

**Travaux Personnels Encadrés (Physique/chimie – SVT).
Structurer, Innover**

La pressurisation dans les avions de ligne.

Pourquoi la pressurisation est elle indispensable dans un avion de ligne ? Pourquoi ce système doit il être particulièrement fiable ?

Table des matières

<u>Introduction</u>	3
<u>Chapitre 1 : Les variations des paramètres environnementaux en altitude</u>	4
Qu' est-ce que l'atmosphère ?.....	4
La pression varie avec l' altitude.....	5
<u>Chapitre 2 : Les effets sur le corps humain</u>	7
Les Barotraumatismes.....	7
L'Hypoxie.....	10
<u>Chapitre 3 : La pressurisation : fonctionnement, et effets d' une décompression</u>	15
Fonctionnement du système de pressurisation d'un avion à turboréacteurs..	15
L' embolie : un effet d'une décompression.....	25
<u>Expérience: Application de la loi d' Henry</u>	30
<u>Conclusion</u>	31
<u>Annexe</u>	32
<i>Les unités inhabituelles sont définies dans l' annexe.</i>	

Introduction

Les hommes ont depuis très longtemps cherché à accomplir un rêve qu'on a souvent pensé irréalisable, ou réservé aux dieux : voler. Mais le simple fait de s'élever en l'air, dès que cela fut possible, outre l'aspect mécanique du vol, a apporté de nouveaux problèmes : la santé humaine et la vie en altitude. Voler représente souvent un danger, comme dans la légende grecque, où Icare, fils de Dédale, voulant s'approcher trop près du soleil se serait brûlé les ailes de cire qui lui permettaient de voler et mourut devant son père.

L'aéronautique s'est particulièrement développée tout au long du vingtième siècle où les premiers vols de « plus lourds que l'air » se sont déroulés. Dans la société actuelle, les avions de ligne évoluent à des altitudes très élevées (souvent aux environs de 10 000 mètres).

Nous avons décidé de nous intéresser ensemble dans le cadre des TPE aux problèmes liés à la pression en altitude. De multiples autres phénomènes de santé en aéronautique auraient pu être étudiés, cependant nous n'avons pas voulu nous étaler sur un sujet trop vaste que nous n'aurions pu approfondir.

Nous essayerons donc de déterminer pourquoi la pressurisation est indispensable dans un avion de ligne et pourquoi elle doit être particulièrement fiable.

Nous aborderons d'abord les propriétés physiques de l'air, rappelant les principales lois et définitions relatives à la pression, puis nous verrons les problèmes engendrés par un manque de pression ou une décompression sur le corps humain, étudiant aussi le principe mécanique de la pressurisation dans un avion à turboréacteurs. Enfin, nous étudierons le cas particulier de l'embolie. L'exposé que nous allons maintenant vous présenter comprendra une petite expérience qui permettra de mieux comprendre un phénomène physique.

Étudions donc en premier lieu les propriétés physiques de l'atmosphère et sa composition.

I/ Les variations des paramètres environnementaux en altitude

Dans l'atmosphère, on constate que certains paramètres environnementaux (pression, teneur en certains gaz, densité de ces mêmes gaz...) varient avec l'altitude. quels sont ils? comment expliquer ces variations?

A : Tout d'abord, qu'est ce que l'atmosphère?

Une atmosphère est une enveloppe gazeuse entourant une planète, dont il est difficile de préciser la limite supérieure, car les gaz deviennent progressivement de plus en plus rares.

La présence ou non d'une atmosphère autour d'une planète dépend de l'attraction que celle-ci exerce sur les molécules gazeuses. Ainsi, l'absence d'atmosphère sur Mercure est, entre autre, due à sa faible masse, donc à sa faible attraction. Sur les planètes gazeuses de grande dimension, les gaz légers comme l'hydrogène et l'hélium sont retenus par la gravité, alors que sur Terre, celle-ci est insuffisante pour les conserver.

L'atmosphère terrestre est originale dans le système solaire : elle est constituée par une série de couches superposées, de densité décroissante de la surface terrestre à sa limite supérieure.

(voir annexe 1)

La masse de celle ci est estimée à environ 5.10^{18} Kg, dont la moitié est située en-dessous de 5.5 Km. Les deux principaux constituants gazeux de l'atmosphère sont l'azote (78%) et l'O₂(21%) les autres constituants sont l'argon, le CO₂, le néon, l'hélium...

Il faut également signaler la présence, dans les basses couches, d'eau sous forme de vapeur, qui représente 0 à 4% du volume d'air sec. La très faible teneur en Ozone ne doit pas masquer son importance : situé entre 15 et 35 Km, il absorbe une grande quantité des rayonnements ultraviolets provenant du soleil. Cet ozone protège les couches inférieures des effets destructeurs des rayons UV sur la matière organique (Les UV sont, entre autre, des facteurs mutagènes). D'ailleurs, la mise en évidence, ces dernières années, de trous dans la couche d'ozone des régions polaires est un sujet de préoccupation pour la communauté scientifique.

La troposphère s'étage de la surface jusqu'à 12 Km d'altitude. (Or, un avion de ligne se déplace exclusivement dans la troposphère. C'est donc au sein de cette première couche que nous étudierons les variations des conditions environnementales) cette couche représente 75% de la masse de l'atmosphère. C'est la couche concernée par les phénomènes météorologiques.

La stratosphère s'étend environ de 12 Km jusqu'à 50 Km d'altitude. Elle est caractérisée par une augmentation plus ou moins régulière de la température. A sa limite supérieure, elle est de 0°C. Des vents très violents, allant jusqu'à 350 Km/h, peuvent y être observés.

La mésosphère est la plus froide des couches atmosphériques. En fait elle est plus froide que la plus basse des températures enregistrées en Antarctique. Il y fait assez froid pour geler de la

vapeur d'eau (qui se trouve normalement principalement dans la troposphère, mais des "échappées" de celle-ci parviennent à atteindre cette couche) en nuages de glace.

D'ailleurs, on peut voir ces nuages si la lumière du soleil les frappe après le coucher du soleil. Ils s'appellent " Noctilucent Clouds " La mésosphère est également la couche dans laquelle beaucoup de météorites se consomment lorsqu'ils entrent dans l'atmosphère de la Terre. Ils sont ce qu'on appelle les "étoiles filantes".

La thermosphère se développe ensuite jusqu'à près de 500 Km d'altitude. Elle porte bien son nom car la température dépasse 1200C°.

Au-delà, sous le rayonnement UV de petite longueur d'onde, les molécules gazeuses s'ionisent. D'ailleurs, le carbone 14 est issu de l'ionisation de l'azote 14, dans cette sphère.

B : La pression de l'atmosphère (appelée pression atmosphérique) varie avec l'altitude

Qu'entend-on par pression atmosphérique?

L'air, qui compose l'atmosphère, exerce une force sur toutes les faces des objets se situant quelque part dans l'atmosphère. Cette force est en réalité le poids des molécules qui constituent l'atmosphère.

La pression atmosphérique est le rapport de l'intensité de ce poids s'exprimant sur une surface, à l'aire de celle-ci. Rigoureusement, l'unité de la pression est le Newton/m². On a simplifié cette notation, et l'unité de pression est devenue, par convention, le Pascal (en l'honneur du scientifique Pascal, qui a considérablement contribué à l'avancée des connaissances dans ce domaine).

L'atmosphère exerce donc une pression sur la surface de la terre et sur tout objet s'y trouvant.

On constate que, plus l'altitude est importante, plus la pression est faible. Comment expliquer cette variation?

Pour avoir une vision claire de la chose, étudions le cas d'une piscine : lorsqu'un objet est au fond de la piscine, au point A, il supporte plus d'eau que s'il est à la surface de cette piscine, au point B. En effet, le nombre de molécules d'eau est alors plus important, ce qui entraîne que l'objet supporte un poids supérieur que s'il se situait au point B. Au point A, la pression est donc plus importante qu'au point B.

L'atmosphère ne se comporte pourtant pas exactement de la même manière :

Comme cela était précisé ci-dessus, l'atmosphère terrestre est constituée par une série de couches superposées, de densité croissante (par densité, on entend la quantité de gaz dans un volume V , à

l'altitude considérée, divisé par la quantité du même gaz dans le même volume, à la surface de la Terre)

Le caractère évolutif de la densité est dû à l'attraction terrestre : les molécules ont tendance à être attirées vers la surface de la planète. Ainsi, les variations de pression, entre les points A et B sont d'autant plus importantes dans le cas de l'atmosphère.

Or, la troposphère représente plus de 75% de la masse de l'atmosphère. Un avion de ligne, qui vole environ à 10 000 mètres(ce qui correspond à la limite supérieure de cette sphère) n'a donc plus à supporter la pression qu'imposait la troposphère. La baisse de pression est considérable, en effet : au niveau de la mer, la pression est de 1015 hPa, elle passe à environ 270 hPa à 10 000 mètres.

D'ailleurs, un modèle a été effectué, présentant les variations de la pression avec l'altitude, dans la troposphère:

Maintenant que nous connaissons précisément les variations des paramètres environnementaux en altitude, étudions leurs effets sur le corps humain lors d'un vol, avec et sans pressurisation.

II/ Les effets sur le corps humain

A : BAROTRAUMATISMES

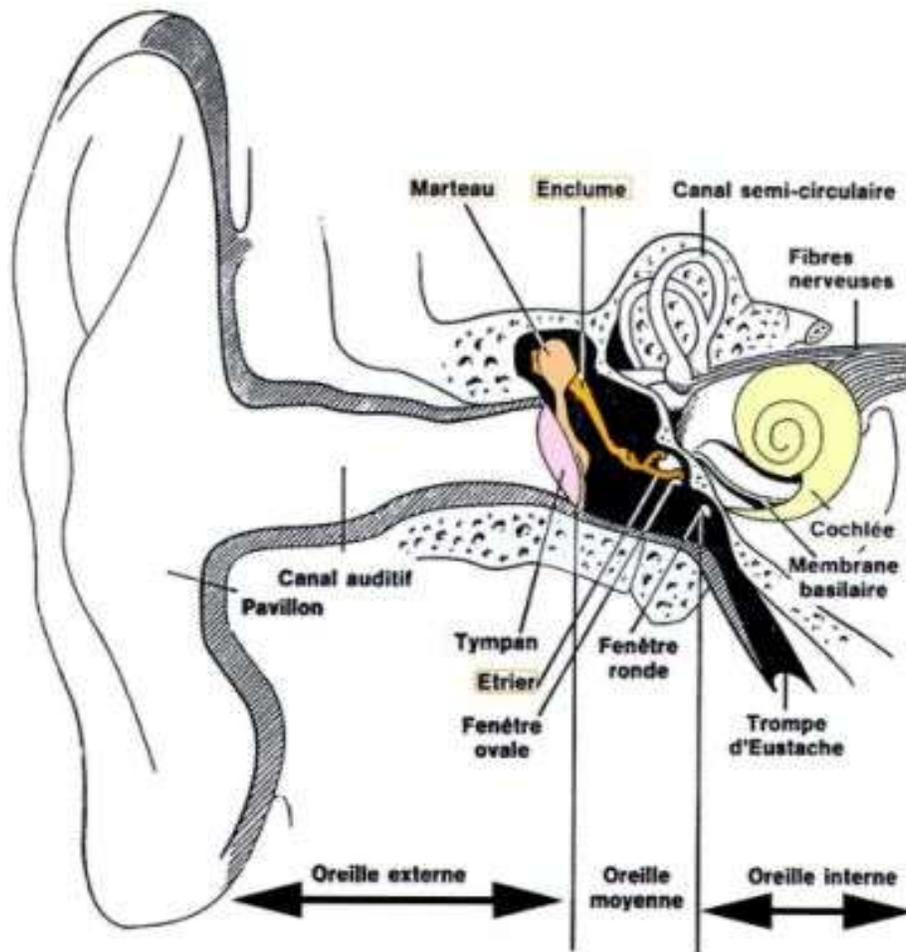
Qui n'a jamais senti en prenant l'avion des douleurs aux oreilles lors du décollage ou surtout de l'atterrissage ?

Cette douleur est une conséquence d'un barotraumatisme, « baro » signifiant « pression » en grec. L'oreille est loin d'être la seule cavité interne subissant des barotraumatismes.

Notre corps humain contient en effet de nombreuses cavités closes. Comme nous l'avons vu précédemment, la pression atmosphérique diminue avec l'altitude. Les gaz de nos cavités internes ne subissent pas ce changement de pression (ils sont enfermés). Il se crée donc un déséquilibre de pression entre ces cavités et l'extérieur. Cela conduit à des tensions, à des déformations, voir à des ruptures graves. Nous avons décidé de nous intéresser particulièrement à deux barotraumatismes :

celui de l'oreille et celui de l'intestin.

Etudions donc d'abord le barotraumatisme que nous connaissons sûrement le mieux, celui de l'oreille.



L'oreille est constituée de 3 ensembles : oreille interne, moyenne, et externe.

L'oreille externe sert de « capteur », avec le tympan qui vibre avec les ondes sonores (vibrations de l'air). Ces vibrations sont transmises grâce aux structures de l'oreille moyenne : marteau, enclume et étrier, puis elles se propagent dans un liquide de l'oreille interne. Elles sont enfin transmises au cerveau par un signal nerveux.

Comme on peut le voir sur le schéma, l'oreille moyenne contient une cavité fermée d'air. Elle est donc susceptible de subir des barotraumatismes.

Cependant, un conduit très important sert à égaliser la pression extérieure avec celle de l'oreille

moyenne : la trompe d'Eustache.

Cet étroit conduit de 3 cm relie le rhino-pharynx (une partie de la gorge, au dessus du palais) à la pression extérieure à l'oreille moyenne.

La trompe est normalement fermée au repos. Une simple déglutition ou un baillement permet de l'ouvrir une fraction de secondes et d'établir l'équilibre de pression.

Ce système permet de compenser les variations de pression dans l'avion durant les phases de montée et de descente. (Nous expliquerons plus tard que la pressurisation ne permet pas de garder une pression équivalente à celle au sol mais une pression moins forte, correspondant à « l'altitude cabine ».)

En général, durant la montée, la trompe d' Eustache joue bien son rôle : la pression dans l'avion diminue, l'oreille moyenne est en surpression, l'air s'échappe donc passivement.

A l'inverse, lors de la descente, la pression dans l'avion augmente rapidement, et l'oreille moyenne est en dépression, de l'air doit donc vite rentrer : phénomène actif.

La trompe n'effectue souvent pas assez rapidement l'équilibrage des pressions, nous pouvons donc l'aider en mâchant du chewing-gum (déglutition), ou si la douleur est trop intense, en effectuant la manoeuvre dite de « Valsalva » : se boucher les narines et expirer. La trompe s'ouvre alors grandement et les pressions se rééquilibrent, la douleur disparaît.

Si la différence de pression est trop forte, la trompe se bouche, et si l'on n'effectue pas alors de gestes suffisant pour ramener l'équilibre (Valsalva...), le tympan se déforme fortement du fait de la dépression : sensations de douleurs, et de légère surdité, le tympan ne vibrant plus idéalement. Une otite barotraumatique peut alors être engendrée, des douleurs extrêmes sont ressenties, le tympan se déchire plus ou moins grandement, ce qui peut avoir des effets non négligeables sur l'audition de la personne concernée.

Cependant, dans un avion de ligne, la pressurisation permet de réduire la vitesse de baisse ou d'augmentation de pression, et en général mâcher un chewing-gum suffit. Les personnes souffrant de problèmes à la trompe d' Eustache ou atteintes d'une rhino-pharyngite ou d'un rhume (empêchant le bon fonctionnement de la trompe) doivent faire attention avant de prendre l'avion et doivent prendre toutes les précautions nécessaires.

Comme nous l'avons déjà dit, il existe d'autres barotraumatismes que celui de l'oreille. Etudions celui de l'intestin.

En vol, l'altitude cabine augmente jusqu'à environ 2000 mètres. Les gaz contenus dans les cavités intestinales sont donc dilatés d'après la loi des gaz parfaits.

Si le passager a consommé précédemment des boissons gazeuses ou des féculents en grande quantité, il risque de souffrir de ballonnement de flatulences, et de douleurs.

En effet, les gaz dilatés distendent les parois intestinales et provoquent ces symptômes.

Il existe encore d'autres barotraumatismes que nous citerons juste : celui des sinus faciaux, de l'estomac, et des dents.

Nous voyons donc bien que même dans un avion pressurisé peuvent survenir des

barotraumatismes plus ou moins graves. Sans la pressurisation, ceux-ci seraient insupportables.

Attardons nous maintenant à un autre type de problème lié à la pression atmosphérique : l'hypoxie d'altitude.

B : Quels autres paramètres varient avec l' altitude?

Même si la teneur en O₂ n'évolue qu'à partir de 200 Km, les molécules de ce gaz sont en bien moins grande quantité à 10 000 mètres :

C : HYPOXIE

Qu'est-ce que l' hypoxie ?

L' hypoxie est par définition un apport insuffisant en oxygène dans les tissus cellulaires. Comme nous l'avons vu précédemment, la pression atmosphérique diminue avec l'altitude. Il en découle une concentration volumique inférieure pour tous les gaz. Ainsi, dans un même volume d'air, le nombre de molécules gazeuses est inférieur. Une même respiration aspirera ainsi moins d'oxygène à 10 000 mètres qu'au sol.

Ce phénomène est à l'origine de l'hypoxie rencontrée dans les avions de ligne : l'hypoxie d'altitude.

L' hypoxie d'altitude rencontrée dans les avions est la même que celle rencontrée à la montagne lors de séjours ou de randonnées à haute altitude : les cellules reçoivent moins d'oxygène et le corps devient plus faible, ce qui oblige par exemple les randonneurs de haut niveau à porter des masques à oxygènes lors d'excursions à haute altitude.

Mais revenons à notre problème.

L'hypoxie d'altitude

Il existe de nombreuses formes d'hypoxie (une dizaine) qui peuvent être reliées à beaucoup de causes, souvent internes au corps (par exemple, un asthme provoquant une mauvaise respiration). On parle d'hypoxémie lorsque la quantité d'oxygène transportée dans le sang est elle-même insuffisante. Cela implique une baisse de la pression partielle en oxygène (O₂) dans le sang. L'hypoxie constatée dans les avions de ligne est donc une hypoxie avec hypoxémie.

Qu'est-ce que la pression partielle ? Ce terme est très utilisé en biologie, il est en effet très pratique par exemple dans le cas des gaz transportés par le sang.

La pression partielle est le produit de la pression totale par la fraction d'un gaz à étudier (ici l'O₂) (Loi de Dalton).

C'est donc la part de pression gazeuse due à un gaz étudié.

Par exemple, calculons la pression partielle de l'oxygène dans l'air (qui contient environ 21% d'O₂).

$$P_{pO_2} = P_{atm} \times 21\%$$

Pour une pression atmosphérique de 760mmHg (unité: millimètre mercure) (atmosphère standard au niveau de la mer), la pression partielle vaudra ainsi $760 \times 21\% = 160$ mmHg environ.

Une pression partielle d'O₂ faible implique donc, soit une baisse de la pression totale, soit une baisse du pourcentage d'oxygène. Dans le cas de l'hypoxie d'altitude, il s'agit d'une baisse de la pression totale puisque comme nous l'avons déjà vu, le pourcentage d'oxygène reste le même en altitude.

Ainsi, à une hauteur de 35 000 pieds, où la pression atmosphérique vaut environ 179mmHg, la pression partielle d'O₂ vaut :

$PO_2 = 179 \times 21\% = 38$ mmHg environ, ce qui est bien trop faible comparé aux besoins cellulaires.

Il faut, de plus, savoir que la pression partielle de l'oxygène baisse dans le sang, ceci est dû au fait qu'une quantité de l'air inspiré n'est pas utilisée dans l'échange gazeux entre alvéole et sang, et que l'air contenu dans les alvéoles est humide.

$$PO_{2\text{alvéoles}} = (P_{atm} - P_{H_2O}) \times 21\%.$$

Or dans les alvéoles, P_{H_2O} vaut environ 47mmHg:

$$PO_{2\text{alvéoles}} = (P_{atm} - 47) \times 21\%$$

Au sol : ($PO_{2\text{alvéoles}}$ normal):

$$PO_{2\text{alvéoles}} = (760 - 47) \times 21\% = 150 \text{ mmHg environ}$$

La pression partielle dans le sang, encore plus basse va être beaucoup trop faible par rapport aux besoins des cellules à 35 000 pieds, ce qui entraîne une très forte hypoxie et toutes ses conséquences.

Les cellules commencent à être gravement touchées si la PO_2 est inférieure à 55mmHg environ.

En montagne, où l'on ne monte pas aussi haut, et où on monte plus doucement, le corps peut

s'acclimater jusqu'à une certaine altitude, grâce à plusieurs réponses du corps comme l'augmentation du rythme respiratoire.

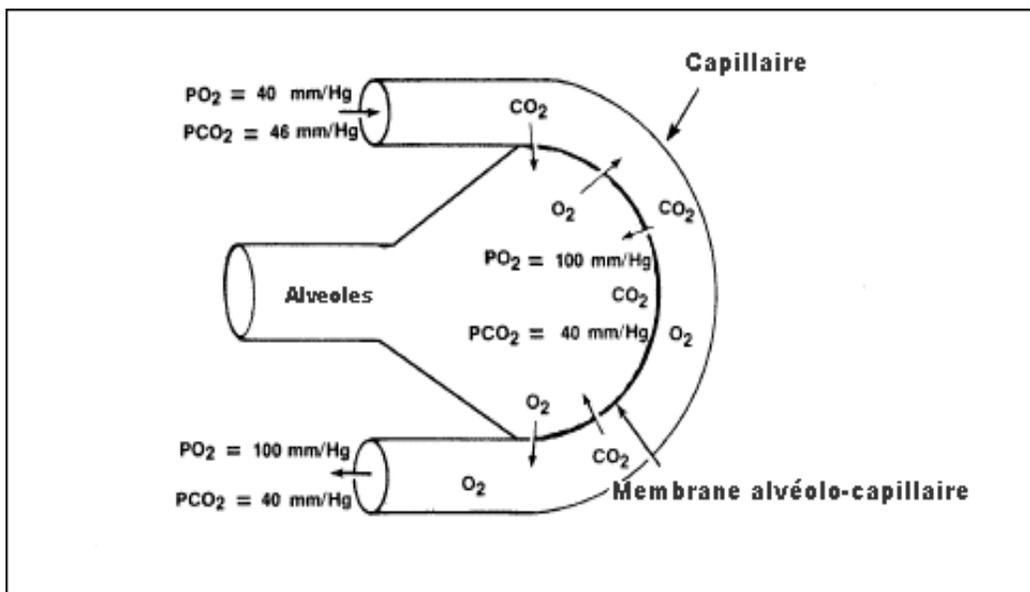
Etude de la respiration

Pour comprendre l'hypoxie, il est nécessaire de comprendre le processus de respiration et l'acheminement de l'oxygène jusqu'aux tissus cellulaires.

Nous aspirons tout d'abord de l'air grâce à l'augmentation du volume du diaphragme, qui, provoquant une baisse de pression, aspire l'air extérieurs.

L'air passe ensuite dans tous les conduits du circuit respiratoire: nez ou bouche, pharynx, larynx, trachée, bronches, bronchioles et enfin les alvéoles du poumons et leurs sacs alvéolaires.

C'est là qu'a lieu l'échange des gaz entre les alvéoles et le sang contenu dans les capillaires, entre veines et artères : l'oxygène est absorbé dans le sang tandis que du dioxyde de carbone est rejeté, comme le montre ce schéma :



On peut voir les variations de pression partielle des gaz les plus importants dans la respiration : O_2 et CO_2 .

Il faut savoir que le transport de l'oxygène dans le sang est très majoritairement effectué par les molécules d'hémoglobine des globules rouges, puisque seulement 2% de l'oxygène transporté dans le sang est dissous dans le plasma.

La saturation est le pourcentage d'oxygène fixé par l'hémoglobine par rapport au maximum possible.

L'hémoglobine fixe donc de l'oxygène pour son transport jusqu'aux cellules où il est libéré.

Nous allons maintenant voir un ordre de grandeur des pressions partielles en oxygène dans le sang suivant l'altitude où on se trouve (sans pressurisation bien sûr).

Altitude (pieds)	Pression atmosphérique (mm/Hg)	PAO ₂ (mm/Hg)	PVO ₂ (mm/Hg)	Différence de pression (mm/Hg)	Saturation du sang (%)
Niveau mer	760	100	40	60	98
10,000	523	60	31	29	87
18,000	380	38	26	12	72
22,000	321	30	22	8	60
25,000	282	7	4	3	9
35,000	179	0	0	0	0

Nous pouvons voir qu'à environ 35 000 pieds, la pression partielle en oxygène dans les veines et les artères devient nulle ! La saturation de l'hémoglobine s'annule alors aussi, ce qui devient extrêmement dangereux comme nous allons le voir avec les effets de l'hypoxie.

Les effets de l'hypoxie d'altitude

Dans un avion pressurisé, l'altitude cabine reste raisonnable (environ 2 000 mètres), mais cela suffit pour déclencher des problèmes à des personnes souffrant d'insuffisances. De plus, en cas de dépressurisation de l'appareil, l'utilisation des masques à oxygènes dont sont équipés les avions de ligne est obligatoire.

L'hypoxie entraîne plusieurs effets. Tout d'abord, au niveau cardiaque :

Augmentation du débit et du rythme cardiaque pour compenser le manque d'oxygène. Les personnes souffrant d'insuffisances cardiaques doivent faire très attention en cas de dépressurisation.

En cas de dépressurisation, le cerveau est vite touché, ce qui provoque souvent des euphories, actes absurdes, troubles sensoriels, perte d'attention, de mémoire, troubles du jugement, ce qui peut être fatal si le pilote n'a alors pas de masque à oxygène. Les effets se terminent par une perte de conscience si rien n'est fait.

D'autres organes sont aussi touchés par l'hypoxie, comme l'œil et l'oreille: la vue et l'audition diminuent rapidement.

Le schéma suivant présente les principaux symptômes d'une forte hypoxie, et ses signes extérieurs, jusqu'à l'inconscience:

Symptomes (subjectif)	Signes (objectif)
Besoin d'air	Hyperventilation
Appréhension	Cyanose
Fatigue	Confusions mentales
Mal de tête	Mauvais jugements
Vertiges	Mauvaise coordination des muscles
Euphorie	
Mauvaise vision	
Engourdissements	
Tintement des oreilles	
Agressivité	


INCONSCIENCE

On peut remarquer que le système nerveux est celui qui est le plus grandement atteint par l'hypoxie, ceci en raison du grand besoin en oxygène des cellules nerveuses.

Le temps durant lequel un sujet est en pleine possession de ses moyens suite à une dépressurisation diminue en fonction de l'altitude :

Altitude (pieds)	Temps de conscience
>50,000	9-12 s
43,000	9-12 s
35,000	30-60 s
25,000	4-6 minutes
22,000	8-10 minutes
18,000	20-30 minutes

On voit donc qu'à haute altitude, les passagers, et surtout le pilote, doivent très vite réagir en cas d'incident.

De plus, les corps finissent par être atteints de cyanose : les molécules d'hémoglobine ne sont plus assez saturées en O₂. Lorsque la saturation est inférieure à 80%, la cyanose devient visible : la peau et plus particulièrement les extrémités du corps et les lèvres deviennent violacés. En effet, lorsque l'hémoglobine est moins saturée en O₂, sa couleur est beaucoup plus violacée.

C'est ainsi que le masque à oxygène est conseillé dès 3500 mètres pour les passagers de petits avions non pressurisés, et qu'il est obligatoire de pressuriser les avions de transport public volant à plus de 6 000 mètres, l'altitude cabine devant rester inférieure à 2438 mètres durant un vol normal.

Le seul remède efficace contre l' hypoxie d' altitude est donc la mise d'un masque à oxygène, ou le cas échéant la descente de l'avion à une altitude convenable (10 000 pieds).

Quel moyen pourrait-on envisager pour, à la fois, conserver une pression viable et palier au manque d'oxygène en altitude?

III/La pressurisation : fonctionnement, et effets d' une décompression

A.Fonctionnement du système de pressurisation d'un avion à turboréacteurs.

Les premiers vols qui furent réalisés par l'homme, furent ceux qui eurent lieu en montgolfière. Cependant ceux-ci, ne prenant pas en compte les variations des conditions environnementales, furent pour la plupart victimes de divers maux amenant parfois à la mort de ses navigateurs aériens.

La deuxième étape de l'accomplissement du rêve humain fut celui de la création de des avions, véhicules aériens, plus puissant que leur prédécesseur. Cependant malgré les plus grandes capacités de ce véhicule, les problèmes liés aux conditions atmosphériques, ne furent toujours pas réglés.

L'un de ces problèmes liés à la montée en altitude, est celui de la pression de l'air .En effet plus en monte en altitude plus la pression diminue.

Pour régler ce problème de pression, les constructeurs d'avion ont été dans l'obligation de se doter d'un système permettant de retrouver en altitude, les conditions environnementales (la pression, la quantité de O₂ dans l'air, la température, etc.), de l'altitude dite "altitude cabine", afin d'assurer la survie de tout les passagers en haute altitude ou d'éviter toute sorte de traumatismes qu'ils soient mortels ou non.

De ce fait, nous définirons d'une part « qu'est-ce que la pressurisation ? », l'un de ces système, afin de ne pas avancer dans le brouillard, c'est-à-dire parler de quelque chose qu'on ne connaît pas et déterminerons par la suite les situations où ce système s'avère indispensable au bien-être des passagers à bord de l'avion, pour pouvoir d'autre part expliquer son mode de fonctionnement.

- 1) Qu'est-ce que la pressurisation ?
- 2) Quel est son mode de fonctionnement ?
Et quand s'avère-t-elle nécessaire ?

1) Définition et rôle:

a)Définition:

Le système de pressurisation a pour but premier celui d'assurer le confort et le bien être des passagers ainsi que leur sécurité. En effet le système de pressurisation a été créé dans ce but précis qui est celui de la sécurité à bord des passagers. Du fait qu'il a été observé, que l'homme ne peut espérer vivre que dans certaines conditions atmosphériques et dans un certain intervalle de pression, s'est vu mettre en place un système qui est celui de la pressurisation qui a pour but de

réguler la pression à bord de l'avion et ainsi permettre aux passagers de voyager dans des conditions égales à celle que l'on peut retrouver à une altitude où l'air ambiant est respirable.

b) Cas d'utilisations et précautions d'emploi:

Selon les règlements aéronautiques tout avion transportant du public et volant à une altitude de plus de 6000 mètres (20 000 pieds) doit être pressurisé et doit rétablir une altitude cabine d'une valeur maximale de 2438 mètres en vol normal (8000 pieds).

Les équipements de pressurisation rétablissent dans l'avion une pression équivalente à celle régnant aux alentours de 1000 à 2500 mètres maximum dans l'atmosphère standard. Du coup, la pression dans l'avion est beaucoup plus importante qu'à l'extérieur. Pour faire simple on peut dire que, le fuselage est "gonflé" comme un ballon de baudruche, il est donc "sous pression". Il faut donc concevoir des cabines parfaitement étanches et très résistantes. En effet, la force s'appliquant sur une porte à cause de cette différence de pression intérieure/extérieure, est de plusieurs tonnes!

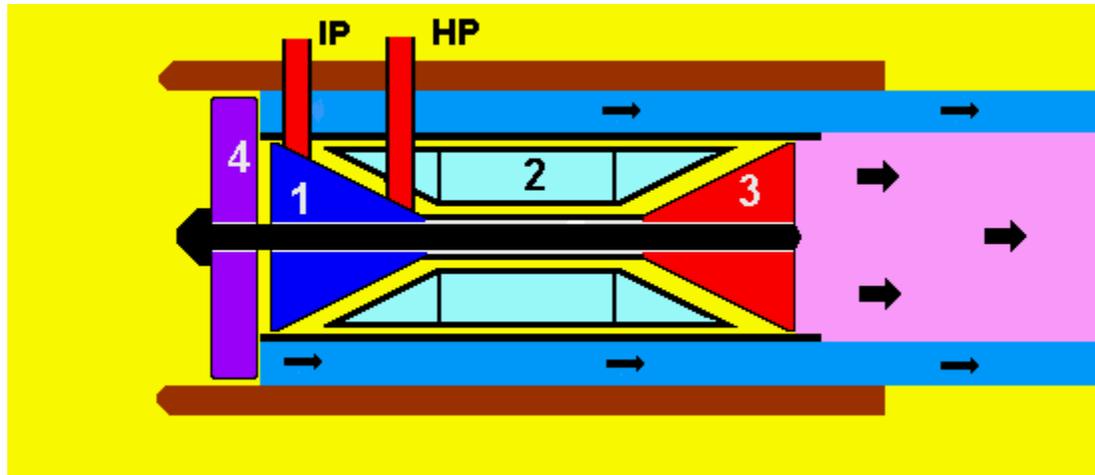
Les systèmes de pressurisation ont donc pour rôle de "souffler" de l'air sous pression dans l'avion en permanence afin de le maintenir "gonflé". Des fuites calibrées et ajustables (Out Flow Valves) permettent de réguler avec précision la valeur de la pression dans l'avion à une valeur déterminée afin d'y rétablir une altitude fictive réputée convenable pour le confort et la sécurité des occupants.

2) Son fonctionnement:

Le système de pressurisation fonctionne sur le modèle de celui qui est chargé de réguler l'air à bord du fuselage, par le simple fait que ces deux sont générés de la même façon c'est à dire par le même appareil. Cependant le système de pressurisation d'un avion peut être fractionné en deux systèmes. D'une part nous aurons le système de prélèvement de l'air et d'autre part nous aurons le système de régulation de l'air (celui chargé d'envoyer l'air dans la cabine de l'avion).

a) Le système de prélèvement de l'air:

Sur le schéma qui nous est proposé ci-dessous on peut observer le mode de fonctionnement d'un de ces moteurs à réaction, fonctionne en prélevant de l'air atmosphérique:



Dans la zone qui est numérotée 4 on peut constater la présence d'une hélice qui pour but de produire de l'air froid dans et autour du moteur. L'air froid ainsi obtenu, est envoyé comme il a été dit précédemment dans le moteur pour être renvoyé dans un pré-refroidisseur.

Dans la zone numérotée 1, l'air qui était jusqu'à ce stade à la pression de l'extérieur, est comprimé, le but de ce compresseur est d'augmenter la pression de l'air qui a été prélevé dans les turboréacteurs. De ce fait la température de l'air monte et l'air qui sort du compresseur est à très haute température. D'après le principe suivant:

Si on prend un certain volume et qu'on le comprime: la pression et la température augmente=>



Après avoir été mis à une pression très élevée, l'air qui vient être comprimé, passe dans la "chambre de combustion" dont le rôle est de mélanger cet air avec du carburant, puis de brûler ce mélange.

Ces quatre phases du prélèvement de l'air sont l'énumération brèves du fonctionnement de ce système. En effet on peut constater que le compresseur est composé de deux parties, de ce fait on remarque que deux prises de pression sont installées sur deux étages du compresseur, ce qui permet ainsi de prélever de l'air sur le moteur en fonction des différentes phases du vol de l'avion. Par exemple pendant la descente lorsque le moteur fonctionne à faible puissance, l'air est prélevé sur la prise haute pression (HP). Pendant la croisière où le moteur fournit une puissance élevée, l'air est prélevé sur la prise de pression intermédiaire (IP) qui offre une pression plus faible mais qui pénalise moins le moteur et sa consommation de carburant. Ceci est réalisé à l'aide de deux composants :

- un clapet anti retour IP qui empêche l'air prélevé de retourner dans le moteur
- une vanne HP qui peut être ouverte ou fermée comme nécessaire.

Ceci nous permet donc de dire que la première fonction du système de prélèvement de l'air est de sélectionner de manière optimum la meilleure prise d'air sur le moteur.

Cependant ce système de prélèvement de l'air possède une autre fonction qui n'est pas négligeable , car celle-ci possède un rôle important qui est celui qui consiste à abaisser la pression et la température de l'air afin d'assurer le sécurité des passagers.Cette fonction est réalisée par deux composants principaux:

- une vanne : la vanne de régulation de pression (PRV); cette vanne le plus souvent de type " papillon "module le débit d'air de façon à ce que le flot d'air aval ait une pression plus faible et constante.
- un échangeur de chaleur : le pré-refroidisseur ; cet échangeur de chaleur est alimenté sur l'un de ses côté par de l'air chaud venu du compresseur (via la PRV) comme décrit ci-dessus et sur l'autre côté par de l'air froid prélevé sur le canal d'air de FAN . Cet air de FAN est modulé par une vanne spécifique (FAV), elle aussi le plus souvent de type papillon.

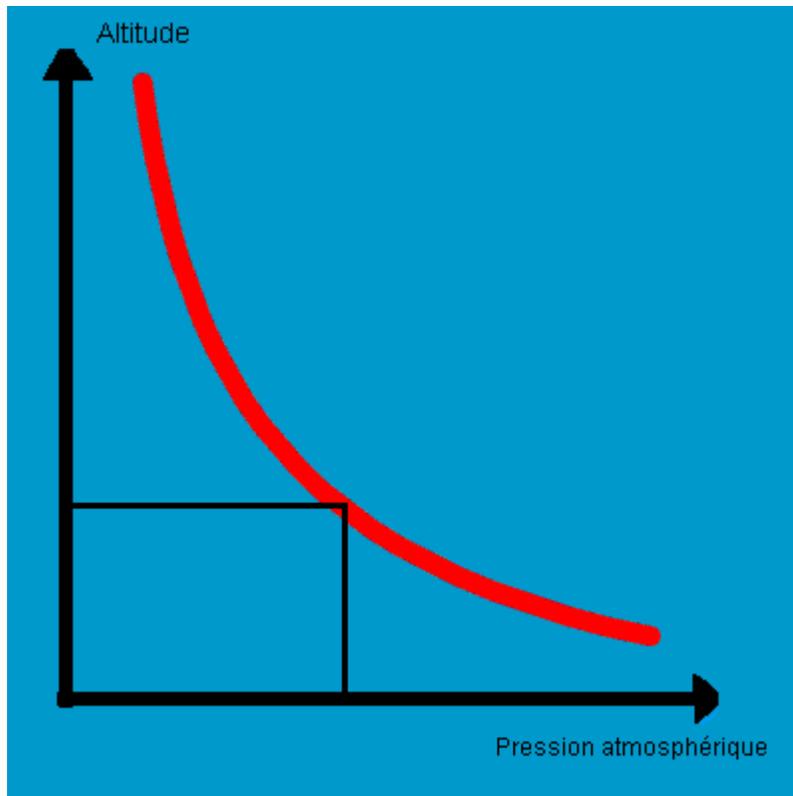
De cette manière, la température de l'air en sortie du pré-refroidisseur est abaissée.

Ces deux composants principaux, nous permettent d'introduire la partie du système de pressurisation qui est le système de régulation de la pression à l'intérieur de la cabine.

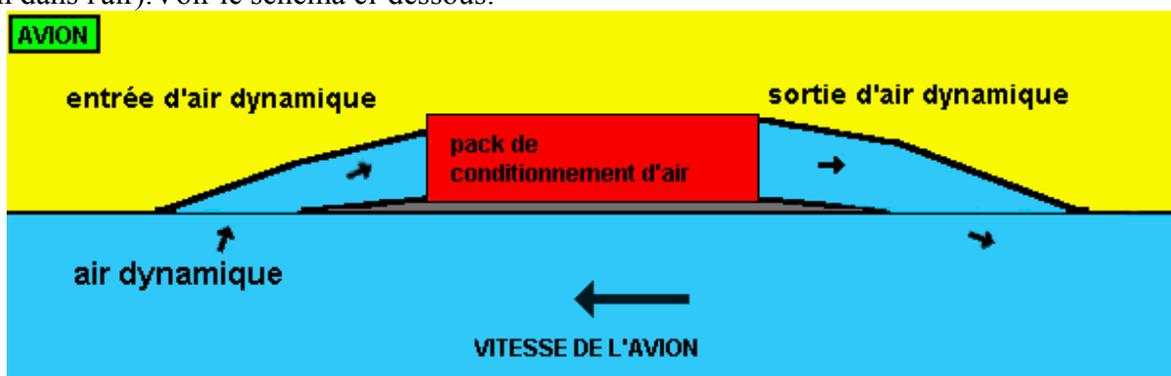
b) Le système de régulation de la pression cabine

L'air qui est prélevé a l'extérieur de l'avion par les réacteurs n'est pas a une pression convenable pour permettre le confort des passagers .C'est là que le système de régulation de la pression de la cabine fait son entrée et effectue son rôle.

La pression atmosphérique diminue lorsque l'altitude augmente. Ceci a été soigneusement mesuré et la courbe suivante représente l'évolution de la pression en fonction de l'altitude. Ceci est visible par ce schéma (ci-dessous):

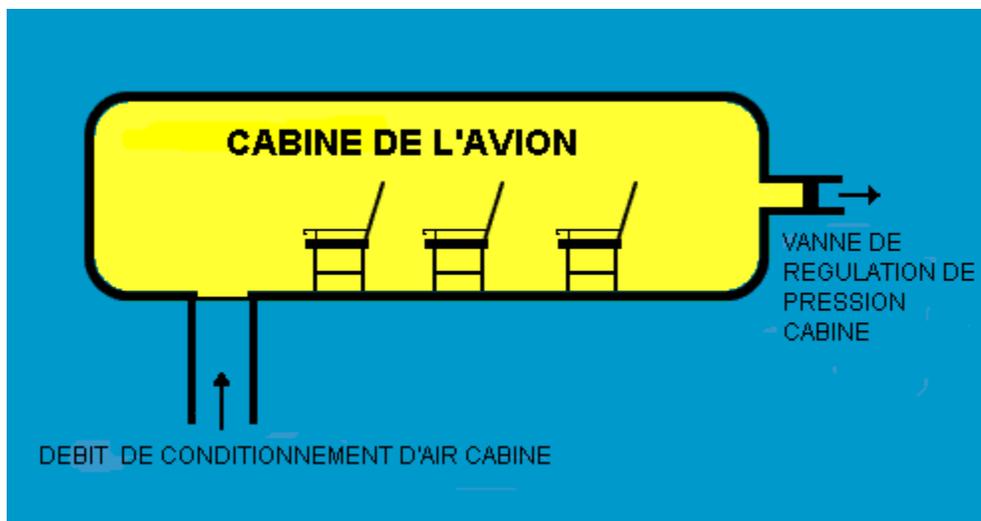


De ce fait à une pression particulière correspond une altitude spécifique.
 L'air sous pression prélevé sur les compresseurs des réacteurs est envoyé dans la cabine.
 Après le prélèvement d'air qui a été effectué directement sur les compresseurs, l'air a une pression beaucoup trop forte et aussi une température beaucoup trop importante (environ 230°). Il ne s'agit pas de trop chauffer la cabine ou de la surpressuriser. L'air qui provient des compresseurs moteurs sera donc envoyé vers le circuit pneumatique qui va abaisser la pression ainsi que la température et l'on obtiendra maintenant un air qui possédera une pression et une température convenable et surtout vivable pour les passagers.
 L'air en provenance des compresseurs sera dirigé vers des "transformateurs" abaisseurs de température et de pression plus communément appelés "packs". Un avion de ligne volant à haute altitude (ex: un 747), en possède environ trois à bord. Les packs de refroidissement sont situés sous le fuselage de l'avion et sont refroidis par l'air dynamique (souffle produit par la vitesse de l'avion dans l'air). Voir le schéma ci-dessous:



Cependant avant d'être envoyé dans la cabine de l'avion, l'air subit plusieurs changements physique. En effet, lors de sa sortie des packs de refroidissement, l'air, qui fut par ceux-ci refroidit est à une température trop basse. La température à la sortie des packs est à environ -20°C , donc trop basse pour être envoyée dans la cabine directement. C'est pour cela que l'air est envoyé dans le compresseur de la turbo-machine, où la pression est augmentée, ce qui signifie que la température augmente elle aussi simultanément. La pression est dès lors à un niveau acceptable, cependant la température, elle, est trop élevée donc l'air qui est obtenu à la sortie du compresseur est dirigé vers un dernier échangeur dit "principal" pour abaisser la température.

Une cabine d'avion peut être comparée à un volume clos. L'air de refroidissement nécessaire pour le confort des passagers est injecté à l'intérieur de ce volume clos. De ce fait, il est nécessaire de contrôler et de maintenir la pression dans la cabine au niveau requis. Ceci est réalisé par l'intermédiaire d'une sorte de robinet qui est ouvert ou fermé avec soin par un système automatique: le système de pressurisation cabine.

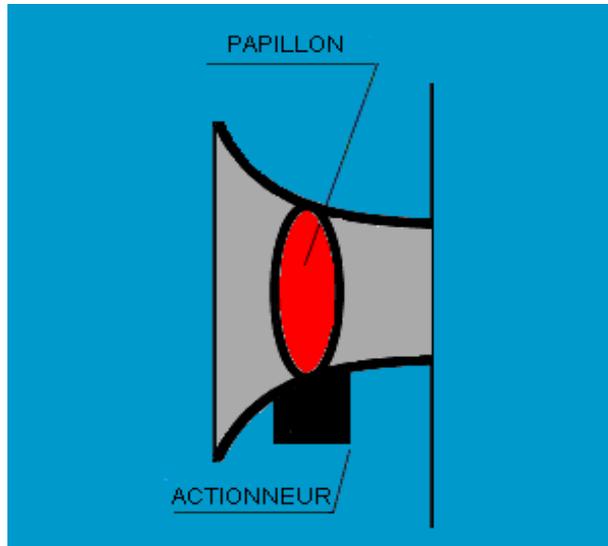


Ces vannes sont utilisées pour réguler le débit d'air qu'il faut éjecter à l'extérieur de l'avion pour maintenir la pression au niveau requis à l'intérieur de la cabine de l'avion. Deux sortes de vannes de régulation de pression cabine existent sur les avions commerciaux modernes:

- les valves à papillons:

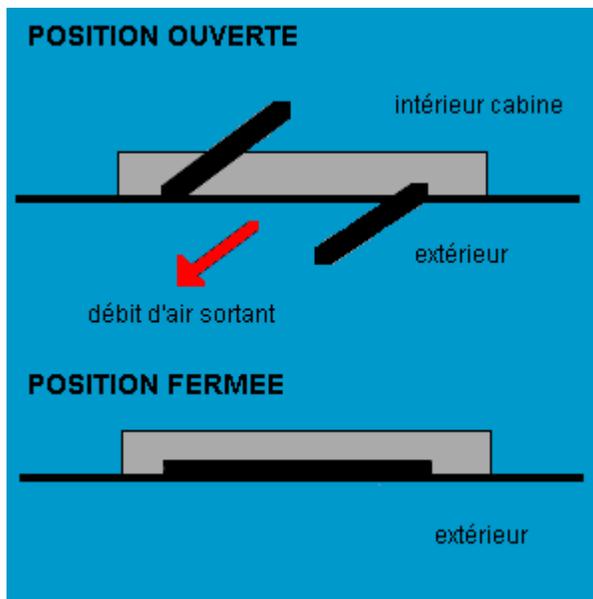
Elles sont souvent installées sur la cloison arrière du fuselage de l'avion.

Elles sont constituées d'un corps cylindrique aérodynamiquement dessiné comportant une plaque tournant autour de l'axe pour ouvrir ou fermer la vanne selon sa position. Cette plaque, appelée papillon, est manoeuvrée par un actionneur électrique.



- et les valves à volets:

Elles sont toujours installées sur la surface du fuselage de manière à créer un effet très intéressant : la récupération de poussée.



Ce type de vanne est constitué d'un corps rectangulaire incluant deux volets rectangulaires eux aussi. Celui de devant peut bouger vers l'extérieur, le volet arrière s'ouvre à l'intérieur. Grâce à ces positions spéciales, ces deux volets créent une tuyère bi-dimensionnelle dirigée autant que faire se peut en ligne avec la vitesse de l'avion.

Le débit d'air quittant l'avion par cette vanne crée une petite poussée qui contribue à économiser du carburant de l'avion : c'est ce qu'on appelle la récupération de poussée.

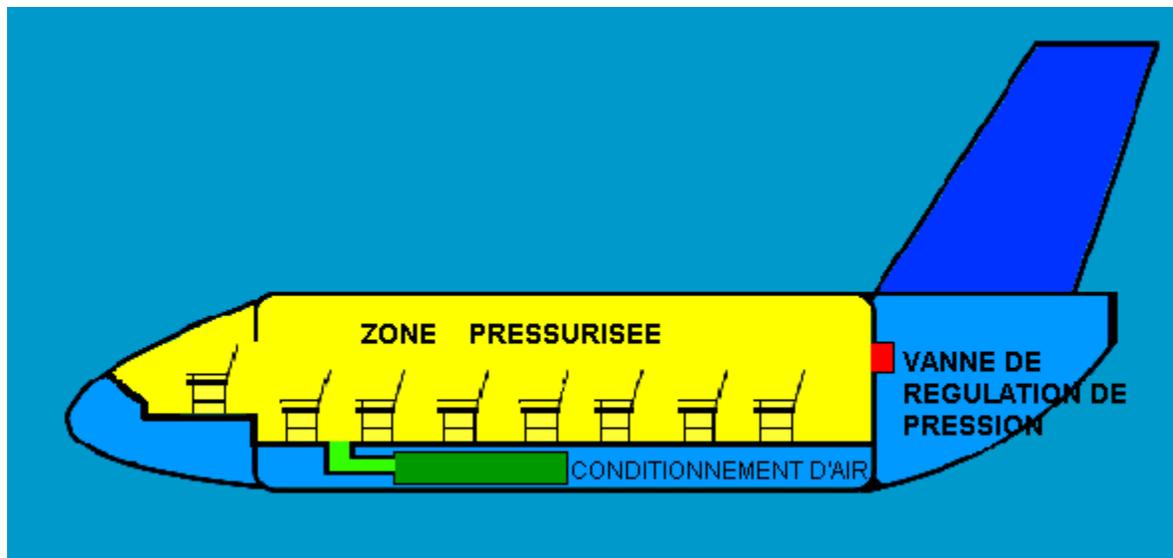
La cabine peut résister à une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur qui est limitée par la résistance de sa structure. Le fuselage se comportant comme un tube gonflé et sous pression, sa structure doit pouvoir soutenir les efforts que cela engendre. Il existe une limite, appelée "delta P max" et charge est confiée au calculateur de pressurisation de rester dans cette limite. S'il n'y parvient pas, des soupapes de protection de pression différentielle protègent l'appareil d'une défaillance du calculateur en s'ouvrant si la pression différentielle devient excessive.

De même, la cabine n'est pas du tout prévue pour encaisser une pression différentielle négative, c'est à dire si la pression extérieure devient trop forte. Autant une "Delta P" positive de 8 psi est supportable autant une "Delta P" négative ne peut dépasser -1 psi. La cabine ne devant normalement pas encaisser de pression différentielle négative, elle n'est pas renforcée dans ce sens afin d'éviter de l'alourdir. Une soupape de protection de pression différentielle négative est installée au cas où le calculateur aurait une défaillance.

Comment fonctionne ce système de pressurisation?

L'objectif du système de pressurisation cabine est de réguler de manière automatique la pression de l'air dans le fuselage. Le niveau de pression et la vitesse de variation de cette pression sont régulés de manière à obtenir les niveaux de pression nécessaires au confort et à la sécurité des passagers et de l'équipage de l'avion.

Ceci est réalisé par la modulation de la quantité d'air qui s'écoule hors du fuselage à travers une ou plusieurs vannes de régulation de pression (" les robinets") installées sur le fuselage ou sur la cloison arrière comme sur le dessin suivant:



Ces vannes sont commandées sur les avions de transport commerciaux actuels, c'est à dire les avions transportant des passagers, par des calculateurs. Ces calculateurs mesurent la pression à l'extérieur de l'avion (à l'altitude de vol de l'avion), la pression qui règne dans le fuselage et puis commandent l'ouverture ou la fermeture des vannes selon des lois programmées pour obtenir la pression requise à l'intérieur du fuselage. Ces lois tiennent

En (4) l'avion reprend sa montée, la cabine suit (toujours sur une pente moins raide pour nos tympanes, la limite est à environ 1000 ft/mn)

En (5) l'avion se stabilise pour la croisière, la cabine également (avec un temps de retard). La différence entre la pression extérieure et intérieure est maximale et de l'ordre de 8 psi sur A340. L'altitude cabine maxi est limitée à 7350 ft (2240 mètres) ce qui permet à l'avion de monter à 41000 ft en respectant la Delta P max de 8,70 psi.

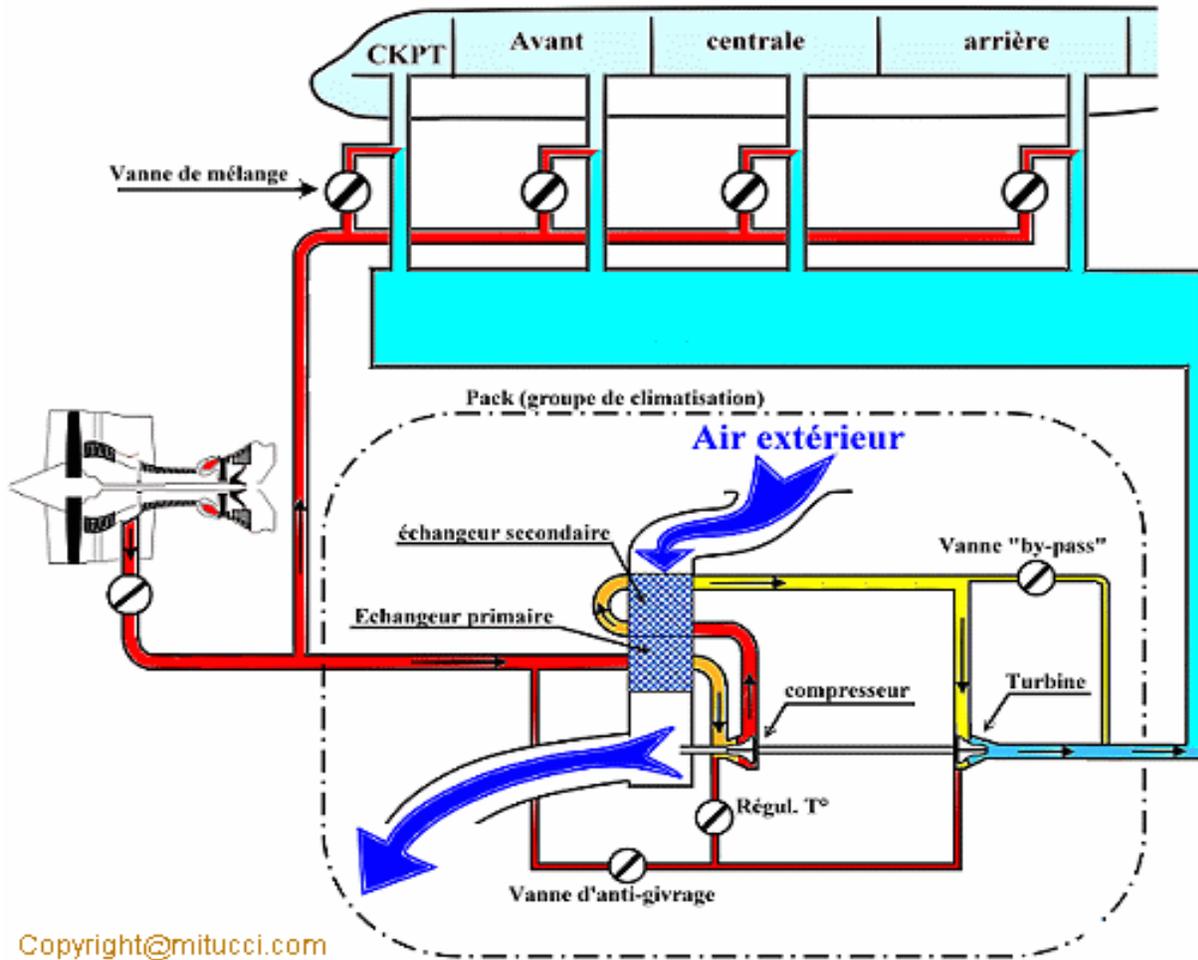
En (6), l'avion descend, la cabine aussi toujours moins vite afin de préserver nos oreilles (la limite est à 750 ft/mn sur A340). Ce n'est pas grave, car la cabine étant plus "basse" que l'avion, elle a de l'avance.

En (7), l'avion stoppe momentanément sa descente, la cabine continue de descendre vers l'altitude du terrain d'arrivée moins l'équivalent de 0,1 psi pour éviter les à-coups lors de l'atterrissage comme lors du décollage.

En (8) l'avion touche le sol, la cabine remonte rejoindre son altitude, le contrôleur de pressurisation dépressurise doucement la cabine.

Conclusion:

Voici un rapide récapitulatif de l'ensemble des éléments qui composent le système de pressurisation, sous la forme d'un schéma:



B.L' embolie : un effet d'une décompression

Qu'est ce qu'une décompression?

Une décompression se produit lorsqu'un problème dans l'appareil de pressurisation apparaît. Une chute de pression, plus ou moins rapide selon la gravité de l'incident, s'effectue alors. Si une brèche apparaît dans la paroi de la carlingue (hublot arraché, ou autre) l'avion dépressurise très rapidement. C'est la différence de pression entre les deux systèmes (avion / atmosphère) qui est la cause de cette décompression. On parle de dépressurisation explosive si elle se produit en moins d'une seconde. La baisse de la pression entraîne une augmentation considérable du volume des gaz, ce qui est la cause de carence en oxygène pour l'être humain, et peut causer des cas d'hypoxie très graves. Un autre problème peut avoir de conséquences graves sur les individus : l'embolie.

Que cause la baisse brutale de la pression sur un liquide dans lequel du gaz est dissous?

La conséquence de la baisse de la pression, sur un liquide, est l'apparition de bulles.

comment expliquer cette subite apparition?

Étudions le cas d'une canette de boisson sucrée, ou de champagne.

Lorsqu'on ouvre une bouteille contenant une boisson de ce type, on peut observer la formation de bulles. Pour expliquer cette formation, il faut considérer la loi de Henry :

"À température constante et à saturation, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression exercée par ce gaz sur le liquide"

Certains facteurs influent la dissolution d'un gaz : type du gaz, le type du liquide, le temps d'exposition du liquide à la forte pression, et la valeur de cette pression.

En effet, si l'on considère une bouteille. Plus la pression que l'on fait supporter au volume de gaz présent au dessus du liquide, plus les molécules de gaz, présentes dans ce volume, auront tendance à se dissoudre dans le liquide en question. Inversement, dans un liquide où sont dissoutes les molécules gazeuses, si l'on baisse la pression du volume d'air présent au dessus du liquide, celles-ci ne seront plus "forcées" de rester dissoutes, et elles se reformeront alors à l'état gazeux. C'est alors que les bulles apparaissent : il s'agit du gaz qui "sort" du liquide. La taille et le nombre des bulles qui apparaissent dans le liquide, au cours de la décompression, dépendent de la gravité de cette décompression : plus la décompression est grave, plus le nombre et la taille des bulles (qui sont deux paramètres évoluant en même temps) seront conséquents. Il faut savoir que l'on fait supporter aux sodas, lorsqu'on les met en bouteille, une pression bien supérieure à la pression atmosphérique. Ainsi, lorsqu'on ouvre une bouteille de soda, une décompression brutale a lieu, et les gaz, qui étaient alors dissolus dans le liquide, "sortent" de celui-ci.

Que se passe t il dans le corps d'un individu supportant une décompression?

Un individu, en respirant, intègre, en son milieu intérieur, certains gaz dissout, comme l'oxygène, ou l'azote. L' oxygène est utilisé par les muscles, mais l'azote, qui n'a pas d'utilité propre au sein du corps humain, est normalement rejeté par la respiration. Or, lorsqu'une décompression a lieu, de la même manière que la bouteille étudiée précédemment : des bulles se forment dans les tissus, et dans le sang.

De quelle nature sont ces bulles?

Ce sont uniquement des bulles d'azote, puisque c'est un gaz largement majoritaire dans l'atmosphère, donc dans le corps, et qu'il n'est pas utilisé par les muscles. Il est donc présent en relative grande quantité dans le sang.

Ces bulles sont elles dangereuses?

La réponse à cette question doit être nuancée.

Une bulle dans le sang peut être dangereuse à partir d'un certain seuil : si son diamètre égale ou dépasse le diamètre de la veine ou artère ou cette bulle se forme. Or, la taille et le nombre de

bulles apparaissant dans des tissus organiques dépendent exclusivement de la gravité de la décompression. En effet, les plongeurs, lorsqu'ils remontent à la surface, subissent une décompression conséquente (même en respectant les paliers de décompression), et des bulles apparaissent dans leur sang. Pourtant, même si les accidents de plongée surviennent régulièrement, ils sont plutôt rares.

Les bulles que l'on considère "inoffensives", ont un diamètre inférieur ou égal à 5 micromètres. Le nombre et la taille des bulles apparaissant dans le sang dépend de la gravité de la décompression à laquelle l'individu est soumis. De cette façon, lorsqu'une décompression "faible" a lieu, comme par exemple pour un plongeur, lors d'une remontée : peu de bulles se formeront et celles-ci seront de petites tailles. Ainsi, les bulles ne se coincent pas dans les vaisseaux sanguins.

Au-delà de 5 micromètres, une bulle circulant dans le sang d'un individu peut être considérée comme un risque potentiel d'embolie. Or, plus la taille des bulles est conséquente, plus le nombre de ces bulles l'est. On peut donc dire qu'une décompression causant l'apparition de bulles de taille supérieure à 5 micromètres est doublement dangereuse : d'une part, une des multiples bulles peut se coincer dans une veine ou artère et causer une embolie (nous reviendrons sur ce point plus tard), et d'autre part, le nombre de ces bulles est très important. Le risque qu'au moins une bulle se coince dans un vaisseau sanguin est alors très grand.

Cela dit, les accidents de décompression chez les plongeurs ayant respecté les paliers imposés sont aisément explicables : il suffit que le plongeur concerné souffre d'un rétrécissement veinal, pour qu'une petite bulle puisse se coincer dans la veine en question, et provoquer une embolie.

Mais qu'est-ce qu'une embolie?

L'embolie est l'oblitération d'un vaisseau sanguin par un corps étranger, l'*embolus* ou embole, charrié par le sang. Si l'obstacle est une bulle de gaz, on a affaire à une embolie gazeuse.

Lorsqu'une grosse bulle, de diamètre supérieur à 5 micromètres apparaît dans une veine, elle peut s'y bloquer. La bulle se coince dans un conduit de vascularisation, et bloque la circulation du sang. Or, le sang contient en permanence des plaquettes, qui sont sécrétées en plus grand nombre lorsqu'il y a besoin de coagulation. Le sang s'accumule autour de la bulle, et les plaquettes contenues dans ce sang commencent alors à coaguler, et à créer un milieu déshydraté.

(Voir Annexe)

L'amas de plaquettes va considérablement aggraver l'embolie.

La gravité de l'embolie est à nuancer selon l'endroit où elle se produit dans le système vasculaire : Si elle se produit dans une veine ou artère relié au cœur ou poumon, les séquelles peuvent être très graves. Si l'individu n'est pas immédiatement pris en charge (administration d'oxygène pur, ce qui va liquéfier le sang et dans certains cas "dégager" la bulle), il peut mourir.

Si celle-ci se produit dans une veine ou artère conduisant à un centre nerveux (encéphale ou moelle épinière), les séquelles sont dans tous les cas très graves : paraplégie partielle ou complète, d'un ou plusieurs membres.

Si l'embolie est cérébrale, elle provoque un arrêt circulatoire dans une région cérébrale, ce qui entraîne nécrose (c'est à dire la mort des nerfs) du tissu nerveux, aboutissant à la mort rapide de

l'individu.

Si l'embolie a lieu dans une veine conduisant uniquement à un membre ou organe du corps, la personne doit être prise en charge (administration d'oxygène pur), et conduite à l'hôpital. La, elle sera opérée, le caillot sera enlevé . Le plus souvent, l'usage du membre qui a été atteint par l'embolie, est réduit considérablement.

Cependant, une décompression grave, ou explosive (qui a lieu en moins d'une seconde) fait apparaître dans le sang un très grand nombre de bulle, qui peut conduire à la l'accumulation de ces différentes embolies...

Une décompression brutale a aussi un effet notoire sur les cavités semi closes de l'organisme , comme l'oreille externe ou les narines. En effet, les gaz peuvent atteindre jusqu'à 350% de leur volume initial. Aucune compensation de l'organisme n'a alors le temps d'intervenir.

C'est pour ces raisons qu'un avion de ligne doit être équipé non seulement d'un système de pressurisation infaillible, mais d'une carlingue solide, capable d'éviter la formation d'éventuels "trous", il en va de la vie des passagers.

C.Experience : Application de la loi d' Henry

On met de l'eau gazeuse dans la seringue.

L'eau gazeuse contient une particularité intéressante : La tension des gaz dissous est supérieure à la pression extérieure. Le système n'est donc pas en équilibre, il y a "trop" de gaz dissous, c'est pour cela que l' eau "pétille" (des bulles sont présentes).

On bouche avec le doigt la seringue, puis on tire sur cette dernière.

On augmente le volume clos, ce qui entraîne une baisse de pression(Loi de Mariotte). Il y a alors accentuation nette du déséquilibre entre tension des gaz contenus dans l'eau et pression de l'air dans la seringue.

De grosses bulles très visibles se forment, en plus des petites déjà présentes. Ce principe est tout à fait comparable à l'apparition de bulles dans le sang des passagers subissant une décompression.

L'expérience aurait pu être faite avec de l'eau non gazeuse, mais le déséquilibre étant moins fort, les bulles formées auraient été plus petites et moins visibles, c'est donc par un souci de simplicité que nous ne l'avons pas choisie.

Conclusion

L'atmosphère terrestre présente certaines caractéristiques. Ces caractéristiques varient avec l'altitude. La pression des gaz, ou leurs densité, par exemple, baissent considérablement lorsque l'altitude augmente.

Les barotraumatismes ou l'hypoxie d'altitude sont des conséquences de ces variations sur le corps humain, et elles sont extrêmement néfastes.

Il est donc indispensable, pour effectuer un voyage à haute altitude, de se doter d'une machine capable de conserver une pression et une densité des gaz viable pour le corps.

La machine de pressurisation, dont nous avons étudié le fonctionnement en détail dans la seconde partie, répond à ces exigences.

Cela dit, l'appareil de pressurisation ne doit absolument pas subir d'avarie, sinon les passagers courraient le risque de subir une embolie gazeuse (due à l'apparition de bulles d' azote dans le sang lors de la décompression)

Pour ne pas faire subir aux passagers les traumatismes dus aux variations des paramètres environnementaux, un avion de ligne doit absolument être équipé d'un appareil de pressurisation, et cet appareil doit être particulièrement fiable.

Annexe

1. Les unités employées

Unités de pression:

Le millimètre mercure (mmHg) : $1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$

Le Psi : $1 \text{ Psi} = 6\,894.75729 \text{ Pa}$

Unités d'altitude

Le pied (feet) : $1 \text{ pied} = 0.3048 \text{ mètres}$

2. Les sources utilisées lors de la réalisation de ce TPE

Livres :

-Manuel du pilote d'avion, 8ème édition, publié par la DGAC (Direction Générale de l' Aviation Civile)

Editions Cépadues, Toulouse, réédition d'août 2003.

-Thierry du Puy de Goyne, Yves Plays, Patrick Lepourry, Jacques Besse
Initiation à l'aéronautique

Editions Cepadues, Toulouse, 2002.

-Comprendre et enseigner les sciences de la Terre

-Encyclopédie Universalis

Sites internet

-Pilot Friend : <http://www.esparacing.capricornians.co.uk/frames/MAIN%20FRAME.htm>

-Flying Doctor : <http://www.medsyn.fr/perso/g.perrin/aero.htm>

-Aviation-info : <http://www.aviation-fr.info/>

-Site personnel sur la pressurisation : <http://perso.wanadoo.fr/mirabilevisu/airsystemfr.htm>

3. Tableau de l' atmosphère standard

Altitude		Pression	Température
ft	m	hPa	°C
45 000	13 716	148,2	- 56,5
44 000	13 411	155,4	- 56,5
43 000	13 106	163,0	- 56,5
42 000	12 802	171,0	- 56,5
41 000	12 497	179,4	- 56,5
40 000	12 192	188,2	- 56,5
39 000	11 887	197,5	- 56,5
38 000	11 582	207,1	- 56,5
37 000	11 278	217,3	- 56,5
36 000	10 973	228,0	- 56,2
35 000	10 668	239,1	- 54,2
34 000	10 363	250,6	- 52,3
33 000	10 058	262,6	- 50,3
32 000	9 754	275,1	- 48,3
31 000	9 449	288,1	- 46,3
30 000	9 144	301,5	- 44,4
29 000	8 839	315,4	- 42,4
28 000	8 534	329,9	- 40,4
27 000	8 230	344,9	- 38,4
26 000	7 925	360,4	- 36,5
25 000	7 620	376,5	- 34,5
24 000	7 315	393,2	- 32,5
23 000	7 010	410,5	- 30,5
22 000	6 706	428,3	- 28,5
21 000	6 401	446,8	- 26,6
20 000	6 096	466,0	- 24,6
19 000	5 791	485,8	- 22,6
18 000	5 486	506,3	- 20,6
17 000	5 182	527,5	- 18,7
16 000	4 877	549,4	- 16,7
15 000	4 572	572,1	- 14,7
14 000	4 267	595,5	- 12,7
13 000	3 962	619,6	- 10,7
12 000	3 658	644,6	- 8,8
11 000	3 353	670,4	- 6,8
10 000	3 048	696,9	- 4,8
9 000	2 743	724,4	- 2,8
8 000	2 438	752,7	- 0,8
7 000	2 134	781,9	+ 1,1
6 000	1 829	812,0	+ 3,1
5 000	1 524	843,1	+ 5,1
4 000	1 219	875,1	+ 7,1
3 000	914	908,1	+ 9,1
2 000	610	942,1	+ 11,0
1 000	305	977,2	+ 13,0
0	0	1013,2	+ 15,0
- 1 000	- 305	1050,4	+ 17,0
- 2 000	- 610	1088,7	+ 19,0