

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie,
à Paris



ÉDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

DÉCOLLAGES À CHAUD

En modifiant les conditions requises pour le décollage d'un avion, des températures inhabituellement élevées perturbent le fonctionnement de certains aéroports. Or avec le réchauffement climatique, ces situations risquent de devenir plus fréquentes.

En juin 2017, American Airlines a annulé 40 vols intérieurs au départ de Phoenix, dans l'Arizona. La presse a invoqué une température trop élevée, de l'air moins dense, une portance des ailes réduite avec pour conséquence une distance de décollage qui dépasse la longueur de la piste.

Vraiment ? Cette explication a suscité notre incrédulité et celle de plusieurs collègues. Pour en avoir le cœur net, nous avons creusé la question avec nos outils de physiciens. Nos évaluations ne rendent pas totalement compte des valeurs choisies par les constructeurs d'avions pour la sécurité des vols, mais elles confirment les explications données. Et les effets du réchauffement climatique ne s'arrêteront pas là : il faudra aussi s'attendre à des fluctuations plus fréquentes des temps de vol, dues à un jet-stream perturbé.

ATTEINDRE LA VITESSE REQUISE POUR LE DÉCOLLAGE

Suivons un avion au décollage. Une fois les freins relâchés, l'avion roule sur la piste en accélérant. L'écoulement de l'air autour des ailes et de la carlingue engendre alors une force aérodynamique proportionnelle à la masse volumique de l'air ambiant et au carré de la vitesse de l'avion par rapport à cet air, donc une

force de plus en plus intense. La composante horizontale de cette force, la traînée, s'oppose à la vitesse, tandis que la composante verticale, la portance, compense progressivement le poids.

Lorsque la vitesse est suffisante, le pilote actionne les ailerons des ailes pour incliner l'avion. Puis l'avion accélère encore jusqu'à atteindre la vitesse à laquelle la portance compense le poids, ce qui lui permet de décoller. En pratique, la vitesse de décollage est supérieure à la vitesse minimale permettant à l'avion de voler, marge de sécurité obtenue en mobilisant les volets des ailes, situés sur le bord de fuite de l'air.

Peut-on toujours atteindre la vitesse seuil sur une piste donnée ? Pour des raisons de sécurité, on impose une longueur de piste supérieure à 1,15 fois la distance nécessaire pour que l'avion s'élève à 10 mètres du sol. Or les données des constructeurs indiquent qu'il faut une piste de 2500 mètres de long à un moyen-courrier tel que le Boeing 737-800 pour décoller à pleine charge (79 tonnes, dont 37,5 tonnes de carburant et de fret, soit environ 180 passagers) au niveau de la mer et à température standard (15 °C). La vitesse atteinte est alors typiquement de l'ordre de 250 kilomètres par heure.

Si la piste est plus courte, la seule possibilité est d'alléger l'avion : avec une piste de 2133 mètres, ce même Boeing ne

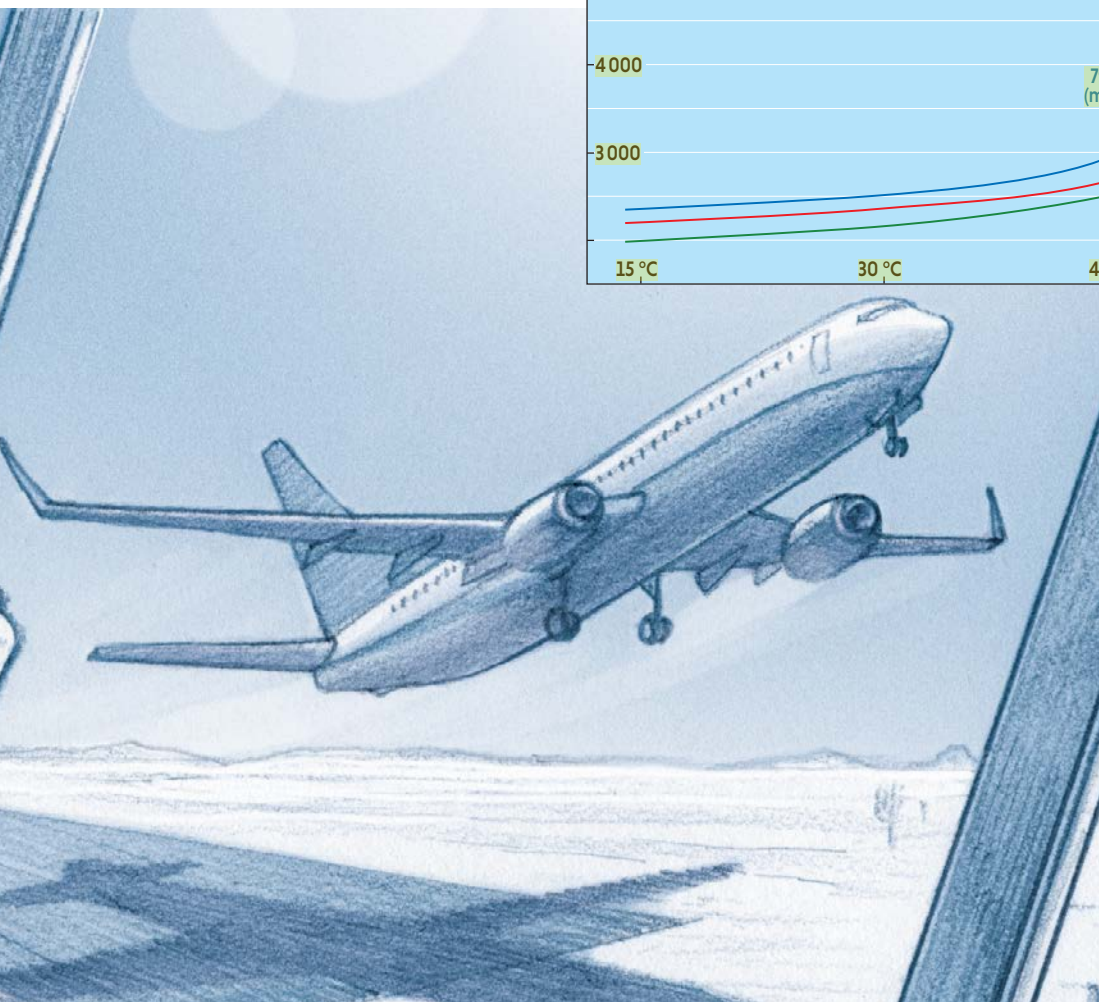
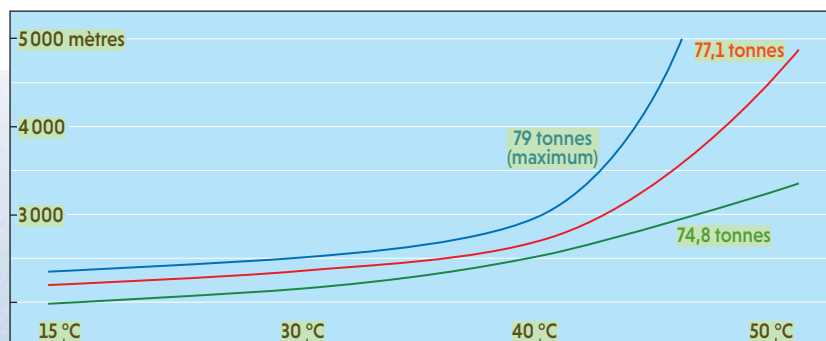


s'envolera ainsi qu'avec 75 tonnes. Quel pourrait alors être le problème avec l'aéroport de Phoenix et sa piste de 3500 mètres ?

La pression atmosphérique à Phoenix, ville située à 340 mètres d'altitude, est égale à 96 % de la pression régnant au niveau de la mer dans les conditions standard. En outre, un pic de température à 40 °C correspond à 8 % d'augmentation de la température (exprimée en kelvins) par rapport à ces mêmes conditions. L'air se comportant comme un gaz parfait, sa masse volumique est proportionnelle à la pression

LONGUEUR DE PISTE ET TEMPÉRATURE

Plus l'air est chaud, moins il est dense. Une température plus élevée diminue donc la force de portance s'exerçant sur l'avion (à vitesse égale). Pour décoller, l'avion a alors besoin d'une vitesse supérieure, atteinte au bout d'une accélération sur une piste plus longue. Le graphique ci-dessous, fondé sur les données du constructeur, indique comment la longueur de piste nécessaire à un Boeing 737-800 augmente avec la température de l'air au niveau du sol, et cela pour trois valeurs différentes de la masse au décollage de l'avion.



et inversement proportionnelle à la température exprimée en kelvins. Ainsi, lors d'un pic de chaleur à Phoenix, la masse volumique de l'air, et donc la portance, sont réduites de près de 12 %. Pour décoller, il faut donc une vitesse plus importante de 6 % et, partant, une piste plus longue de 12 %, en supposant que l'accélération de l'appareil reste la même.

DES PISTES À ALLONGER ?

Pour une distance initiale de décollage de 2500 mètres, cela correspond à un allongement de 300 mètres, ce qui est

loin d'être négligeable. L'explication donnée dans les médias est donc tout à fait plausible. Si, en plus, on prend en compte la réduction de la poussée des moteurs due à l'augmentation de température et les questions de sécurité, les données du constructeur Boeing annoncent une distance nécessaire de 3500 mètres !

Heureusement, la plupart des avions sont désormais équipés de *winglets* (ailettes verticales) aux extrémités des ailes, qui diminuent la traînée de quelques pour cent. L'avion peut donc, pour une même poussée des réacteurs, accélérer

davantage et ainsi atteindre la vitesse seuil au bout d'une distance plus courte. C'est pourquoi les 737-800 peuvent décoller de Phoenix jusqu'à 52 °C ; ils n'ont donc pas trop souffert de la vague de chaleur de juin, contrairement aux avions un peu plus petits et moins performants.

Cette vague de chaleur sur Phoenix peut être prise comme un événement >



Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

exceptionnel, mais elle sonne comme un avertissement. Les modèles des climatologues prédisent qu'avec le réchauffement global en cours, ces épisodes caniculaires se multiplieront sur toute la planète. Une équipe de l'université Columbia a donc entrepris d'étudier l'impact du réchauffement climatique sur le trafic aérien. Si certains aéroports ou appareils s'en sortent bien (Charles-de-Gaulle, à Paris, JFK, à New-York, les A320 et A380...), certains binômes seront fragilisés.

UN RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE PERTURBANT POUR LE TRAFIC AÉRIEN

Ainsi, vers 2050, à l'aéroport La Guardia, à New York, où la piste ne fait que 2 100 mètres, un avion 737-800 devra subir 40 jours par an des allègements d'au minimum 2,7 tonnes de sa masse à pleine charge pour décoller aux heures les plus chaudes de la journée. Sachant que sur cet appareil, 100 kilogrammes d'allègement s'obtiennent en enlevant 83 kilogrammes de charge utile et 17 kilogrammes de carburant, il faudra embarquer au minimum 22 passagers en moins ! La gestion du trafic aérien n'en sera pas facilitée...

Qu'advient-il durant le vol si la hausse des températures modifie aussi la masse volumique de l'air en altitude ? Pour le coup, pas grand-chose. En vol de croisière, à vitesse constante, la portance compense le poids et la poussée des moteurs la traînée. Comme le rapport portance/traînée est presque une constante, il en est de même du rapport poids/poussée. L'énergie consommée pendant le vol (produit de la poussée par la distance parcourue) sera donc la même quelle que soit l'altitude choisie. Tout au plus l'avion devra-t-il augmenter sa vitesse de croisière pour compenser une diminution de la masse volumique : les moteurs devront fournir plus de puissance, mais le temps de parcours en sera réduit d'autant.

Plus inquiétantes sont les modifications prévues des jet-streams (ou courants-jets), couloirs venteux permanents qui règnent entre 8 000 et 12 000 mètres d'altitude, là où justement volent les avions de ligne. Ces « rivières » d'air, deux dans chaque hémisphère, sinueuses et changeantes, circulent d'ouest en est à une vitesse moyenne d'environ 21 mètres par seconde.

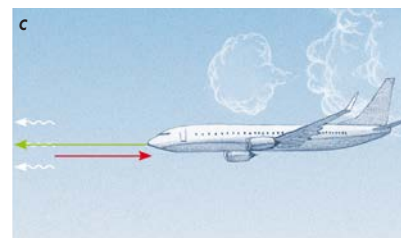
Face au vent, la vitesse de croisière de l'avion sera inférieure, car les forces aérodynamiques dépendent du vent relatif : la

VENT DE FACE OU VENT ARRIÈRE

En vol de croisière, le poids de l'avion est compensé par la portance aérodynamique, et la poussée fournie par les moteurs est compensée par la traînée aérodynamique (a). Comme la portance dépend de la vitesse de l'avion par rapport à l'air ambiant, la vitesse de l'air relativement à l'avion (flèche rouge) doit être la même, qu'il y ait ou non du vent et quelle que soit la vitesse de ce dernier.

Par conséquent, en présence d'un vent de face de vitesse v , l'avion doit réduire sa vitesse par rapport au sol d'une valeur v (b), tandis qu'il doit l'augmenter de v en cas de vent arrière (c). Ainsi, contrairement à ce qu'on pourrait penser, le retard pris par un avion qui vole face au vent n'est pas dû à la résistance plus forte rencontrée par l'appareil, mais à la nécessité de ralentir pour garder une portance égale au poids.

-  Vitesse du vent par rapport à l'avion
-  Vitesse de l'avion par rapport au sol
-  Vitesse du vent par rapport au sol



condition de sustentation (portance égale au poids) sera donc atteinte à des vitesses plus basses, et le temps de vol sera rallongé. Avec un vent arrière, c'est le contraire (voir la figure ci-dessus).

Les passagers des vols transatlantiques le savent bien : entre New York-JFK et Londres-Heathrow (5 540 kilomètres), le temps de vol à 900 kilomètres par heure serait de 6 heures et 9 minutes s'il n'y avait pas de jet-stream. En raison du jet-stream et en optimisant la trajectoire de l'avion, on gagne ou perd environ une demi-heure sur ce trajet.

Or les modèles climatiques prévoient une augmentation de la vitesse moyenne du jet-stream, typiquement de l'ordre de 3 mètres par seconde, ainsi qu'une plus grande variabilité. Si l'impact moyen sera modeste (gain de 4 minutes de New York à Londres, perte de 5 minutes et 20 secondes dans l'autre sens), les probabilités de vol exceptionnellement courts (moins de 5 heures et 20 minutes) ou longs (plus de 7 heures) vont doubler, avec des perturbations associées du trafic aérien. Les voyageurs du XXI^e siècle ne sont donc pas au bout de leurs peines, entre retards et annulations. Et c'est sans compter avec l'accroissement prévu des turbulences aériennes ! ■

BIBLIOGRAPHIE

E. D. Coffel et al.,
The impacts of rising temperatures on aircraft takeoff performance, *Climatic Change*, pp. 1-8, juillet 2017 (doi 10.1007/s10584-017-2018-9).

P. D. Williams,
Transatlantic flight times and climate change, *Environmental Research Letters*, vol. 11, article 024008, 2016.

737 : Airplane characteristics for airport planning, document Boeing, 2013 (www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/acaps/737.pdf).