



Par **MICHEL BARRY**,
pilote professionnel,
ingénieur aéronautique.

Le risque d'hypoxie

DÈS LE FL 100, PEU DE MOYENS EXISTENT POUR DÉTECTER CETTE PERTE DE CAPACITÉ, AUTANT DE RAISONS DE SE MÉFIER DE CETTE DIMINUTION DE LA CONCENTRATION D'OXYGÈNE DANS LE SANG...

Nous avons déjà abordé le sujet de l'hypoxie, dans *Info-Pilote* n° 753 de décembre 2018, sous la plume du Dr Emmanuel Pierantoni dans notre rubrique Aéromédical. Depuis, un accident de 2020, désignant le manque d'oxygène en altitude comme une cause possible de la perte d'un appareil Cirrus SR-22 près de Besançon, est l'occasion de nous intéresser de près au phénomène d'hypoxie. Toute une série de raisons, concernant aussi bien les pratiquants de la montagne que les pilotes, explique comment, malgré la connaissance du risque, on peut se faire piéger. Le risque étant de ne pas comprendre qu'on est en train de perdre progressivement tous ses moyens physiques et surtout intellectuels en ce qui nous concerne. Et après un accident, en général grave puisqu'il conduit la plupart du temps à une perte de contrôle, les enquêteurs disposent de peu de moyens pour attribuer l'accident à une perte des capacités du pilote liée à l'hypoxie. C'est la raison pour laquelle on parle plutôt de probable hypoxie. Après avoir évoqué un certain nombre de cas, nous dégagerons des recommandations à destination des pilotes de notre petite communauté. Ils peuvent être confrontés à l'hypoxie car la plupart de nos appareils performants peuvent aujourd'hui évoluer à des altitudes où l'oxygène est nécessaire pour une grande partie de la durée du vol. Et même pour les autres, leurs performances sont suffisantes pour confronter des pilotes, pas toujours bien informés ni bien préparés, au danger du manque d'oxygène. Par exemple, le moins motorisé des DR400, celui de 120 ch, a un plafond pratique de 11 800 pieds (3 600 mètres). En effet à une altitude de 3 000 mètres la même ventilation de l'appareil respiratoire qu'au sol n'approvisionne que 70 % environ de la masse d'oxygène. Ainsi dès que nous montons, comme à pied en région montagneuse, il y a lieu de se préoccuper de sa propre

condition physique pour savoir si nous serons exposés ou non au risque d'hypoxie. Ce dernier est très différent d'un individu à l'autre et très variable, pour la même personne, en fonction de son état physique au moment du vol. La tolérance à la raréfaction d'oxygène doit ainsi être toujours envisagée dans le cas le plus défavorable. Tel athlète qui aura pu réussir des ascensions de 6 000 mètres pourra éprouver des difficultés à respirer à partir de 3 000 mètres quelques jours plus tard. Nous sommes tous concernés. Des précautions existent pour éviter d'être confronté en vol à l'hypoxie. Nous vous donnons en recommandations les informations les plus adaptées à la prévention et éventuellement à la reconnaissance des signes qui doivent vous faire immédiatement quitter votre niveau de vol avant qu'il ne soit trop tard.

A. Cinq cas de probable hypoxie, incidents ou accidents

1. Accident d'un Piper PA-28 à Saint-Chaffrey (05), le 15/05/97 Voir lien #1 sur notre site.

Un pilote allemand (120 heures de vol), accompagné d'un passager de 78 ans (12 000 heures de vol), entreprend un vol de 3h15 qui doit le mener de Würzburg-Schenkenturm vers Cannes-Mandelieu. Il a prévu des niveaux de vol compatibles avec sa cabine non-pressurisée, son absence d'équipement en oxygène et l'absence de système de dégivrage. De son départ jusqu'à l'arrivée sur les Alpes, tout semble se dérouler normalement. Dès qu'il contacte Genève Terminal, il lui est demandé de monter au niveau 90. Il s'exécute et suit une trajectoire qui l'éloigne du trajet annoncé. Il demande ensuite une route plus directe vers Cannes qui l'oblige à survoler le massif du Mont-Blanc et

	DATE	APPAREIL	LIEU	MÉTÉO	NATURE DE L'ACCIDENT, RÔLE DE L'HYPOXIE	CONSÉQUENCES
1	15/05/97	PA-28	Saint-Chaffrey (05)	Mauvaises conditions	Rupture en vol. Fatigue, probable hypoxie du pilote	Avion détruit, 3 personnes décédées
2	26/05/05	DR400	Massif du Mont Blanc (Bonnes conditions	Collision avec le relief. Probable hypoxie du pilote	Avion détruit, 3 personnes décédées
3	10/10/05	MCR 45	Dijon (21)	CAVOK, vent 8 à 13 kt	Sortie de piste à l'atterrissage. Fatigue liée à un vol à 10 000 ft	Sortie de piste. Avion endommagé
4	01/08/18	PA-31	Calgary (Canada)	Bonnes conditions	Perte de contrôle en vol après une panne-moteur. Probable hypoxie du pilote	Avion détruit, 2 personnes décédées
5	28/09/2020	SR22	La Chevillotte (25)	Approche en conditions IMC	Perte de contrôle lors d'une approche interrompue. Possible asthénie post-hypoxique	Avion détruit, 3 personnes décédées

lui fait rencontrer des masses nuageuses qu'il n'a pas prévues. Dans un premier temps, il demande une clairance pour le niveau 125. La suite du vol est une succession de recherche de zones hors des nuages qui l'oblige entre autres à rester 15 minutes au niveau 120. Il continue selon une trajectoire d'évitements successifs des sommets de nuages tout en montant jusqu'au niveau 154. Il finit par entrer dans les nuages et l'avion commence à givrer. Fatigué, probablement en hypoxie après de longues minutes dans des niveaux qui requièrent normalement une alimentation en oxygène, le pilote perd le contrôle de l'appareil. Une action désespérée conduit à la rupture de la cellule sous facteur de charge positif. Le rapport du BEA mentionne que les phases du vol à des niveaux supérieurs n'étaient pas prévues et que le survol improvisé des Alpes n'aurait pas eu lieu si le pilote avait correctement consulté les prévisions. Mais accepter de monter c'est méconnaître les risques liés à l'hypoxie dès le niveau 100, même pour une personne en bonne santé. Sans doute un risque mesuré pour un athlète bien entraîné, mais plus que probable pour la plupart des autres personnes, notamment pour l'accompagnateur expérimenté de 78 ans. Le dernier message plutôt confus confirmerait l'hypothèse d'une hypoxie partielle.

2. Accident d'un DR400-180 au col Major, dans le massif du Mont-Blanc (74), le 26/05/05

Voir lien #2 sur notre site.

Un pilote (545 heures de vol) accompagné de deux passagers, dont un également pilote (700 heures de vol), entreprend un vol de Chalon-Champforgeuil vers Megève, via le mont Blanc. Sans aucun équipement en oxygène, il monte vers 10 000 pieds puis continue vers le massif entre 10 000 et 11 000 pieds pendant environ une heure. Ensuite il monte à 12 500 pieds où il reste pendant 31 minutes, puis enfin à 14 500 pieds pendant les 11 dernières minutes du vol.

Les conditions météorologiques sont bonnes. Le BEA retient une possible altération des aptitudes physiques du pilote, notamment une fatigue liée à l'hypoxie, perturbant la vision périphérique. Près des parois enneigées, la luminosité et le manque de contraste altèrent naturellement l'évaluation des distances et la bonne perception du relief. Phénomène qui peut s'aggraver pour un pilote ne possédant pas temporairement de bonnes capacités de jugement. L'épave est retrouvée à 4 650 mètres. Dans son rapport, le BEA rappelle la réglementation en vigueur à l'époque de l'accident - arrêté du 24 juillet 1991 : **voir lien #2.1 sur notre site.**

Et concernant les vols à haute altitude pour les aéronefs à cabine non pressurisée : **voir lien #2.2 sur notre site.**

3. Accident d'un Dyn'Aéro MCR 4S à Dijon-Darois (21), le 10/10/05

Voir lien #3 sur notre site

Le pilote (171 h de vol) a construit son appareil dans le cadre d'une certification CNSK (appareils construits à partir d'un kit). L'obtention de son certificat de navigabilité nécessite un certain nombre d'heures de vol dont les quatre heures et demie du vol précédant l'accident sont l'objet. Il en effectue une grande partie entre les niveaux de vol 90 et 100. A l'atterrissage, l'appareil fait une embardée que le pilote corrige grossièrement. Il sort de piste et endommage son appareil.

Le BEA signale que quelques heures à une altitude voisine du FL100 peuvent se traduire par une fatigue et un manque de vigilance qui expliqueraient en partie la survenue des erreurs. L'appareil n'était pas équipé en oxygène de subsistance.

4. Accident d'un Piper PA-31 à Calgary-Springbank (Alberta, Canada), le 01/08/18

Voir lien #4 sur notre site

Le pilote (pilote de ligne 4 400 heures), accompagné d'un technicien, effectue des « travaux de levé » à bord du bimoteur à une altitude de 15 000 pieds. Le moteur droit perd de sa puissance peu après la mise en descente. Passant 13 500 pieds, le pilote perd le contrôle de l'appareil et percute le relief. Le BST du Canada, l'équivalent du BEA français, attribue la perte d'aptitude du pilote nécessaire pour faire face à une situation d'urgence - panne d'un moteur - à l'hypoxie. Pour un vol à une altitude de 15 000 pieds à bord d'un appareil non pressurisé, et en utilisant l'oxygène de bord par intermittence, il est nécessaire :

- d'abord de suivre une formation théorique sur le vol à haute altitude,
- ensuite d'acquiescer une formation pratique pour se familiariser avec les effets de l'hypoxie.

Ce dernier point traduit toutes les difficultés de lutter contre l'hypoxie. Rares en effet sont les pilotes, même professionnels et habitués, volant sur des appareils non pressurisés à être capables de détecter les premiers signes. A fortiori, pour nos amis pilotes privés volant occasionnellement en air moins dense, il n'est pas envisageable de monter à des niveaux supérieurs à ceux désignés par la réglementation et d'attendre les signes qui, bien que connus, deviennent indétectables au fur à mesure que l'esprit souffre du manque d'oxygène.



Figure 1.

L'oxymètre de pouls, appareil bon marché, ne doit pas être utilisé comme seule évaluation de l'hypoxie en l'absence d'équipement d'oxygène de subsistance. Son indication demande une interprétation experte.

5. Accident d'un Cirrus SR22 à La Chevillotte (25), le 28/09/20

Voir lien #5 sur notre site

Le pilote (3 600 h de vol), accompagné de deux passagers dont l'un titulaire d'une licence PPL(A) (1 000 h de vol), entreprend un vol en régime IFR qui doit le conduire de Caen à Besançon. À l'arrivée, le pilote rate la percée et perd le contrôle de l'appareil probablement lors d'une remise de gaz. Bien qu'une grande partie du vol se soit déroulée au-dessus de FL 100, c'est-à-dire en conditions hypoxiantes, le BEA remarque que le système de bord délivrant l'oxygène de subsistance était hors service, situation connue du pilote. Il pensait probablement évaluer le risque d'hypoxie grâce à un oxymètre de pouls (Fig. 1).

À ce propos, le BEA pointe l'insuffisance, voire le caractère laxiste, des recommandations diffusées par l'EASA « Preventing hypoxia » (voir lien ci-dessous). On relira attentivement les détails du texte du BEA, notamment toutes les remarques à caractère réglementaire et opérationnel, en particulier :

- les règles NCO que tout pilote privé devrait connaître notamment concernant l'utilisation de l'oxygène de subsistance ;
- l'obligation pour les pilotes d'appareils américains de se conformer à la réglementation en vigueur sur le territoire survolé ;
- les limites des recommandations EASA (améliorées depuis l'accident : recommandation FRAN-2022-003), notamment la possibilité « ... d'amener les pilotes à faire une évaluation erronée de leurs besoins en oxygène de subsistance. »

Voir lien #5.1 sur notre site

B. Recommandations : les règles sont parfois compliquées, évolutives, mais plutôt que de chercher à les contourner, restons conscients du risque et appliquons celles en vigueur le jour du vol. Connaître quelques rudiments de physiologie.

1. Des libertés parfois mortelles

Les cinq pilotes des accidents pris comme exemples ont négligé les règles élémentaires de prudence concernant le vol en atmosphère moins dense. De plus, ils n'ont pas respecté la réglementation. Les cinq accidents auraient dû être évités si des décisions imprudentes n'avaient été prises :

- **Cas n°1** : accepter de monter au-dessus de 15 000 pieds sans aucun équipement d'oxygène de subsistance.
- **Cas n°2** : voler entre 12 000 et 14 000 pieds sans aucun équipement en oxygène de subsistance.
- **Cas n°3** : imprudence moins évidente pour un vol entre FL 90 et FL 100 sans oxygène, mais qui montre bien comment une hypoxie modérée peut altérer ensuite les aptitudes manœuvrières du pilote même à l'atterrissage.
- **Cas n°4** : équipement en oxygène de subsistance non conforme à la réglementation et surtout, d'après l'enquête, très difficile à utiliser en cas de difficulté technique (panne d'un moteur).
- **Cas n°5** : application de règles personnelles (contrôle de l'hypoxie par un oxymètre de pouls) à la fois contestable sur le plan médical et aussi non-réglementaire.

2. Éléments de physiologie : manifestations moyennes des troubles dus à l'hypoxie chez un individu en bonne santé. À moduler en fonction de l'état de santé, de l'âge, de la fatigue

TRANCHES D'ALTITUDE	NATURE DES TROUBLES, SIGNES
De zéro à 4 500 pieds	Saturation en oxygène quasi normale. Pas de troubles.
De 4 500 à 11 500 pieds	Compensation complète par augmentation des rythmes cardiaque et respiratoire. Peu de troubles.
De 11 500 à 13 500 pieds	Début des troubles : malaises, picotements, fatigue, euphorie, déprime sont observés.
De 13 500 à 20 000 pieds	Aggravation des troubles : vision obscurcie, rétrécie, bruits atténués, modification de la peau, couleur bleue sur les lèvres.
Au-dessus de 20 000 pieds	Seuil critique. Perte de connaissance imminente, respiration difficile, irrégulière, ralentissement du rythme cardiaque. Possibilité d'arrêt respiratoire et de mort subite.

3. La règle actuellement en vigueur sur le territoire français : NCO.OP190. Utilisation de l'oxygène de subsistance pour les vols non commerciaux (Aviation générale)

Voir lien #6 sur notre site

4. Information des pilotes d'aéroclubs

La plupart des aéroclubs informent leurs élèves et leurs pilotes dès qu'ils utilisent des appareils capables de voler à des altitudes où l'hypoxie survient. Il serait utile que l'information soit systématique. Bien se souvenir que l'hypoxie ne prévient pas. « **Fausse impression de tolérance...** ». Voir ci-dessous l'intervention du Pr Henri Marotte. Attendre les premiers signes est suicidaire !

Si l'hypoxie dite « modérée » (entre 4 000 et 11 000 pieds) n'est pas mortelle, elle peut générer une perte du discernement qui ne permet plus de prendre de décision vitale, comme celle de descendre immédiatement. Et elle peut se prolonger même quand le pilote retrouve un air plus dense (cas n°3).

C. Point de vue du Pr Henri Marotte Responsable de l'enseignement de médecine aérospatiale à Paris, membre du conseil médical de l'aéronautique civile

L'oxygène est nécessaire au fonctionnement de nos cellules, notamment de nos cellules nerveuses. Celles-ci n'ont aucun dispositif de stockage de ce gaz et doivent le recevoir en permanence. Les cellules nerveuses, dont on pourrait imaginer qu'elles sont dédiées à l'alerte, sont donc « désactivées » au moment où elles devraient apporter cette alerte.

La relation entre la quantité d'oxygène transportée par le sang et celle qui est délivrée aux tissus est complexe et sujette à une large variabilité pouvant donner à l'intéressé, après une première

expérience heureuse, une fausse impression de tolérance, d'autant plus importante que l'hypoxie peut parfaitement rendre le sujet euphorique.

L'euphorie : elle est souvent observée ; elle peut parfois passer brutalement (dans tous les sens du terme) dans l'agressivité. Enfin elle peut même être (inconsciemment) recherchée au cours d'expositions ultérieures à l'altitude. Nous en avons des exemples.

Les troubles cognitifs sont constants, mais ils ne sont identifiés que s'ils sont recherchés. Récemment, à 16 000 ft, j'étais parfaitement serein. J'avais sous les yeux une feuille de test, comportant le calcul de la réserve d'oxygène à embarquer pour un vol de 150 min, connaissant le débit d'oxygène. En 10 minutes de test, j'ai échoué à trouver le mode opératoire. Moi ! Mais j'étais bien ! Sans ce fichu test, j'aurais évidemment conclu : 16 000 ft : RAS.

Les constantes de l'hypoxie modérée sont les troubles du comportement (inhibition ou excitation, euphorie, dépression ou agressivité) et les troubles cognitifs, comprenant l'occultation des préoccupations de sécurité.

Et le piège : les symptômes peuvent être totalement décorrélés de la valeur de l'altitude, ou de la pression en oxygène, ou de la saturation. L'organisme tente de lutter contre l'hypoxie, d'où la fatigue. Les récits ci-dessus ne disent rien d'autre : vol en altitude, pilotes (âgés !) fatigués, erreur de pilotage dans la dernière phase de vol, donc à basse altitude, et collision avec la planète. Nous pouvons imputer l'erreur de pilotage à l'asthénie qui a suivi l'exposition à l'hypoxie.

Nous ne commentons pas cette erreur grotesque : remplacer l'oxygène par un oxymètre – dont la précision est par ailleurs toute relative. Celui-ci est conçu, à la base, comme un dispositif médical et non comme un outil de monitoring de l'administration d'oxygène. L'accident du Cirrus à bord duquel il y avait un oxymètre et pas d'oxygène est totalement navrant.

L'hypoxie « débranche » le système d'alerte. Le pilote devient la seule personne inconsciente de son état d'hypoxie. Terminons par une boutade, même si elle est d'un goût discutable : quel est le point commun entre un sujet hypoxique et un mari trompé (en bon français : cocu) ? Réponse : dans un cas comme dans l'autre, il est le seul à ne pas le savoir. Ne soyons pas les « cocus » de l'altitude. ●