

L'exposition de l'Homme à l'altitude en aéronautique : de Paul Bert à nos jours

par Henri Marotte

Directeur de la Capacité de Médecine Aéronautique de Paris, Centre Universitaire des Saints-Pères, 45, rue des Saints-Pères, 75270 Paris Cedex 06. Tél. : 01 42 86 22 66. E-mail : henri.marotte@univ-Paris5.fr
henri.marotte@tiscali.fr

Reçu le 7 mai 2006

RÉSUMÉ

Cet article est centré sur l'apport de Paul Bert à la physiologie aéronautique moderne. Il retrace un historique exceptionnel, qui aboutit à la notion de pression partielle de l'oxygène comme grandeur significative pour l'organisme. La protection de l'Homme

contre l'altitude en aéronautique reprend cette notion en manipulant soit la pression environnant l'homme, soit la composition en oxygène des gaz inhalés. S'y ajoute le cas de la protection contre une défaillance accidentelle du système de pressurisation de l'avion.

SUMMARY The exposure of man to altitude when flying: from Paul Bert to today

This paper is organised around Paul Bert's inputs to modern aviation physiology. Paul Bert gave a masterly historical work, which established the notion of oxygen partial pressure as the right physiological parameter for the body. Human protection against

aviation altitude takes this notion into account, by modifying either the pressure surrounding the body or the oxygen fraction in inhaled gases. We also consider the case of protection against accidental loss of aircraft pressurization.

Pour tout physiologiste respiratoire, notamment lorsqu'il s'intéresse à la respiration en altitude, la référence à Paul Bert est incontournable. Dans le cadre de la séance d'hommage à cet illustre scientifique, nous proposons une revue de son œuvre, à la fois comme synthèse des travaux antérieurs et comme base des connaissances actuelles.

Le travail de Paul Bert (1979, réédition CNRS) contient le meilleur historique connu sur le sujet. Nous nous en inspirons donc très largement pour retracer les connaissances en ce domaine.

La première mention connue, du moins dans le monde occidental, de troubles dus à l'altitude, provient d'un religieux espagnol, le Père José de Acosta, qui parcourait les hauts plateaux andins après leur conquête par les troupes espagnoles. Dans un texte publié en 1590, De Acosta décrit les troubles ressentis, tant par l'homme que par l'animal, et les imputa à l'altitude. De nombreux autres troubles devaient par la suite être relatés dans des conditions similaires, avec une discussion récurrente sur leur origine, altitude ou simple fatigue due à des marches épuisantes. Mais progressivement se dégagait la notion que ces troubles étaient bien la marque de l'altitude, sans que l'on comprît à l'époque pourquoi.

Le 17^{ème} siècle fut marqué par la découverte de la pression barométrique, avec les noms de Galilée, Torricelli, Pascal, Von Guericke, Boyle, Mariotte, entre autres. Un facteur physique fut donc clairement identifié, caractérisant

l'altitude : la pression barométrique diminue lorsque l'altitude augmente ; c'est la célèbre expérience organisée par Blaise Pascal et exécutée par son beau-frère Florent Périer, qui gravit le Puy-de-Dôme en notant, à intervalles réguliers, la hauteur de la colonne de mercure. Ce fut la première courbe « pression-altitude » de l'histoire. Une première explication des troubles physiopathologiques ressentis se fit donc jour : les troubles observés sont dus au fait que l'air devient plus « subtil » en altitude.

Le siècle suivant fut marqué par l'apparition d'une hypothèse amusante : les troubles observés sont dus à la variation de la force que la pression de l'air exerce sur le corps. Cette hypothèse fut émise pour la première fois clairement par Bouguer en 1744 ; elle eut cours jusqu'à l'époque des travaux de Paul Bert. Elle fut récusée dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle. Hypothèse amusante, disons-nous car, encore à l'heure actuelle, un certain nombre de revendications réclament la réparation financière de pathologies veineuses, constatées dans le cadre de l'activité aéronautique, s'appuyant sur cette fameuse « force » ; or, ces revendications – ou leurs auteurs – oublient d'une part que l'organisme régule ses différentes pressions autour de la pression ambiante, d'autre part que, s'agissant du sang, fluide incompressible, la variation de la pression barométrique est à l'évidence sans conséquence sur les volumes sanguins. Or, lisons ou relisons Paul Bert : le débat est tranché depuis un siècle et demi !

Plus sérieusement, le 18^{ème} siècle est, en notre propos, celui de la découverte de l'oxygène et du début de l'aérostation. La paternité de la découverte de l'oxygène revient plus à un courant de pensée qu'à un homme seul : le suédois Scheele, l'anglais Priestley, le français Lavoisier laisseront ainsi leur nom à l'Histoire. L'oxygène définitivement découvert (1774), sa proportion établie dans l'air et son rôle démontré dans les oxydations de la vie, de Saussure gravit le Mont-Blanc au début du mois d'août 1787, ressentit et observa d'intenses troubles physiopathologiques et les mit sur le compte du déficit en oxygène. Était donc acquise la notion de pression partielle d'oxygène comme condition de la vie, même si elle n'était pas encore exprimée avec ces mots.

Cette période de l'histoire est également marquée par les premières ascensions en ballon, en 1783 : Pilâtre de Roziers et le marquis d'Arlandes le 21 novembre avec un ballon à air chaud, les physiciens Charles et Nicolas Robert 9 jours après, le 1^{er} décembre, avec un ballon à gaz léger (l'hydrogène, récemment découvert). Très vite, l'altitude atteinte par les aérostats est très élevée, voire même tellement irréaliste aux yeux des contemporains que la réalité des chiffres est contestée, surtout lorsque l'aéronaute lui-même varie dans ses revendications. Paul Bert nous conte ainsi l'histoire de Blanchard, qui revendique jusqu'à 32 000 pieds (9 600 m) ; mais, bizarrement, Paul Bert ne reprend que la thèse de l'affabulation, celle des contemporains (et peut-être rivaux) de Blanchard, sans se pencher sur une autre hypothèse qui est celle des troubles psychiques d'origine hypoxique, dont nous pouvons légitimement penser qu'ils auraient pu perturber le malheureux aérostatier aussi bien dans l'observation physique que dans la mémorisation des résultats. La discussion – si tant est qu'elle soit possible compte tenu des éléments disponibles à ce jour – mérite de rester ouverte.

Arrivèrent très vite les premiers accidents : dès 1785, Pilâtre de Roziers et Romain se tuèrent dans l'incendie, à 1 000 m d'altitude de leur ballon mixte (ballon à hydrogène réchauffé par un feu) ; mais il s'agissait là d'accidents « mécaniques », « compréhensibles » (Paul Bert). Le monde scientifique sera bien plus perplexe devant le « mal des ballons », ce mal mystérieux qui frappe les audacieux. Le 19^{ème} siècle connaîtra une recherche active sur ce thème. Nous retiendrons le nom de Junod, qui construisit en 1835 ce qui semble avoir été le premier caisson à dépression de l'histoire, puis celui de Jourdanet, qui travailla sur le mal des montagnes, rapporté à sa cause, l'hypoxie, et confia le versant « aérostation » ou « mal des ballons », envisagé selon la même hypothèse, à Paul Bert.

En fait, en ce qui concerne l'altitude, Paul Bert va tout simplement traiter de façon magistrale la notion de pression partielle d'oxygène, dégagée par de Saussure et en tirer le prolongement logique, à savoir l'administration d'oxygène en altitude. Il proposera les premiers calculs d'enrichissement en oxygène en fonction de l'altitude. Exposons donc maintenant les grandes lignes de ce que sont les conséquences physiopathologiques de l'exposition à l'hypoxie d'altitude en aéronautique, et les moyens de les prévenir. Après Paul Bert l'historien,

voyons Paul Bert le précurseur et le père de la médecine aéronautique.

L'EXPOSITION DE L'HOMME À L'ALTITUDE EN AÉRONAUTIQUE

L'Homme est exposé à l'altitude dans deux circonstances de vol, soit en conditions normales de fonctionnement de l'avion et de ses systèmes, soit en cas de dysfonctionnement. L'actualité du transport aérien civil de passagers nous amène ensuite à distinguer deux sous-ensembles dans la première de ces deux conditions : le sujet normal et le sujet déficient du point de vue respiratoire.

En conditions normales de vol, le risque hypoxique est celui de l'exposition aiguë à l'altitude (Luft, 1965). L'hypoxie d'altitude est une hypoxie hypocapnique. En conditions chroniques (après quelques jours), l'organisme présente des réactions d'adaptation aux variations de la capnie (P_{CO_2}). Dans les conditions usuelles de l'aéronautique, ces mécanismes d'adaptation n'ont pas le temps d'apparaître avec des effets significatifs et leur rémanence n'est pas suffisante pour pouvoir observer un cumul adaptatif entre deux ou plusieurs expositions à l'altitude. La réponse ventilatoire à l'hypoxie aiguë d'altitude est donc une hyperventilation hypoxique partiellement inhibée par l'hypocapnie, c'est-à-dire en fait très modérée.

Les conséquences de l'exposition à l'hypoxie d'altitude chez le sujet jeune et sain sont classiquement découpées en deux grands groupes :

– Les conséquences sur les grandes fonctions végétales de l'organisme, caractérisées par :

- une hyperventilation d'importance très modérée ;
- une augmentation du rythme et du débit cardiaques, rapidement limitée par l'hypoxie myocardique ;
- l'apparition aléatoire de troubles du rythme et de la conduction cardiaques ;
- par contre, tant que l'exposition à l'altitude reste raisonnable, les autres observations ne montrent que des modifications minimales. Les perturbations, limitées, des autres grandes fonctions physiologiques sont sans grande importance dans les conditions considérées ici.

– Les conséquences sur les fonctions de relation (acquisition sensorielle, fonctions nerveuses supérieures, capacités psychomotrices) sont beaucoup plus importantes :

- dégradation de la fonction visuelle ;
- maintien de la fonction auditive ;
- troubles de la fonction musculaire, démontrés aussi bien sur les critères mécaniques qu'électrophysiologiques ;
- dégradation profonde de la fonction neuronale (conduction, transmission synaptique) ;
- dégradation profonde des fonctions psychiques, dans les trois composantes majeures que sont les fonctions psychomotrices (incoordination, tremblements, dysmétrie), les fonctions cognitives (impossibilité d'effectuer ou de mener à bonne fin des opérations mentales

simples), les fonctions thymiques, avec des troubles du comportement majeurs et polymorphes : excitation, agressivité ou état de type ivresse éthylique ou, au contraire (le plus fréquent) dépression avec inhibition profonde de la personnalité.

Nous insisterons sur le fait que les troubles psychiques peuvent être profonds et insidieux, conduisant le sujet à un abandon de toute notion de sauvegarde. Le jugement étant atteint, le sujet ne met pas en œuvre les moyens de protection et, son aéronef restant en altitude, meurt à bord. De nombreux exemples de drames imputables à ce mécanisme sont connus. Citons en deux. Le premier est historique et il tint une place importante dans l'analyse de Paul Bert : ce fut l'accident du ballon « Le Zénith », le 15 avril 1875, dans lequel deux des trois aéroliers trouvèrent la mort. Le second exemple date d'une actualité très récente : il semble que ce soit ce mécanisme qui ait entraîné l'inconscience puis la mort de l'équipage d'un Boeing 737 près d'Athènes le 14 août 2005, provoquant l'écrasement de l'avion et la mort de tous ses occupants (121 personnes) ; le système de pressurisation de l'avion ne fonctionnait pas.

Un cas particulier doit être réservé au sujet atteint d'une pathologie de type hypoxique, généralisée ou localisée ;

nous entendons par ces mots soit le sujet atteint d'un handicap respiratoire, soit le sujet dont l'un des tissus est atteint d'une hypoxie par restriction circulatoire (système nerveux du sujet atteint d'une pathologie vasculaire restrictive, maladie coronaire). Les symptômes de désadaptation apparaissent évidemment pour des valeurs d'altitude et des durées d'exposition bien moindres que pour des sujets sains.

La tolérance de l'homme à l'hypoxie d'altitude a été tabulée dans les années 1930 (Ruff & Strughold, 1939). Cette tabulation repose sur un découpage de l'altitude en quatre zones (Fig. 1) et les valeurs sont indiquées pour la limite basse de la dispersion statistique des données individuelles (et non pour les valeurs moyennes) :

- une première zone est dite « zone indifférente » : un sujet normal ne présente pas de désaturation en oxygène de son hémoglobine. L'altitude correspondante est comprise entre le niveau de la mer et 1 500 m ;
- la « zone de compensation complète », définie comme la tranche d'altitude à l'intérieur de laquelle la désaturation est compensable par un organisme sain (saturation du sang artériel en oxygène, ou S_aO_2 comprise entre 95 et 85 %) : entre 1 500 et 3 500 m ;
- la « zone de compensation incomplète », définie comme la tranche d'altitude caractérisée par les troubles

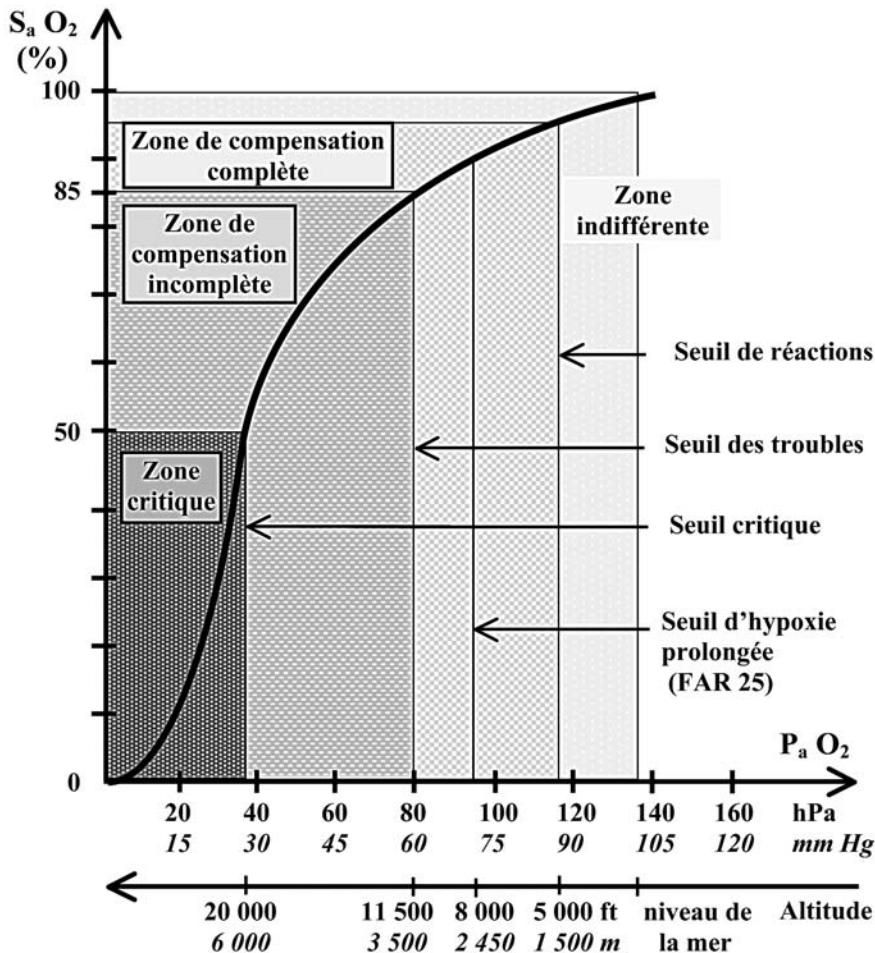


FIG. 1. – Zones de tolérance à l'hypoxie en fonction de l'altitude (voir texte).

des fonctions de relation, et notamment les troubles psychiques : S_aO_2 comprise entre 85 et 50 %, altitude comprise entre 3 500 et 5 500 à 6 000 m ;

– au-delà de cette limite, la « zone critique » est la zone d'altitude à l'intérieur de laquelle la perte de conscience est susceptible de survenir, à une vitesse d'autant plus rapide que l'altitude est plus élevée.

C'est dans cette dernière zone que les aérostats du ballon « Le Zénith » perdirent la vie. De nombreux accidents aériens ont encore lieu dans ces mêmes conditions, qu'il s'agisse d'avions légers mal ou non pressurisés, de planeurs, etc. Mais cette zone est surtout celle du risque d'accidents par défaut de la pressurisation de l'avion, ce qui amène, auparavant, à évoquer la protection physiologique de l'Homme en vol.

La protection physiologique de l'Homme en vol repose sur deux techniques, utilisant l'une et l'autre le même concept, maintenir la pression partielle d'oxygène à une valeur suffisante. Ces deux techniques sont le conditionnement de cabine, dont le but est le maintien de la pression dans l'environnement du sujet à une valeur plus élevée que la pression à l'altitude de vol de l'aéronef, et l'inhalation d'oxygène ou d'un mélange gazeux convenablement suroxygéné. Ces deux techniques peuvent être associées : c'est le cas à bord des avions de chasse. Nous remarquons également que la protection contre l'hypoxie par la technique de l'inhalation de mélanges enrichis en oxygène est limitée à une altitude voisine de 12 000 m : cette altitude est la limite au-delà de laquelle la pression totale est trop faible pour que la pression partielle d'oxygène atteigne un niveau suffisant, même avec de l'oxygène pur. Cette limite ne fut pas reconnue par Paul Bert car ni les aérostats de l'époque ni son caisson à dépression ne permettaient d'atteindre cette limite. Elle fut identifiée, pour la première fois semble-t-il, par le physiologiste viennois von Schrötter en 1905 (Von Schrötter, 1912).

Le conditionnement de cabine est la technique de choix utilisée par l'aviation commerciale. Elle nous éloigne de Paul Bert car le grand homme eut lui aussi ses faiblesses et nous le surprenons à railler cette « fantaisie, qui consiste à imaginer que l'Homme puisse explorer l'altitude en étant enfermé dans une enceinte munie de hublots et fenêtres » ; c'était, pour lui, une « charmante mystification, dont il convient de laisser le développement à M. Jules Verne ».

Le conditionnement de cabine maintient à l'intérieur de la cabine une pression, exprimée de façon intuitive en termes d'« altitude », généralement comprise entre 1 500 et 2 500 m, la valeur maximale admissible étant, selon les règlements internationaux, 8 000 pieds, soit 2 438 m (Department of Transportation ; European Aviation Safety Agency). Le problème technique réside dans la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la cabine, qui peut atteindre au niveau de vol de l'avion (12 000 m) une valeur de l'ordre de 2/3 d'atmosphère. La résistance de la structure doit être adaptée à cette valeur et le risque de cette technique réside dans la perte de la pressurisation. Un tel accident est très rare mais non exclu. Il peut être

provoqué par une panne de système, par rupture par fatigue de la structure, par éclatement d'un moteur et projection d'éclats à travers la cabine, par acte criminel, etc.

Le cas de l'avion non pressurisé nous ramène aux accidents historiques, ne le rappelons pas. Par contre, la décompression rapide de la cabine en vol entraîne des conséquences physiopathologiques intéressantes. Présentons les calculs qui ont été effectués à propos d'un avion de ligne typique (Fig. 2). L'avion vole en croisière à l'altitude de 39 000 ft (11 900 m – pression barométrique $P_B = 197$ hPa = 147 mm Hg), sa cabine étant pressurisée à 8 000 ft (2 438 m – $P_B = 753$ hPa = 565 mm Hg). Ceci signifie que, au moment de la décompression, l'atmosphère environnant le sujet passe en quelques secondes de 753 à 197 hPa. Que deviennent alors les différentes pressions partielles d'oxygène de l'organisme ?¹

Vers 2 500 m, la pression partielle de l'oxygène des gaz alvéolaires est comprise entre 95 et 100 hPa (135-140 hPa au niveau de la mer) et la pression partielle de l'oxygène du sang veineux est proche de 40 hPa (52 hPa au niveau de la mer). Au moment de la décompression, toutes les pressions partielles des gaz alvéolaires décroissent, à l'exception de la pression partielle de vapeur d'eau, qui est une grandeur physique dépendant de la température (63 hPa à 37 °C) et de celle du dioxyde de carbone, qui s'équilibre avec le sang veineux, autour de 30 hPa dans ces conditions (Marotte *et al.*, 1990). La pression partielle de l'oxygène des gaz alvéolaires atteint donc une valeur très basse, inférieure à 20 hPa, et inférieure à la pression en oxygène du sang veineux. À la limite, c'est le sang veineux qui achève de se désaturer dans les alvéoles pulmonaires (Luft *et al.*, 1951). Dès l'instant de la décompression, le sang quitte le poumon totalement désaturé et atteint le cerveau environ 4 secondes plus tard. Or, toute l'expérience médicale ou physiologique nous apprend que la perte de conscience survient environ 5 secondes après l'interruption de l'oxygénation cérébrale. La perte de conscience survient donc de façon extrêmement rapide après la décompression, d'autant plus rapidement que l'altitude atteinte est plus élevée. Vers 12 000 m, la perte de conscience survient en 8 à 10 secondes. Les valeurs de tolérance sont généralement tabulées selon le concept de « temps de conscience utile », identifié dès les travaux précurseurs des années 1930 (Ruff & Strughold, 1939).

Des systèmes d'oxygène sont mis en place à bord des avions, aussi bien pour les passagers que pour les pilotes. Les systèmes dédiés aux passagers sont déployés automatiquement devant le visage des passagers en cas de nécessité ; ceux qui sont dédiés aux membres de l'équipage de conduite de l'avion, d'un type plus complexe, doivent être déployés et mis en place par le membre d'équipage lui-même, qui est normalement instruit et entraîné pour cela. Cependant, d'un point de vue *facteur humain*, le pilote victime d'une décompression acciden-

¹ Nous rappelons l'équivalence : 3 mm Hg = 4 hPa.

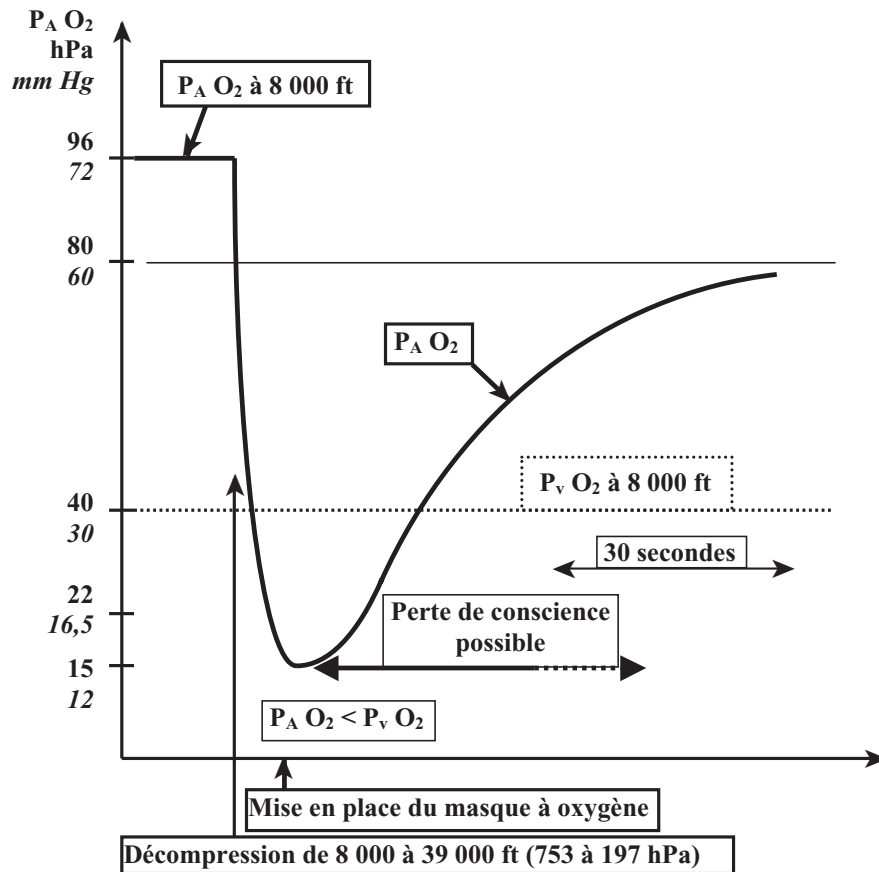


FIG. 2. – Variations de la $P_A O_2$ après une décompression rapide. Le masque à oxygène est mis en place moins de 5 secondes après la décompression.

telle, donc d'une avarie grave de son aéronef, est tenté de traiter l'urgence aéronautique en oubliant sa propre protection : il s'agit là d'un problème majeur mais qui, une fois de plus, ne nous éloigne pas des observations de Paul Bert lui-même.

D'un point de vue national, nous notons ici un détail : au niveau de la flotte mondiale des avions de transport de passagers – avions de ligne et avions d'affaire – les systèmes d'oxygène à la disposition des membres de l'équipage de conduite sont produits à 90 pour cent par l'industrie française (société Inter technique, du groupe Zodiac).

Nous comprenons donc que la protection de l'Homme contre l'hypoxie d'altitude se décline en deux grands concepts : la protection contre une exposition progressive à l'altitude, la tolérance humaine se mesurant par l'altitude atteinte, et la protection contre une exposition très brutale, en conditions accidentelles, à une altitude très élevée : la protection doit alors être évaluée en termes de temps, le « temps de conscience utile ».

En conclusion, dans cette évocation de l'œuvre de Paul Bert à propos de l'altitude, nous avons pris connaissance d'un historique très riche et très documenté, nous avons pu dégager la notion de pression partielle d'oxygène comme déterminant primaire de la tolérance de l'être vivant en altitude, avec son corollaire qu'est le calcul des moyens de protection.

BIBLIOGRAPHIE

- Bert P., La Pression Barométrique, réédition CNRS, 1979, Paris, 1183 pages.
- Department of Transportation (USA), Federal Aviation Administration, FAR (Federal Aviation Regulations, or 14 CFR), Part 25 : Airworthiness Standards, Transport Category Airplanes, § 841 : Pressurized cabins.
- European Aviation Safety Agency (EASA) : CS-25 : Large aeroplanes, § 841 : Pressurized cabins.
- Luft U. C., Aviation physiology: the effects of altitude. Handbook of Physiology – Respiration W. O. Fenn & H. Rahn Ed. – *Am. Physiol. Soc.*, 1965, Washington DC : t. 2, 44, 1099-1145.
- Luft U. C., Clamann H. G., Opitz E., The latency of hypoxia on exposure to altitude above 50000 ft. *J. Aviat. Med.*, 1951, 22 (2), 117-122.
- Marotte H., Touré C., Clère J. M., Vieillefond H., Rapid decompression of a transport aircraft cabin: protection against hypoxia. *Aviat. Space Environ. Med.*, 1990, 61 (1), 21-27.
- Ruff S., Strughold H., Grundriß der Luftfahrtmedizin. Johann Ambrosius Barth, 1939, Verlag, Leipzig.
- von Schrötter H., Hygiene der Aeronautik und Aviatik. W. Braumüller, Wien und Leipzig, 1912.

Ouvrage complémentaire récent sur le sujet, écrit par l'auteur de cet article :

- Marotte H., Physiologie aéronautique. SEES, aérodrome de Lognes-Emerainville 77185 Lognes (230 pages).