



## L'Armée de l'Air et de l'Espace et l'aviation civile face aux conséquences du changement climatique



Les effets du changement climatique sont de mieux en mieux documentés et connus grâce aux travaux du Groupe intergouvernemental d'experts du climat (GIEC) notamment. Ces effets sont toutefois souvent perçus comme secondaires dans le secteur aéronautique lorsqu'ils sont considérés individuellement, mais ils constituent bel et bien une problématique globale pour l'aviation. Le secteur aéronautique a identifié clairement sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre et s'est engagé dans des initiatives d'atténuation, à l'image du programme européen *Clean Sky*, suivi par l'*Advisory Council for Aviation Research and Innovation* (ACARE). En revanche, la nécessité d'adapter les métiers et les matériels de l'aéronautique aux conséquences du changement climatique n'est ni aussi étudiée, ni autant prise en compte par les industriels et les exploitants, aussi bien civils que militaires. Pourtant, les impacts sur les missions et les conditions d'opération des matériels de l'armée de l'Air et de l'Espace (AAeE) sont bien réels et limiteront à terme son efficacité si rien n'est fait. Le présent document référence ces impacts et propose un tableau récapitulatif des principales conséquences concrètes du changement climatique pour l'aviation civile et militaire.

### Le changement climatique modifie l'ensemble des couches de l'atmosphère

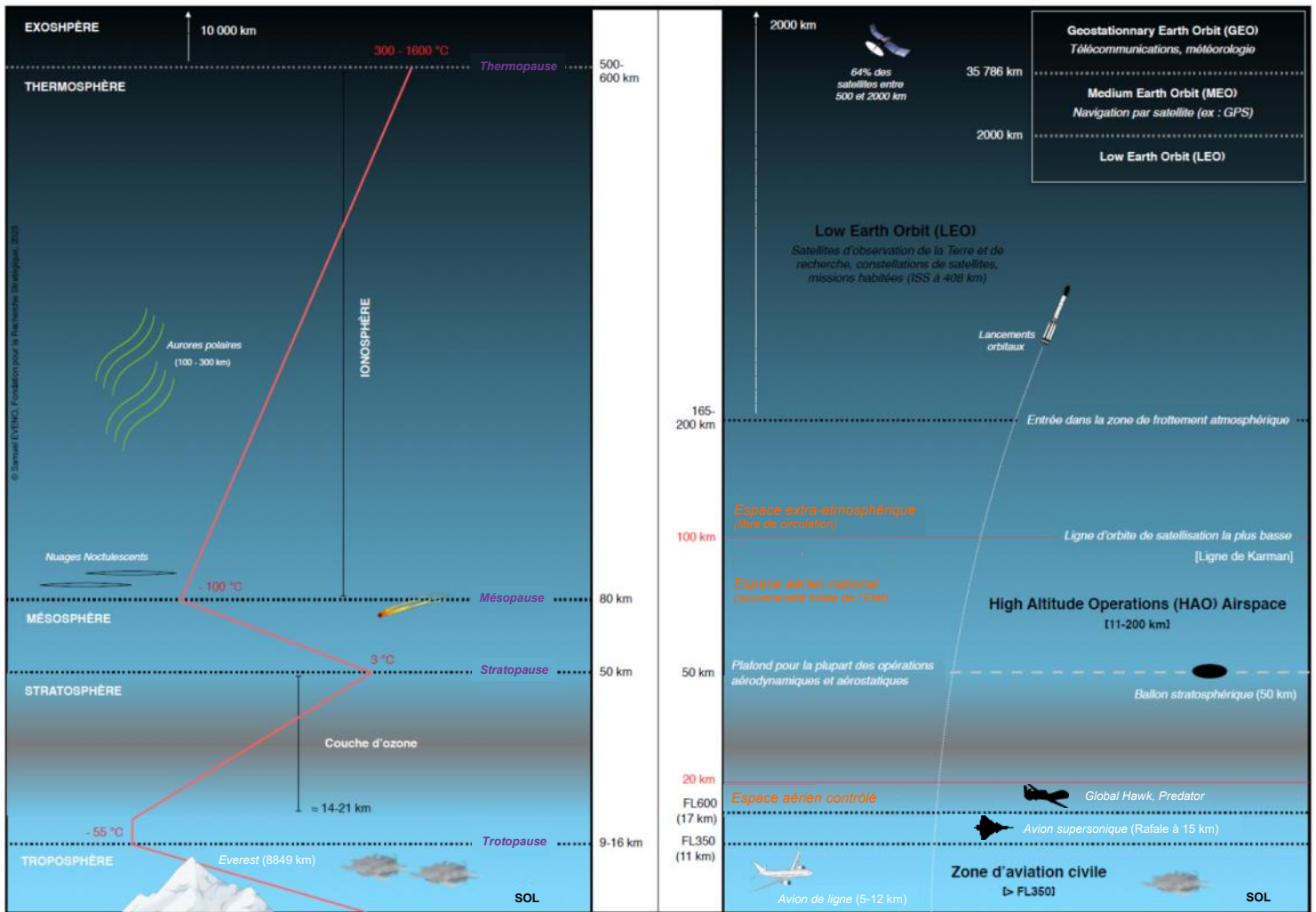
Paru entre 2021 et 2023, le sixième rapport (AR6) du GIEC conclut qu'il faut baisser les émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'ordre de 45% d'ici 2030 pour limiter le réchauffement climatique à 1,5°C en 2100. Cependant, les projections du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) montrent que les politiques gouvernementales en faveur de l'atténuation, fixées depuis la COP26, ne limitent le réchauffement qu'à 2,4-2,6°C supplémentaires d'ici à 2100. De plus, au regard des émissions actuelles, le réchauffement devrait même atteindre le seuil symbolique des +1,5°C au plus tard en 2040. Dans tous les cas, la température moyenne à la surface de la Terre est vouée à encore augmenter en raison des émissions passées et futures. Par ailleurs, d'autres sources de préoccupations majeures sont soulignées par l'AR6 parmi lesquelles figurent l'élévation du niveau marin,

la forte hausse des émissions de méthane, ainsi que la perte d'efficacité des puits de carbone, ces réservoirs naturels ou artificiels qui absorbent et stockent le carbone de l'atmosphère.

Sous l'effet de ce dérèglement planétaire, plusieurs modifications physiques importantes touchent les cinq couches de l'atmosphère (troposphère, stratosphère, mésosphère, thermosphère et exosphère). D'abord, la hausse de la température dans la troposphère, couche la plus proche de la surface où sont concentrés la plupart des GES et où se produisent la majorité des événements météorologiques, provoque la dilatation de celle-ci. En conséquence, la tropopause, à savoir la limite entre la troposphère et la stratosphère située entre 9 et 16 km selon la latitude, s'élève de l'ordre de 40 à 120 mètres par décennie entre 1981 et 2015. Par ailleurs, la stratosphère, où se trouve la couche d'ozone, se refroidit d'une part (entre -0,56°C et -0,16°C par décennie dans la stratosphère moyenne et entre -0,62°C et -0,29°C dans la haute stratosphère durant la période 1980-2019), et s'amincit, d'autre part (400 mètres en moins entre 1980 et 2018). Le phénomène d'amincissement est voué à se poursuivre dans le temps – du moins au cours du XXI<sup>e</sup> siècle – et la stratosphère devrait perdre environ 1,3 km d'épaisseur d'ici 2080, soit une baisse de 3,7% par rapport à l'épaisseur de cette couche durant la période 1980-2018.

S'agissant de la haute atmosphère (50 à 10 000 km), les trois couches qui la composent se refroidissent et rétrécissent également en réaction aux phénomènes décrits précédemment, en particulier dans la mésosphère, qui a perdu 2°C à 3°C et s'est réduite de 150 à 200 mètres par décennie jusqu'à présent. Une tendance qui devrait se confirmer dans le temps puisque que le refroidissement moyen global et la baisse de la densité de la thermosphère prévus pour la période 2015-2070 seront environ deux fois plus importants que par le passé. A ces changements s'ajoutent une perturbation attendue de l'ionosphère, grâce à laquelle le réfléchissement des ondes radioélectriques permet d'assurer les communications radios et satellites dont de nombreuses activités dépendent.

Correspondances entre les tranches d'altitude opérationnelle et des couches atmosphériques utilisées par les scientifiques



**Les modifications de l'environnement climatique induites affectent d'ores et déjà les opérations de l'armée de l'Air et de l'Espace et devraient s'aggraver**

En ce qui concerne l'aviation militaire, les changements environnementaux ayant un impact non négligeable sur les opérations de l'AAeE peuvent être répartis en trois grandes catégories : la perturbation du cycle hydrologique de la Terre, l'évolution de la densité de l'air sous l'effet de la hausse globale des moyennes thermiques et l'évolution des vents et des tempêtes.

**Perturbation du cycle hydrologique**

La modification du cycle hydrologique se traduit par la hausse des précipitations globales, la survenue plus fréquente de pluies violentes et soudaines, un taux d'humidité atmosphérique qui s'accroît, des écarts plus importants entre extrêmes humides et secs, de plus en plus de tempêtes extrêmes, notamment dans l'Atlantique et le Pacifique Nord, etc. Ces phénomènes compliqueront la planification des vols, en particulier pour les hélicoptères, à cause du manque de visibilité et de plafond optimal. Il sera nécessaire d'adapter davantage le profil des missions, en faisant preuve d'un maximum de flexibilité, et les aéronefs seront de plus en plus exposés à des

risques d'endommagement, voire de destruction. L'humidité crée quant à elle des problèmes de corrosion, menaçant surtout les composants électroniques, et peut limiter le vol à vue en brouillant la visibilité, sans compter le fait qu'elle altère aussi les performances des capteurs (IR2, IR3) et du laser de visée. A cela s'ajoute des conditions plus propices au givrage, qui dégrade les performances des aéronefs à cause des masses de glace qui s'accumulent sur les ailes et les pales. En vol, les avions de chasse sont moins concernés par ce problème, tandis que les missions à bord d'hélicoptères et de gros porteurs seront plus souvent annulées ou réduites dans le temps pour atténuer les risques. Au sol, tous les types d'aéronefs sont vulnérables s'ils ne sont pas à l'abri. Les épisodes de grêle, auxquels les verrières des aéronefs sont très sensibles, devraient aussi s'intensifier et poser le même problème que pour le givrage. Enfin, la multiplication et l'intensification des orages et risques de foudre menacent la sécurité des équipages et la protection de l'électronique embarquée. A l'avenir, l'évolution du front intertropical (FIT) en Afrique, ainsi que des phénomènes de mousson et d'El Nino, sont particulièrement préoccupants pour la bonne conduite des opérations de l'AAeE face à un risque de foudre spatialement plus étendu et potentiellement plus intense.

### *Evolution de la densité de l'air et réchauffement global*

L'élévation globale des températures agit mécaniquement sur la densité de l'air, dans la mesure où l'air se dilate en se réchauffant. De cette façon, le nombre de molécules assurant la portance des aéronefs diminue, ce qui altère leurs performances au décollage, en vol et à l'atterrissage. La densité de l'air à proximité de la surface est celle qui a le plus baissé. L'altitude-densité (c'est-à-dire le lien altitude-pression corrigé en fonction des variations de température), paramètre de base pour le vol d'un aéronef, est ainsi largement modifiée. Ce phénomène concerne aussi bien les flottes de transport que de chasse et d'hélicoptères. Afin d'y faire face, les opérationnels sont contraints de réduire la capacité d'emport au décollage (armements, hommes, carburant) ou d'allonger les distances de décollage, ce qui n'est pas toujours possible. Le profil des missions et la capacité de projection pourront ainsi être limités. Toutefois, les aéronefs sont rarement chargés au maximum de leurs capacités, donc il reste des marges substantielles en cas d'imprévus. Concernant les impacts de l'augmentation des températures moyennes à travers le monde, ils sont nombreux : réduction de la charge utile lors des épisodes de chaleur extrême en période estivale, adaptation des plans de ravitaillement et des plages horaires (en privilégiant la nuit et la matinée plus fraîches), hausse de la consommation énergétique pour la climatisation, dégradation de performances et vols plus fréquemment en condition de « mode dégradé », baisse de l'efficacité de certains équipements (caméra thermique, guidage infrarouge), hausse des risques d'épuisement des équipages (dont la capacité de discernement est altérée), augmentation du nombre de pannes, etc.

### *Evolution des vents et des tempêtes*

Enfin, le changement climatique modifie la structure et la vitesse des vents, ce qui a des conséquences durables sur la vitesse et les trajets des vols. La modification des trajectoires des courants-jets devrait entraîner une modification des cartes des vents et donc des routes aériennes. C'est une évolution qu'il convient de prendre en compte dans la planification des futures missions. Dans certains cas, les pistes ne seront plus orientées dans le sens des vents dominants, entraînant ainsi des pertes de performance au décollage et à l'atterrissage. En outre, des vents de plus en plus imprévisibles créeront davantage d'incertitudes pour le guidage des missiles en vol dans la basse atmosphère. L'intensification des vents violents et des turbulences favorisera le décrochage des turbines et l'arrêt des moteurs. Etant déjà contraints d'éviter les zones de turbulences, les avions-cargos verront la planification de leurs missions se compliquer. Les avions de transport et les hélicoptères sont les plus touchés par ces phénomènes, car le pilotage deviendra plus difficile à leur bord et la nécessité d'atterrir rapidement dans ces conditions s'imposera plus souvent. Certaines missions seront de plus en plus fréquemment annulées à cause des vents violents, car ces derniers empêchent le saut en parachute, l'éjection des pilotes en cas d'urgence ou la préparation des hélicoptères au sol. Pour finir, les tempêtes de sable et de poussières de plus en plus intenses et fréquentes limiteront la visibilité et donc le vol à vue, à tel point que des décollages et des atterrissages

seront retardés, tandis que des vols seront déroutés. Les particules de sable et de poussière érodent les surfaces et endommagent notamment les moteurs d'hélicoptères. Au Mali, le sable abrasif du désert accélère le vieillissement des matériels et des équipements. Par conséquent, des pannes à répétition et des envois en révision plus fréquents sont à prévoir, de même qu'une surconsommation de certains éléments (hélices pour vecteurs tactiques, pales d'hélicoptères, moteurs, verrières de cockpits, turbogénérateurs de démarrage, etc.), ce qui aura un coût logistique et de maintenance non négligeable. De plus, les poussières et le sable transportés par les vents causent des problèmes de santé tels que des migraines, des poussées d'hypertension artérielle, des bronchites, ainsi que des épidémies de méningite.

### **Les opérations spatiales militaires également exposées à des risques, malgré davantage d'incertitudes**

#### *Evolution de la couverture nuageuse*

Le changement climatique devrait avoir des conséquences sur la couverture nuageuse dans la mesure où il entraîne une diminution de la fraction couverte par les nuages bas d'une part, et d'autre part une élévation des nuages hauts, renforçant ainsi l'effet de serre. En outre, le nombre et la répartition spatiale des nuages à la surface de la Terre va évoluer : il y aura de moins en moins de nuages dans les zones arides, ainsi que là où l'humidité baisse légèrement, tandis que le couvert deviendra de plus en plus opaque dans les zones humides appelées à l'être davantage en raison du dérèglement climatique. Par ailleurs, avec le refroidissement croissant de la mésosphère, la concentration de vapeur d'eau s'accroît dans cette couche, ce qui favorise l'apparition de nuages noctulescents (NLC) plus brillants, à des latitudes moins élevées et plus tôt dans l'année. Au vu de ces évolutions, les performances des capteurs optiques des satellites, dont dispose la France, pourraient se dégrader ou être inopérantes dans certaines régions où elle est présente et/ou impliquée (Indo-Pacifique, Amérique latine, Afrique tropicale, Europe de l'Est).

#### *Perturbation des couches ionosphériques*

Le refroidissement et la contraction thermique des couches supérieures de l'atmosphère se traduisent par un abaissement des couches ionosphériques. L'ionosphère pourrait être affectée par des changements majeurs, comme l'évolution du contenu total en électrons (*Total Electron Content* – TEC), susceptibles d'altérer les performances des satellites radars permettant d'observer la Terre. Les perturbations ionosphériques peuvent surtout poser problème pour les signaux GPS et, dans une moindre mesure, pour les signaux de télécommunication. A l'avenir, si les communications radios et satellites sont moins fiables à cause du changement climatique, cela aura nécessairement un impact sur les opérations militaires dans des théâtres d'opération éloignés.

#### *Baisse de la densité dans la haute atmosphère*

Plusieurs études ont démontré que le refroidissement et la rétractation de la mésosphère entraînent une baisse de la densité des couches supérieures à hauteur fixe : ces dernières

« s’effondrent » et l’atmosphère perd ainsi en densité. Ce phénomène réduit la traînée atmosphérique sur les engins spatiaux traversant la thermosphère (dont les satellites notamment), ce qui signifie qu’ils sont insuffisamment ralentis et la force d’attraction s’affaiblit. Par conséquent, leur durée de vie s’allonge et le taux d’accumulation des débris spatiaux (vieux satellites complets hors d’usage, morceaux de fusée, boulons, sangles, objets perdus par des astronautes, etc.) s’accroît. D’ici une dizaine d’années, ce sont entre 65 000 et 100 000 satellites qui devraient graviter entre 500 et 800 km, ce qui accentueraient les risques de collision pour toutes les constellations de satellites actuelles et futures (Space X, Blue Origin, One Web, StarNet, Cinnamon, CERES, etc.). Face aux changements environnementaux attendus dans la haute atmosphère, tous ces acteurs devront composer avec des délais plus longs pour la planification et une durée de déploiement plus courte, en particulier pour les petits et micro satellites (dits « CubeSats »).

### Des infrastructures aéroportuaires et aérospatiales de plus en plus vulnérables

La situation géographique des aéroports peut conduire à l’intensification de certaines conditions météorologiques à l’échelle locale. Avec le réchauffement global, un risque de surchauffe des aéronefs et des bases aériennes est à prévoir, limitant parfois les décollages au-delà de certaines températures. A ces difficultés s’ajoute le problème de l’altitude-densité, aggravé par les fortes chaleurs, ce qui a des répercussions sur les capacités d’emport. A titre d’exemple, sur la base américaine de *Little Rock* dans l’Arkansas à 310 pieds (95 m), on mesurait au cours des trente dernières années une altitude-densité de 3000 pieds (914 m) pendant au moins 20% des jours du mois de juillet. A horizon 2040-2069, dans le cas du pire scénario (RCP 8.5), on estime qu’au moins 70% des jours de juillet auront une altitude-densité de 3000 pieds. La multiplication et l’intensification des vagues de chaleur accentuent la nécessité de climatiser davantage les bâtiments dans lesquels se prépare l’équipage, ainsi que les lieux où sont stockés les matériels militaires et les armements.

Les bases aériennes situées à proximité des côtes et/ou des cours d’eau seront de plus en plus exposées à des risques de submersion marine et d’inondation partielle ou totale. Dans cette situation, les pistes sont impraticables et les aéronefs sont contraints de rester au sol ou ne peuvent pas atterrir. Or, lorsque le trafic aérien est déjà dense et/ou concentré sur un seul axe, une inondation dans un aérodrome peut interrompre la liaison de sites militaires, ainsi que les approvisionnements. De plus, des risques de perte et d’immobilisation des matériels de servitude aérienne sont à prendre en compte. L’exemple de la base aérienne de Tyndall (Floride) illustre bien ce problème. En octobre 2018, à quelques semaines d’intervalle, les ouragans Michael et Florence ont frappé de plein fouet le littoral où se situe la base, et ont causé des dégâts considérables. 484 bâtiments ont été endommagés, ainsi que plusieurs avions de combat F-22, en raison de l’effondrement d’une partie du toit des hangars qui abritaient ces appareils, et 792 450 m<sup>3</sup> de débris ont été retirés.

Estimée entre 4,7 et 6 milliards de dollars, la reconstruction de la base devrait durer cinq à sept ans. L’année suivante, la base d’Offutt (Nebraska) vit quant à elle un tiers de sa surface et 30 de ses bâtiments être inondés jusqu’à deux mètres au-dessus du sol, suite à la hausse rapide des niveaux d’eau des rivières environnantes, provoquée par des chutes de neige records. Côté français, certaines bases sont exposées à l’érosion du trait de côte ou à l’inondation/submersion, telles que celle de Port-Bouët en Côte d’Ivoire ou le centre spatial basé à Kourou en Guyane française.

Les tempêtes de sable et de poussières, les orages, l’expansion spatiale du risque de foudroiement et la hausse des précipitations globales et extrêmes sont susceptibles de fragiliser davantage les infrastructures, vouées à être de plus en plus soumises à la répétition de chocs plus ou moins violents. Ces paramètres nuisent aussi aux matériels (infiltration de sable ou de poussières dans les moteurs, risques de foudroiement, matériels endommagés en cas de retournement ou d’effondrement, etc.), ce qui nécessite de les abriter de plus en plus. L’évolution du front intertropical (FIT) en Afrique, sous l’effet du changement climatique, apparaît à ce titre sensible. La hausse attendue de l’humidité dans les régions de mousson aggravera les problèmes de corrosion sur les infrastructures et peut conduire à des accidents tels que des effondrements qui menacent la sécurité des militaires et des matériels. Avec l’évolution des vents dominants (*jet-streams*), les pistes de certains aéroports ne seront plus correctement orientées et la valeur maximale admissible de la composante de vent de travers (auquel les chasseurs sont sensibles) sera dépassée. Or, il ne sera pas toujours possible de construire une nouvelle piste ou d’en allonger quelques-unes si l’aéroport est trop enchâssé dans une zone urbaine.

Hormis les risques sur les infrastructures aéroportuaires, l’aviation civile et militaire apparaît confiante vis-à-vis de l’aptitude de ses équipements, et plus largement de ses capacités, à faire face aux conséquences du changement climatique. Mais les effets de l’évolution du climat sont vus le plus souvent de manière isolée, or le tableau ci-après montre l’intérêt de les traiter conjointement et d’examiner la combinaison de ces risques pour le secteur aéronautique. Ces effets sont d’ores et déjà variés et significatifs, que ce soit dans des zones géographiques particulières ou de manière saisonnière. Les projections du GIEC montrent que ces conséquences dimensionnantes pour l’aviation vont concerner des zones géographiques étendues, et pendant des intervalles de temps plus longs. L’aviation civile comme militaire est ainsi exposée à des risques de nature différente mais bien réels, qui nécessiteront des évolutions des procédures, des doctrines et des équipements pour conserver des impératifs comme la sécurité et la performance opérationnelle.

**SAMUEL EVENO**

Chargé de recherche, FRS

**ALEXANDRE TAITHE**

Maître de recherche, FRS



**Tableau synthétique des effets des changements environnementaux dans l'atmosphère sur l'aviation civile et militaire**

Changements environnementaux dans l'atmosphère	Impacts sur ...
... l'aviation civile	... l'aviation militaire
<p>Hausse globale des moyennes thermiques (stress thermique) ; Vagues de chaleur plus fréquentes, plus intenses et plus précoces</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction de la charge utile effective à bord des avions-cargos lors des épisodes de chaleur extrême en période estivale.</li> <li>- En OPEX, le stress thermique entraîne des interdictions de vol et pèse sur la planification opérationnelle (vols davantage prévus lors des plages horaires moins chaudes) : tout est défini dans les Conditions particulières de maîtrise des risques (CPMRA) avec trois niveaux d'application : normes standard, normes particulières et normes exceptionnelles.</li> <li>- Epuisement des équipages (les mauvaises nuits en forte chaleur affectent la prise de décision et le jugement, plus de micro-sommeils), les délais de variation des extrêmes de températures ne permettent pas de s'adapter (altération de la capacité de discernement). Un pilote dans sa cabine peut parfois attendre deux heures avant de décoller donc il y a plus de risques de malaises.</li> <li>- Il faudra avoir recours à davantage de climatisation au sol pour les phases de préparation de l'aéronef et des équipages à bord, ce qui pourrait conduire à revoir les procédures de climatisation pour tous les aéronefs et à systématiser la climatisation dans le cockpit et la carlingue</li> <li>- Planification opérationnelle : en période de forte chaleur, les vols peuvent être interdits pendant les heures chaudes ou reportés à des horaires où les températures sont plus fraîches (nuit, matinée), donc le soutien aérien sera réduit.</li> <li>- Des hélicoptères moyens d'ancienne génération peuvent davantage être sensibles à l'élévation des températures : les spécifications techniques vont jusqu'à 50°C et il est possible d'aller au-delà mais c'est très rare et fortement décommandé.</li> <li>- Certains outils sont moins efficaces : les caméras thermiques distinguent par exemple moins bien les points chauds dans une atmosphère plus chaude.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction des plages opérationnelles (vols interdits/impossibles durant les heures chaudes de la journée).</li> <li>- Augmentation du nombre de jours de restrictions de vol.</li> <li>- Baisse de la portance des avions, de l'ordre de 1% à chaque hausse de 3°C, ce qui rend plus difficile le décollage, voire impossible.</li> <li>- Dans les aéroports en altitude, le problème de la portance est encore plus important dans les aéroports car l'air est plus rare et les pistes sont plus courtes : un avion moyen a besoin de 2km de piste quand il fait 20°C et 2,5 km à 40°C.</li> </ul>	

Impacts sur ...	... l'aviation militaire
Changements environnementaux dans l'atmosphère	... l'aviation civile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les moteurs des avions de chasse s'épuisent plus vite en période de forte chaleur (jusqu'à 10% de perte de puissance).</li> <li>- Les fortes températures induisent des pertes de rendement sur les groupes électrogènes et les climatiseurs.</li> <li>- Le stockage des munitions est compromis par la hausse des températures qui peut donner lieu à des incendies ou des explosions des dépôts de munitions inexploités (<i>Unplanned Explosions at Munitions Sites</i>, UEMS).</li> </ul>	
<p>Baisse de la densité à proximité de la surface (NSAD)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baisse de la masse maximale totale au décollage (MTOW), de l'ordre de 5% dans les latitudes septentrionales de l'hémisphère Nord, surtout dans les aéroports en altitude.</li> <li>- Baisse de la charge utile transportée, entre 8,5% et 19% tout au long de l'année (-1% au cours des 75 dernières années dans le corridor transatlantique ; perte nette de charge utile pour tous les avions dans ce corridor comprise entre 5% et 8,3%).</li> <li>- Augmentation du nombre de jours de restrictions de poids.</li> <li>- Répercussions économiques en termes de transport de passagers avec leurs bagages (baisse de 6% de la capacité totale de transport).</li> <li>- Potentiel renforcement de la réglementation en matière de performance au décollage à travers le MTOW par les agences gouvernementales.</li> </ul>
<p>Évolution de la densité de l'air</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baisse de la capacité d'emport : moins d'armements ou de carburant ou d'hommes embarqués à bord des avions de chasse (cet appareil peut emporter l'équivalent de son poids en armement et pourrait voir cette charge être divisée par deux).</li> <li>- La hausse de l'altitude-densité touche l'aviation civile et les hélicoptères mais pas les avions de chasse dont les moteurs sont « surdimensionnés » par les constructeurs (pas besoin d'allonger les pistes car les militaires n'utilisent qu'un tiers des pistes standard OTAN de 2400 x 45).</li> </ul>
<p>Baisse globale de la densité de l'air</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La capacité d'emport diminue, ce qui implique de choisir entre transporter moins d'armements, de carburant ou d'hommes (le choix dépend du type de mission : pour le transport, le carburant sera privilégié, tandis que pour l'attaque, ce seront les hommes et l'armement).</li> </ul>
<p>Hausse de l'altitude-densité</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exemple de la base de l'<i>US Air Force</i> de Little Rock : l'altitude-densité atteignait 3000 pieds durant au moins 20% des jours du mois de juillet au cours des 30 dernières années (310 pieds d'altitude, 90 m) et devrait représenter 70% des jours de juillet, à horizon 2049-2069 (RCP 8.5).</li> </ul>

Changements environnementaux dans l'atmosphère		Impacts sur ...	
	... l'aviation civile	... l'aviation militaire	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Besoin d'allonger les pistes de roulage avant le décollage, entre 0,95% et 6,5% sur la période 2021-2050 par rapport à 1976-2005 pour les avions de ligne en période estivale.</li> <li>- Baisse du taux de poussée de l'ordre de 0,68% à 3,4% sur la période 2021-2050 par rapport à 1976-2005 pour les avions de ligne en période estivale.</li> <li>- Aéroports disposant de courtes pistes et dans des zones où l'espace est restreint seront moins desservis, surtout pendant l'été.</li> <li>- Baisse du taux de montée (fixé autour de 3% par toutes les compagnies aériennes).</li> <li>- Baisse du plafond pratique.</li> <li>- Baisse de la capacité d'emport.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baisse de la capacité d'emport, allongement des pistes pour les gros porteurs (jusqu'à 400 mètres supplémentaires pourraient être nécessaires pour ces derniers).</li> <li>- Les avions de chasse ne sont pas affectés au niveau des performances au décollage et à l'atterrissage, contrairement aux avions-cargos (qui ont déjà besoin de 2 à 3 km de piste pour décoller) et aux hélicoptères.</li> </ul>	
Multiplication et intensification des turbulences globales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation du nombre d'incidents météorologiques lors des vols commerciaux.</li> <li>- Augmentation du nombre d'incidents mécaniques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les avions-cargos ont pour obligation d'éviter les zones de turbulence, ce qui complique la planification des missions en amont et en temps réel.</li> </ul>	
Évolution des vents	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation du nombre d'incidents météorologiques lors des vols commerciaux (exemple du vol Istanbul-New York en 2019).</li> <li>- Augmentation du nombre d'incidents mécaniques.</li> <li>- Davantage de retards et de déviations.</li> <li>- Moyens et technologies disponibles pour détecter les CAT ? A priori pas possible avec la technologie embarquée à bord des avions.</li> <li>- Les avions passeront plus de temps en CAT (environ 3% de leur temps de croisière dans des turbulences légères ou plus importantes et 1% dans des turbulences modérées ou plus importantes aujourd'hui) ?</li> <li>- Faibles marges de contrôle (au niveau d'altitude où ont lieu les CAT) plus longues lors des vols ? Plus d'effets de surprise ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficile anticipation des turbulences en air clair (CAT) en amont lors de la planification des vols, contrairement aux zones de turbulence identifiées dans un couvert nuageux visible.</li> <li>- Des CAT particulièrement violentes peuvent entraîner un décrochage des turbines et un arrêt du moteur, qui provoquent une baisse de la pressurisation dans la cabine.</li> </ul>	

Changements environnementaux dans l'atmosphère		Impacts sur ...	
		... l'aviation civile	... l'aviation militaire
Multiplication des vents violents			<ul style="list-style-type: none"> <li>- S'il y a trop de vent, l'éjection des pilotes est trop dangereuse donc la mission est annulée sauf urgence (problème de planification).</li> <li>- La vitesse et le sens du vent sont importants pour les sauts en parachute des commandos de l'Air pour déterminer leurs paramètres de saut.</li> </ul>
Intensification des courants-jets ( <i>jet-streams</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Raccourcissement des vols vers l'ouest car les avions sont ralentis et allongement significatif des vols vers l'est car les avions seront davantage poussés.</li> <li>- Modification des routes aériennes et nécessité de construire de nouvelles pistes adaptées au sens nouveau du vent mais cela ne sera pas toujours possible si l'aéroport est trop encaissé dans des zones denses.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- La modification des <i>jet-streams</i> entraîne une modification des cartes des vents et donc des routes aériennes (certains aéroports ne pourront pas construire de nouvelles pistes adaptées au sens du vent s'ils sont déjà trop encaissés dans des zones denses) : cette modification peut favoriser les vents traversiers qui posent notamment problème pour les avions de chasse, à titre d'exemple.</li> </ul>
Migration du <i>jet-stream</i> Nord-Atlantique vers le nord / Oscillations nord-sud plus marquées	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus de précipitations, plus de vagues de chaleur, plus de changements brutaux, donc révision des modèles météorologiques.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- La modification des <i>jet-streams</i> entraîne une modification des cartes des vents et donc des routes aériennes.</li> </ul>
Ralentissement des vents (« calme global »), comme en 2021, surtout en Méditerranée et en Europe du Nord (si +2°C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baisse des performances au décollage (le GIEC évoque dans ses travaux une « forte probabilité que les vitesses moyennes du vent diminuent dans les régions méditerranéennes vers 2050 », ainsi qu'une réduction probable en Europe du Nord).</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- La distance de décollage nécessaire diminue à mesure que la vitesse du vent (mesurée en noeuds) augmente, donc un ralentissement des vents récurrent pourrait entraîner un allongement des pistes dans certains cas rares.</li> <li>- Il faudra consommer plus de carburant pour faire décoller un chasseur sur le pont d'un porte-avions si la vitesse du vent baisse.</li> </ul>
Intensification des phénomènes de cisaillement du vent et de rafales descendantes (surtout dans l'Atlantique)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hausse du nombre d'incidents météorologiques lors des vols commerciaux.</li> <li>- Hausse du nombre d'incidents mécaniques.</li> <li>- Davantage de retards et de déviations.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité d'atterrir si les vents de cisaillement sont trop forts pour les avions de transport et les hélicoptères mais attention aux approches macro (vigilance pour la base d'entraînement à Orange).</li> </ul>
Modification de l'orientation des vents	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réorientation des pistes.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réorientation des pistes mais seulement dans certains cas car ce n'est pas toujours possible en tenant compte du relief (cas par cas).</li> </ul>



Changements environnementaux dans l'atmosphère		Impacts sur ...	
		... l'aviation civile	... l'aviation militaire
	Augmentation de la variabilité des vents en haute et basse atmosphère	- Difficultés pour la planification des vols.	- Trajectoires des missiles et des satellites affectées. - Planification des vols en amont et en temps réel plus compliquée.
Évolution de l'humidité globale	Hausse de l'humidité atmosphérique (cf. règle de Clausius-Clapeyron), notamment dans les régions subtropicales côtières	- Baisse du taux de poussée des avions proportionnelle à la hausse du taux d'humidité présent dans l'air.	- Problèmes de corrosion particulièrement importants pour les hélicoptères en Guyane française, ainsi que pour les infrastructures (traitements anti-corrosion très longs). - Les machines modernes souffrent surtout au niveau des composants électroniques comme les cartes de pilote automatique ou la connectique. - Problème se cumulant avec les effets d'atmosphères salines (Djibouti). - L'humidité accélère le vieillissement des hélicoptères mais n'influence pas les performances. - Problème de visibilité avec une masse d'air humide. - Problème de résistance/résilience des matériaux et/ou composants aux fortes amplitudes thermiques.
	Hausse du volume de précipitations dans certaines régions (Afrique tropicale, Europe de l'Est, Amérique du Nord, Asie centrale, Asie du Sud-Est)	- Problèmes de visibilité en vol, lors du décollage et de l'atterrissage.	- Problèmes de planification opérationnelle des missions pour les vols en hélicoptère car il faut des conditions de visibilité et de plafond optimaux. - Problèmes de visibilité, en particulier pour les hélicoptères qui requièrent des conditions de visibilité et de plafond optimaux. - Risques supplémentaires du profil des missions, nécessité d'atterrir en urgence, planification opérationnelle plus difficile. - Dégâts considérables sur les matériels, même ceux entreposés lorsque l'infrastructure est détruite.
Évolution des précipitations	Hausse de la fréquence des épisodes de précipitations violentes et soudaines	- Problèmes de visibilité au décollage et à l'atterrissage (notamment dans les aéroports en altitude et disposant de courtes pistes).	- La survenue de précipitations soudaines et violentes et/ou d'autres événements météorologiques associés peut contraindre l'aéronef à atterrir en urgence avant d'atteindre la base au retour ou la cible, donc cela complique la planification des missions (plus de flexibilité). - Ce phénomène peut engendrer des débats importants sur les infrastructures et les matériels, comme au Tchad en 2017.

Changements environnementaux dans l'atmosphère		Impacts sur ...	
		... l'aviation civile	... l'aviation militaire
	Hausse de volume de précipitations charriées par les cyclones	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problèmes de visibilité en vol, lors du décollage et de l'atterrissage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problèmes de visibilité en vol, lors du décollage et de l'atterrissage, en particulier pour les hélicoptères.</li> <li>- Risques supplémentaires du profil des missions, nécessité d'atterrir en urgence, planification opérationnelle plus difficile.</li> <li>- Dégâts considérables sur les matériels, même ceux entreposés lorsque l'infrastructure est détruite.</li> </ul>
Évolution des tempêtes et des orages	Multiplication et intensification des tempêtes de poussières et de sable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pollution de l'air et baisse de visibilité à cause des brumes épaisses dans le sillage des tempêtes.</li> <li>- Les problèmes de visibilité au décollage et à l'atterrissage obligent parfois à retarder ou à dérouter des vols (impact sur la planification des vols).</li> <li>- Besoin de plus de protections des appareils au sol (bâchage partiel ou total, arrimage des appareils).</li> <li>- Les particules de poussière et de sable érodent les surfaces des aéronefs et endommagent les moteurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baisse de la visibilité à cause de la poussière (limite du vol à vue qui s'applique déjà en général dans les zones d'intervention lors des opérations tactiques).</li> <li>- Les problèmes de visibilité au décollage et à l'atterrissage obligent parfois à retarder ou à dérouter des vols (impact sur la planification des missions).</li> <li>- Besoin de plus de protections des appareils au sol (bâchage partiel ou total, sainage des appareils).</li> <li>- Les particules de poussière et de sable érodent les surfaces des aéronefs et endommagent les moteurs (cf. problème de filtration d'hélicoptères de transport lors de Serval au Mali, taux de panne élevé, problèmes de moteur, usure plus rapide, changement des pièces plus rapide que ce qui est spécifié par l'industriel).</li> <li>- Le sable du Mali contient un fort taux de silice donc il est très abrasif et érode davantage les surfaces.</li> <li>- Inutilisation des pièces d'artillerie à cause de l'ensablement des canons qui se grippent.</li> <li>- Hausse des coûts de maintenance et de remplacements.</li> <li>- La poussière peut se nichier dans les interstices, la cabine, les instruments mais elle n'a pas d'impact sur le vieillissement des appareils.</li> <li>- Les bâches bougent souvent lorsque le bâchage n'est pas optimal, ce qui permet au sable et aux poussières d'entrer en contact avec les bords d'attaque du cockpit et les rayer alors que la verrière doit être parfaitement transparente.</li> </ul>

Changements environnementaux dans l'atmosphère		Impacts sur ...	
		... l'aviation civile	... l'aviation militaire
Intensification des risques de foudre (et peut-être une multiplication)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risques de foudroiement pour les avions.</li> <li>- Modification de l'altitude de vol pour éviter la foudre (grâce aux nouvelles modélisations au sol, les trajectoires d'évitement sont calculées pour économiser davantage de carburant).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le foudroiement menace en particulier les communications radio, tandis que le reste est protégé : si les systèmes de communication et de guidage ne redémarreront pas, il faut suivre une procédure spéciale pour revenir à la base en mode manuel (problème en contexte de guerre).</li> <li>- La foudre peut frapper le cordon pyrotechnique intégré à la verrière et provoquer l'éjection non désirée du pilote dans de très rares cas.</li> <li>- La foudre est susceptible d'éblouir le pilote.</li> <li>- L'évolution du suivi du front intertropical (FIT), ainsi que des phénomènes de mousson et El Nino, sont des sujets préoccupants pour la bonne conduite des opérations de l'AAeE car les vols dans un orage de type FIT sont interdits en raison des conditions trop défavorables (vents de cisaillement trop forts combinés au risque de foudre par exemple).</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intensification des tempêtes violentes (partout sur Terre et surtout dans le Pacifique Nord et en Atlantique)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La planification opérationnelle sera rendue plus difficile à cause de la prise en compte des cellules orageuses de plus en plus nombreuses et étalées.</li> </ul>	
Évolution du grand froid	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Accumulation de neige sur les ailes pouvant peser jusqu'à plusieurs tonnes peut altérer les performances de l'avion.</li> <li>- L'accumulation de glace peut modifier la forme de l'aile, ce qui altère l'écoulement de l'air et réduit la portance de l'avion (nécessite un dégivrage avec de l'eau chaude et du glycol afin de faire fondre le dépôt humide et d'empêcher l'accumulation de nouvelles couches de neige avant le décollage).</li> <li>- Le froid empêche les moteurs de démarrer donc il faut les réchauffer à l'aide de gros ventilateurs (le glycol est trop acide pour cela).</li> <li>- L'air froid accroît la portance et la poussée des réacteurs et des hélices en vol, mais le problème du froid est très important au sol : par exemple, les réacteurs ne démarrent pas si l'huile n'atteint pas 40°C minimum, ce qui implique de préchauffer les moteurs.</li> <li>- Le système de freinage peut geler et ainsi empêcher le positionnement de l'aéronef sur la piste pour le décollage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les avions européens sont résistants au grand chaud mais ne sont pas dédiés au grand froid : il faut parfois jusqu'à une semaine pour redémarrer un avion, le stockage des appareils est plus long et plus cher (problèmes de maintenance, plus que de performance).</li> </ul>	

Changements environnementaux dans l'atmosphère	Impacts sur ... ... l'aviation civile	Impacts sur ... ... l'aviation militaire
Multiplication et intensification des épisodes de grêle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les dégâts de la grêle dépendent de la vitesse de la chute et de la taille des grêlons : arrêt, voire destruction des moteurs, perte des moyens de communication par le bris des antennes, vitres du cockpit brisées, bosselage de la cellule et de toutes les surfaces exposées, notamment au niveau du bord d'attaque des ailes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les hélicoptères doivent éviter au maximum les zones de grêle.</li> <li>- Les avions de chasse sont sensibles à la grêle et au verglas.</li> </ul>
Baisse du nombre de jours propices à des pluies verglaçantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins de risques d'accumulation de glace sur les ailes des avions (la pluie verglaçante se transforme instantanément en glace dès qu'elle touche les ailes et s'accumule à un rythme de 50 mm/min), ce qui permet d'éviter de changer d'altitude ou de trajectoire pour contourner les pluies verglaçantes, sauf en Scandinavie où le nombre de jours propices à ces dernières est voué à augmenter au XXI<sup>e</sup> siècle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les masses de glace surfondues qui s'accumulent sur les surfaces d'un hélicoptère alourdissent l'aéronef (une centaine de kilos supplémentaires) : les performances et le profil de vol se dégradent car la portance baisse.</li> </ul>
Multiplication et intensification des phénomènes de givrage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'accrétion de givre/glacé (même légère) entraîne une diminution du taux de montée, une baisse de la vitesse maximale, une hausse de la vitesse de décrochage et une baisse du plafond pratique.</li> <li>- Risques de décrochage en roulis du fait de l'accumulation non symétrique de givre/glacé sur les deux demi-ailes.</li> <li>- Baisse de la portance : la couche mince de la glace initiale, présentant des irrégularités, peut réduire de 20% le coefficient de portance en configuration de croisière.</li> <li>- Augmentation de la traînée (les performances de remise de gaz avec un moteur en panne ne sont plus satisfaites).</li> <li>- Caractéristiques des ailes gravement modifiées par la présence de contaminants givrés.</li> <li>- En transport public, les appareils à turbopropulseurs sont statistiquement plus touchés par ce problème que les jets lors des phases de vol.</li> <li>- L'engin est alourdi et les ailes, les gouvernes ou la dérive, parties essentielles au pilotage peuvent être entravées.</li> <li>- Nécessité de dégivrer les pistes de roulage.</li> <li>- Exposition des techniciens à des conditions de froid extrême (en dessous de -20°C, ils doivent effectuer des rotations toutes les 20 minutes maximum sur la piste car leurs vêtements ne les protègent plus suffisamment).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Certains hélicoptères ont des capacités de résistance au givrage mais le vol dans ces conditions n'est pas recommandé car les qualités de vol seront immédiatement dégradées.</li> <li>- Les ailes et les pales sont les plus impactées car les masses de glace se forment sur ces surfaces et alourdissent l'appareil, ce qui dégrade les performances et le profil de vol puisque la portance baisse.</li> <li>- Tous les types d'aéronefs militaires sont sensibles au givrage lorsqu'ils sont au sol et surtout s'ils ne sont pas mis à l'abri (les avions de chasse et de transport sont en revanche plus préservés une fois en vol car les turbines sont très chaudes).</li> <li>- Risques de givrage sur les côtés de l'aéronef en vol mais la plupart possèdent des équipements dégivrants.</li> <li>- La mission peut être annulée si le risque de givrage est trop important, ce qui a des conséquences sur la planification des missions et l'organisation des vols.</li> <li>- Conditions de travail et de confort dégradées pour les personnels au sol (équipements à adapter, rotations plus fréquentes des équipes).</li> </ul>

Changements environnementaux dans l'atmosphère		Impacts sur ...	
		... l'aviation civile	... l'aviation militaire
Evolution de la couverture nuageuse	Si plus de nuages		<ul style="list-style-type: none"> <li>- S'il y a plus de cumulonimbus à l'avenir, les trajectoires de vol seront peut-être plus sinueuses ou, du moins, la prévision météo sera de plus en plus importante.</li> <li>- Les équipages des systèmes de drone Reaper sont très impactés par les couches nuageuses qui altèrent grandement les images produites par leurs capteurs.</li> </ul>
	Si moins de nuages		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les hélicoptères volent toujours sous le couvert nuageux (norme standard : 170 pieds, 50 mètres) et parfois à 500 mètres pour un vol long en ligne droite sauf en contexte tactique.</li> </ul>