq fois l'équivalent, dans la chaîne de production pour synthétiser ce carburant²⁷, sous forme d'électricité. Les coûts environnementaux et économiques d'une filière de production de carburants de synthèse *FT-PTL* sont donc nécessairement importants. Pour autant, en termes environnementaux, la capacité de production d'électricité bas carbone offerte par le parc nucléaire français constitue un atout

23. M. Wigston, "Global Air Chiefs Conference 2021", <https://www.raf.mod.uk> (consulté le 10 juillet 2022).

24. C. Maisonneuve, « Opérations d'armement : De l'éco-conception à l'adaptation au changement climatique », *La guerre chaude*, Paris, Les Presses Science Po, 2022, p.207.

25. R. Thomson, *Sustainable Aviation Fuels, The Best Solution to Large Sustainable Aircraft?*, Roland Berger, Londres, 2020.

26. P. Lowe, *Petrosynthesis: the completion of the industrial revolution*, 2021, <https://zeropetroleum.com/wp-content/uploads/2021/11/White-Paper-Petrosynthesis-15-11-21.pdf>

27. J-M Jancovici, *Éléments de base sur l'énergie au XXI^e siècle - part 5, art. cit.*

certain. D'un point de vue économique, les surcoûts inhérents à la production de carburants alternatifs empêchent pour l'heure leur montée en puissance significative dans l'industrie aéronautique. Néanmoins, l'idée d'une filière de production de carburants de synthèse étatique voire européenne, non assujettie aux enjeux de rentabilité du marché, dessine une piste étroite à terme pour garantir la pérennité des missions aériennes critiques tout en se conformant à l'impératif de réduction des émissions de CO₂.

Enfin, des expérimentations sont actuellement conduites pour identifier les difficultés techniques liées à la généralisation de l'emploi de carburants de synthèse sur les aéronefs actuellement en service (*A330 MRTT Voyager* britannique, *Gripen* suédois). Ces exemples techniques illustrent la nécessité de développer les partenariats avec les nations alliées sur le sujet de l'énergie opérationnelle, en renforçant par exemple la participation de l'AAE au comité de réflexion sur les questions environnementales présidé par le *Chief of Air Staff* britannique (initiative *Global Air Chiefs Climate Change Collaboration*).

Pour des raisons financières, politiques, écologiques mais également opérationnelles, la dépendance aux énergies fossiles est de moins en moins souhaitable. Plus généralement, quel que soit le type d'énergie envisagé, la sujétion des armées à des niveaux de consommation importants inscrit leur action dans un cercle vicieux. Cette dépendance contribue en effet à souffler sur les braises de tensions géopolitiques et environnementales à l'origine d'incendies sécuritaires que les armées sont dans le même temps appelées à combattre, limitant d'autant les perspectives de réduction de leur empreinte énergétique. Les armées ne sont pas les premières responsables de cette situation. Elles n'y contribuent bien sûr que faiblement à l'échelle nationale aujourd'hui. Mais cette contribution croîtra inexorablement à mesure que le reste de la société s'approchera de la neutralité carbone. La finitude des ressources en pétrole illustre de façon marquante la façon dont les armées, et la puissance aérienne de façon singulière, se trouveront de plus en plus prisonnières d'une boucle liant consommation énergétique, crises sécuritaires, interventions militaires, et *in fine* accroissement de la dépendance énergétique.

Loin de conduire à une impasse pour l'AAE, les évolutions liées à la transition énergétique laissent au contraire entrevoir des opportunités. L'histoire récente de l'AAE le démontre. L'AAE s'est réinventée en optimisant des ressources comptées (ressources humaines, équipements, carburant). Ainsi, l'École de l'aviation de chasse n'est plus équipée du biréacteur d'entraînement *Alphajet*. Il a été remplacé par le *PC-21*, équipé d'un turbopropulseur, moins énergivore que son prédécesseur mais surtout davantage adapté à la formation des jeunes pilotes grâce à son système moderne. La formation sur *PC-21* consomme 70% de carburant de moins que celle qui était effectuée avant sur *Alphajet*. L'histoire de l'aviation est directement liée aux innovations technologiques, dans les domaines de l'aérodynamique et de la propulsion. L'énergie permettant cette propulsion ainsi que la question corollaire de l'accès aux ressources nécessaires

à la génération de cette énergie sont appelées à occuper une place de plus en plus importante. Il sera donc nécessaire de déployer une vision stratégique, c'est-à-dire une capacité à penser le futur alors que l'environnement est incertain. Des impératifs se dessinent en ce sens, de la promotion d'une culture de sobriété énergétique dans les armées, au développement de partenariats avec l'industrie aéronautique civile et les partenaires internationaux, en passant par l'investissement dans les carburants de synthèse et par l'étude de la question d'une filière étatique voire européenne dédiée.