

# Physiologie et Transport Aérien



**Henri Marotte**

# Physiologie et Transport Aérien

## **Déclaration de conflits d'intérêt :**

**Le conférencier travaille comme consultant pour la plupart des sociétés industrielles citées dans ce cours ; il s'efforce d'être rigoureusement impartial dans sa présentation des matériels.**



*Yahvé Dieu façonna l'Homme, poussière tirée du sol, il insuffla dans ses narines une haleine de vie, et l'Homme devint un être vivant.*

*Genèse 2, 7*

# Physiologie et Transport Aérien

**Introduction**

**Rappels**

**Conséquences de l'exposition de l'Homme à l'altitude**

**Barotraumatismes**

**Ébullisme**

**Maladie de décompression**

**Hypoxie**

**Cabines pressurisées**

**Systèmes d'oxygène**

# Physiologie et Transport Aérien

## Introduction

### Définitions

**L'altitude est définie par l'hypobarie\*,  
à laquelle s'associe la variation d'autres facteurs d'ambiance :**

- la température,
- l'hygrométrie,
- la charge radiante.

**Le facteur principal est l'hypobarie.**

\* ὑπό (hypo) : sous, τὸ βάρος (to baros) : pesanteur, poids, fardeau.

hypobarie : diminution de la pression barométrique, vs. normobarie, hyperbarie.

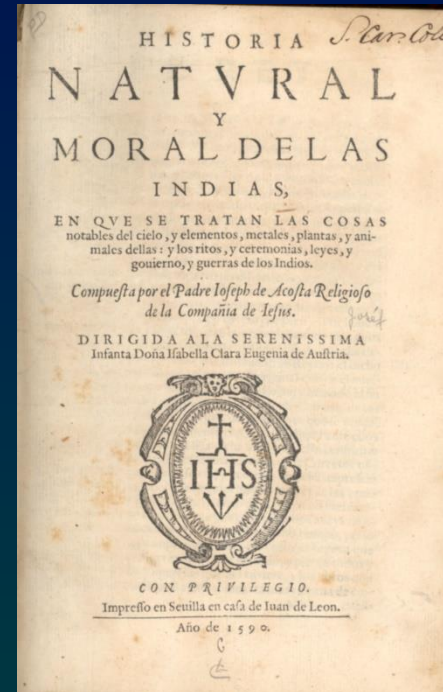
# Physiologie et Transport Aérien

## Introduction

 Historique

## Altitude : quelques repères historiques

1590 - P. José de Acosta : conquête des hauts plateaux andins (vers 1539-1570).



« Par quoi je me persuade que l'élément de l'air est en ce lieu-là si subtil et si délicat, qu'il ne se proportionne point à la respiration humaine... »

## Altitude : quelques repères historiques

1590 - **P. José de Acosta** : conquête des hauts plateaux andins.

Début du 17<sup>ème</sup> - **Galilée** : « la nature a une horreur *modérée* du vide ».





## Altitude : quelques repères historiques

1590 - **P. José de Acosta** : conquête des hauts plateaux andins.

Début du 17<sup>ème</sup> - **Galilée** : « la nature a une horreur *modérée* du vide ».

1643 - **Evangelista Torricelli** : le baromètre à mercure.



## Altitude : quelques repères historiques

1590 - **P. José de Acosta** : conquête des hauts plateaux andins.

Début du 17<sup>ème</sup> - **Galilée** : « la nature a une horreur *modérée* du vide ».

1643 - **Evangelista Torricelli** : le baromètre à mercure.

1648 - **Blaise Pascal** : expérience du Puy-de-Dôme (19 sept. 1648) :  
la première courbe pression-altitude.



## Altitude : quelques repères historiques

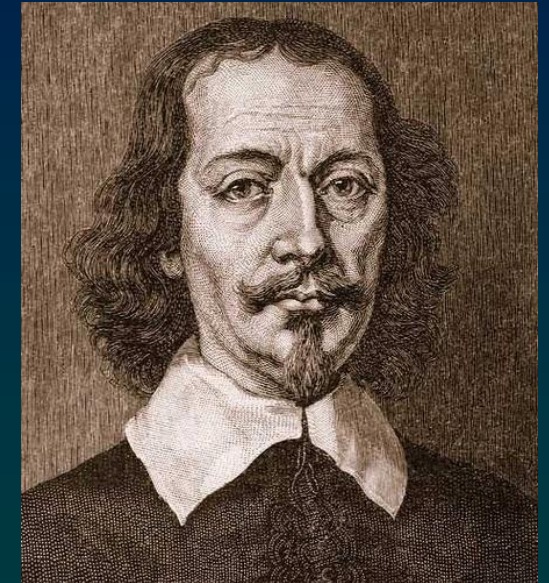
1590 - **P. José de Acosta** : conquête des hauts plateaux andins.

Début du 17<sup>ème</sup> - **Galilée** : « la nature a une horreur *modérée* du vide ».

1643 - **Evangelista Torricelli** : le baromètre à mercure.

1648 - **Blaise Pascal** : expérience du Puy-de-Dôme.

1650 - **Otto von Guericke** : invention de la pompe à vide.



## Altitude : quelques repères historiques

1590 - **P. José de Acosta** : conquête des hauts plateaux andins.

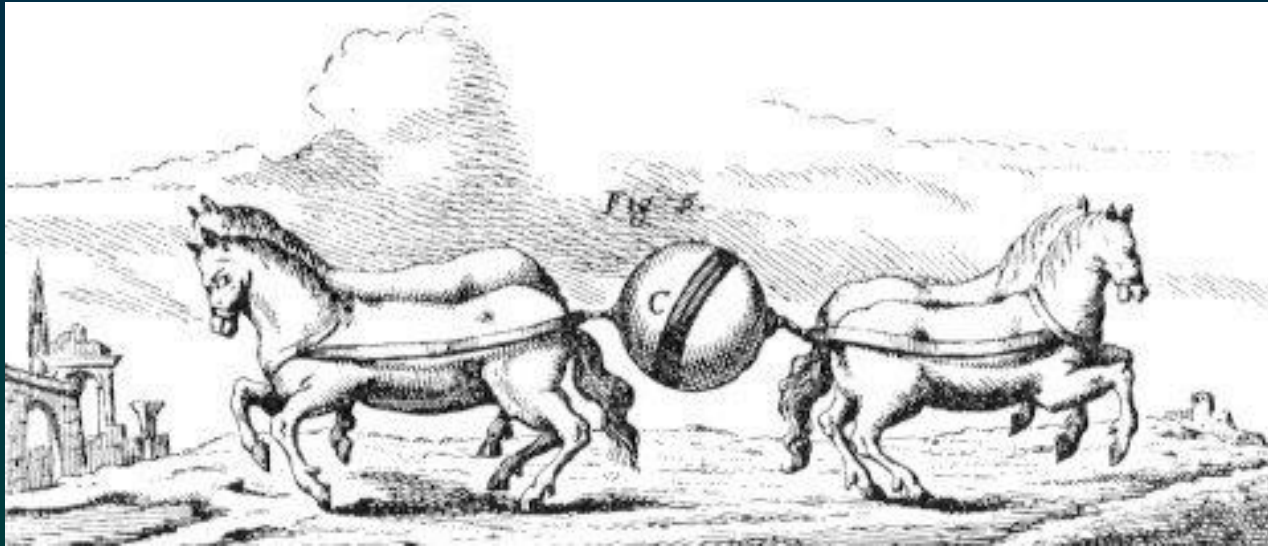
Début du 17<sup>ème</sup> - **Galilée** : « la nature a une horreur *modérée* du vide ».

1643 - **Evangelista Torricelli** : le baromètre à mercure.

1648 - **Blaise Pascal** : expérience du Puy-de-Dôme

1650 - **Otto von Guericke** : invention de la pompe à vide

1654 - **Otto von Guericke** : les sphères de Magdebourg et la relation  $F = P \cdot S$



Anecdote : première observation d'une otite barotraumatique.

## Altitude : quelques repères historiques

**1590 - P. José de Acosta : conquête des hauts plateaux andins.**

**Début du 17<sup>ème</sup> - Galilée : « la nature a une horreur *modérée* du vide ».**

**1643 - Evangelista Torricelli : le baromètre à mercure.**

**1648 - Blaise Pascal : expérience du Puy-de-Dôme.**

**1650 - Otto von Guericke : invention de la pompe à vide.**

**1654 - Otto von Guericke : les sphères de Magdebourg.**

**1662-74 - la loi de Boyle-Mariotte ( $P.V = \text{constante}$ ).**

**1670 - Robert Boyle : description de l'apparition de bulles de gaz dans l'œil d'une vipère placée dans une cloche à vide.**

**Fin du 18<sup>ème</sup> siècle : découverte de l'oxygène,  
début de la conquête de l'air.**

## Altitude : quelques repères historiques

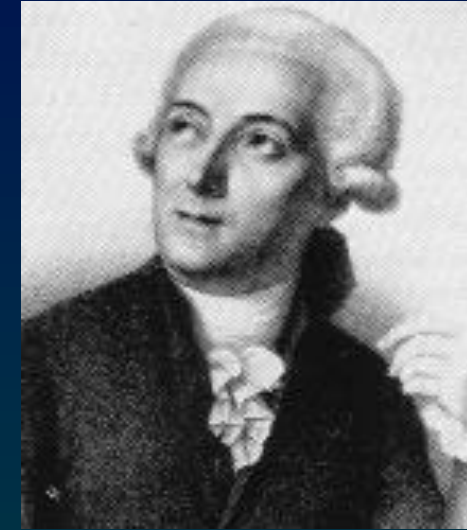
*Découverte de l'oxygène, qui fut le fruit d'un courant de pensée (plutôt que celui d'un homme seul).*



**Karl Wilhelm Scheele**  
(1742 - 1786)  
Apothicaire suédois



**Joseph Priestley**  
(1733 - 1804)  
Anglais, théologien, pasteur,  
polyglotte distingué, physicien,  
chimiste, philosophe,  
mort émigré à Northumberland  
(Pennsylvanie)



**Antoine-Laurent Lavoisier**  
(1743 - 1794),  
chimiste,  
fermier général,  
exécuté comme tel  
par la Convention

## Altitude : quelques repères historiques

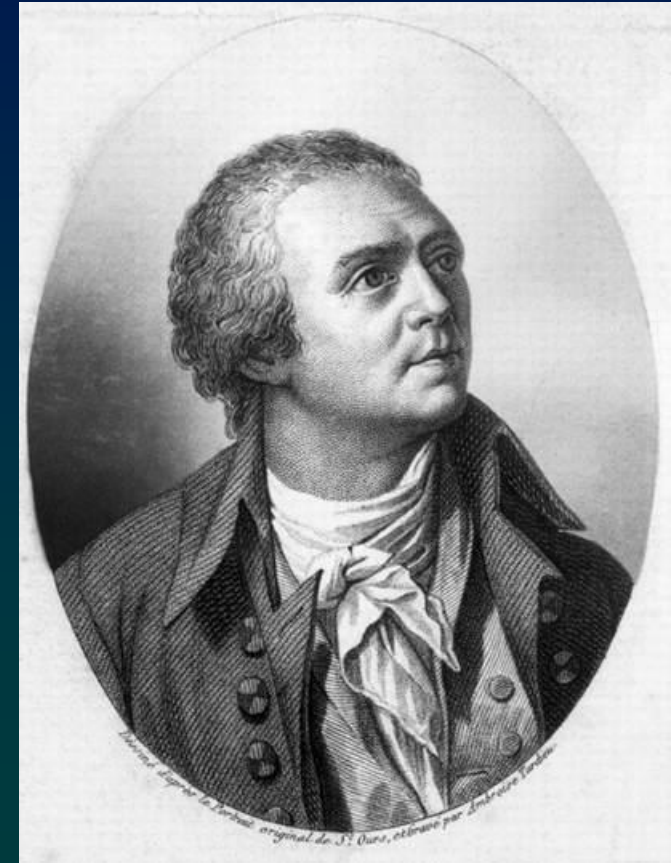
### Troubles observés en altitude et manque d'oxygène :

**3 Août 1787 : Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799)**

**Il organisa la troisième expédition de l'histoire (et première expédition scientifique), qui aboutit le 9 août 1787 au sommet du Mont-Blanc. Le guide était Jacques Balmat.**

**Interprétant les observations qu'il avait faites au cours de son ascension, de Saussure mit les symptômes ressentis sur le compte du manque d'air.**

**Pour mémoire : première ascension du Mont-Blanc par Jacques Balmat et le Dr Michel Paccard le 9 août 1786, puis seconde ascension avec 2 autres guides le 7 juil. 1787.**



## La montagne est restée le domaine des dieux !

ou celui des démons ?

### Mont-Blanc: l'irrespect atteint des sommets sur le toit de l'Europe

617 partages



Réagir



Le Mont-Blanc qui culmine à 4810m proche de Chamonix en Haute-Savoie, le 10 août 2018  
©PHILIPPE DESMAZES, AFP

AFP, publié le vendredi 17 août 2018 à 18h59

#### A lire aussi



Insultes, coup de poing, faux guides... Le maire de Saint-Gervais (Haute-Savoie) s'alarme des comportements irrespectueux qui se multiplient selon lui lors de l'ascension du Mont-Blanc, sans parler des touristes inconscients qui la tentent en baskets.

### Les touristes au sommet du Mont-Blanc

« Insultes, coups de poing, faux guides... Le maire de Saint-Gervais (Haute Savoie) s'alarme des comportements irrespectueux qui se multiplient selon lui lors de l'ascension du Mont-Blanc...

AFP, 17/08/2018

Goujaterie ?

Hypoxie ?

(ou les deux ?)



## Altitude : quelques repères historiques

### Les premiers vols en altitude :



### 5 juin 1783 : Joseph et Étienne Montgolfier

L'histoire anecdotique des frères Montgolfier et de leurs « montgolfières » est riche. Ils étaient papetiers à Vidalon-lès-Annonay (Ardèche). Le 5 juin 1783, ils effectuèrent une démonstration de leur ballon devant les membres des États du Vivarais. Leur ballon, d'un poids de 245 kg, vola jusqu'à l'altitude de 2 000 m et parcourut 2,5 km. Le vol avait duré 10 min.

## Altitude : quelques repères historiques

### Les premiers vols en altitude :

**19 Septembre 1783 :**

**Démonstration à Versailles, devant le Roi et la Cour.**

**Ce fut « la première expérience en altitude » :  
3 animaux furent embarqués,  
un mouton, un coq et un canard.**

**Altitude atteinte : 500 m.**

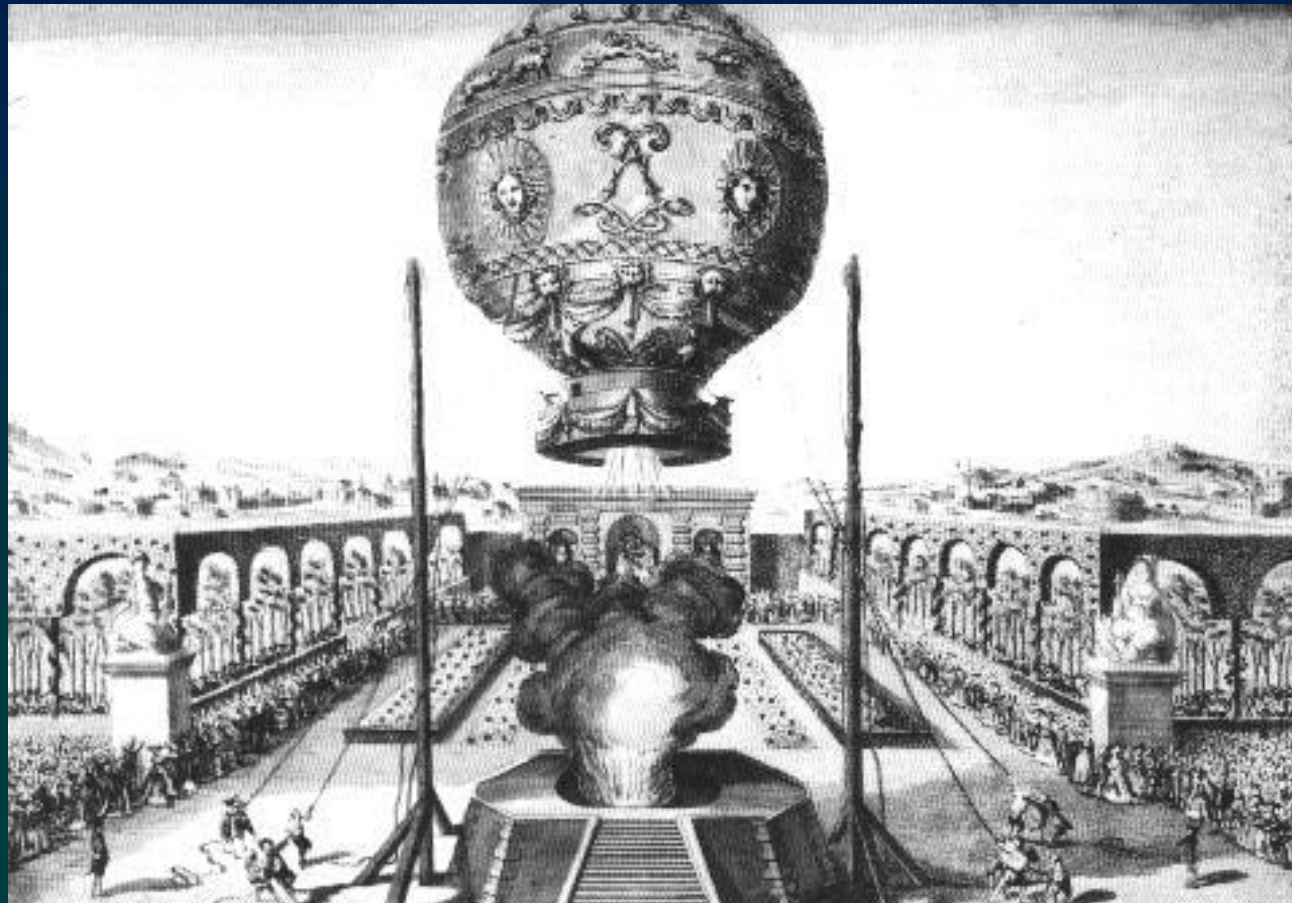
**Les trois animaux ont survécu.**



## Altitude : quelques repères historiques

### Les premiers vols humains en altitude :

19 octobre 1783 : **Pilâtre de Roziers** essaya la machine des frères Montgolfier en vol captif.



## Les premiers vols humains en altitude

**21 novembre 1783** : premier vol humain de **François Pilâtre de Roziers et du marquis François d'Arlandes**.

**1<sup>er</sup> décembre 1783** : utilisant une « *Charlière* », ballon à « gaz inflammable » (hydrogène), **Jacques Charles et Nicolas Robert** atteignirent l'altitude de **2700 mètres**. Charles fut, à cette occasion, le premier humain à souffrir d'une otite barotraumatique en vol. Il rapporta correctement cette observation à sa cause.

**7 janvier 1785** : première traversée de la Manche en **2 h et 25 min**, de **Douvres à Calais**, par **Jean-Pierre Blanchard et le Dr John Jeffries**.

**26 juin 1794 à la bataille de Fleurus** : première utilisation militaire d'un ballon, initiée par le chimiste **Louis-Bernard Guyton de Morveau**, le général **Moreau** étant l'observateur à bord du ballon.

## **Les premiers vols humains en altitude**

**15 juin 1785 : mort de Pilâtre de Roziers et de Romain. Leur ballon s'est enflammé à 1000 m, au cours d'une tentative de traversée de la Manche en Rozière (association hydrogène-montgolfière).**

## Altitude : quelques repères historiques

**Le « mal des ballons » : « *ce mal mystérieux qui frappe les audacieux* »**

**Robertson en 1800 à l'altitude de 6 550 m**

**Gay-Lussac et Biot en 1804 à l'altitude de 7 016 m**

**Glaisher en 1871 après une ascension à 8 833 m  
et bien d'autres...**

**Les premières études théoriques semblent dues à Junod en 1835**

**(qui construisit le premier caisson à dépression connu), puis à Jourdanet en 1863 après une série d'expéditions en montagne.**

**15 avril 1875 : accident du ballon *Le Zénith*, mort de Sivel et Crocé-Spinelli, récit du survivant (Tissandier). L'altitude maximale atteinte avait été de 8 600 m.**

**1878 : Paul Bert publie *La Pression Barométrique* (1183 pages).**

## Altitude : quelques repères historiques

à partir de 1901 : **Hermann von Schrötter (Vienne)**  
principes d'utilisation des masques inhalateurs d'oxygène, leur limite d'emploi en altitude, le concept de cabine étanche.

Pendant la première guerre mondiale, les directives de l'armée allemande prescrivaient l'emploi de systèmes d'oxygène pour les vols à une altitude supérieure à 4 000 m.

début des années 1930 : **Pr Auguste Piccard**  
premières utilisations de cabines étanches en haute altitude.

## Altitude : quelques repères historiques

**Les « Piccard » :**

**Auguste, Jean, Bertrand...**

**Auguste Piccard :**

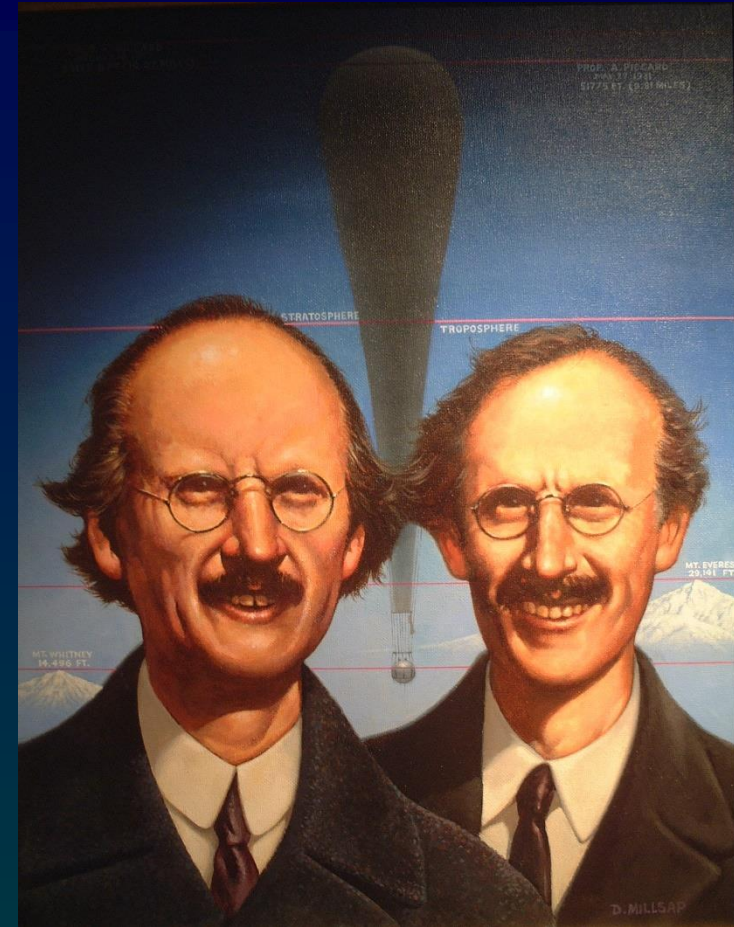
**15 780 m le 27 mai 1931, avec Paul Kipfer,  
16 200 m le 18 Août 1932, avec Max Cosyns.**

**Jean-Félix, avec son épouse Jeannette :**

**17 544 m le 23 octobre 1934,  
alimentation en oxygène par une source  
d'oxygène liquide.**

**Jacques, (fils d'Auguste), l'homme du bathyscaphe : record de profondeur  
à 11 000 m le 23 janvier 1960.**

**Bertrand, (fils de Jacques, petit-fils d'Auguste), tour du monde en aérostat (1999),  
oxygène liquide (60 dm<sup>3</sup>).**





## Altitude : quelques repères historiques

**Mise au point du premier régulateur d'oxygène à la demande :  
1936, société Auer (Allemagne)**

**Bases théoriques de calcul pour la prévention du risque hypoxique**

**fin de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale : Rahn, Fenn, Otis**

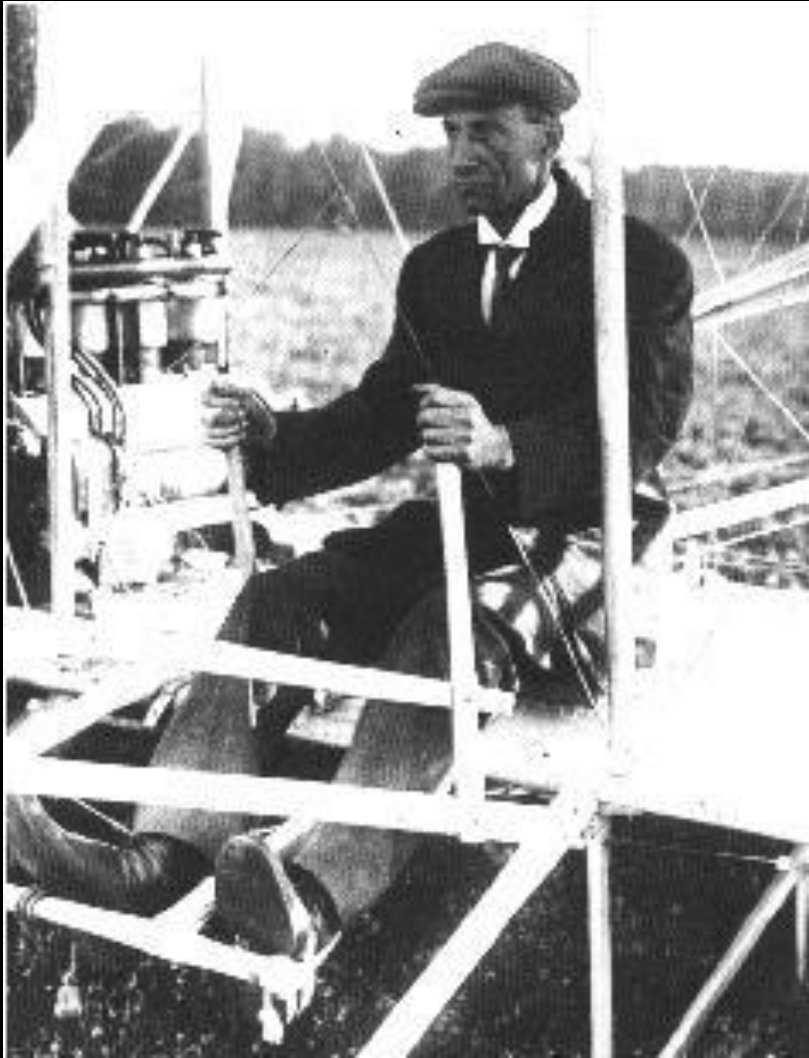
**USA et Grande-Bretagne : John Ernsting,**

**France : François Violette (décompressions explosives),**

**Pierre Varène et Charles Jacquemin (mécanique ventilatoire),**

**Jean Colin (protection contre l'altitude),**

**Georges Gutman (industrie).**



Wilbur Wright



1e F-35 JSF

# Physiologie et Transport Aérien

**Introduction**

 **Rappels**

**Conséquences de l'exposition de l'Homme à l'altitude**

**Barotraumatismes**

**Ébullisme**

**Maladie de décompression**

**Hypoxie**

**Cabines pressurisées**

**Systèmes d'oxygène**

# Physiologie et Transport Aérien

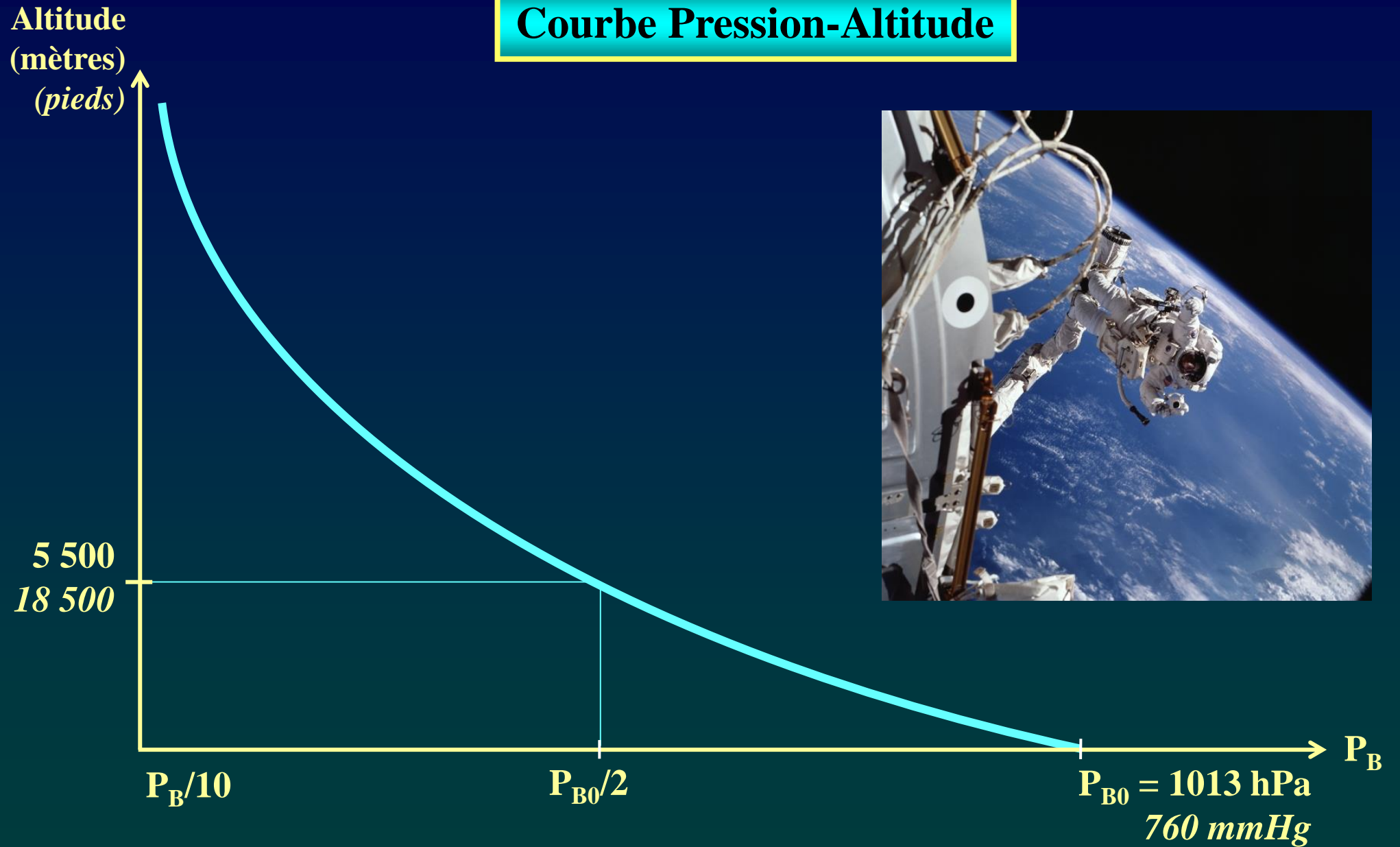
## Rappels :

**Structure de l'atmosphère : courbe pression-altitude**

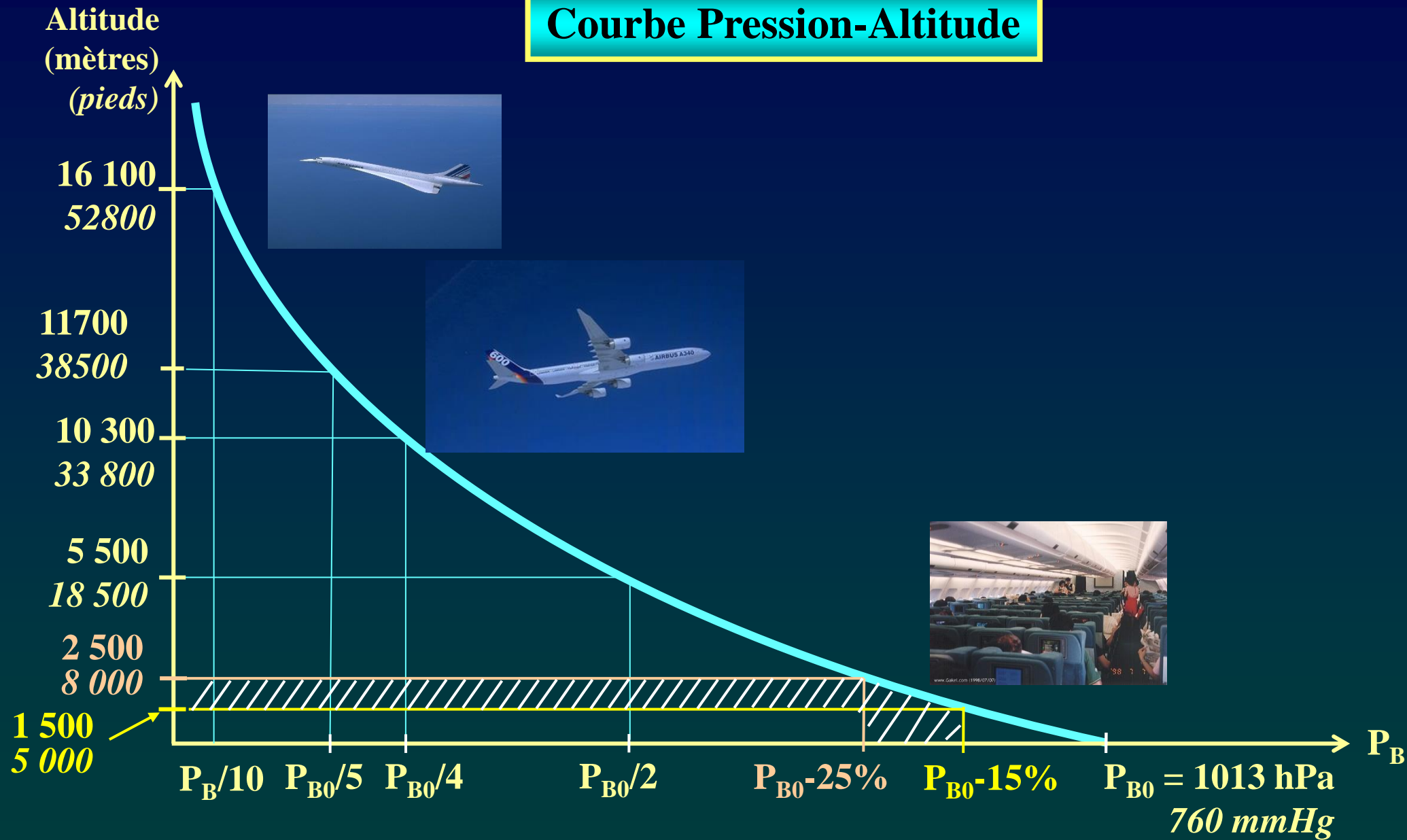
**Unités et notations**

**Lois de physique des gaz**

# Courbe Pression-Altitude



# Courbe Pression-Altitude

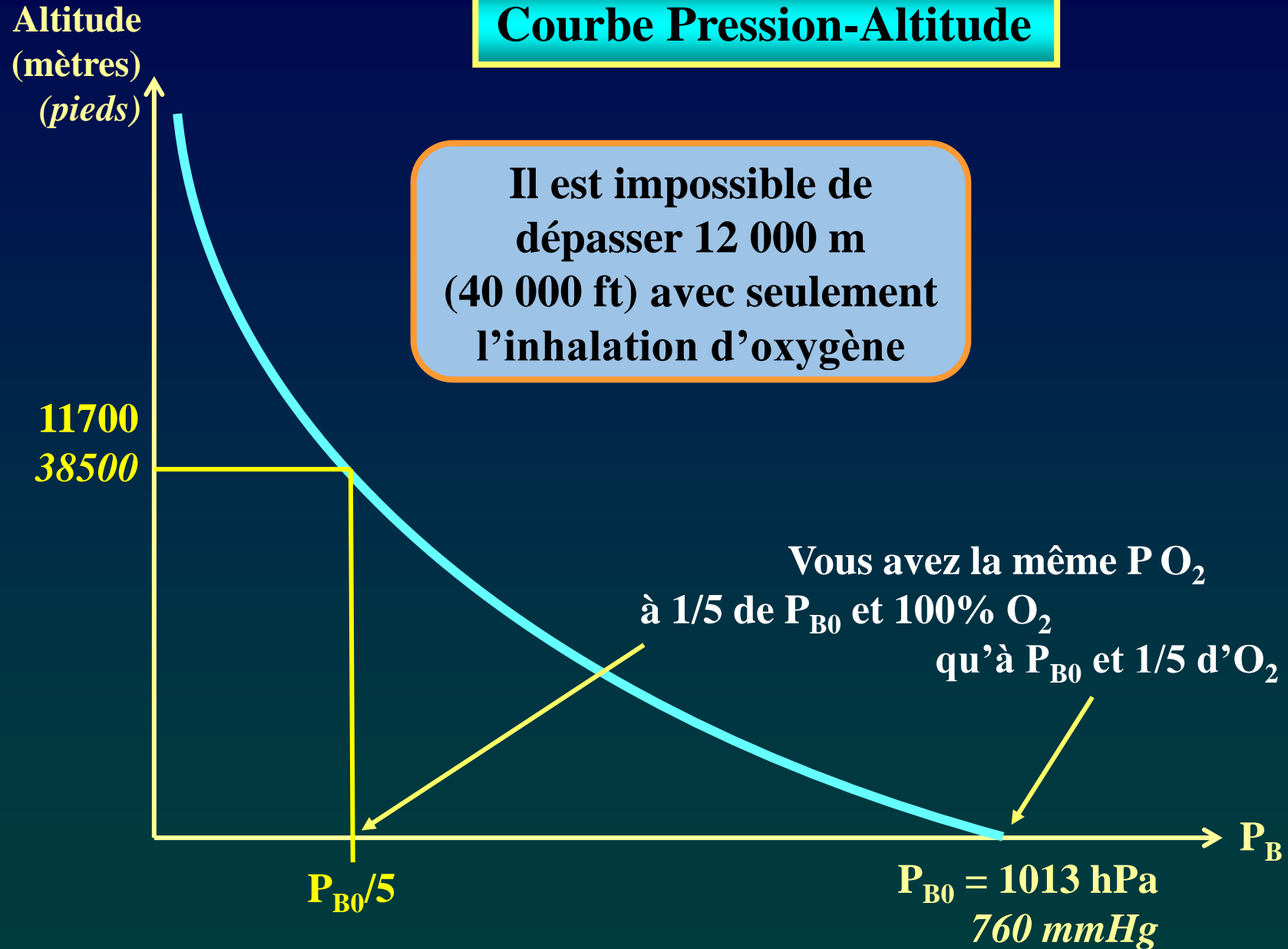


## Composition gazeuse de l'atmosphère terrestre

« Dans toute la zone d'altitude utilisée par l'aéronautique (jusqu'à 30 000 m – 100 000 ft), l'air contient 21 % d'oxygène. »

Gaz	Symbole	Fraction	Remarques
Azote	N <sub>2</sub>	0,78101	constant
Oxygène	O <sub>2</sub>	0,20946	constant
Vapeur d'eau	H <sub>2</sub> O	2 . 10 <sup>-2</sup>	très variable
Argon	Ar	9,17 . 10 <sup>-3</sup>	constant
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	3,30 . 10 <sup>-4</sup>	variable
Néon	Ne	1,82 . 10 <sup>-4</sup>	constant
Hélium	He	5,24 . 10 <sup>-6</sup>	constant
Méthane	CH <sub>4</sub>	1,50 . 10 <sup>-6</sup>	constant
Krypton	Kr	1,14 . 10 <sup>-6</sup>	constant
Ozone	O <sub>3</sub>	10 <sup>-7</sup>	très variable

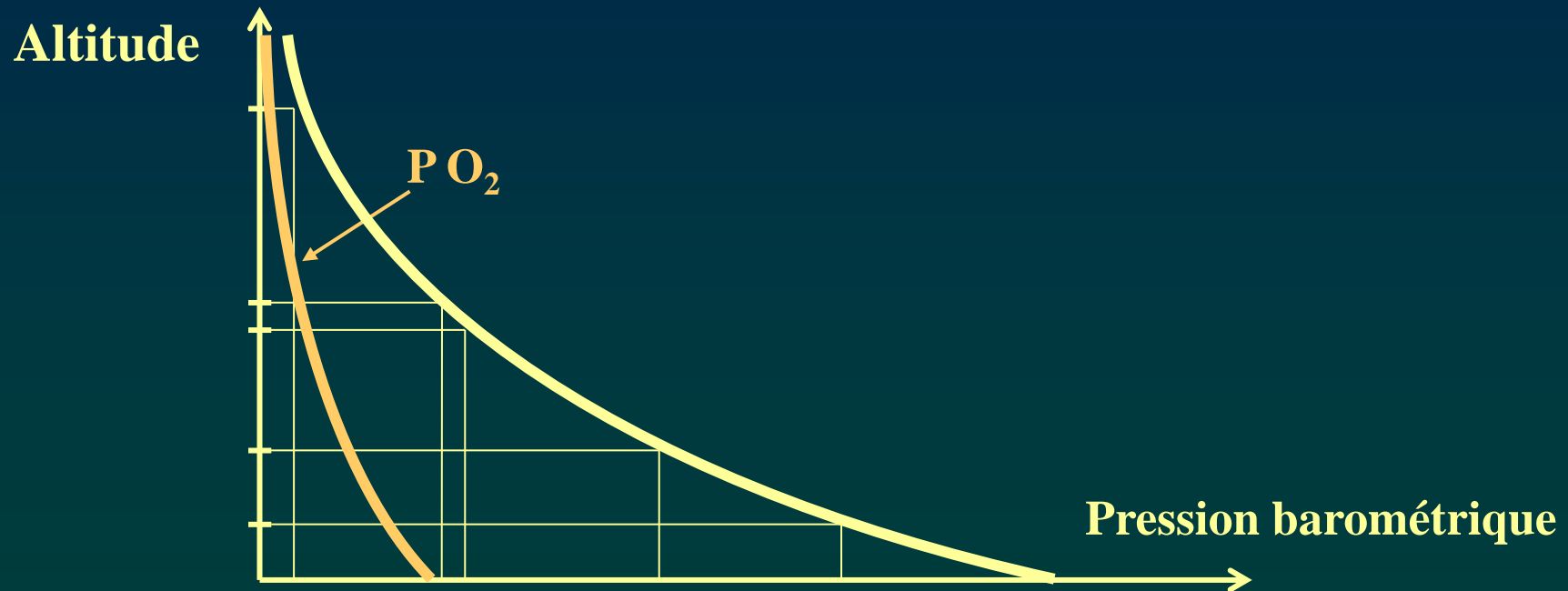
## Courbe Pression-Altitude





# Composition gazeuse de l'atmosphère terrestre

Gaz	Symbole	Fraction
Azote	$N_2$	78 %
Oxygène	$O_2$	21 %
Gaz rares		1 %



# Composition gazeuse de l'atmosphère terrestre

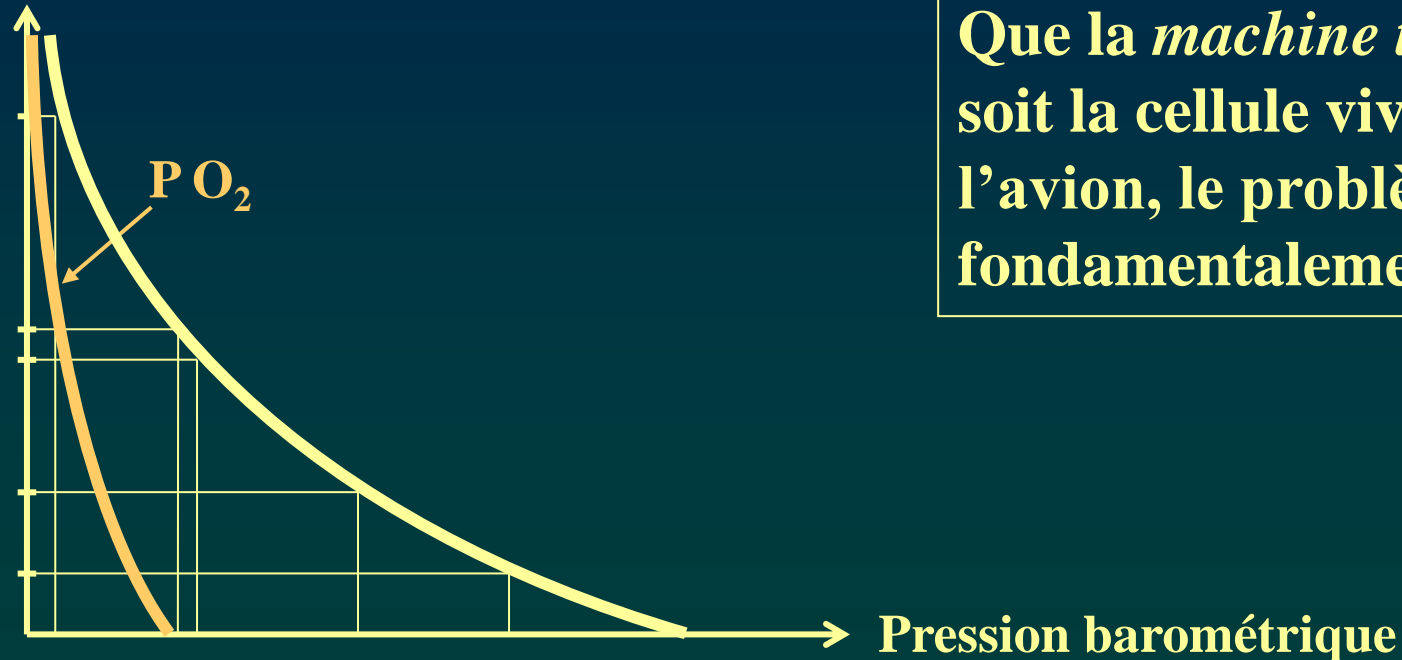
Gaz	Symbole	Fraction
Azote	N <sub>2</sub>	78 %
Oxygène	O <sub>2</sub>	21 %
Gaz rares		1 %

## En pratique :

La notion de  $P_{O_2}$  recouvre celle de masse d'oxygène disponible par unité de volume.

Que la *machine thermique aérobie* soit la cellule vivante ou le moteur de l'avion, le problème est fondamentalement le même...

Altitude





CHARGE    PRESSION D'HAILE    PRESSION ESSENCE    ESSENCE ARRIERE    VOLETS    POMPE ELECT

CONDITIONS de VOL  
VFR de JOUR et de  
NUIT en zone non givrante

B-M MKR    COM NAV    ADF    ATC

VOL VOLUME    SPEAKER    1 COM 2 COM 3 COM 4    1 NAV 2 DME MKR 1 ADF 2    ENG 1 2 3 4 PA  
MAGNETIC AMMETER 24R 150    FROM    SPOKE AUTO    MIC

119.05 119.20    115.20 116.50

SBY ON ALT    7    0    0    0  
OFF TST IDENT    KING AT78A

OFF ADF ANT RFO    ADF    KR 85 TSO  
295

10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0  
-1  
-2  
-3  
-4  
-5  
-6  
-7  
-8  
-9  
-10  
TAB





# Altitude

**Rappels :**

**Structure de l'atmosphère**

**Unités et notations**

**Lois de physique des gaz**

## Unités et notations : unités de pression

Unité légale (système métrique) : le pascal (Pa)  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N.m}^{-2}$   
multiples du Pa : hPa, kPa, Mpa, etc.

Unité usuelle en aéronautique :

le bar (bar) et le millibar

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa} = 0,1 \text{ kPa}$$

Unité usuelle en médecine :

Les « unités mercure » (mmHg [Torr], cmHg)

$$760 \text{ mmHg} = 1013,25 \text{ hPa} = 101,325 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 1,33 \text{ hPa} = 0,133 \text{ kPa}$$

$$3 \text{ mmHg} = 4 \text{ hPa}$$

Unité usuelle (une des...) en terre anglophone :

la livre par pouce carré (psi)

$$1 \text{ psi} = 68,9 \text{ hPa}$$

$$1 \text{ bar} = 14,7 \text{ psi}$$

## Unités et notations : unités de pression

Exemple : une bouteille d'oxygène gazeux « aéro » est « gonflée » à

**12,7 MPa** (mégapascal, unité métrique, réglementaire),

**127 bars** (unité usuelle en terre francophone),

**1850 psi** (unité usuelle dans le monde anglophone)

## Unités et notations : unités de longueur

Unité légale : le mètre (m)

Unité usuelle en aéronautique :

le pied (ft)

1 ft = 0,3048 m

1 m = 3,281 ft

Approximations :

3 ft  $\approx$  1 m

10 000 ft  $\approx$  3 050 m

Définition : Niveau de vol (Flight Level, FL) : Altitude-Pression divisée par 100.

exemple : FL 300 = 30 000 ft = 301 hPa.



## Unités et notations : notations

### Symboles utilisés :

**P** : Pression partielle d'un gaz

**F** : Fraction gazeuse

$$P = F \times P_B$$

### Notations en indice :

**I** : gaz inspirés

**E** : gaz expirés

**A** : gaz alvéolaires

**a** : sang artériel

**v** : sang veineux

### Exemples :

**$P_I O_2$**  : Pression partielle en oxygène dans les gaz inspirés

**$F_E CO_2$**  : Fraction expiratoire en dioxyde de carbone



le « Leduc 02 »

# Physiologie et Transport Aérien

## Rappels :

**Structure de l'atmosphère**

**Unités et notations**

**Lois de physique des gaz**



**- Loi de Boyle-Mariotte**

**- Loi de Charles**

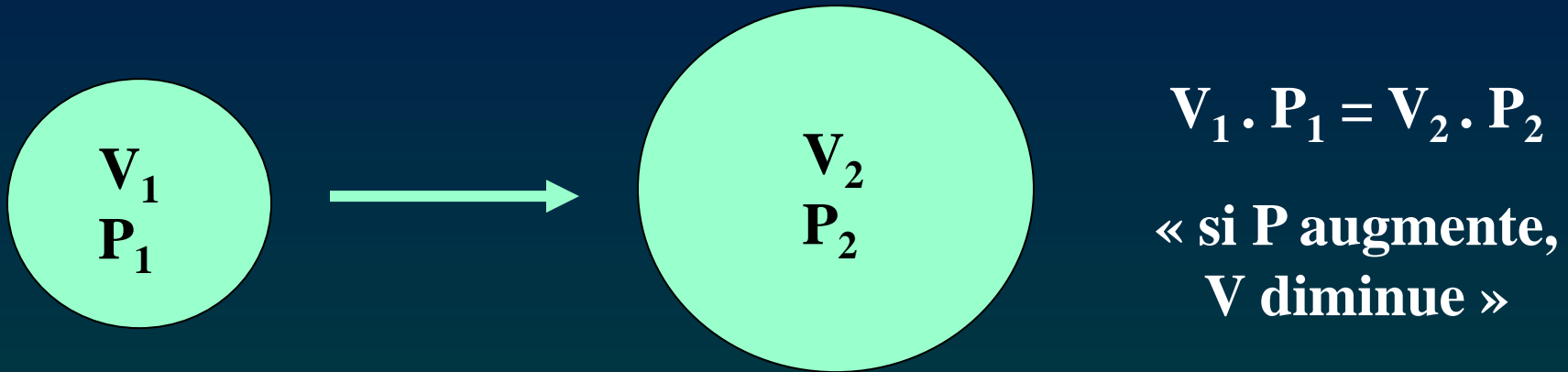
**- Loi de Henry**

**- Loi de Dalton**

**Autres principes de physique**

## Lois de physique des gaz : 1 - loi de Boyle-Mariotte

*Pour une quantité donnée de gaz, à température constante, le produit  
Pression x Volume est une constante :  $P * V = cst$*



*Application physiopathologique : les barotraumatismes*

## Lois de physique des gaz : 1 - loi de Boyle-Mariotte

*Réponses à deux questions usuelles :*

*1) si la pression diminue, le volume augmente.*

*Ce principe est vrai également en sens inverse :  
si la pression augmente, le volume diminue.*

*2) la loi de Boyle-Mariotte ne s'applique qu'aux fluides compressibles (gaz).*

*Elle ne s'applique pas aux liquides.*

*Application : les variations d'altitude n'expliquent ni l'apparition de varices ni les ruptures d'anévrisme.*

## Lois de physique des gaz : 2 - loi de Charles (rôle de la température)

*Lorsque la température d'un gaz augmente, à pression constante, le volume augmente d'un facteur 1/273 par ° Celsius.*

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

## Conditions physiques des mesures gazeuses

Associer la loi de Boyle-Mariotte et la loi de Charles

The diagram shows the text 'Associer la loi de Boyle-Mariotte et la loi de Charles' at the top. Two white arrows point downwards from this text to a bracketed equation. The first arrow points to the left side of the equation, and the second points to the right side. The equation is  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ .

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

**Donc, pour chaque gaz il existe une relation masse / volume / température :**

$$V = n \cdot R \cdot \frac{T}{P}$$

**Les volumes et débits gazeux ne peuvent être parfaitement connus que lorsque sont connues la pression et la température.**

## Conditions physiques des mesures gazeuses

**Condition STPD :**

- S Standard**
- T Temperature**
- P Pressure**
- D Dry (sec)**

**Traduire : température et pression standard, gaz sec**

**Température Standard = 0 °C = 273,15 K**

**Pression Standard = 1013,25 hPa**

**C'est la condition de référence, à préférer à toutes les autres.**



## Conditions physiques des mesures gazeuses

	Température	Pression	P H <sub>2</sub> O	usage
STPD	Standard : 0°C	Standard : 1013 hPa (760 mmHg)	Gaz sec (Dry)	référence absolue
NTPD	« Normale* »	Standard : 1013 hPa (760 mmHg)	Gaz sec (Dry)	à temp. <i>normale</i> du labo
ATPD	Ambiante	Ambiante	Gaz sec (Dry)	à temp. <i>observée</i> du labo, gaz sec
ATPS	Ambiante	Ambiante	Gaz humide (Saturé à T Ambiante)	à temp. <i>observée</i> du labo, gaz saturé en H <sub>2</sub> O
BTPS	Body (37 °C)	Body (= ambiante)	Gaz humide (Saturé à 37 °C)	gaz alvéolaire
BTPD	Body (37 °C)	Body (= ambiante)	Gaz sec	gaz alvéolaire sec

\* La définition de la température « normale » varie selon les interlocuteurs : entre 15 et 27 °C.

## Conditions physiques des mesures gazeuses

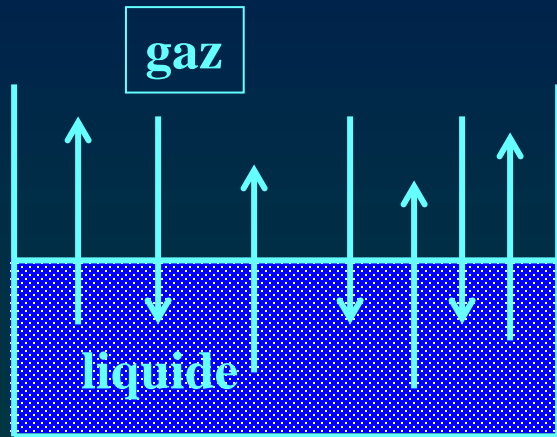
**Un exemple d'application : interpréter correctement la pression lue au manomètre de contrôle de la bouteille d'oxygène.**

La bouteille d'O<sub>2</sub> a été remplie à la pression standard de 1850 psi (127 bars) dans les conditions NTPD (T = 21°C).

Température		Pression	
°C	°F	psi	bars
-40	-40	1321	91
-29	-20	1418	98
-32	0	1515	104
-7	20	1611	111
4	40	1707	118
16	60	1802	124
21	70	1850	127
27	80	1897	131
38	100	1992	137
49	120	2087	144
66	150	2228	153

## Lois de physique des gaz : 3 - loi de Henry

**Loi de Henry : lorsqu'un liquide est en contact avec un gaz, une certaine quantité de ce gaz se dissout dans le liquide, jusqu'à un point d'équilibre appelé saturation. La quantité de gaz saturante dépend de la nature du liquide et du gaz et elle est proportionnelle à la pression partielle du gaz en contact avec le liquide.**



à l'équilibre, le nombre de molécules de gaz dissoutes dans le liquide est proportionnel à la pression partielle du gaz :

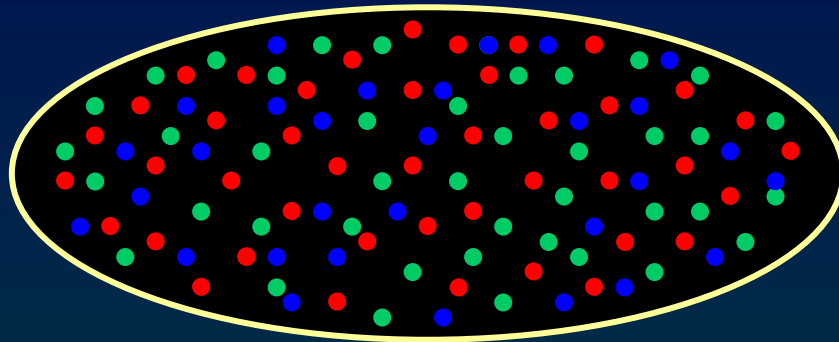
$$Q = \alpha \cdot P$$

*Application physiopathologique : la maladie de décompression*

## Lois de physique des gaz : 4 - loi de Dalton

*Dans un mélange gazeux, chaque gaz se comporte comme s'il était seul.*

*En pratique : la pression partielle d'un gaz est proportionnelle au nombre de molécules de gaz présentes dans un volume fini.*



$$P_{O_2} = k \frac{\text{Nb de mol. d'O}_2}{\text{Volume}} \quad \bullet$$

$$P_{N_2} = k \frac{\text{Nb de mol. de N}_2}{\text{Volume}} \quad \bullet$$

Dans un mélange gazeux,

- la pression totale du gaz est égale à la somme des pressions partielles des gaz qui constituent le mélange :  $P_B = \sum P_i$

- la fraction d'un gaz est égale au rapport entre sa pression partielle et la pression totale du mélange de gaz :

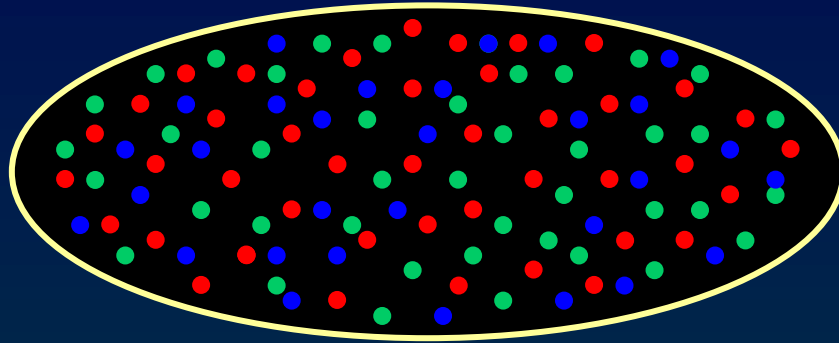
$$F_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_B}$$

- la pression partielle d'un gaz est égale au produit de sa fraction par la pression totale du mélange gazeux :  $P_{O_2} = F_{O_2} * P_B$

- la somme des fractions gazeuses est égale à 1 (100 %) :  $\sum F_i = 1$

## Lois de physique des gaz : 4 - loi de Dalton

*Dans un mélange gazeux, chaque gaz se comporte comme s'il était seul.*



$$P_{O_2} = k \frac{\text{Nb de mol. d'O}_2}{\text{Volume}} \quad \bullet$$

$$P_{N_2} = k \frac{\text{Nb de mol. de N}_2}{\text{Volume}} \quad \bullet$$

**Retenons la différence entre les notions de pression partielle et de fraction d'un gaz :**

**la pression partielle est le produit de la fraction par la pression totale.**

**En ce qui concerne l'oxygène, seule la pression partielle est la grandeur significative pour l'organisme :  $P_{O_2} = F_{O_2} \times P_B$ .**

**Technologiquement, nous assurons une valeur correcte de la  $PO_2$  en jouant soit sur le pourcentage d'oxygène ( $F_{O_2}$ ), soit sur la pression totale ( $P_B$ ), soit sur les deux à la fois : inhalation de mélanges enrichis en oxygène et/ou pressurisation.**

## Lois de physique des gaz : 4 - loi de Dalton : quelques exemples d'application

La « loi de Dalton » fait parfois peur...

En physiologie, ou en thérapeutique, nous devons maintenir une certaine  $PO_2$ .

La question est donc : lorsque la pression varie, en plongée ou en altitude, quel est le juste pourcentage d'oxygène à administrer ?

- la fraction (le pourcentage) d'un gaz est égale à la pression partielle divisée par la pression totale :  $F_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_B}$

- ou bien : la pression partielle d'un gaz est égale au produit de sa fraction par la pression totale du mélange gazeux :  $P_{O_2} = F_{O_2} * P_B$

## Lois de physique des gaz : 4 - loi de Dalton : quelques exemples d'application

**Vous êtes au niveau de la mer (pression barométrique = 1013 hPa = 760 mmHg).**

**Vous respirez de l'air ( $F_I O_2 = 0,21$ )**

**Quelle est votre pression partielle d'oxygène dans le gaz inspiré ?**

$$P_I O_2 = F_I O_2 \times P_B = 0,21 \times 1013 \text{ hPa} = 212 \text{ hPa} \\ = 159 \text{ mmHg}$$

## Lois de physique des gaz : 4 - loi de Dalton : quelques exemples d'application

À 5 500 m d'altitude, la pression barométrique est égale à la moitié de celle du niveau de la mer, soit 506 hPa. À cette altitude, l'air contient environ :

A – 10,5 % d'oxygène

B – 21 % d'oxygène

C – 42 % d'oxygène

D – 50 % d'oxygène

À cette altitude, la pression partielle de l'oxygène est :

A – 1013 hPa

B – 212 hPa

C – 106 hPa

D – 92 mmHg



## Lois de physique des gaz : 4 - loi de Dalton : quelques exemples d'application

**Vous êtes en plongée à 90 mètres (pression barométrique = 10 atmosphères = 10 ATA).**

**Vous respirez de l'air ( $F_I O_2 = 0,21$ ).**

**Quelle est votre pression partielle d'oxygène ?**

**A - 212 hPa**

**B - 2 120 hPa**

**C - 21 hPa**

**10 atmosphères = 10 132 hPa**

**$P O_2 = 0,21 \times 10\ 132 = 2\ 120\ \text{hPa}$**

## Lois de physique des gaz : 4 - loi de Dalton : quelques exemples d'application

Suite de la question précédente : nous avons obtenu  $P_{O_2} = 212 \text{ hPa}$

Or, le seuil de l'effet Paul Bert (crise d'épilepsie) est à 1,7 ATA en  $O_2$  pur (1 700 hPa), équivalent à une profondeur de 7 m en  $O_2$ .

À 90 mètres de profondeur, quel doit être le pourcentage d'oxygène dans le gaz inspiré pour avoir la même pression partielle d'oxygène qu'en surface ?

A - 212 hPa

B - 21 p. cent

C - 2 p. cent

D - 5 p. cent

## Lois de physique des gaz : 4 - loi de Dalton : quelques exemples d'application

Suite de la question précédente : nous avons obtenu  $P_{O_2} = 212 \text{ hPa}$

Or, le seuil de l'effet Paul Bert (crise d'épilepsie) est à 1,7 ATA en  $O_2$  pur (1 700 hPa), équivalent à une profondeur de 7 m en eau avec de l'oxygène pur.


À 90 mètres de profondeur, quel doit être le pourcentage d'oxygène dans le gaz inspiré pour avoir la même pression partielle d'oxygène qu'en surface ?

A - 212 hPa

B - 21 p. cent

C - 2 p. cent

D - 5 p. cent

$$P_{O_2} = 212 \text{ hPa}$$


$$P_B = 10 \text{ atm} = 10\,132 \text{ hPa}$$

$$F_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_B} = \frac{212}{10\,132} \approx \frac{2}{100} \quad (2 \text{ p. cent})$$

## Lois de physique des gaz : 4 - loi de Dalton : quelques exemples d'application

**Votre patient est équilibré au niveau de la mer avec au moins 25 % d'oxygène additionnel.**

**Dans la cabine de l'avion, l'altitude peut être de 8000 ft = 2438 m ( $P_B = 753$  hPa [565 mmHg]).**

**Votre ordonnance : pendant son voyage aérien, le patient devra inhaler un mélange enrichi en oxygène à hauteur de ?**

**Les calculs sont les suivants:**

**Quand un patient reçoit x % d'oxygène, il reçoit (100 – x) % d'air.**

**Le pourcentage d'oxygène dans le gaz qu'il respire est constitué de 2 termes :  
l'oxygène pur reçu et l'oxygène contenu dans l'air additionnel.**

**Sa  $F_I O_2$  est :  $F_I O_2$  (en %) = x % + 0,21 . (100 – x) %.**

**Si x = 25 %,  $F_I O_2 = 25 + 0,21 . (100 – 25) = 25 + 15,75 \approx 41$  %.**

**Avec 41 % d'oxygène au niveau de la mer, la  $P_I O_2$  de ce patient est**

$$P_I O_2 = F_I O_2 \times P_B = 0,41 \times 1013 = 415 \text{ hPa.}$$

**À 2 438 m (8 000 ft,  $P_B = 753$  hPa), quelle  $F_I O_2$  doit-on administrer pour obtenir une  $P_I O_2$  de 415 hPa ?**

$$F_I O_2 = \frac{P_I O_2}{P_B} = \frac{415}{753} = 0,55 \text{ (55\%)}$$

**La dernière question est : comment fournir 55 % d'oxygène avec un mélange air-oxygène ? (quel pourcentage d'O<sub>2</sub> additionnel ?)**

**Reprenons la formule ci-dessus :  $F_I O_2 = x \% + 0,21 \cdot (100 - x) \%$ .**

**Il suffit de sortir x de cette formule :  $F_I O_2 = x + 21 - 0,21x = 0,79x + 21$ . D'où :**

$$x = \frac{F_I O_2 - 0,21}{0,79}$$

**Dans l'application précédente, pour délivrer une  $F_I O_2 = 55 \%$ , il faut administrer**

$$x = \frac{0,55 - 0,21}{0,79} = 0,43 = 43\% \text{ d'O}_2 \text{ additionnel}$$

**Pourquoi faire des calculs aussi complexes ?**

# Physiologie et Transport Aérien

## Rappels :

Structure de l'atmosphère

Unités et notations

Lois de physique des gaz

- Loi de Boyle-Mariotte
- Loi de Charles
- Loi de Henry
- Loi de Dalton



Autres principes de physique

**L'oxygène gazeux pose des problèmes :**

- **gaz sous pression (stockage d'énergie),**
- **(par définition) gaz oxydant avec risque de feu,**
- **risque spécifique dû à la proximité entre circuits électriques et circuits d'oxygène.**



## Physique appliquée

**Pression x Volume = constante = énergie**

**énergie = rupture possible**

**Rappel :**

$$\text{Pression} = \frac{\text{Force}}{\text{Surface}}$$

**d'où : Force = Pression x Surface**

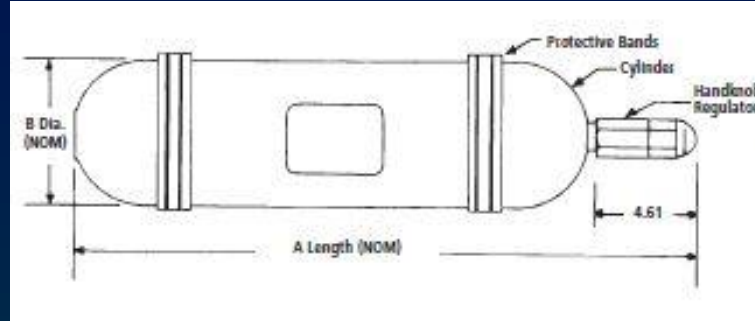
**Application :**

# Physique appliquée

**Pression x Surface = Force**



**AVOX Systems 115 cu.ft (3275 dm<sup>3</sup>)**



**diamètre = 8.9 inches = 22,61 cm**

**surface =  $11,305^2 \times 3,1416 = 401,51 \text{ cm}^2 = 0,0401 \text{ m}^2$**

**Pression de gonflement : 127 bars = 12,7 MPa**

**Force appliquée sur le fond de bouteille : pression x surface**

$$F = 12,7 \cdot 10^6 \times 401 \cdot 10^{-4} = 12,7 \times 401 \times 10^2 = 509\,270 \text{ N}$$

$$= 51\,913 \text{ kgf} \approx 52 \text{ tonnes-force}$$

# Physique appliquée



**B-747-438  
VH-OJK  
Qantas  
(25-07-2008)**

# Physique appliquée



**L'oxygène gazeux pose des problèmes :**

- **gaz sous pression (stockage d'énergie),**
- **(par définition) gaz oxydant avec risque de feu,**
- **risque spécifique dus à la proximité entre circuits électriques et circuits d'oxygène.**

**Boeing 767 : années 80**

**1981, 200 t, 181-375 pax, 12 000 km, 946 ex**



Note: sur cette illustration, l'avion est intact et vole normalement.

ABX 767, San Francisco  
28 juin 2008



CRJ-200, Tallahassee, 28 fév. 2009





# CRJ-200, Tallahassee



## **L'oxygène sous pression : risque combiné explosion/incendie**

**L'oxygène est**

- un gaz sous pression (stockage d'énergie)**
- (par définition) : un oxydant (risque de feu)**

**La triade infernale : - forte  $PO_2$**

- échauffement**
- présence d'un combustible**

**discuter le cas typique de l'ouverture trop rapide d'un robinet ou d'une vanne (parfois en mauvais état) dans un circuit d'oxygène à haute pression, en présence d'un polluant microscopique.**

**Ajout en date du 18 nov 2015 (réf.: SAE A-10 Committee meeting, Las Cruces (NM, USA))**

**Des études importantes sont réalisées sur le risque incendiaire lié à l'oxygène.**

**Le risque « feu » est rencontré notamment lorsque 3 conditions sont réunies :**

**forte pression d'oxygène,**

**chaleur,**

**présence d'un combustible.**

**Dans une installation d'oxygène, le combustible peut être une particule métallique, provenant par exemple du vieillissement des contenants.**

**L'ouverture trop brutale d'un robinet ou d'une vanne d'oxygène, même sans que la pression soit très élevée, peut créer localement une surpression, qui elle-même provoque l'échauffement. Un combustible même microscopique peut alors allumer l'incendie. Ensuite de quoi, les feux d'oxygène étant très violents, l'incendie local est destructeur des structures et l'éclatement suit l'incendie.**

**De plus, l'éclatement peut se propager le long des lignes de transfert de l'oxygène.**

**Les diapos suivantes sont des photos personnelles réalisées au cours de cette réunion. Elles peuvent se passer de commentaire.**

**Henri Marotte**

**Feu initié dans la bouteille à haute pression puis éclatement du fût**



**feu propagé à la tuyauterie**

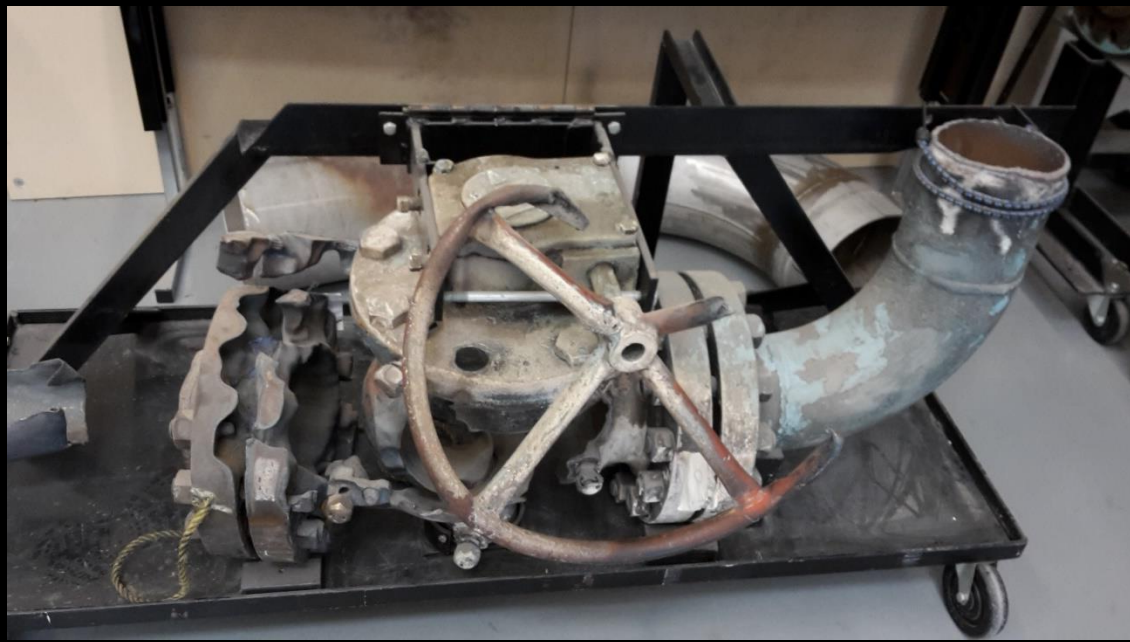


**feu sur la vanne/manodétendeur**



**Feu sur les structures de têtes de bouteilles; en bas à droite, observer les dommages sur le masque O2**





**Feux dans des installations de production d'oxygène liquide. Les pressions ne sont pas très élevées et la température est froide, du moins avant l'incendie. Et pourtant...**

**Photos de photos (désolé pour la qualité) : ce qui reste d'une ambulance après un feu d'oxygène.**



## Physique des gaz (suite)

**L'oxygène pose deux problèmes :**

**gaz sous pression (stockage d'énergie)**

**(par définition) : gaz oxydant avec risque de feu**

**Après l'accident, 3 questions seront posées :**

- fallait-il de l'oxygène ?**
- en fallait-il AUTANT ?**
- quelles étaient les procédures d'emploi prévues ?**

**Des restrictions réglementaires sont à prévoir sur l'emport de grandes quantités d'oxygène à bord et/ou sur les contenants de grande capacité.**

**Solutions alternatives ?**



## Application des lois de physique des gaz aux conséquences physiopathologiques de l'exposition à l'altitude

**Loi de Dalton** :  $P_B = P_{O_2} + P(N_2 + \text{gaz rares})$

Variation de $P_B$	Gaz occlus dans des cavités closes ou semi-closes	Loi de Boyle-Mariotte	Barotraumatismes
Diminution de $P_B$	(cas particulier)		Ébullisme
Diminution de $P_{N_2}$	Gaz dissous dans les liquides de l'organisme	Loi de Henry	Maladie de décompression (aéroembolisme)
Diminution de $P_{O_2}$	Gaz combiné chimiquement dans l'organisme		Hypoxie

# Physiologie et Transport Aérien

**Introduction**

**Rappels**

**Conséquences de l'exposition de l'Homme à l'altitude**

**Barotraumatismes**

**Ébullisme**

**Maladie de décompression**

**Hypoxie**

**Cabines pressurisées**

**Systèmes d'oxygène**

# **Les barotraumatismes**

**Définition**

**Troubles ORL**

**Otites barotraumatiques**

**Sinusites barotraumatiques**

**Aérodontalgies**

**Troubles digestifs**

**Cas particuliers du transport aérien sanitaire**

# Les barotraumatismes

## Définition

## Troubles ORL

Otites barotraumatiques

Sinusites barotraumatiques

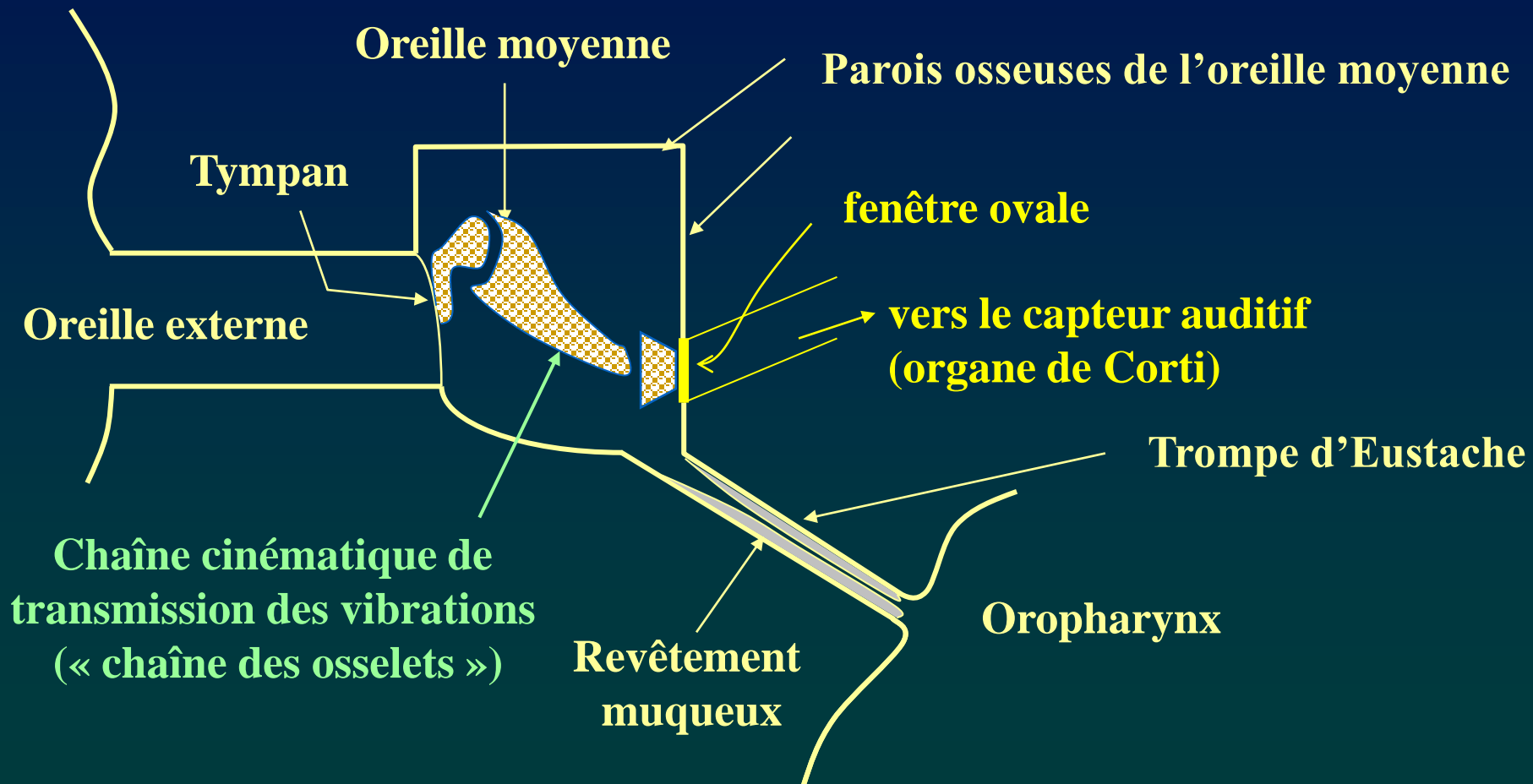
## Aérodontalgies

## Troubles digestifs

## Cas particuliers du transport aérien sanitaire

# Les barotraumatismes

## Les otites barotraumatiques



# Les barotraumatismes

## Définition

## Troubles ORL

**Otites barotraumatiques**



**Sinusites barotraumatiques**

## Aérodontalgies

## Troubles digestifs

## Cas particuliers du transport aérien sanitaire

# Les barotraumatismes

**Définition**

**Troubles ORL**

**Otites barotraumatiques**

**Sinusites barotraumatiques**

 **Aérodontalgies**

**Troubles digestifs**

**Cas particuliers du transport aérien sanitaire**

# Les barotraumatismes

**Définition**

**Troubles ORL**

**Otites barotraumatiques**

**Sinusites barotraumatiques**

**Aérodontalgies**

 **Troubles digestifs**

**Cas particuliers du transport aérien sanitaire**



# Les barotraumatismes

**Définition**

**Troubles ORL**

**Otites barotraumatiques**

**Sinusites barotraumatiques**

**Aérodontalgies**

**Troubles digestifs**

 **Cas particuliers du transport aérien sanitaire**

## Cas particulier du transport aérien sanitaire

**L'expansion volumétrique des gaz occlus :**

**application de la loi de Boyle-Mariotte (  $P.V = cst$  )**

**aux volumes piégés dans l'organisme :**

**la diminution de la pression barométrique**

**entraîne l'expansion volumétrique des**

**gaz, et la distension des parois si les gaz**

**ne peuvent pas s'échapper :**

- pneumothorax,
- bulles d'emphysème,
- chirurgie digestive,
- chirurgie oculaire,
- ...





Château de Pierrefonds  
≈15 km, SE de Compiègne

# Physiologie et Transport Aérien

**Introduction**

**Rappels**

**Conséquences de l'exposition de l'Homme à l'altitude**

**Barotraumatismes**

**Ébullisme**

**Maladie de décompression**

**Hypoxie**

**Cabines pressurisées**

**Systèmes d'oxygène**

# Application des lois de physique des gaz aux conséquences physiopathologiques de l'exposition à l'altitude

<b>Diminution de <math>P_B</math></b>	<b>(cas particulier)</b>		<b>Ébullisme</b>

# L'ébullisme

## Définition

**La température d'ébullition de l'eau est fonction de la pression : l'eau bout à 100 °C sous une pression de 1013 hPa (760 mmHg). Elle augmente ou diminue avec la pression\*.**

**À la pression de 63 hPa (47 mmHg), l'eau bout à 37 °C, ce qui recoupe la notion connue de *pression (tension) saturante en vapeur d'eau à 37 °C*.**

**Cette valeur de la pression barométrique est observée à 19 200 m (63 000 ft).**

- **de Saussure, 1787 : « au sommet du Mont-Blanc, l'eau bout à 68,99°R (86,24°C) ».**

# Physiologie et Transport Aérien

**Introduction**

**Rappels**

**Conséquences de l'exposition de l'Homme à l'altitude**

**Barotraumatismes**

**Ébullisme**

**Maladie de décompression**

**Hypoxie**

**Cabines pressurisées**

**Systèmes d'oxygène**

## Application des lois de physique des gaz aux conséquences physiopathologiques de l'exposition à l'altitude

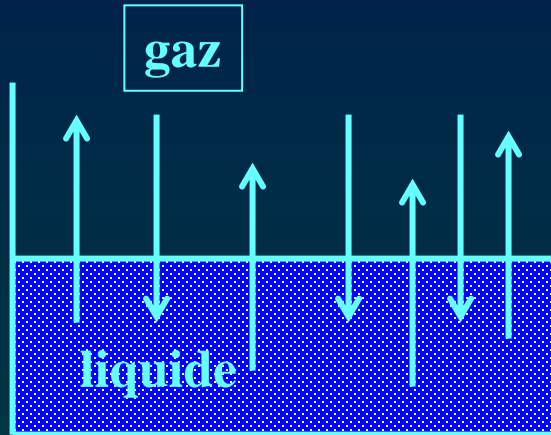
**Loi de Dalton** :  $P_B = P_{O_2} + P_{(N_2 + \text{gaz rares})}$

Variation de $P_B$			
Diminution de $P_B$			
Diminution de $P_{N_2}$	Gaz dissous dans les liquides de l'organisme	<b>Loi de Henry</b>	Maladie de décompression (aéroembolisme)
Diminution de $P_{O_2}$			



## Lois de physique des gaz : 3 - loi de Henry

**Loi de Henry : lorsqu'un liquide est en contact avec un gaz, une certaine quantité de ce gaz se dissout dans le liquide, jusqu'à un point d'équilibre appelé saturation. La quantité de gaz saturante dépend de la nature du liquide et du gaz et elle est proportionnelle à la pression partielle du gaz en contact avec le liquide.**

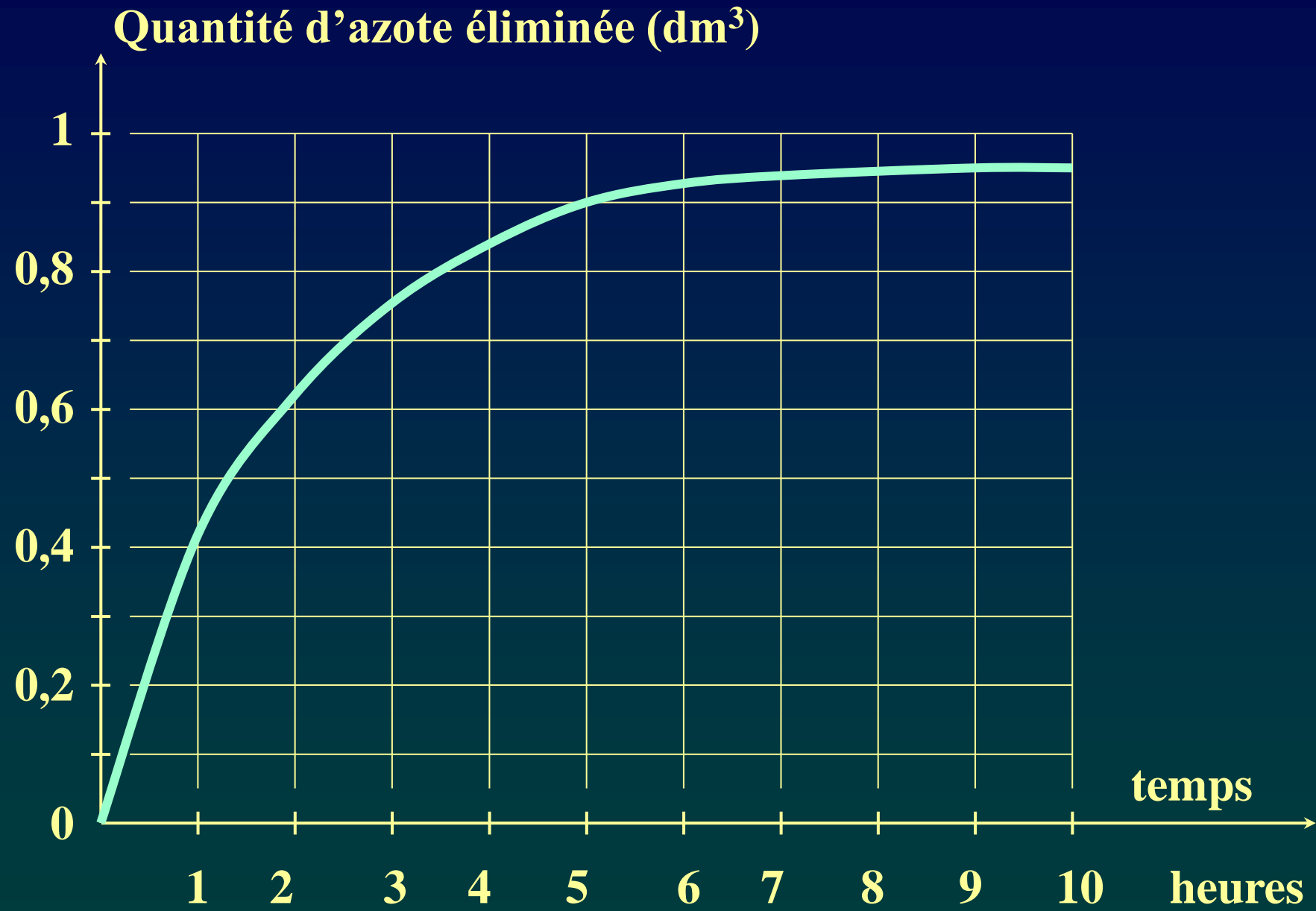


à l'équilibre, le nombre de molécules de gaz dissoutes dans le liquide est proportionnel à la pression partielle du gaz :

$$Q = \alpha \cdot P$$

Exemple: à 35°C,  $\alpha = 12,5$  ml/l pour  $N_2$  et 24,5 ml/l pour  $O_2$ .  
L'azote est 5 à 6 fois plus soluble dans les graisses humaines que dans l'eau.

***Application physiopathologique : la maladie de décompression***



*(d'après Behnke et Willmon, 1940)*

## Conditions de sursaturation critique

	à la vitesse maximale de	à partir du niveau de la mer, montée à
risque <i>clinique</i>	1 m.s <sup>-1</sup>	5 500 m
risque <i>objectif</i>	0,4 m.s <sup>-1</sup>	4 000 m

Risque « *clinique* » = présence de symptômes perçus par le sujet

Risque « *objectif* » = présence de bulles de gaz détectables seulement par un instrument [par exemple : détecteur ultrasonore]  
notion de « bulles silencieuses »

# **La maladie de décompression (aéroembolisme)**

## **Symptômes de la maladie de décompression**

**Les formes bénignes d'expression immédiate**

**Douleurs articulaires (bends)**

**Symptômes cutanés (puces)**

**Manifestations articulaires non douloureuses**

**Les formes graves d'expression immédiate**

**Formes neurologiques**

**Formes pulmonaires**

**Formes cardiovasculaires**

**Les formes retardées**

# La maladie de décompression (aéroembolisme)

## Facteurs individuels de risque de la maladie de décompression

Travail musculaire

Âge

Existence de traumatismes antérieurs

Obésité

Sexe

Consommation d'alcool

**Plongée sous-marine avant exposition à l'altitude**

**Évacuation par voie aérienne de plongeurs  
victimes d'un accident de décompression**

Existence de particularités anatomiques préexistantes

## **La maladie de décompression (aéroembolisme)**

**Circonstances d'apparition de la maladie de décompression en  
aéronautique civile :**

**à propos du vol après plongée sous-marine :**

- délai incompressible de 24 heures entre la plongée et le vol\***
- (évidence) : aucune restriction de délai pour plonger après le vol**
- problème particulier : l'évacuation sanitaire d'un patient déjà atteint de symptômes de maladie de décompression.**

**\* pour les membres d'équipage : règlement UE n°965/2012, §CAT.GEN.MPA.100, c.2 et AMC-GM de même référence.**









U-2 : le plus gros pourvoyeur de maladie de décompression de l'USAF !

# Physiologie et Transport Aérien

**Introduction**

**Rappels**

**Conséquences de l'exposition de l'Homme à l'altitude**

**Barotraumatismes**

**Ébullisme**

**Maladie de décompression**

**Hypoxie**

**Cabines pressurisées**

**Systèmes d'oxygène**

# Physiologie et Transport Aérien

*L'hypoxie : rappels de physiologie*

# Rappels de physiologie



**La ventilation alvéolaire**

**Les gaz alvéolaires**

**Le transport de l'oxygène par le sang**

## Rappels de physiologie

### La commande de la ventilation alvéolaire

La commande de la ventilation alvéolaire chez l'homme appartient à une double régulation :

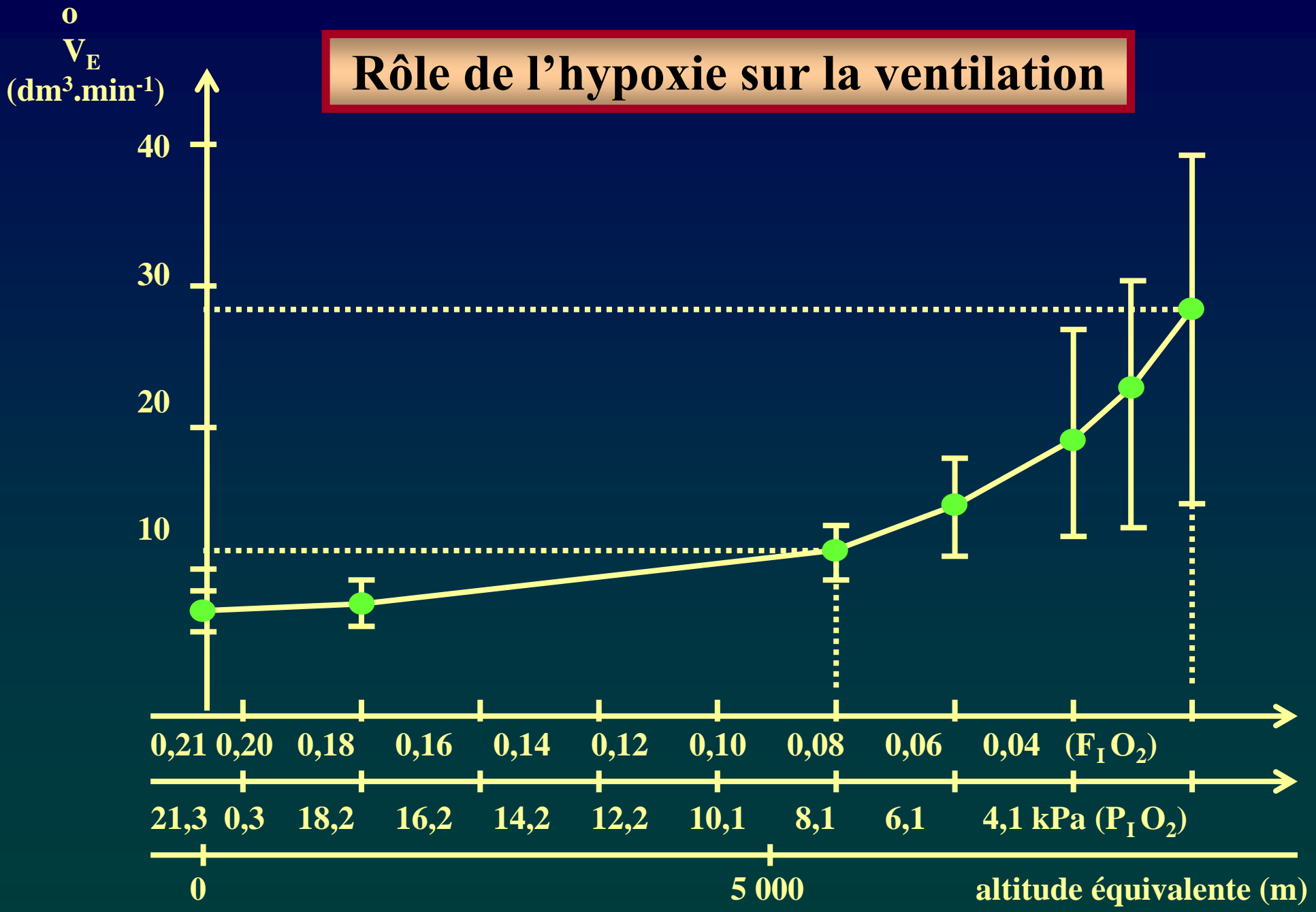
régulation de la  $P_{O_2}$  :

la ventilation augmente lorsque la  $P_{O_2}$  diminue

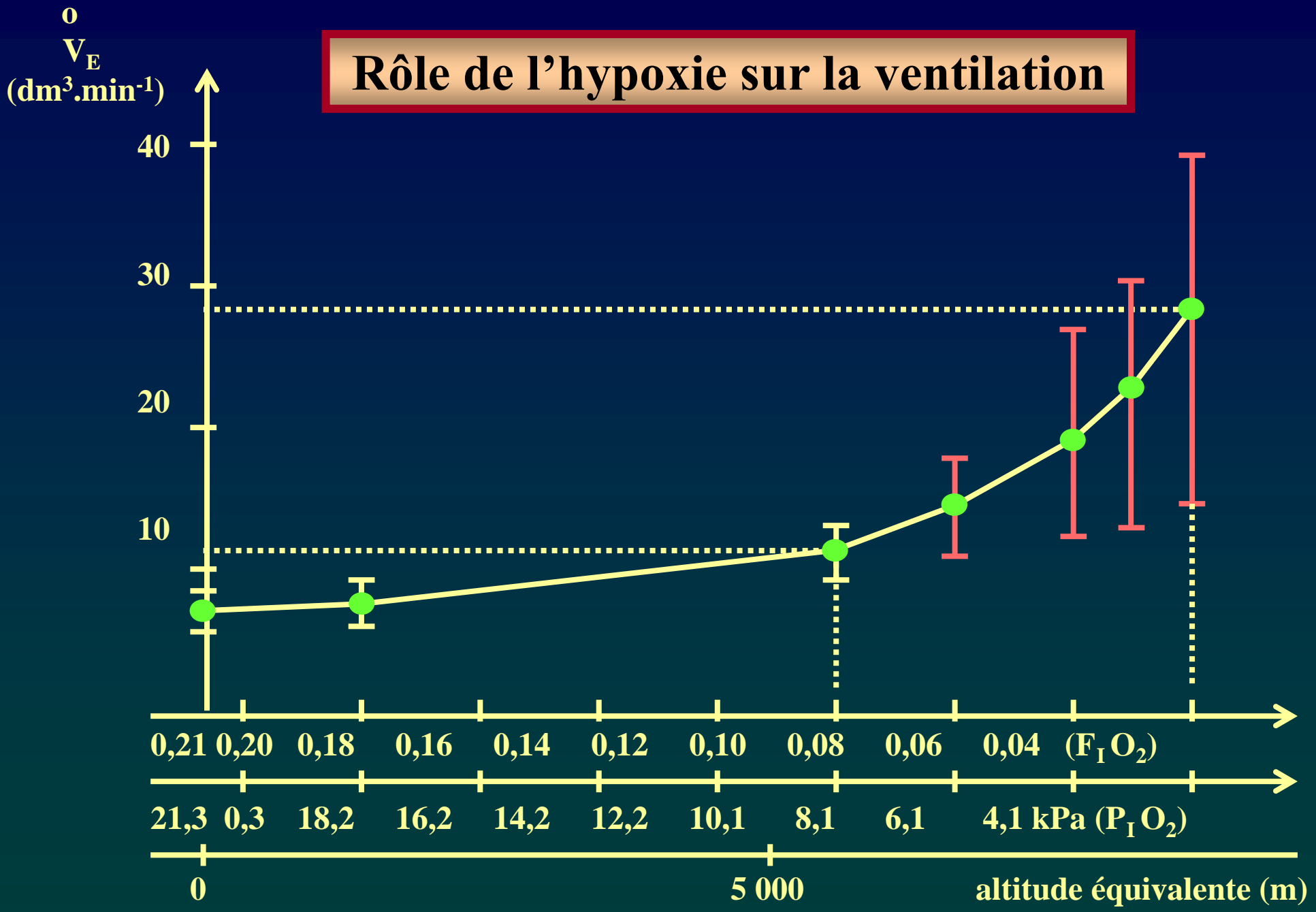
régulation de la  $P_{CO_2}$  :

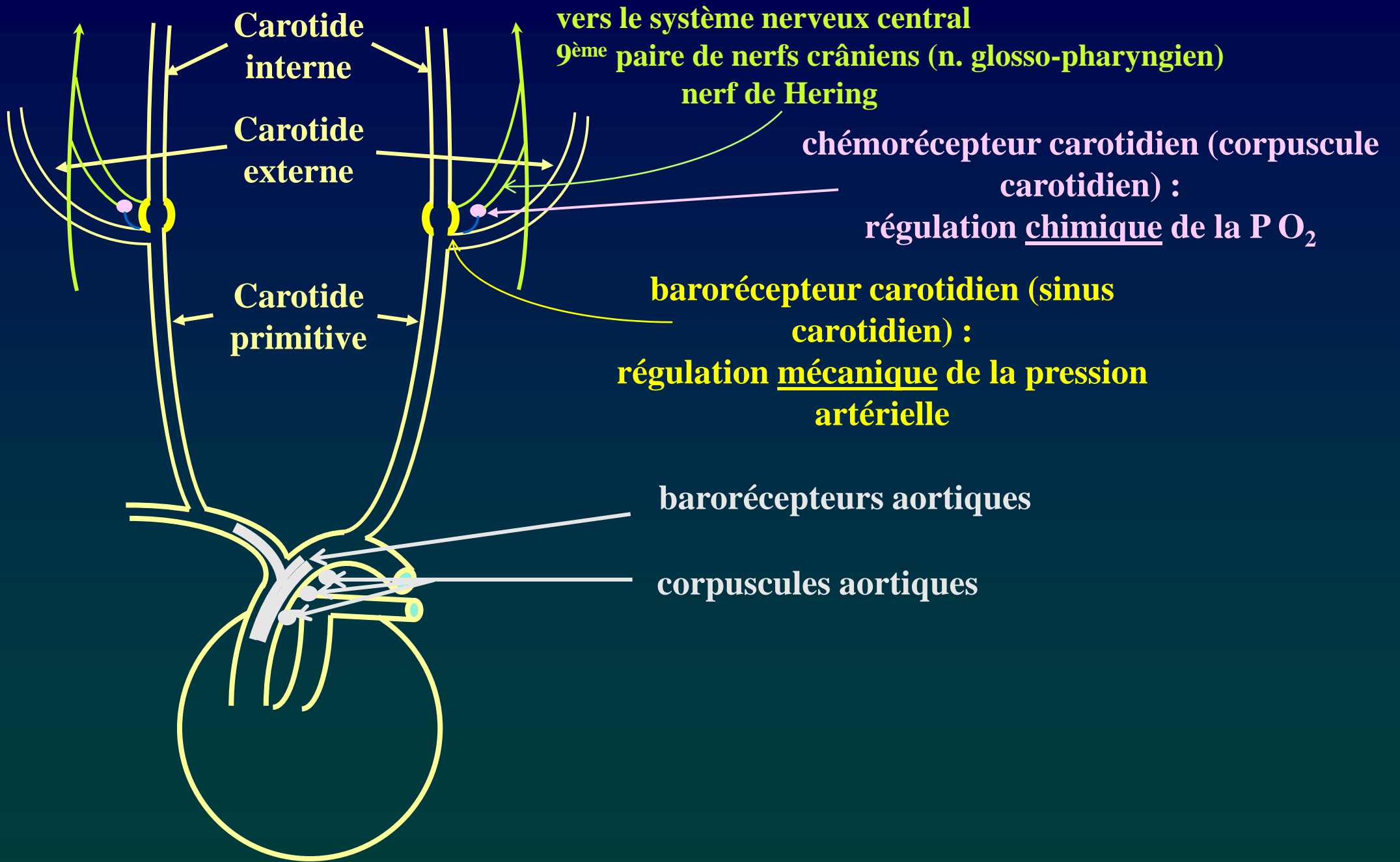
la ventilation augmente lorsque la  $P_{CO_2}$  augmente

# Rôle de l'hypoxie sur la ventilation



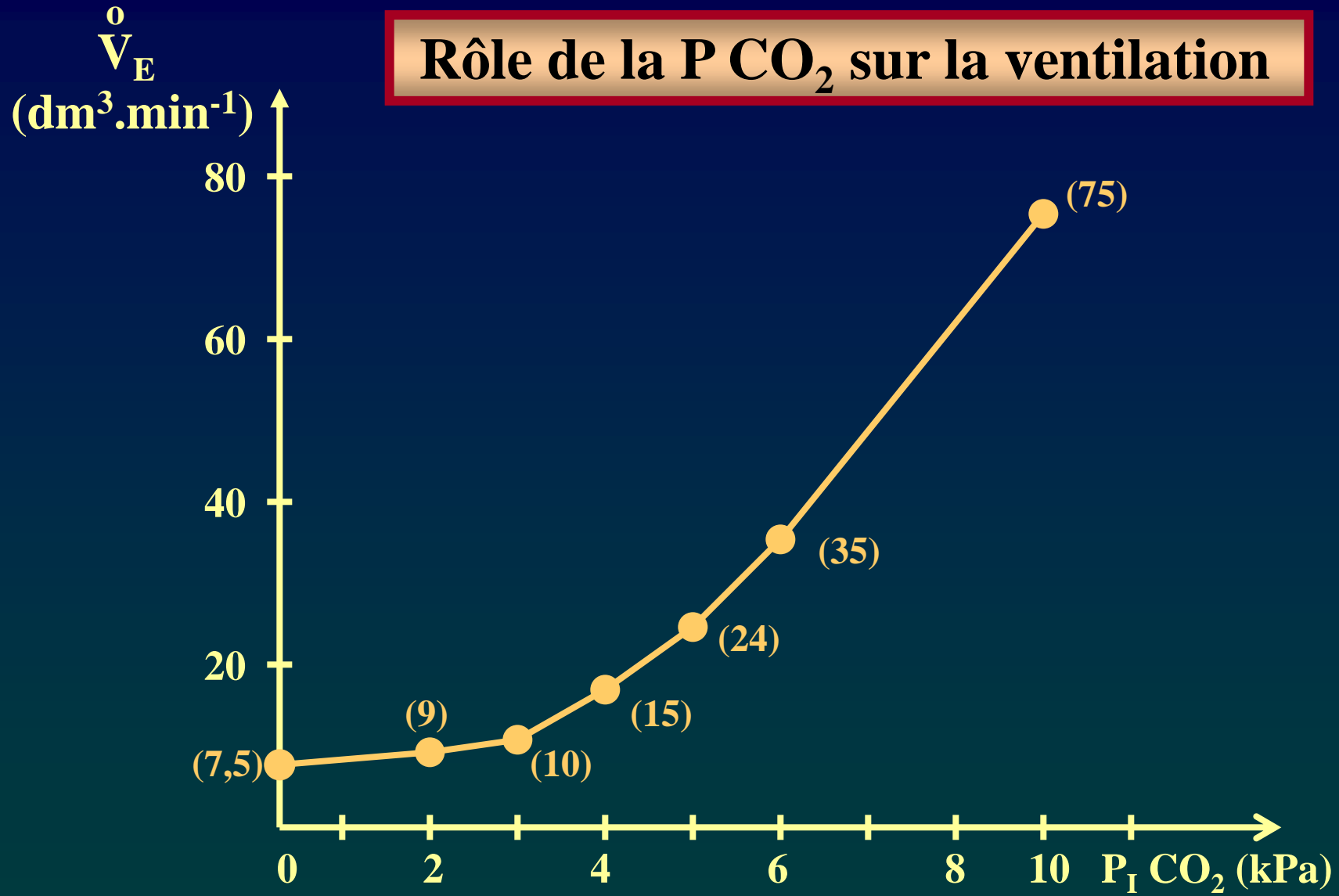
# Rôle de l'hypoxie sur la ventilation







## Rôle de la $P_{CO_2}$ sur la ventilation



# Rappels de physiologie

La ventilation alvéolaire

 Les gaz alvéolaires

Le transport de l'oxygène par le sang

**Question :**

**connaissant la composition des gaz inspirés (pression barométrique et fraction d'oxygène), peut-on connaître la composition des gaz alvéolaires ?**

Gaz inspirés :  $\left\{ \begin{array}{l} P_B = 1013 \text{ hPa} \\ P_I O_2 = 212 \text{ hPa} \\ P_I CO_2 = 0 \end{array} \right.$

Air trachéal ( $P_T$ ) :  
gaz inspiré saturé en  $H_2O$   
à  $37^\circ C$  (63 hPa)

$P_T O_2 = 199 \text{ hPa}$

Gaz alvéolaires :

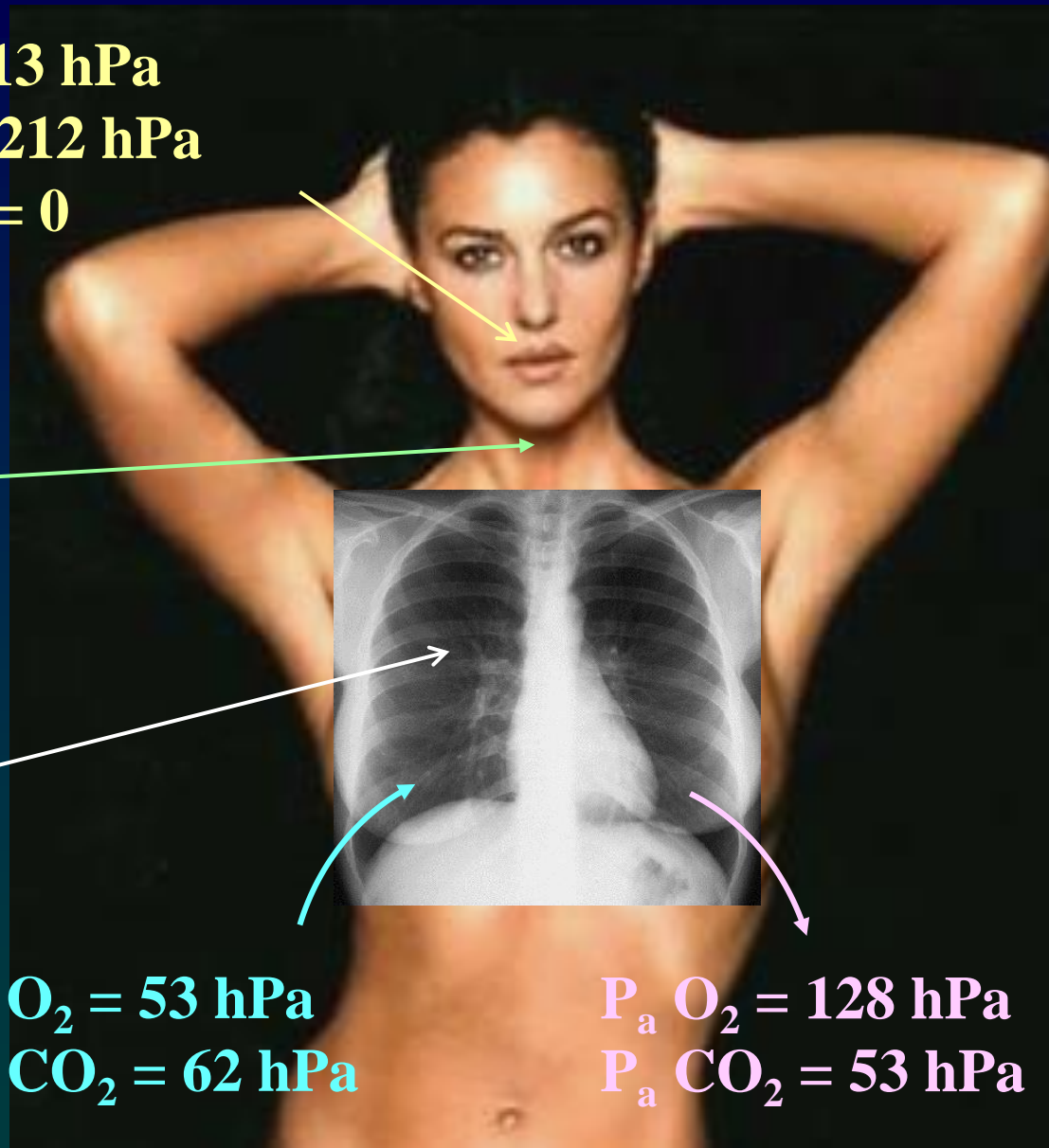
$P_A O_2 = 138 \text{ hPa}$

$P_A CO_2 = 53 \text{ hPa}$

$P_A H_2O = 63 \text{ hPa}$

$P_v O_2 = 53 \text{ hPa}$   
 $P_v CO_2 = 62 \text{ hPa}$


$P_a O_2 = 128 \text{ hPa}$   
 $P_a CO_2 = 53 \text{ hPa}$



## Équations des gaz alvéolaires

$$P_A O_2 = F_I O_2 \cdot (P_B - P_A H_2O) - P_A CO_2 \left( F_I O_2 + \frac{1 - F_I O_2}{R} \right)$$


$$P_A O_2 = F_I O_2 \cdot (P_B - P_A H_2O) - P_A CO_2 \cdot \left( F_I O_2 + \frac{1 - F_I O_2}{R} \right)$$


$$P_A O_2 = F_I O_2 \cdot (P_B - P_A H_2O) - P_A CO_2 \cdot \left( F_I O_2 + \frac{1 - F_I O_2}{R} \right)$$

$$P_A O_2 = F_I O_2 (P_B - P_A H_2O) - P_A CO_2 \cdot \left( F_I O_2 + \frac{1 - F_I O_2}{R} \right)$$

$$P_A O_2 = f (F_I O_2, P_B)$$

Systemes inhalateurs d'oxygène

Z < 12 000 m (40 000 ft)

Conditionnement de cabine



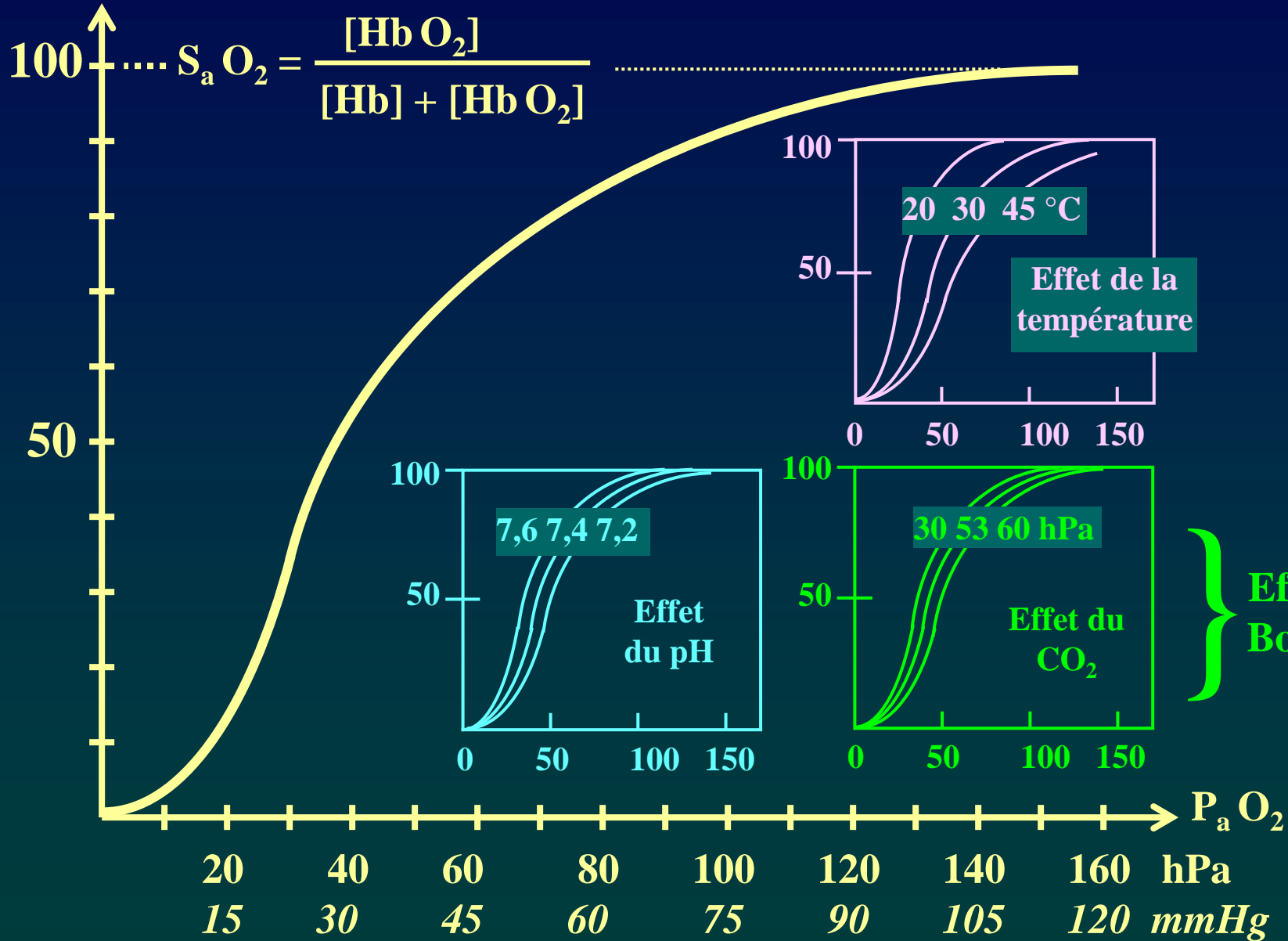
# Rappels de physiologie

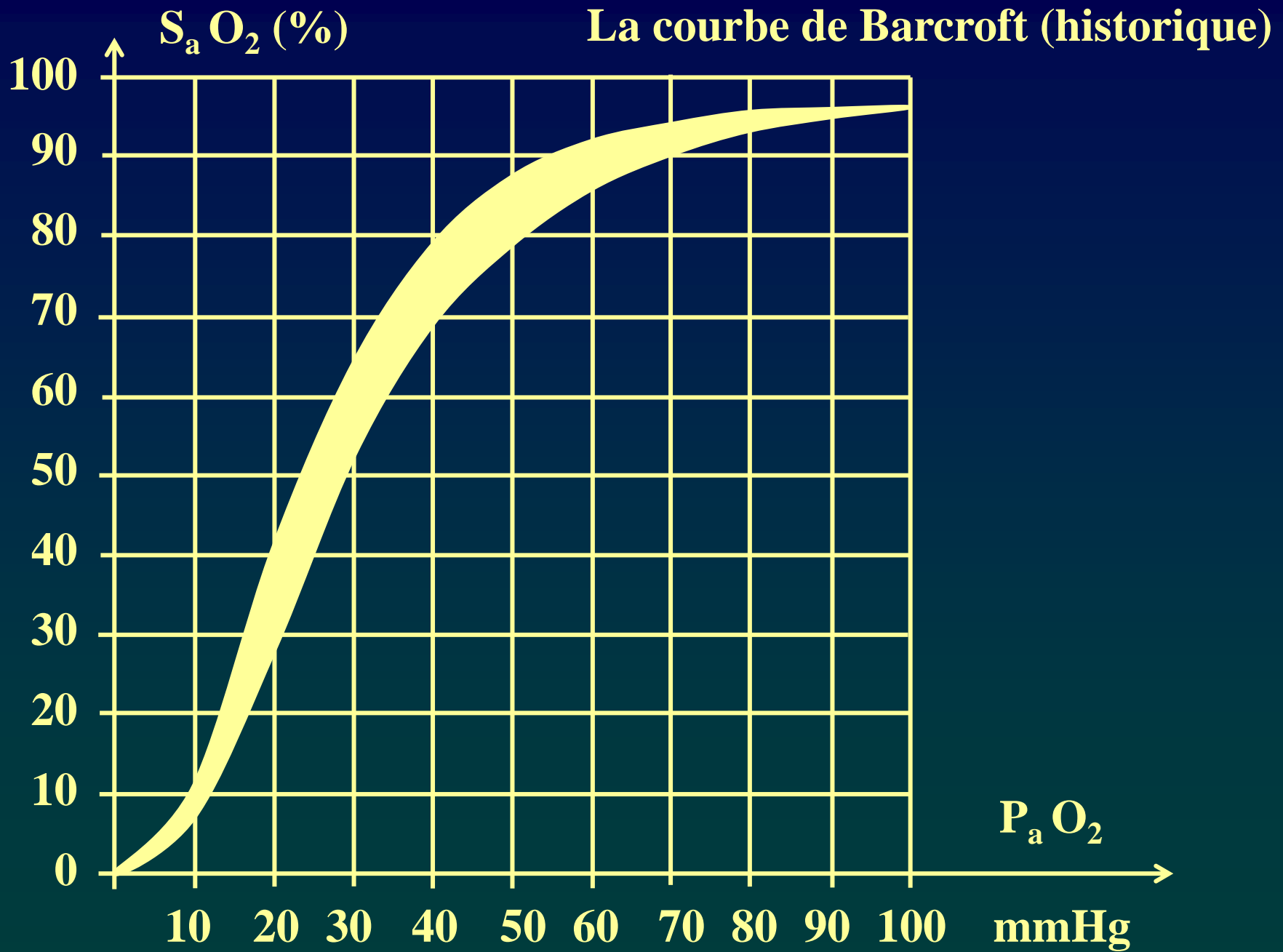
**La ventilation alvéolaire**

**Les gaz alvéolaires**

 **Le transport de l'oxygène par le sang**

$S_a O_2$  (%)






# Physiologie et Transport Aérien

*L'hypoxie : ses conséquences physiopathologiques*

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

-  *1 - Introduction*
- 2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*
- 3 - Fonctions végétatives*
- 4 - Fonctions de relation*
- 5 - Fonctions psychiques*
- 6 - Le risque léthal*
- 7 - Entraînement ou instruction au caisson d'altitude ?*
- 8 - Applications hors aéronautique*

## *Hypoxie aiguë d'altitude : historique*

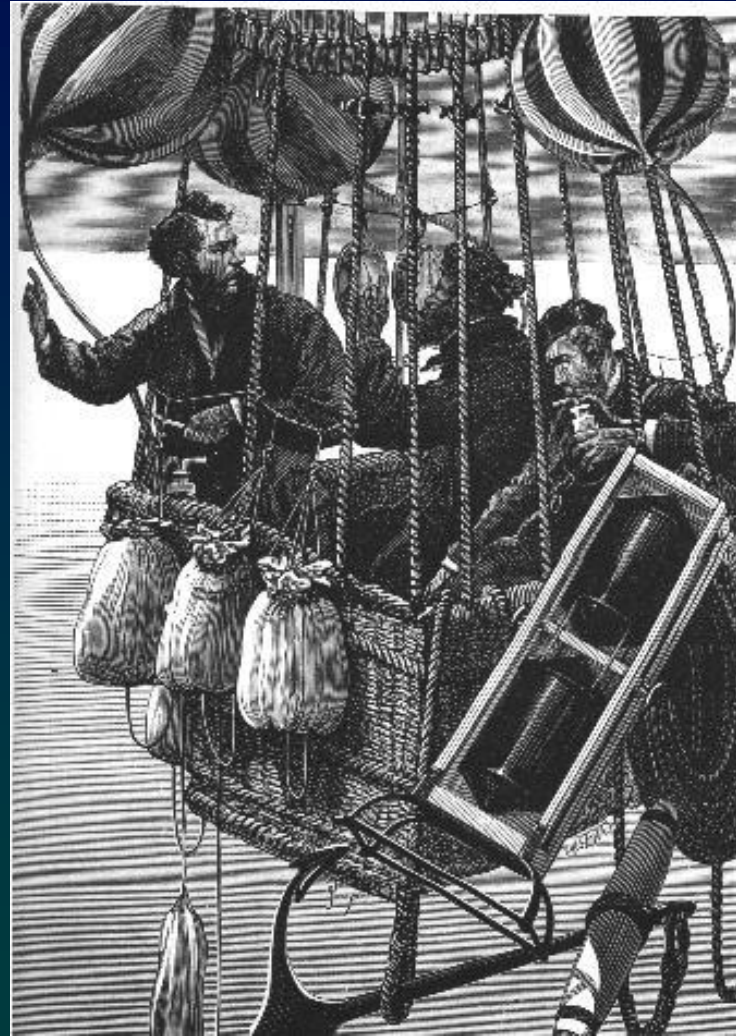
### *L'accident **princeps** :*

**15 Avril 1875 : accident du ballon**

**« *Le Zénith* »**

**Mort de Théodore Sivel et de  
Joseph Crocé-Spinelli.**

**Le récit de cet accident est dû au seul  
survivant (Gaston Tissandier).**



## *Hypoxie aiguë d'altitude : historique*

**1878 : publication de “La Pression Barométrique” de Paul Bert**

**11 juillet 1989, 22 décembre 1993 : accidents aériens en France, avec mort d'hommes, dus à l'hypoxie.**

**octobre 1999 : accident aérien aux États-Unis, avec mort d'hommes, dû à l'hypoxie.**

**septembre 2000 : accident aérien en Australie, avec mort d'hommes, dû à l'hypoxie.**

**août 2005 : accident d'un B737 à proximité d'Athènes, dû à l'hypoxie : 121 morts.**



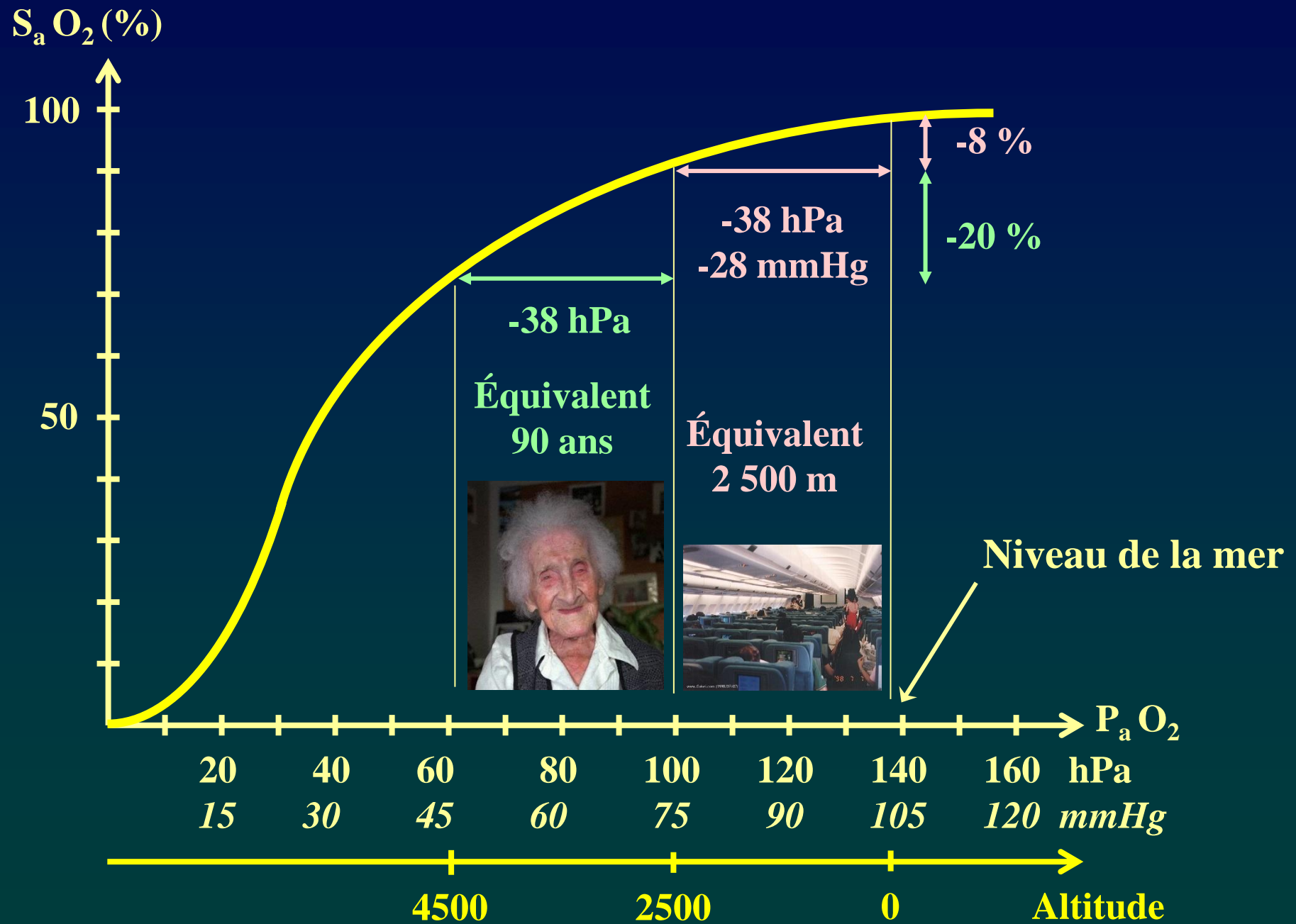
## *Classification des états d'hypoxie*



Selon le type :

Selon la durée :





*Classification des états d'hypoxie  
selon le type : classification de P. Dejours*

<b>Air ambiant</b>	<b>Type 1</b>	<b>Hypoxie d'ambiance</b>	<b>Altitude</b>
<b>Gaz alvéolaire</b>	<b>Type 2</b>	<b>Hypoventilation alvéolaire</b>	<b>Neuro., PPB</b>
	<b>Type 3</b>	<b>Troubles des rapports V/Q</b>	
<b>Paroi alvéolo-capillaire</b>	<b>Type 4</b>	<b>Bloc alvéolo-capillaire</b>	
<b>Sang</b>	<b>Type 5</b>	<b>Court-circuit artério-veineux</b>	
	<b>Type 6</b>	<b>Hypoxie « anémique »</b>	<b>CO : feu cabine</b>
	<b>Type 7</b>	<b>Insuffisance circulatoire (généralisée ou localisée)</b>	<b>Accélérations +G<sub>Z</sub> de longue durée</b>
<b>Liquide interstitiel</b>	<b>Type 8</b>	<b>Hypoxie par œdème</b>	
<b>Cellules</b>	<b>Type 9</b>	<b>Hypoxie histotoxique</b>	<b>CN : feu cabine</b>
	<b>Type 10</b>	<b>Hypoxie de sur-utilisation</b>	<b>Exercice physique</b>

# *Classification des états d'hypoxie*

Selon le type :



Selon la durée :

## *Classification des états d'hypoxie selon la durée*

<b>Selon la durée</b>	<b>Circonstances d'apparition</b>	<b>Types de troubles</b>	<b>Altitude</b>	<b>Délai avant les troubles</b>
<b>Suraiguë (fulminante)</b>	<b>Décompression brutale de cabine Dysfonctionnement du système d'oxygène</b>	<b>Syncope inaugurale</b>	<b>&gt;7 500 m</b>	<b>Quelques secondes</b>
<b>Aiguë</b>	<b>Exposition progressive à l'altitude, altitude moyenne</b>	<b>Troubles psychiques, syncope possible</b>	<b>5 000 à 6 000 m</b>	<b>Quelques minutes</b>
<b>Prolongée</b>	<b>En cabine pressurisée</b>	<b>Fatigue</b>	<b>2 500 m</b>	<b>Quelques heures</b>
<b>Chronique</b>	<b>Vie en haute montagne</b>	<b>(adaptation)</b>	<b>3 500 m</b>	<b>Quelques jours à toute la vie</b>

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

 *2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

*4 - Fonctions de relation*

*5 - Fonctions psychiques*

*6 - Le risque léthal*

*7 - Entraînement ou instruction au caisson d'altitude ?*

*8 - Applications hors aéronautique*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie :*

- Dyspnée (essoufflement),*
- Céphalées (maux de tête),*
- Asthénie (fatigue).*

*Ces symptômes sont majorés par*

- l'effort physique,*
- le sommeil.*

**L'hypoxie TRÈS sévère (jusqu'à la mort) provoque une cyanose.**

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

 *3 - Fonctions végétatives*

*4 - Fonctions de relation*

*5 - Fonctions psychiques*

*6 - Le risque léthal*

*7 - Entraînement ou instruction au caisson d'altitude ?*

*8 - Applications hors aéronautique*

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

 *3 - Fonctions végétatives*

*3.1 - Ventilation*

*3.2 - Circulation*

*3.3 - Autres fonctions*



### *3 - Fonctions végétatives*

#### *3.1 - Effets de l'hypoxie sur la ventilation*

*31.1 - Grandeurs mécaniques ventilatoires*

*31.2 - Composition des gaz alvéolaires*

*31.3 - La commande ventilatoire*

#### *3.2 - Effets de l'hypoxie sur la circulation*

*32.1 - sur le cœur*

*32.2 - sur les vaisseaux*

*32.3 - sur la pression artérielle*

*32.4 - sur la régulation des fonctions C.V.*

*32.5 - à l'exercice physique*

*32.6 - le patient coronarien*

## *3 - Fonctions végétatives*

### *3.1 - Effets de l'hypoxie sur la ventilation*

 *31.1 - Grandeurs mécaniques ventilatoires*

*31.2 - Composition des gaz alvéolaires*

*31.3 - La commande ventilatoire*

### *3.2 - Effets de l'hypoxie sur la circulation*

*32.1 - sur le cœur*

*32.2 - sur les vaisseaux*

*32.3 - sur la pression artérielle*

*32.4 - sur la régulation des fonctions C.V.*

*32.5 - à l'exercice physique*

*32.6 - le patient coronarien*

<b>Altitude</b>	<b>Augmentation de la ventilation</b>
<b>(mètres)</b>	<b>(en pourcentage)</b>
<b>1 500</b>	<b>0</b>
<b>3 000</b>	<b>4 %</b>
<b>4 000</b>	<b>14 %</b>
<b>5 000</b>	<b>24 %</b>
<b>6 000</b>	<b>33%</b>
<b>7 000</b>	<b>50 %</b>

## *3 - Fonctions végétatives*

### *3.1 - Effets de l'hypoxie sur la ventilation*

*31.1 - Grandeurs mécaniques ventilatoires*



*31.2 - Composition des gaz alvéolaires*

*31.3 - La commande ventilatoire*

### *3.2 - Effets de l'hypoxie sur la circulation*

*32.1 - sur le cœur*

*32.2 - sur les vaisseaux*

*32.3 - sur la pression artérielle*

*32.4 - sur la régulation des fonctions C.V.*

*32.5 - à l'exercice physique*

*32.6 - le patient coronarien*

Altitude		P <sub>A</sub> O <sub>2</sub>		P <sub>A</sub> CO <sub>2</sub>	
mètres	<i>pieds</i>	hPa	<i>mmHg</i>	hPa	<i>mmHg</i>
0	0	138	103	53	40
2 500	8 000	96	71	49	37
4 500	15 000	61	46	44	33
5 500	18 000	53	39,5	37	28
6 100	20 000	49	36,5	35	26,5
6 700	22 000	44	33,2	33	25
7 600	25 000	40	30	29	22

Altitude		$P_A O_2$		$P_A CO_2$	
mètres	<i>pieds</i>	hPa	<i>mmHg</i>	hPa	<i>mmHg</i>
0	0	138	103	53	40
2 500	8 000	96	71	49	37
4 500	15 000	61	46	44	33
5 500	18 000	53	39,5	37	28
6 100	20 000	49	36,5	35	26,5
6 700	22 000	44	33,2	33	25
7 600	25 000	40	30	29	22

Altitude		0	18 000 ft (5 500 m) pendant		
			5 min	30 min	60 min
$P_B$	hPa	1013	505	505	505
$P_I O_2$	hPa	213	106	106	106
$P_A O_2$	hPa	137	53,5	51	48
$P_A CO_2$	hPa	55	44	41	40
$R$		0,83	1,14	0,95	0,85
$V_E$	dm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup>	8,48	13,51	11,50	10,10

## *3 - Fonctions végétatives*

### *3.1 - Effets de l'hypoxie sur la ventilation*

*31.1 - Grandeurs mécaniques ventilatoires*

*31.2 - Composition des gaz alvéolaires*



*31.3 - La commande ventilatoire*

### *3.2 - Effets de l'hypoxie sur la circulation*

*32.1 - sur le cœur*

*32.2 - sur les vaisseaux*

*32.3 - sur la pression artérielle*

*32.4 - sur la régulation des fonctions C.V.*

*32.5 - à l'exercice physique*

*32.6 - le patient coronarien*



### *3 - Fonctions végétatives*

#### *3.1 - Effets de l'hypoxie sur la ventilation*



#### *31.3 - La commande ventilatoire (suite) : l'interaction hypoxie / hypocapnie*

**L'hypoxie provoque une hyperventilation.**

**L'hyperventilation (hypoxique) entraîne une hypocapnie.**

**L'hypocapnie entraîne une hypoventilation.**

**L'hypoxie et l'hypocapnie qui en résulte sont donc  
deux stimulus physiologiques contradictoires.**

**La réponse ventilatoire à l'hypoxie aiguë est caractérisée par  
l'inhibition hypocapnique (partielle) de l'hyperventilation hypoxique.**

## *3 - Fonctions végétatives*

### *3.1 - Effets de l'hypoxie sur la ventilation*

*31.1 - Grandeurs mécaniques ventilatoires*

*31.2 - Composition des gaz alvéolaires*

*31.3 - La commande ventilatoire*

### *3.2 - Effets de l'hypoxie sur la circulation*

*32.1 - sur le cœur*

*32.2 - sur les vaisseaux*

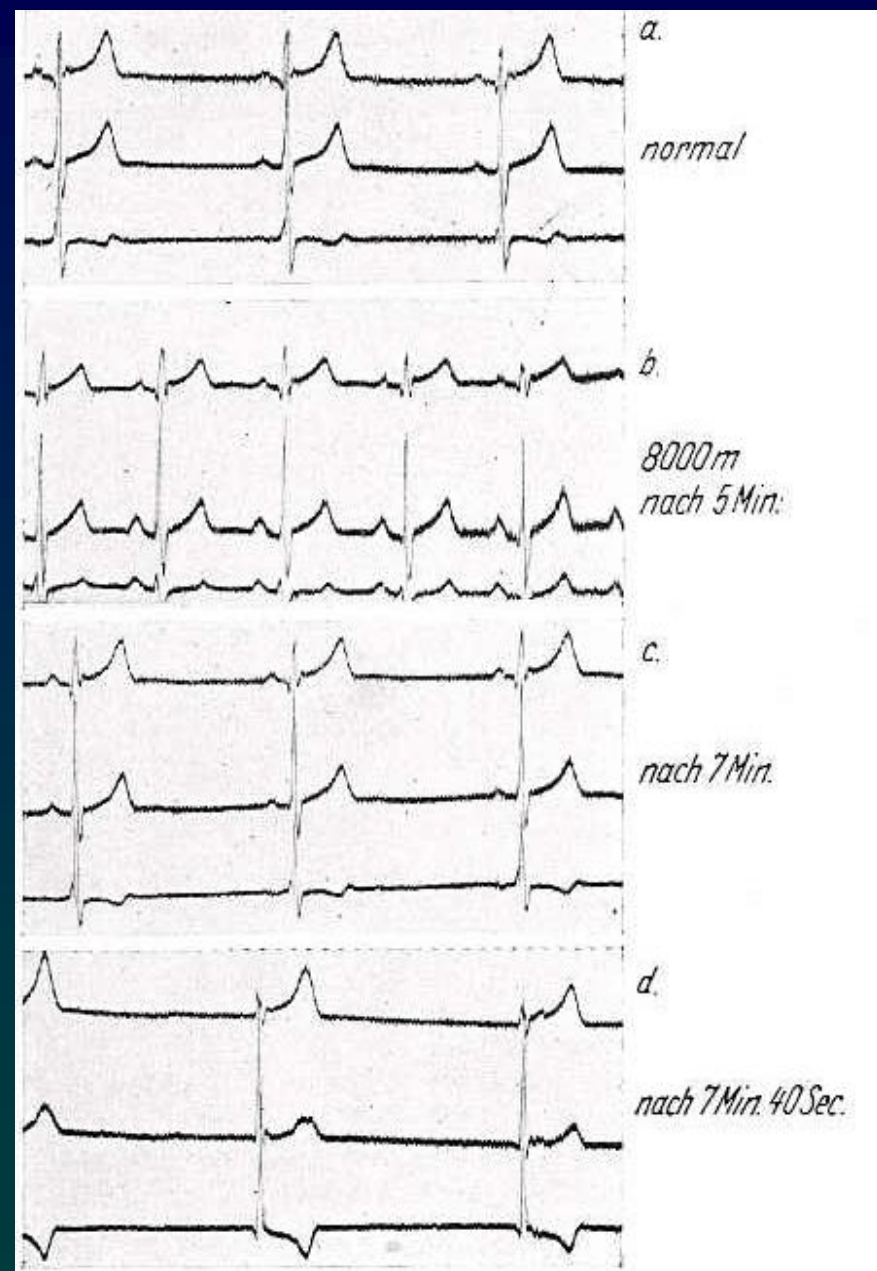
*32.3 - sur la pression artérielle*

*32.4 - sur la régulation des fonctions C.V.*

*32.5 - à l'exercice physique*

*32.6 - le patient coronarien*

Temps de séjour (minutes)	Fréquence cardiaque à l'altitude de (mètres)				
	3 658	4 877	5 586	6 059	6 705
10	113	111	107	124	131
20	115	110	109	112	126
30	113	103	108	117	124
40	106	103	111	107	
50	104	101	108		
60	99	105	104		



## *3 - Fonctions végétatives*

### *3.1 - Effets de l'hypoxie sur la ventilation*

*31.1 - Grandeurs mécaniques ventilatoires*

*31.2 - Composition des gaz alvéolaires*

*31.3 - La commande ventilatoire*

### *3.2 - Effets de l'hypoxie sur la circulation*

*32.1 - sur le cœur*

*32.2 - sur les vaisseaux*

*32.3 - sur la pression artérielle*

*32.4 - sur la régulation des fonctions C.V.*

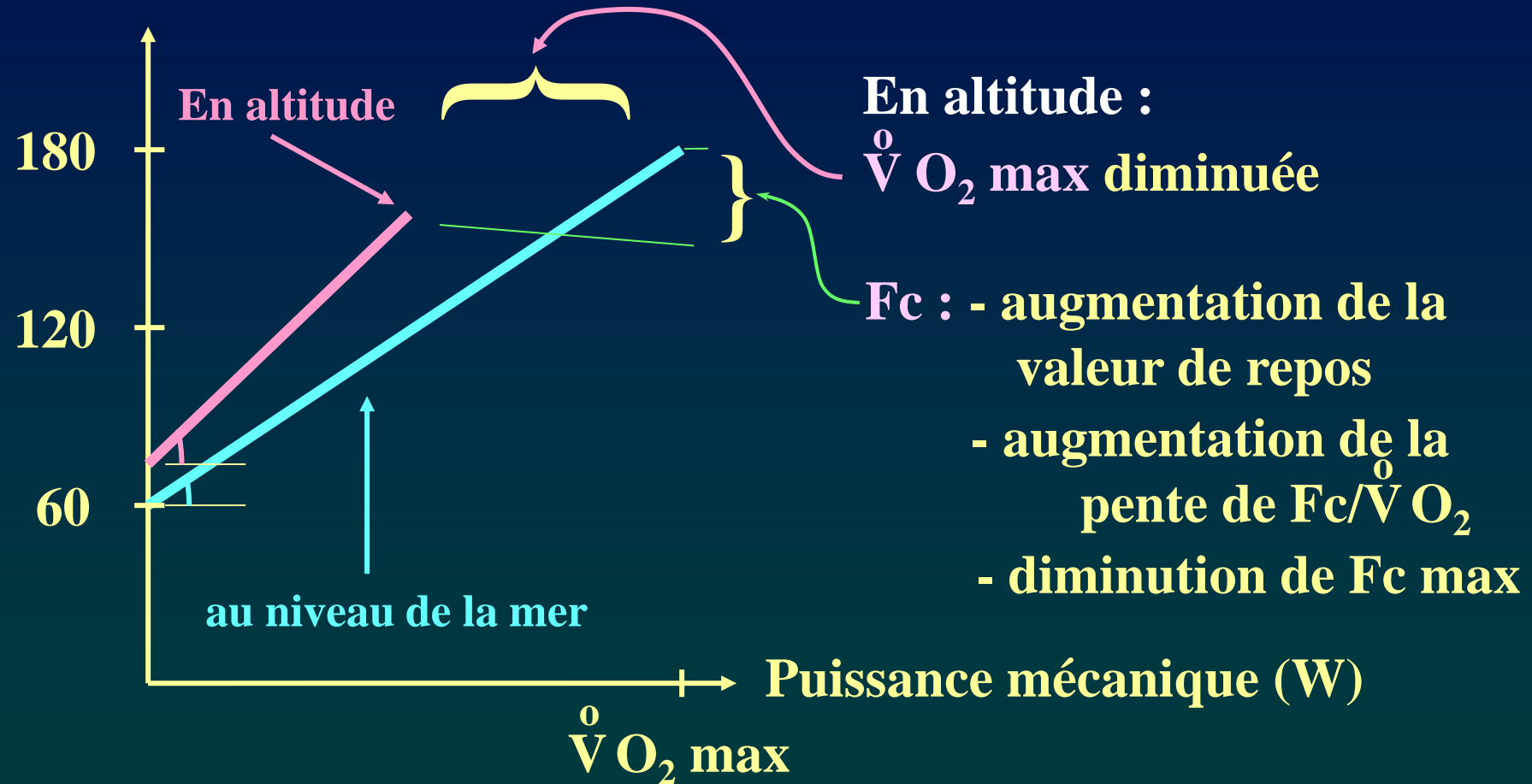
*32.5 - à l'exercice physique*

*32.6 - le patient coronarien*

### 3.2 - Effets de l'hypoxie sur la circulation

#### 32.5 - à l'exercice physique

Fréquence cardiaque



Ce qui n'apparaît pas sur ce schéma : diminution de l'endurance

## ***3 - Fonctions végétatives***

### ***3.1 - Effets de l'hypoxie sur la ventilation***

***31.1 - Grandeurs mécaniques ventilatoires***

***31.2 - Composition des gaz alvéolaires***

***31.3 - La commande ventilatoire***

### ***👉 3.2 - Effets de l'hypoxie sur la circulation***

***32.1 - sur le cœur***

***32.2 - sur les vaisseaux***

***32.3 - sur la pression artérielle***

***32.4 - sur la régulation des fonctions C.V.***

***32.5 - à l'exercice physique***

***32.6 - le patient coronarien***

***peut présenter des épisodes d'ischémie  
silencieuse dès l'altitude de 2 000 m  
(passagers de l'aviation commerciale).***

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

 *4 - Fonctions de relation*

*5 - Fonctions psychiques*

*6 - Le risque léthal*

*7 - Entraînement ou instruction au caisson d'altitude ?*

*8 - Applications hors aéronautique*



# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

 *4 - Fonctions de relation*

*4.1 - Muscle*

*4.2 - Cellule nerveuse*

*4.3 - Réflexes*

*4.4 - Motricité volontaire*

*4.5 - Modifications électro-encéphalographiques*

*4.6 - Organes sensoriels*


# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

*4 - Fonctions de relation*

 *4.1 - Muscle :*

- Période réfractaire allongée,*
- Amplitude de contraction diminuée,*
- Durée de contraction allongée,*
- Augmentation transitoire de l'excitabilité, puis diminution,*
- Amplitude des potentiels d'action diminuée.*

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

*4 - Fonctions de relation*

*4.1 - Muscle*

 *4.2 - Cellule nerveuse*

*4.3 - Réflexes*

*4.4 - Motricité volontaire*

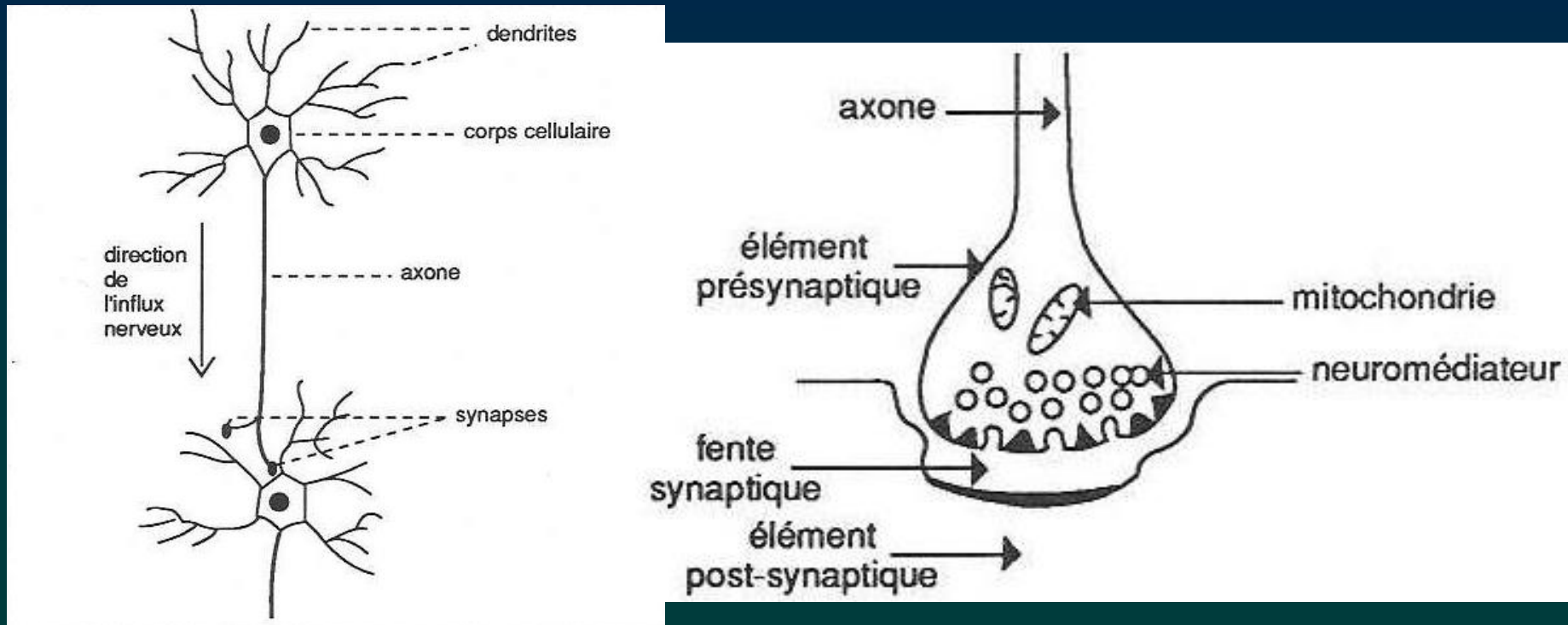
*4.5 – Modifications électro-encéphalographiques*

*4.6 - Organes sensoriels*

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

## *4.2 - Cellule nerveuse*

- Dégradation de la conduction nerveuse,*
- Dégradation de la transmission synaptique.*



# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

## *4.2 - Cellule nerveuse*

*Il faut se rappeler 2 ou 3 notions essentielles :*

- 1 - Hormis le gaz alvéolaire lui-même, l'organisme humain ne possède aucune réserve significative d'oxygène.*
- 2 - La population neuronale est hétérogène, y compris en termes de résistance à l'hypoxie.*
- 3 - Les neurones affectés aux fonctions supérieures sont les plus sensibles à l'hypoxie. Leur sensibilité à l'hypoxie est résumée par 2 chiffres :*
  - ces neurones cessent de fonctionner **5 secondes** après la privation d'oxygène ;*
  - ils commencent à mourir **3 minutes** après la privation d'oxygène.*

*Pour illustrer l'hétérogénéité d'une population neuronale,  
le cas du Chat*

<b>Tissus</b>	<b>Temps de fonctionnement</b>
<b>Cortex cérébelleux</b>	<b>12 secondes</b>
<b>Cortex cérébral</b>	<b>12 à 14 secondes</b>
<b>Noyau caudé</b>	<b>25 à 32 secondes</b>
<b>N. ventrolatéral du thalamus</b>	<b>28 à 33 secondes</b>
<b>Substance réticulée bulbaire</b>	<b>30 à 40 secondes</b>
<b>Motoneurones médullaires</b>	<b>1 à 2 minutes</b>
<b>Ganglions sympathiques</b>	<b>1 heure</b>

*Pour illustrer l'hétérogénéité d'une population neuronale,  
le cas du Chat*

<b>Tissus</b>	<b>Temps de survie</b>
<b>Cerveau et petites cellules pyramidales</b>	<b>8 minutes</b>
<b>Cervelet et cellules de Purkinje</b>	<b>13 minutes</b>
<b>Cellules de noyaux bulbaires</b>	<b>20 à 30 minutes</b>
<b>Mœlle épinière</b>	<b>45 à 60 minutes</b>
<b>Ganglions sympathiques</b>	<b>60 minutes</b>
<b>Plexus mésentérique</b>	<b>3 heures</b>

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

***4 - Fonctions de relation***

*4.1 - Muscle*

*4.2 - Cellule nerveuse*

 ***4.3 - Réflexes***

*4.4 - Motricité volontaire*

*4.5 – Modifications électro-encéphalographiques*

*4.6 - Organes sensoriels*



### ***4.3 - Réflexes***

**La vitesse d'un réflexe simple (réflexe rotulien) évolue de façon multiphasique en fonction de l'altitude :**

- ralentissement initial,**
- puis augmentation de vitesse,**
- puis de nouveau ralentissement,**
- avant disparition définitive du réflexe.**

## Stimulation du réflexe (provenant de la périphérie)



**Motoneurone médullaire**

**Neurone intercalaire de  
*Renshaw* :**

**fonction d'inhibition du motoneurone,  
interprétée comme un mécanisme qui  
évite que la réponse réflexe puisse devenir  
excessive (effet de fusible).**

**vers le muscle**

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

*4 - Fonctions de relation*

*4.4 - Motricité volontaire :*

- tremblement,*
- incoordination motrice,*
- dysmétrie,*
- incapacité à finaliser l'acte moteur,*
- Modifications caractéristiques (valeur diagnostique) :*  
*de l'écriture et de la voix.*

1000 999 998 997 996 995 994 993 992 991 990  
 889 888 887 886 885 884 883 882 881 880 879  
 878 877 876 875 874 873 872 871 870 869  
 868 868 867 866 865 864 863 862 861 860 859  
 858 857 856 855 854 853 852 851 850  
 849 848 847 846 845 844 843 842 841  
 840 839 838 837 836 835 834 833 832  
 831 830 829 828 827 826 825 824  
 823 822 821 820 819 818 817 816  
 815 814 813 812 811 810  
 809 808 807 806 805 804 803 802  
 801 800 799 798 797 796 795 794 793  
 792 791 790 789 788 787 786 785  
 784 783 782 781 780 779 778 777  
 776 775 774 773 772 771 770 769  
 768 767 766 765 764 763 762 761  
 760 759 758

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

***4 - Fonctions de relation***

*4.1 - Muscle*

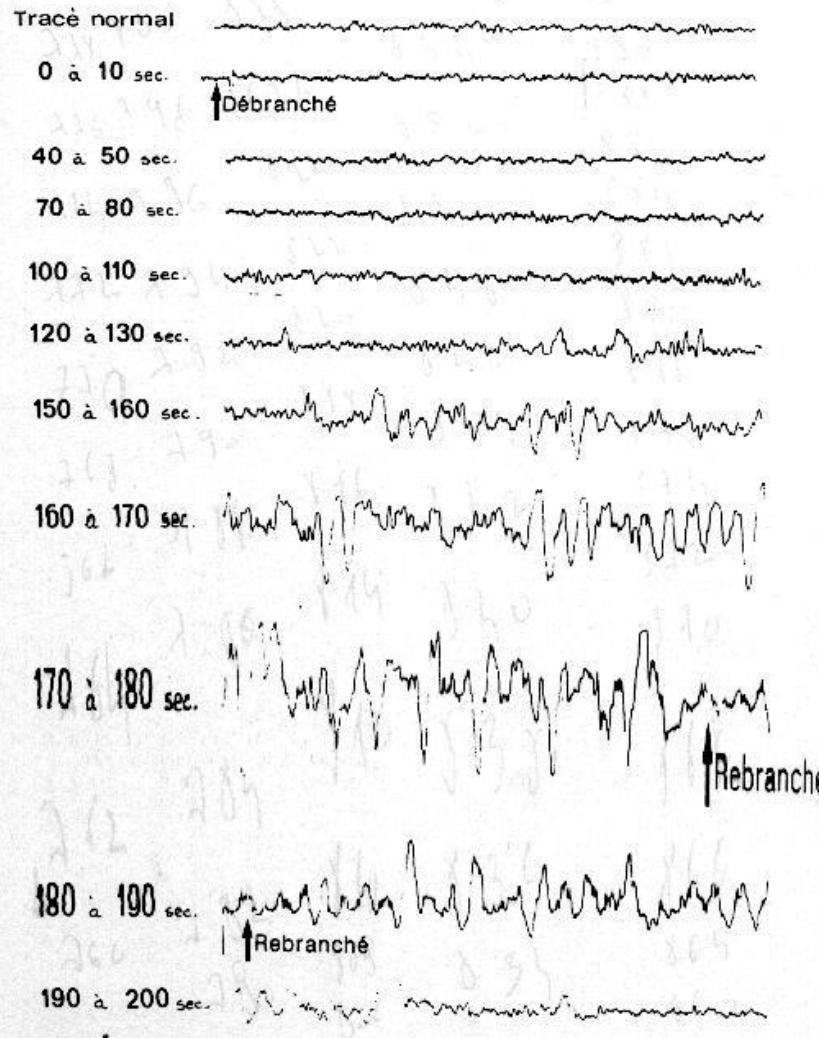
*4.2 - Cellule nerveuse*

*4.3 - Réflexes*

*4.4 - Motricité volontaire*

 ***4.5 – Modifications électro-encéphalographiques***

*4.6 - Organes sensoriels*



100 μV  
 1 Sec.

Exemple d'écriture en hypertonie aiguë au cours d'une montée à 8000 mètres sans oxygène. Déjà de 30 m/s, suite à un saut de quelques mètres à 6000 m. Le sujet a pour consigne d'effectuer un test de décompte de 2 en 2 à partir de 100.

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

***4 - Fonctions de relation***

*4.1 - Muscle*

*4.2 - Cellule nerveuse*

*4.3 - Réflexes*

*4.4 - Motricité volontaire*

*4.5 – Modifications électro-encéphalographiques*

 ***4.6 - Organes sensoriels***

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

## *4.6 - Organes sensoriels*

*Audition : remarquablement conservée*

*Vision :*

- Perception lumineuse diminuée (assombrissement de la scène),*
- Vision de nuit précocement dégradée,*
- Vision des couleurs diminuée,*
- Champ visuel diminué (vision tunnalisée)*  
*(effet central plutôt que périphérique ?),*
- Acuité visuelle conservée.*

*Les dégradations visuelles ne peuvent pas être perçues par le sujet qui en est atteint.*



<b>Altitude</b>		<b>Dégradation moyenne de la vision nocturne (en %)</b>
<b>(ft)</b>	<b>(m)</b>	
<b>4 000</b>	<b>1 200</b>	<b>5</b>
<b>6 000</b>	<b>1 800</b>	<b>10</b>
<b>8 000</b>	<b>2 400</b>	<b>15</b>
<b>10 000</b>	<b>3 000</b>	<b>20</b>
<b>12 000</b>	<b>3 600</b>	<b>25</b>
<b>14 000</b>	<b>4 200</b>	<b>35</b>
<b>16 000</b>	<b>4 800</b>	<b>40</b>

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

*4 - Fonctions de relation*

 *5 - Fonctions psychiques*

*6 - Le risque léthal*

*7 - Entraînement ou instruction au caisson d'altitude ?*

*8 - Applications hors aéronautique*

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

*4 - Fonctions de relation*

*5 - Fonctions psychiques :*

*Perte de conscience,  
inaugurale  
ou précédée de troubles psychiques*

*Troubles de la conscience (troubles psychiques)*

## *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

### *Perte de conscience*

- *précédée ou non de troubles de la conscience*
- *de durée variable,*
- *amnésie totale possible,*
- *souvenir possible d'hallucinations visuelles et auditives,*
- *mouvements cloniques des membres supérieurs et de la tête.*

## Récit d'un incident :

Le 27 Mars 1956, le SO 4050 n°001  
« Vautour » décolle de Brétigny avec  
l'équipage Lecomte-Caillard.

But de l'essai : étude de la profondeur à haute  
altitude. Les essais consistent en stabilité,  
marges de manœuvre, limites de manœuvres  
vers 48 000 ft.

Après un certain nombre d'essais entraînant pertes d'altitude et remontées,  
j'entends soudain, dans l'interphone, Lecomte dire « (...) s'il ne répond toujours pas,  
je redescends ». En premier réflexe, je dis : « Pour répondre, il faudrait que tu  
m'appelles... ». Après quelques échanges plus ou moins clairs, le programme d'essais  
se poursuit et s'achève. Retour au terrain et atterrissage.



## Récit d'un incident : (suite)

Quand nous sommes arrivés au parc, je prends le cahier de retouches et y note d'avoir à vérifier le circuit d'interphone qui est tombé en panne au cours du vol, puis nous rentrons chacun dans notre bureau et je déroule mon « roll-roll » pour rédiger le compte-rendu de vol.

Décollage, montée, paramètres aux différentes altitudes, arrivée à 48 000 ft, essais divers : RAS.

Puis l'écriture se fait moins lisible, ensuite ne représente plus rien de cohérent, uniquement des gribouillis informes... puis tout redevient correct.

J'ai perdu conscience sans m'en rendre compte et, sans doute instinctivement, je suis passé sur 100% d'oxygène, position dans laquelle je me souviens d'avoir retrouvé le sélecteur sans que ça m'ait surpris.

Je ne me souviens ni d'avoir perdu conscience ni d'être revenu à moi. Je n'ai plus qu'à aller modifier le cahier de retouches du 001, car l'interphone marche normalement !



(signé : Jean Caillard, in « Vols d'essais », de Jean-Claude Fayer)

## *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

### *Perte de conscience*

- précédée ou non de troubles de la conscience*
- de durée variable,*
- amnésie totale possible,*
- souvenir possible d'hallucinations visuelles et auditives,*
- mouvements cloniques des membres supérieurs et de la tête.*

## *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

### *Troubles de la conscience (troubles psychiques)*

- troubles moteurs,*
- troubles dysphoriques (comportementaux),*
- troubles cognitifs.*



804	Y32	860	1000
			998
102	830	855	996
			954
218	Y00	828	856
			992
216	2.98	826	854
			990
			1338
224	2.96	824	852
			886
222	2.94	822	850
			884
710	2.92	820	848
			882
218	2.90	818	846
			880
262	2.88	816	844
			878
264	2.88	814	842
			876
262	2.84	812	840
			874
260	2.82	810	838
			872
	2.80	808	836
			870
	2.78	806	834
			868
	2.76	804	832
			866
	2.74	802	830
			864
	2.72	800	828
			862

10000 9999 9998 9997 9996 9995 9994 9993 9992 9991  
9990 9989 9988 9987 9986 9985 9984 9983 9982 9981  
9980 9979 9978 9977 9976 9975 9974 9973 9972 9971  
9970 9969 9968 9967 9966 9965 9964 9963 9962 9961  
9960 9959 9958 9957 9956 9955 9954 9953 9952 9951  
9950 9949 9948 9947 9946 9945 9944 9943 9942 9941  
9940 9939 9938 9937 9936 9935 9934 9933 9932 9931  
9930 9929

1000-999-988-997-996-995-994  
994-993-992-991-990-989-988-  
 987-986-985-984-983-982-  
 981-980-979-978-977-  
 976-975-974-973-972-971  
 970-969-968-967-966-965  
 964-963-962-961-960  
 959-958-957-956-955-  
 954-953-952-951-950-949  
 948-947-946-945-944-943  
 942-941-940-939-938-937  
 936-935-934-933-932-931  
 930-9

1000	864	816
998		
996	842	814
994		
992	840	812
990		
888	838	810
886	836	
884	834	808
882	832	806
880		
878	830	804
876		
874	828	802
872		
870	826	800
868	214	798
866		
864	822	796
862		
860	820	794
858	218	792
856		
854	818	
852		
850	816	
848		

## Altitudes pour lesquelles le seuil critique est atteint

Altitude (en mètres)	Nombre de sujets
5 000	3
6 000	18
7 000	55
8 000	20
9 000	4

montée à 3 000 m, palier de 5 min puis séquences successives de montées de 1 000 m à 5 m/s suivies d'un palier de 5 min, jusqu'à l'observation du seuil critique (perte de conscience).

## *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

### *Troubles de la conscience (troubles psychiques)*

- *Les troubles du jugement et du comportement peuvent être mémorisés ;*
- *Valeurs d'altitude et délais d'apparition imprévisibles, (variables d'un sujet à l'autre, d'un jour à l'autre) ;*
- *Tous types de troubles dysphoriques ;*
- *Troubles cognitifs constants ;*
- *Modification de la voix (diagnostic possible à distance) ;*
- *Décours de la crise sous forme hyperphorique (risque de conduite addictive à l'hypoxie) ;*
- *Les troubles hypoxiques ne révèlent pas une anomalie latente de la personnalité.*

# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

*4 - Fonctions de relation*

*5 - Fonctions psychiques*

 *6 - Le risque léthal*

*7 - Entraînement ou instruction au caisson d'altitude ?*

*8 - Applications hors aéronautique*

## **Altitudes auxquelles ont été relevés des cas mortels d'hypoxie**

<b>Altitude (en mètres)</b>	<b>Nombre de cas</b>
<b>5 200 à 6 100</b>	<b>2</b>
<b>6 100 à 6 700</b>	<b>4</b>
<b>6 700 à 7 300</b>	<b>6</b>
<b>7 300 à 7 900</b>	<b>11</b>
<b>7 900 à 8 500</b>	<b>23</b>
<b>8 500 à 9 100</b>	<b>13</b>
<b>9 100 à 9 600</b>	<b>5</b>





# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

*4 - Fonctions de relation*

*5 - Fonctions psychiques*

*6 - Le risque léthal*

 *7 - Entraînement ou instruction au caisson d'altitude ?*

*8 - Applications hors aéronautique*

## *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

### *7 - Entraînement ou instruction au caisson d'altitude ?*

- **Instruction (et non entraînement),**
- **indispensable,**
- **altruiste,**
- **sans iconographie,**
- **sans conclusion sur l'aptitude médicale,**
- **à délivrer aux pilotes et à ?**

**« La plus belle parole du monde n'a jamais valu une modeste expérience personnelle. »**



# *Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude*

*1 - Introduction*

*2 - Effets subjectifs de l'hypoxie*

*3 - Fonctions végétatives*

*4 - Fonctions de relation*

*5 - Fonctions psychiques*

*6 - Le risque léthal*

*7 - Entraînement ou instruction au caisson d'altitude ?*

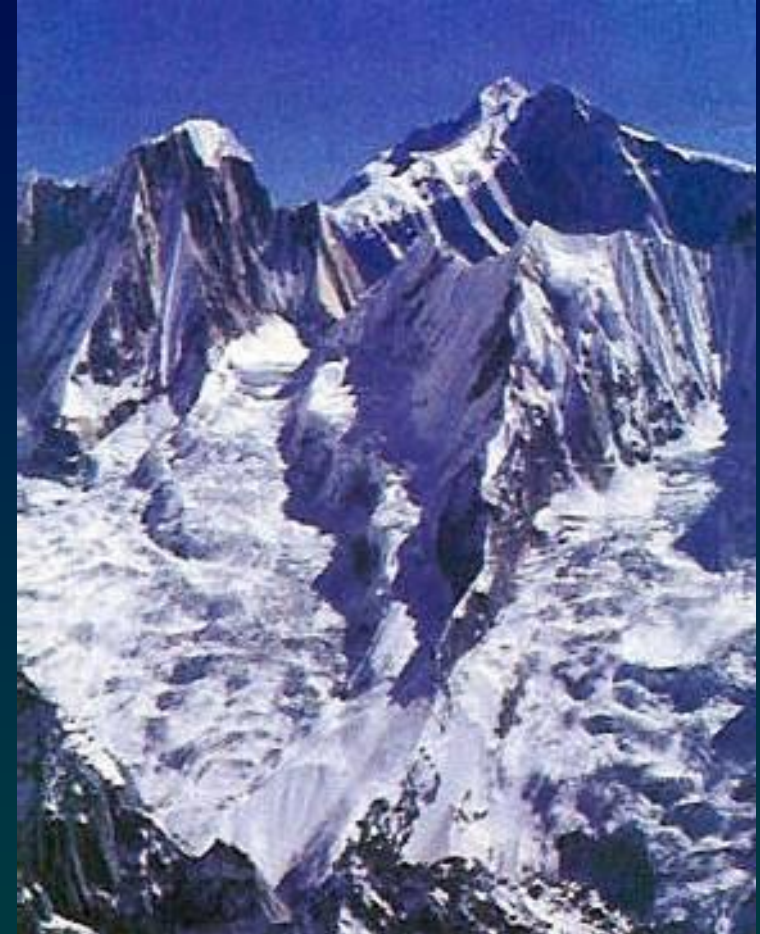
 *8 - Applications hors aéronautique*

## **Le sacrifice de Lachenal :**

**De la conquête de l'Annapurna, le 3 juin 1950, il reste dans la mémoire de chacun le nom de Maurice Herzog. Le sentiment aussi d'une victoire extraordinaire de l'homme sur la montagne symbolisée par la perte des doigts et des orteils du héros, gelés lors de l'ascension... Pour Louis Lachenal, qui l'accompagnait, sacrifier sa vie ou une partie de son corps était aller à l'encontre de sa passion ; s'il suivit Herzog jusqu'au sommet, malgré ses pieds gelés, ce fut pour le sauver d'une mort certaine. Seul Herzog fut traversé de cet enthousiasme proche de l'euphorie mystique qui le transporta jusqu'au sommet dans l'oubli complet de lui-même.**

*Marine Faure*

*TéléCinéObs n°1989 19-25 décembre 2002*



## Récit d'un confrère ex-motard :

« Je suis médecin et j'avais 36 ans au moment des faits. J'ai été victime d'un accident de moto. L'accident s'est passé sur une bretelle de sortie d'autoroute, un dimanche de février, vers 13 heures ; il faisait très beau ; il n'y avait personne d'autre sur cette route. Je pense avoir dérapé sur une plaque d'huile. J'ai senti l'accident arriver et j'ai perdu conscience.

J'ai repris conscience plus tard, sous la glissière de sécurité. Je voyais le ciel radieux au travers des montants de la glissière. J'avais de très vives douleurs partout (polytraumatismes graves) et je me suis rapidement rendu compte qu'à chaque respiration, mon volume courant diminuait, avec des bruits de gargouillement ; il ne m'était pas difficile de m'auto diagnostiquer un hémopneumothorax, avec un phénomène de clapet ; le diagnostic était correct. Respirant de moins en moins par amputation ventilatoire progressive, atteint d'une hémorragie interne, l'évolution était forcément fatale ; je m'en rendais parfaitement compte et, ce qui était étonnant, c'était que je n'en avais plus rien à faire. Mon détachement était complet.

## Récit d'un confrère ex-motard (suite) :

La seule réflexion que je me suis faite à ce moment, c'était de me dire « c'est marrant de mourir par un jour aussi beau. Tiens, c'est comme cela que l'on meurt ? Et il fait beau... ». À aucun moment je n'ai pensé à ma femme, ni à mes enfants, ni à quoi que ce soit qui aurait dû me toucher. Mon salut vint de ce que le premier automobiliste qui est passé à côté de moi était un interne de SAMU qui passait là par hasard et qui, comme tout « samuman » qui se respecte, avait tout dans sa voiture. Je lui dois la vie.

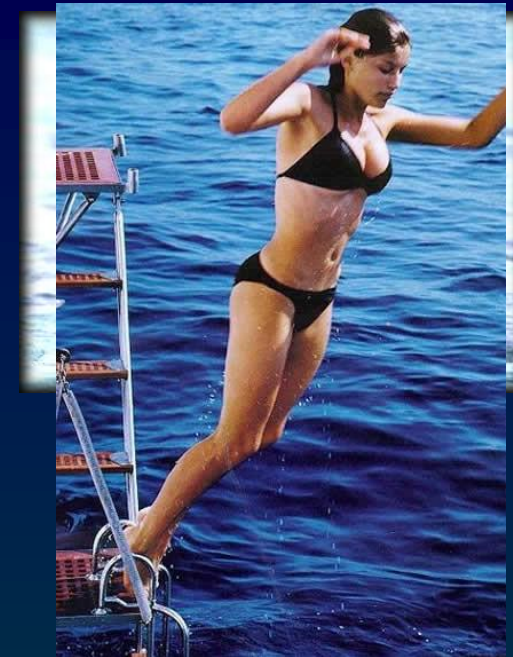
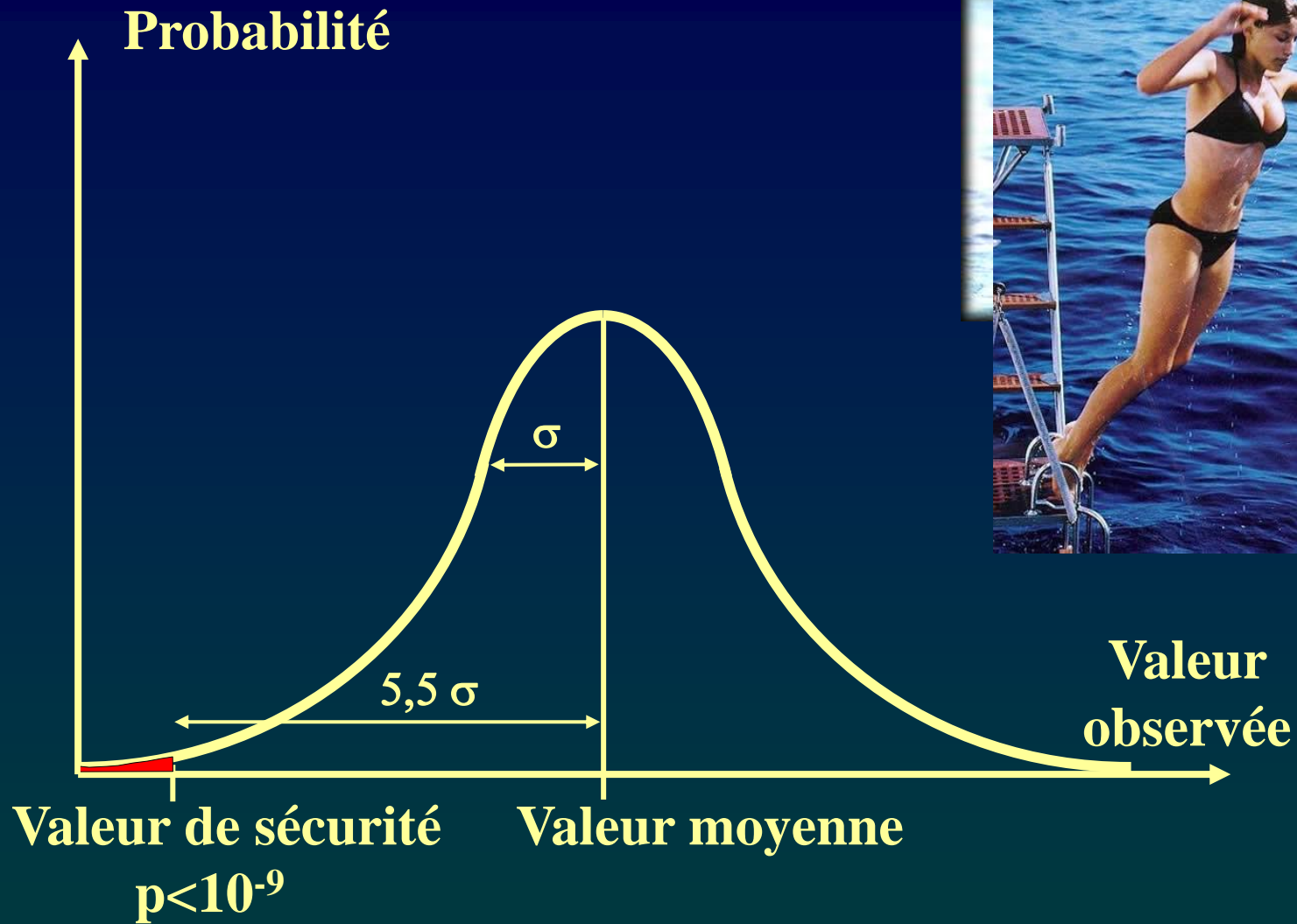
Par la suite, j'ai été extrêmement choqué par cette attitude incompréhensible que je me rappelle avoir eue face à la mort certaine ; tellement inquiet sur mon propre cas que j'ai eu recours à une aide psychiatrique face à ce que j'ai interprété comme une incompréhensible tendance suicidaire révélée par cet accident. Le psychiatre n'a rien trouvé qui relève de sa spécialité.

C'est en assistant au cours sur l'hypoxie que j'ai perçu la seule explication plausible à ce qui m'est arrivé. »

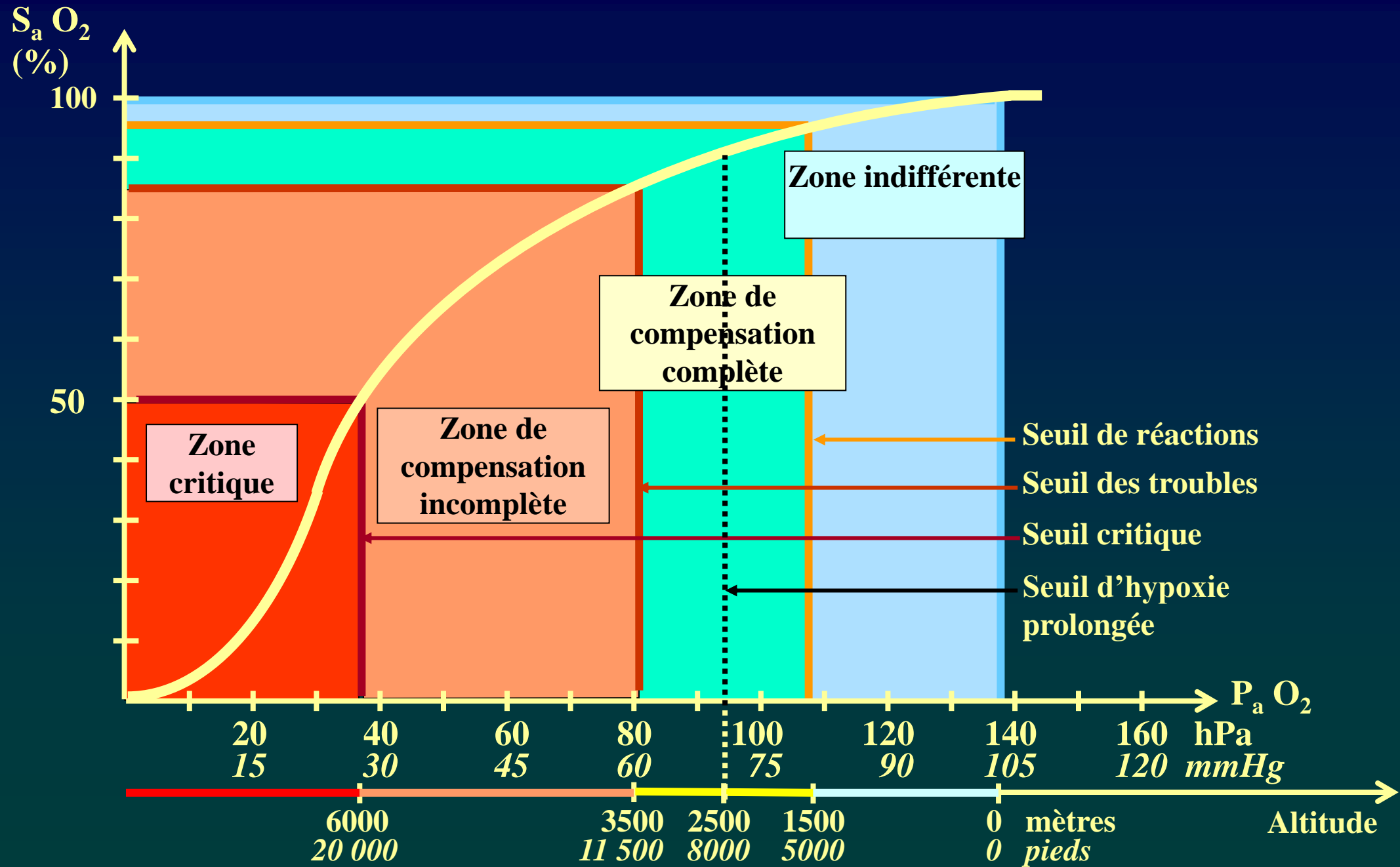
# Physiologie et Transport Aérien

*Tolérance à l'hypoxie aiguë d'altitude*





En matière de sécurité des vols, c'est évidemment la limite basse raisonnablement probable qui doit être prise en compte, et non la valeur moyenne décrite dans nos livres de physiologie. Noter aussi que cette courbe de dispersion est établie en fonction de la population étudiée (c'est-à-dire d'une population donnée).



<b>Les bases physiologiques de la protection contre l'hypoxie d'altitude</b>		<b>Pressurisation</b>	<b>Systemes inhalateurs d'oxygène : <math>P_A O_2</math></b>
<b>Vol en conditions normales</b>	<b>Compenser tous les effets de l'hypoxie</b>	<b>Z &lt; 1 500 m 5 000 ft</b>	<b>&gt; 108 hPa</b>
	<b>Éviter une fatigue excessive en cas d'exposition de plusieurs heures</b>	<b>Z &lt; 2 500 m 8 000 ft</b>	<b>&gt; 96 hPa</b>
	<b>Éviter les principales dégradations psychomotrices dues à l'altitude</b>	<b>Z &lt; 3 500 m 12 000 ft</b>	<b>&gt; 80 hPa</b>

## *Tolérance à l'hypoxie d'altitude*

**Un résumé en quelques mots :**

**L'hypoxie rend l'Homme stupide. Or plus l'Homme est stupide, moins il est apte à se rendre compte combien il l'est .**

**Les règles sont faites pour pallier ce risque : appliquez les !**

**Une réponse simple à une question qui se pose en vol :**

**Faut-il mettre le masque à oxygène ?**

**(une seule réponse possible)**

**OUI**

## 7 - Protection contre l'altitude : réglementation

Réglementation civile : systèmes d'oxygène embarqués

### Textes opérationnels (Europe) :

Les pilotes doivent **utiliser** l'oxygène lorsqu'ils volent au-dessus du FL 100, sauf pendant les 30 premières minutes d'exposition à cette altitude, sans dépasser le FL 130, et pendant toute la durée de vol au-dessus du FL 130.

Les pilotes doivent **disposer** de suffisamment d'oxygène pour toute la durée du vol au-dessus du FL 100.

Les passagers doivent **disposer** d'un dispositif délivrant de l'oxygène pendant toute la durée de vol au-dessus du FL 130.

Ces règles s'appliqu(ai)ent à tous types de vols.

Il s'agit bien sûr de l'altitude observée en cabine.

Règlement EU 965/2012 amendé, parts IV à VIII



**ATR 42**

2005 © aerpix.net

# Physiologie et Transport Aérien

**Introduction**

**Rappels**

**Conséquences de l'exposition de l'Homme à l'altitude**

**Barotraumatismes**

**Ébullisme**


**Maladie de décompression**

**Hypoxie**

**Cabines pressurisées**

**Systèmes d'oxygène**

# Les cabines pressurisées

-  **1 - Définitions**
- 2 - Historique**
- 3 - Principes de fonctionnement**
  - Courbes de pressurisation**
  - Schémas techniques**
  - Exemples**
- 4 - Conditionnement thermo-hygrométrique de la cabine**
- 5 - Avantages et inconvénients**
- 6 - Principaux règlements**



# Les cabines pressurisées

## 1 - Définitions

### Différence entre cabine étanche et cabine pressurisée :

La cabine étanche est une cabine sans fuite. Les gaz sont embarqués, le milieu est confiné et régénéré.

Applications : cabines spatiales, sous-marins, abris terrestres étanches, cas particuliers (records...).

La cabine pressurisée est utilisée dans tout le domaine où une ressource gazeuse extérieure et une source d'énergie sont disponibles. La cabine pressurisée est une cabine ouverte, où des gaz sont admis en permanence ; leur sortie est régulée.

Aéronautique = cabine pressurisée (aucune exception connue à ce jour)

# Les cabines pressurisées

**1 - Définitions**

 **2 - Historique**

**3 - Principes de fonctionnement**

**Courbes de pressurisation**

**Schémas techniques**

**Exemples**

**4 - Conditionnement thermo-hygrométrique de la cabine**

**5 - Avantages et inconvénients**

**6 - Principaux règlements**

# Les cabines pressurisées

## 2 - Historique

premières études, prototypes,  
risque de décompression explosive :  
années 1930

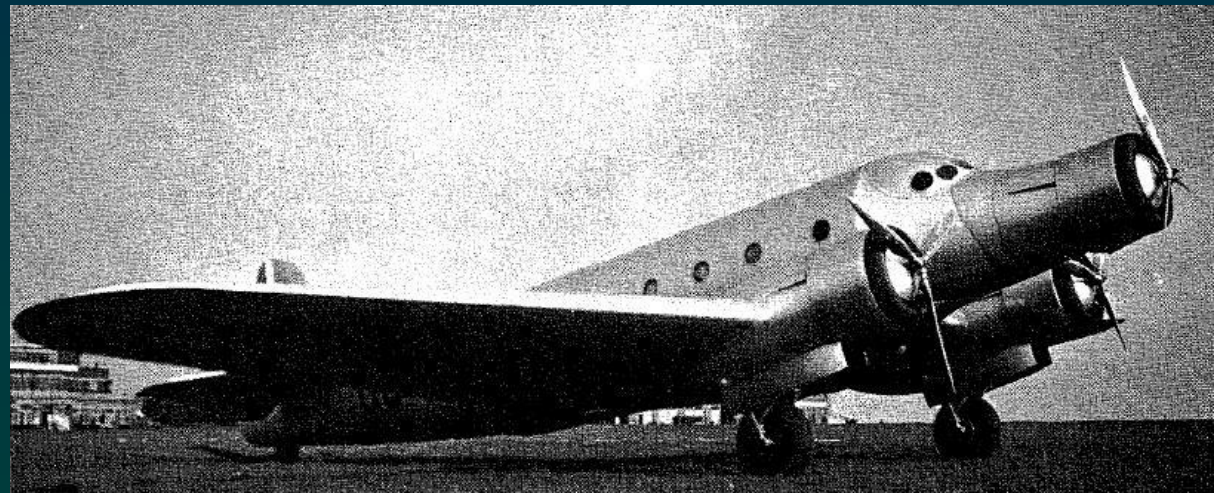
généralisation : fin de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale.



Boeing 307 « Stratoliner »

1938

Renard R-35



# Les cabines pressurisées

**1 - Définitions**

**2 - Historique**

**3 - Principes de fonctionnement**

 **Courbes de pressurisation**

**Schémas techniques**

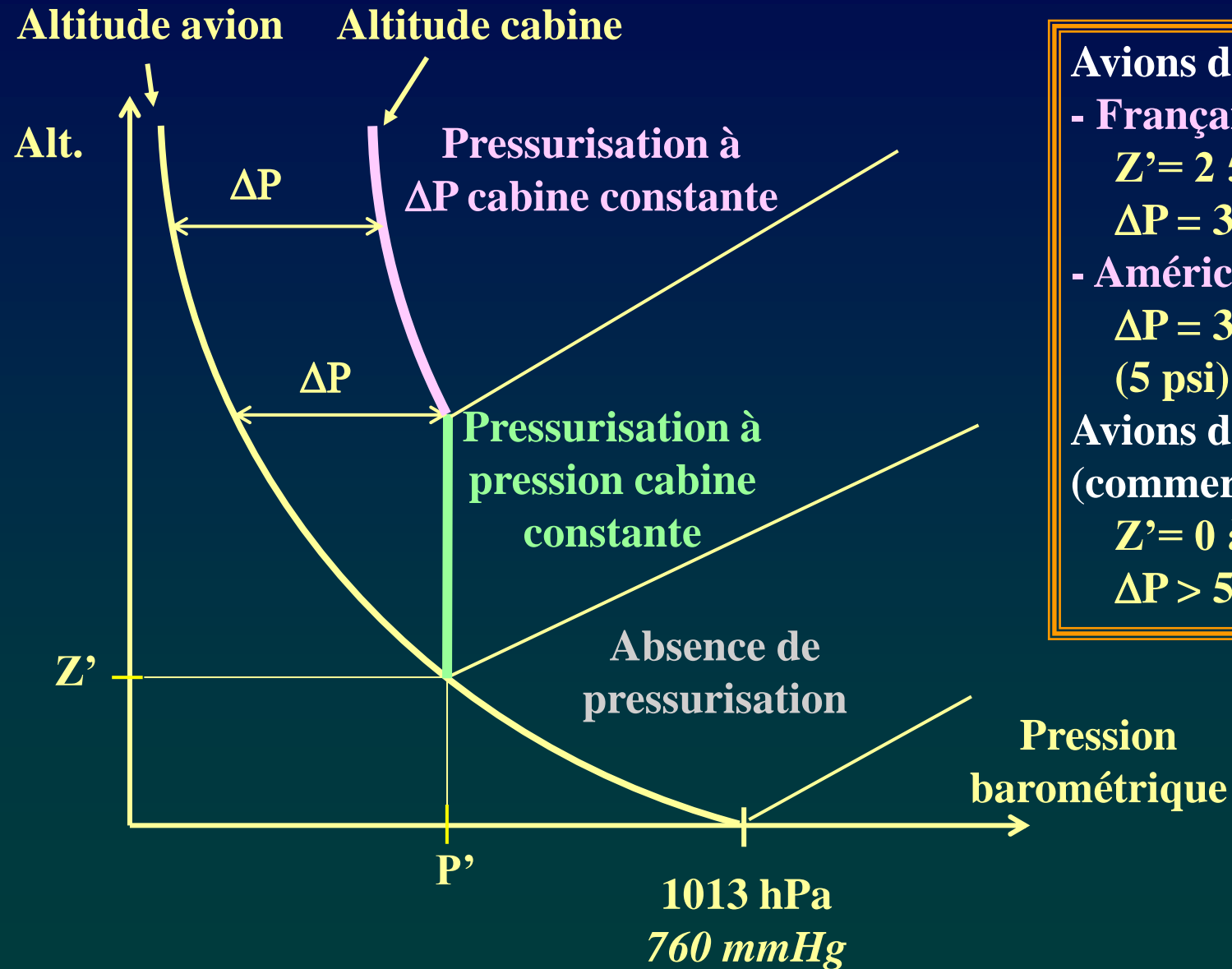
**Exemples**

**4 - Conditionnement thermo-hygrométrique de la cabine**

**5 - Avantages et inconvénients**

**6 - Principaux règlements**

# cabines pressurisées : principes de fonctionnement



Avions de chasse :

- Français :

$Z' = 2\,500\text{ m}$

$\Delta P = 300\text{ hPa}$

- Américains :

$\Delta P = 350\text{ hPa}$

(5 psi)

Avions de transport  
(commercial) :

$Z' = 0\text{ à }8000\text{ ft}$

$\Delta P > 500\text{ hPa}$

# Les cabines pressurisées

**1 - Définitions**

**2 - Historique**

**3 - Principes de fonctionnement**

**Courbes de pressurisation**

 **Schémas techniques**

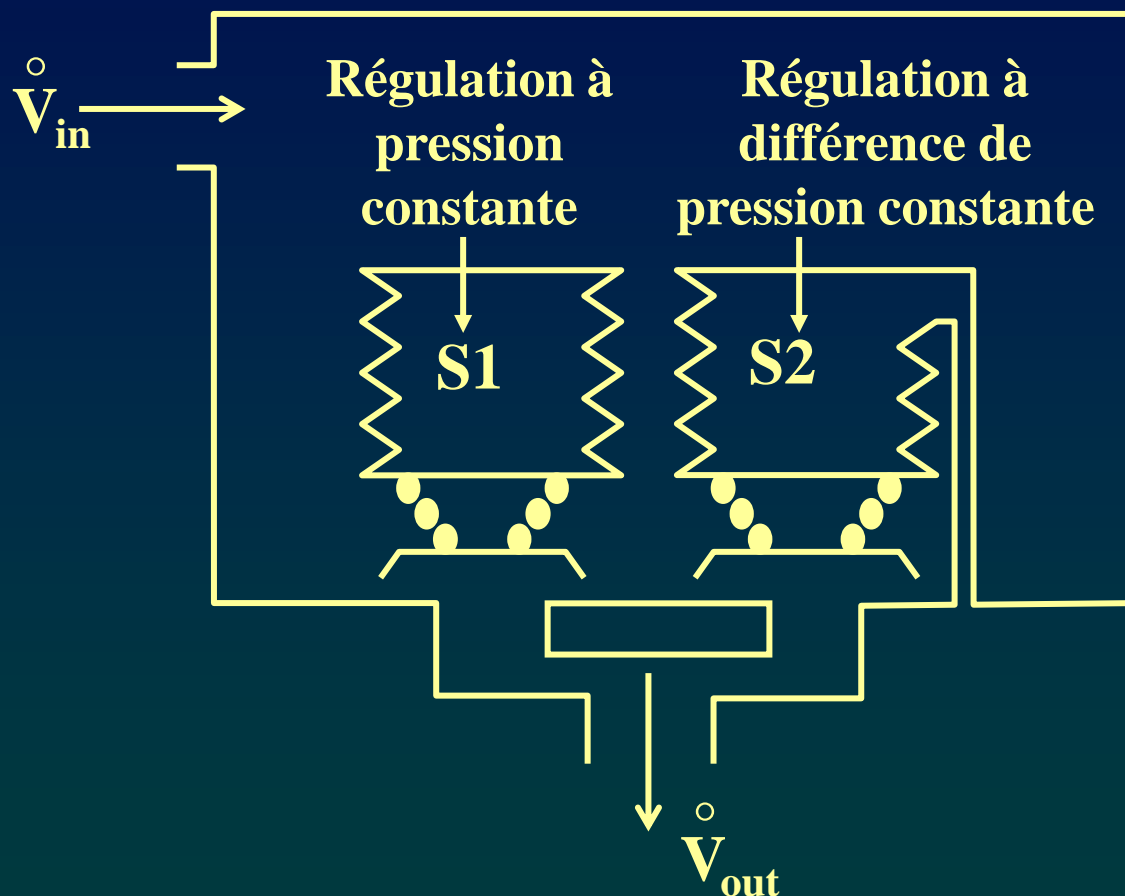
**Exemples**

**4 - Conditionnement thermo-hygrométrique de la cabine**

**5 - Avantages et inconvénients**

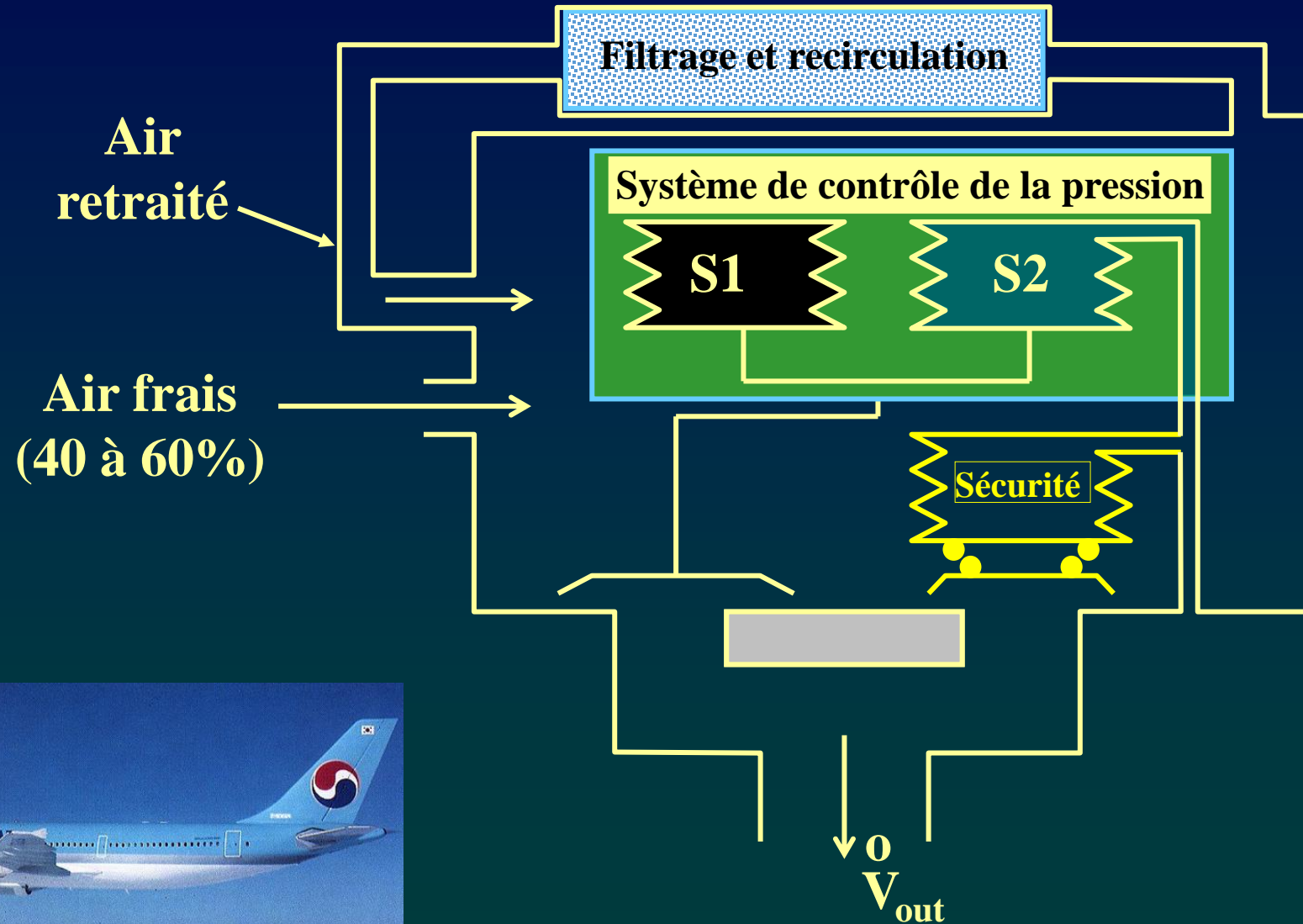
**6 - Principaux règlements**

## Pressurisation simple (schéma classique)



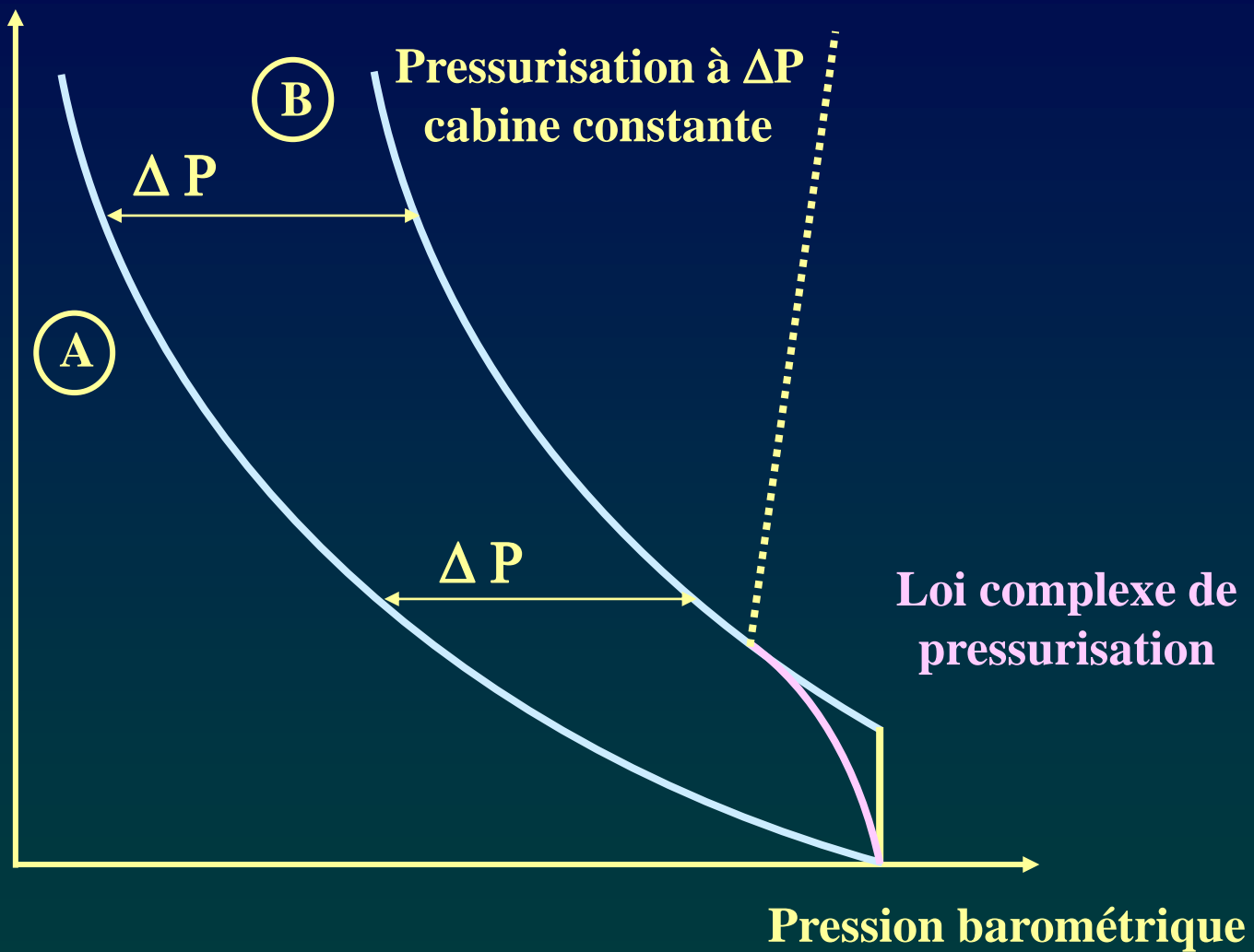
Le principe de la cabine pressurisée est très simple : de l'air comprimé, fourni par le moteur de l'avion, est admis à taux constant dans la cabine. La régulation de la sortie d'air permet de réguler soit la pression absolue soit la différence de pression dans la cabine. Au passage, l'air est conditionné en température.

# Pressurisation avec recirculation partielle





Altitude



# Les cabines pressurisées

**1 - Définitions**

**2 - Historique**

**3 - Principes de fonctionnement**

**Courbes de pressurisation**

**Schémas techniques**

**Exemple**

 **4 - Conditionnement thermo-hygrométrique de la cabine**

**Conditionnement thermique : relativement facile sur les avions de transport car ils volent en altitude, donc en atmosphère froide.**

**Hygrométrie : en altitude, l'air est toujours très sec. Est-ce important ?**

## Quantité d'eau perdue par un occupant (au repos) du fait de l'hygrométrie nulle

*Rappel : La perte d'eau est une fonction de la pression partielle en vapeur d'eau. Elle est indépendante de la pression barométrique ambiante.*

	Pertes cutanées	Pertes respiratoires	Pertes totales
23 °C, 50% d'hygrométrie	28 g/heure	14 g/heure	42 g/heure
23 °C, air sec	39 g/heure	20 g/heure	59 g/heure

## Combien d'eau pour humidifier la cabine ?

Les données (exemple de l'A340) :

- Volume de la cabine : environ 800 m<sup>3</sup>.
- Taux de renouvellement de l'air de la cabine : 3 min.
- Le confort thermique est assuré, à 23 °C, par 50 % d'hygrométrie relative (10,3 g d'eau par m<sup>3</sup>).

Le résultat : 165 kg d'eau par heure

### Les inconvénients ?

techniques : corrosion, faux-contacts électriques

hygiéniques : pollution bactérienne des circuits

Solutions possibles ? humidification de zones privilégiées de la cabine

- 👉 Il n'existe actuellement aucun projet sérieux pour augmenter l'hygrométrie à bord, à l'exception de certains postes de repos pour l'équipage technique.

# Les cabines pressurisées

**1 - Définitions**

**2 - Historique**

**3 - Principes de fonctionnement**

**Courbes de pressurisation**

**Schémas techniques**

**Exemples**

**4 - Conditionnement thermo-hygrométrique de la cabine**

 **5 - Avantages et inconvénients**

**6 - Principaux règlements**

## 5 - Avantages et inconvénients

### Avantages :

- **Technique simple**
- **Conditionnement d'air facile**
- **Dépollution simple et efficace de la cabine**

### Inconvénients :

- **Forte résistance structurale de la cabine**
- **Technique coûteuse en énergie**
- **Risque de pollution**
  - par cause externe (air extérieur pollué)
  - par cause interne (dysfonctionnement au cours du prélèvement sur le moteur)
- **En haute altitude : air sec**

**Pour mémoire : le (faux) problème de l'ozone**

# Les cabines pressurisées

**1 - Définitions**

**2 - Historique**

**3 - Principes de fonctionnement**

**Courbes de pressurisation**

**Schémas techniques**

**Exemples**

**4 - Conditionnement thermo-hygrométrique de la cabine**

**5 - Avantages et inconvénients**

 **6 - Principaux règlements**

## **cabines pressurisées : principaux règlements applicables (aéronefs militaires)**

**OTAN : STANAG 3198 AMD, Ed. 5 (2016), §1,3,1**

**(résumé) : lorsque l'altitude dans la cabine dépasse 10 000 ft (3 050 m) en conditions normales de vol, toutes les personnes à bord doivent être munies d'un système inhalateur d'oxygène.**





## **cabines pressurisées : principaux règlements applicables (aviation civile)**

### **Rappel :**

**Avions certifiés CS-23 et/ou 14CFR (FAR) 23 :**

**en pratique : petits avions  $\leq 9$  sièges pax, MTOW\*  $\leq 5670$  kg (12 500 lb)**

**ou « commuters  $\leq 19$  sièges pax (« turbo-prop », MTOW\*  $\leq 8618$  kg (19 000 lb)**

**Avions certifiés CS-25 et/ou 14CFR (FAR) 25 :**

**Large Aeroplanes (EU), Transport Category Airplanes (FAA)**

**\*MTOW = Maximum Take-Off Weight**

## **cabines pressurisées : règlements civils**

### **Avions certifiés CS-23 et/ou 14CFR (FAR) 23**

**certifié pour voler à FL > 250 : l'avion doit être pressurisé de façon à maintenir l'altitude de rétablissement < 15 000 ft en cas de panne raisonnablement probable.**

**Si l'avion est pressurisé, l'altitude cabine doit être maintenue  $\leq 10\ 000$  ft.**

### **Avions certifiés CS-25 et/ou 14CFR (FAR) 25**

**L'altitude rétablie en cabine doit être  $\leq 8000$  ft en toutes conditions normales de vol et  $\leq 15\ 000$  ft en cas de panne raisonnablement probable.**

*« raisonnablement » probable =  $p < 10^{-5}$  par heure de vol.*

## **cabines pressurisées : principaux règlements applicables (civils)**

### **2 - variation de la pression dans la cabine :**

#### **SAE ARP 1270 :**

**< 500 ft/min à la montée, (< 2,5 m/s)**

**< 300 ft/min à la descente (< 1,5 m/s)**

## **cabines pressurisées : principaux règlements applicables (civils)**

### **3 - conditionnement de la cabine : CS-25 et 14CFR (FAR) 25, §831**

- ventilation > 0,55 livre d'air frais\* par minute et par occupant dans le poste de pilotage (FAR 25),**
- ventilation > 0,28 m<sup>3</sup> (10 ft<sup>3</sup>) d'air frais par minute et par occupant dans le poste de pilotage (CS 25).**
- normes de dépollution (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>).**

**\* attention : *livre*, et non *litre* (0,55 lb d'air = environ 250 g = 200 dm<sup>3</sup> STPD)**

# Physiologie et Transport Aérien

**Introduction**

**Rappels**

**Conséquences de l'exposition de l'Homme à l'altitude**

**Barotraumatismes**

**Ébullisme**

**Maladie de décompression**

**Hypoxie**

**Cabines pressurisées**

**Systèmes d'oxygène**

# L'oxygène à bord : oxygène gazeux



**Alliages usuels :**

**Masse d'O<sub>2</sub> = 10% de la masse totale**



**Aviation de transport, AVOX sys.**

**3 275 dm<sup>3</sup> d'oxygène,**

**Masse à vide : 8,2 kg**

**Masse en charge : 12,6 kg**

**h = 0,91 m, Ø = 0,229 m.**

**Masse d'O<sub>2</sub> = 35% masse totale**

## L'oxygène à bord (état de l'art) : oxygène gazeux

### Avantages

- Technologie simple,
- systèmes fiables,
- fluide disponible partout dans le monde,
- coût relativement faible,
- technologie ancienne et éprouvée : tous les systèmes distributeurs en aval sont compatibles avec cette technologie (associée à un détendeur autour de 5 bars).
- Une bouteille étanche reste indéfiniment en charge sans maintenance.



## L'oxygène à bord (état de l'art) : oxygène gazeux

### Inconvénients

- **opérationnel : plus lourd et plus encombrant que d'autres moyens de stockage de l'oxygène car, pour des problèmes de logistique au niveau mondial, la pression de gonflement reste limitée à 127 bars (1850 psi).**
- **Malgré cette limite de pression, risque d'explosion, d'où :**
  - **maintenance lourde et contraignante (onéreuse),**
  - **et restrictions réglementaires à prévoir sur l'emport de sources d'oxygène gazeux à haute pression à bord des avions - du moins au-delà d'une certaine capacité unitaire.**



## L'oxygène à bord (état de l'art) : oxygène liquide

### Technique :

principe du *vase Dewar* : 2 enveloppes concentriques entre lesquelles est réalisée une isolation thermique très poussée, radiative et convective.

### Avantages

Gain en masse et en encombrement.

Exemple : source de l'α-Jet (10 dm<sup>3</sup> d'O<sub>2</sub> liquide)

(8 m<sup>3</sup> d'O<sub>2</sub> gazeux détendu STPD)

masse à vide : 8 kg, masse totale : 19,5 kg, 382 x 372 x 314 mm

### Inconvénients

Servitudes techniques (génération, stockage, distribution),

Consommation obligatoire d'oxygène,

En cas de déversement accidentel du liquide,

- risque incendiaire,
- risque de destruction des matériaux du plancher de la cabine.



# L'oxygène à bord (état de l'art) : oxygène liquide

## Applications :

- **militaires : avions de chasse depuis le Mirage 4 (en France), jusqu'aux prototypes du Rafale.**
- **civiles, hors aéronautique :  
grandes stations hospitalières (depuis 1960 en France),  
oxygénothérapie à domicile ou ambulatoire (interdit en avion).**

**Aucune application prévisible pour le transport aérien médicalisé.**

# L'oxygène à bord (état de l'art) : générateurs chimiques

Basés sur la réaction exergonique de dégradation du chlorate de sodium:



Mais il existe des réactions parasites ou utiles (exemples) :



1 g Na ClO<sub>3</sub> donne 0,45 g O<sub>2</sub> = 0,32 dm<sup>3</sup> STPD O<sub>2</sub>



système d'oxygène pour passagers :  
1 générateur chimique alimente les  
3 masques à oxygène de la même  
rangée de sièges

# L'oxygène à bord (état de l'art) : générateurs chimiques

## Applications :

**Oxygène fourni aux passagers en cas de dépressurisation de la cabine.**

**Actuellement : environ 80% des avions de transport commercial de passagers sont équipés de chandelles à oxygène pour les passagers en cas de dépressurisation.**

**Aucune application prévisible pour le transport aérien médicalisé.**

# L'oxygène à bord : concentrateurs d'oxygène

## Terminologie

### Aéronautique :

**OBOGS = On-Board Oxygen Generating System**

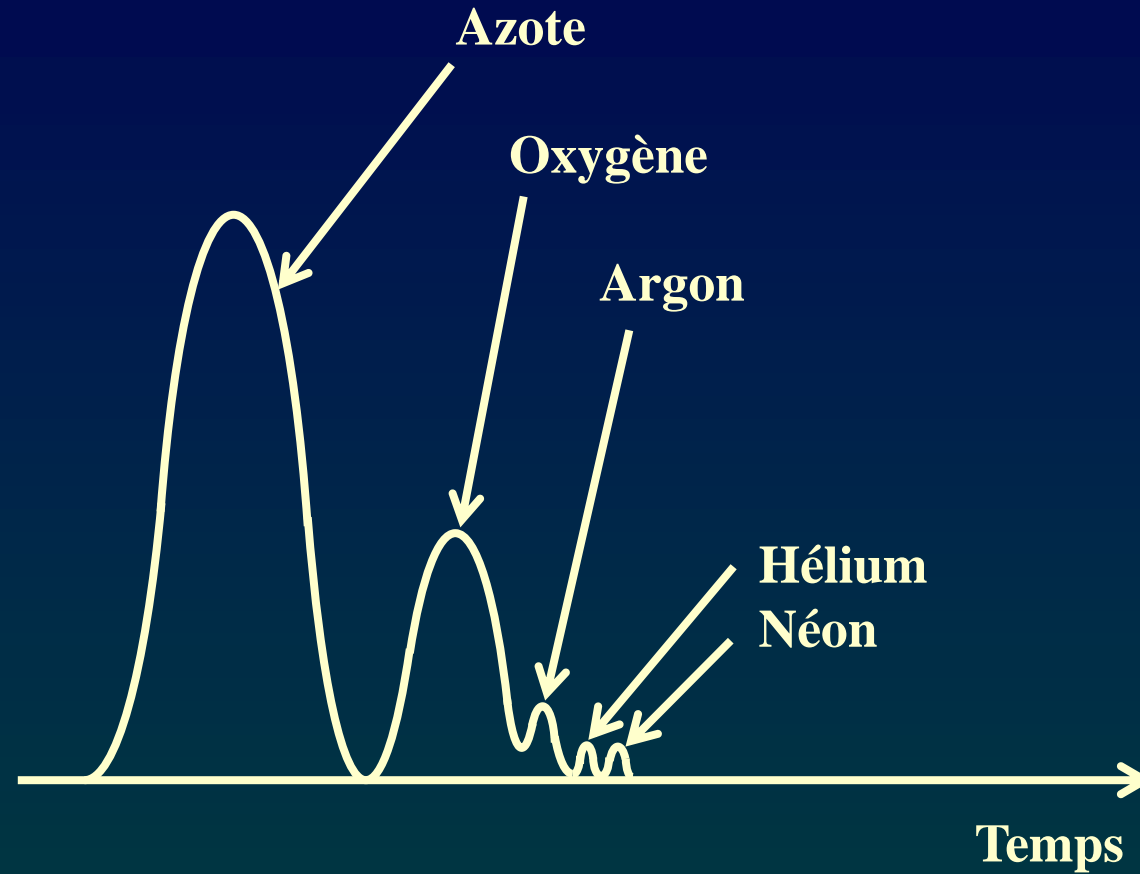
**MSOC = Molecular Sieve Oxygen Concentrator**

**PSA = Pressure Swing Absorber**

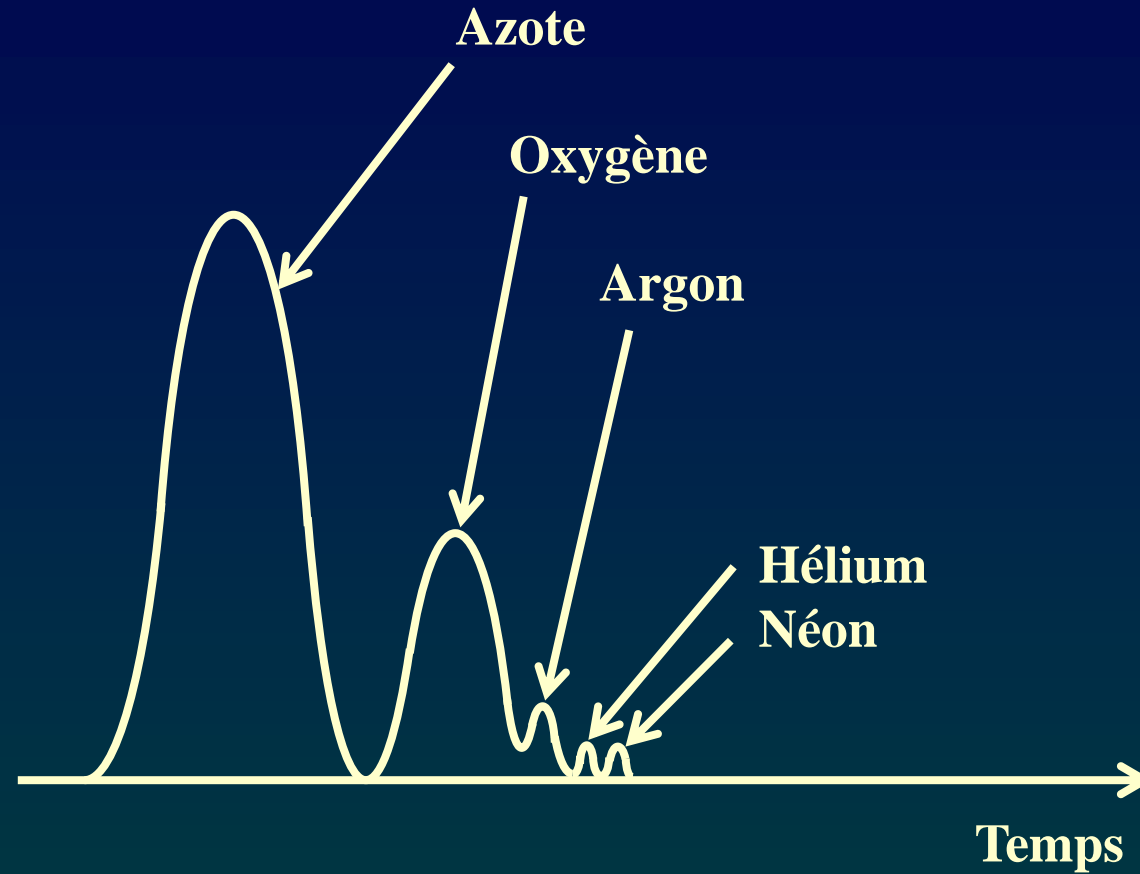
**(Français) : concentrateur d'oxygène**

### Médicale :

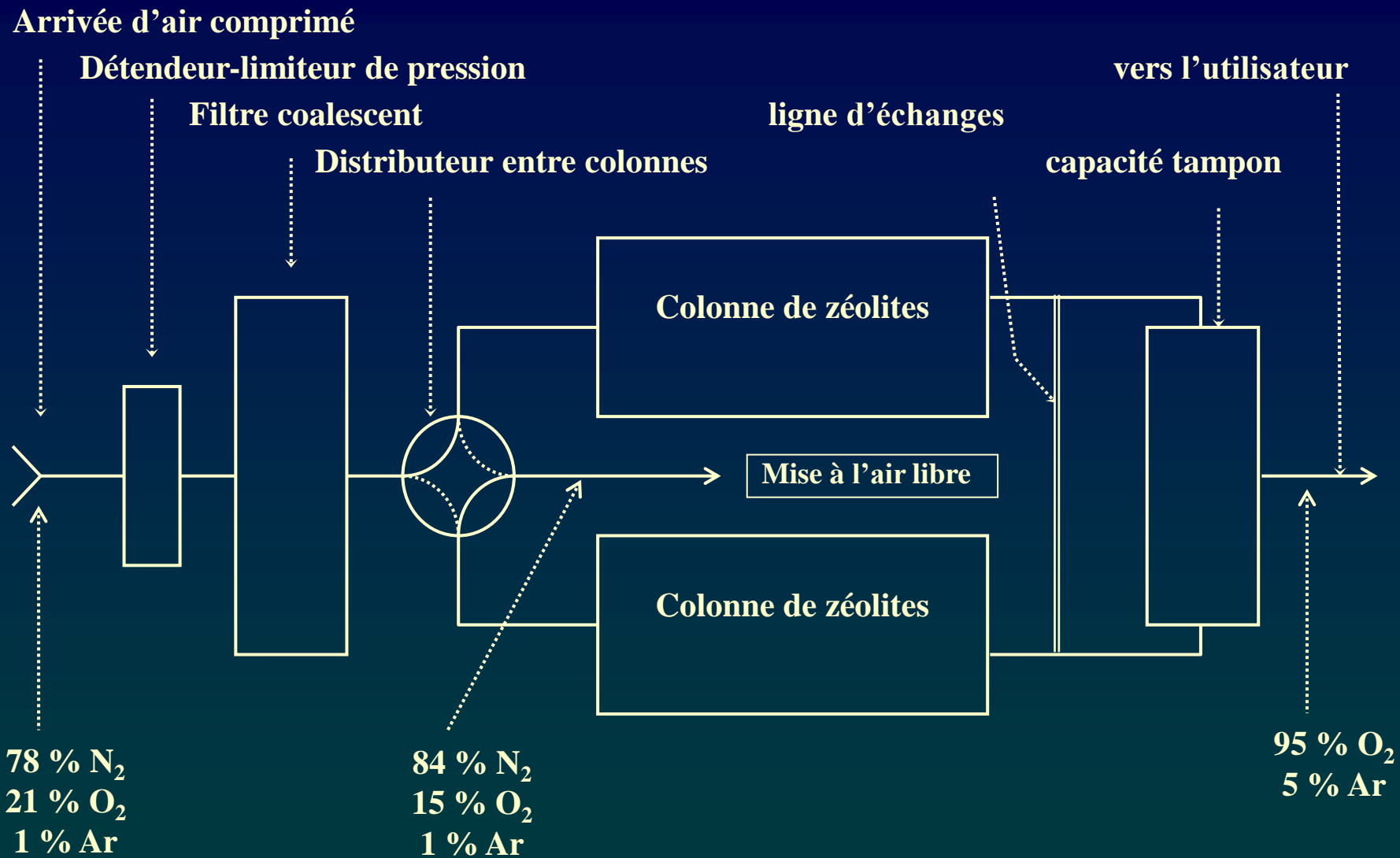
**extracteur d'oxygène**



**Le fonctionnement d'un concentrateur d'oxygène est basé sur la séparation des gaz sur une colonne de zéolite. Le mélange gazeux injecté à l'entrée de la colonne est séparé en ses différents constituants. La première partie du gaz efférent est dirigée vers l'utilisateur ; le reste est rejeté à l'extérieur de l'avion.**



**Commentaire à propos de la séparation des gaz : il est impossible d'obtenir de l'oxygène pur.  
En théorie : 95 % d'oxygène.  
En pratique : 92 %**



**Commentaire sur la pression des gaz en aval : faible !**



**Concentrateur d'oxygène à tamis moléculaire  
(OBOGS : On-Board Oxygen Generating System)**

Application aéronautique actuelle en France : le *Rafale*



# L'oxygène à bord : concentrateurs d'oxygène

## Quelques applications aéronautiques actuelles

- avions militaires : dans le monde (avec OBOGS français)



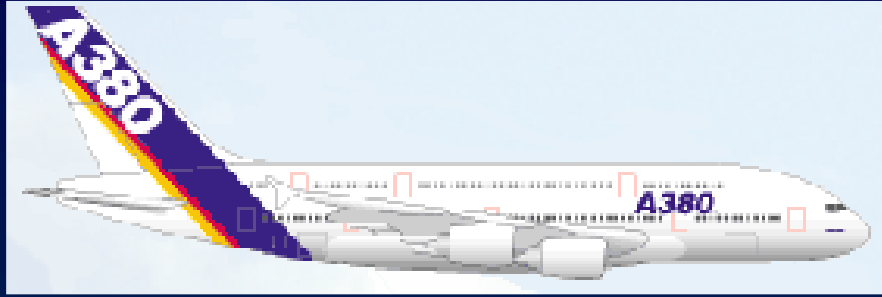
L-159



JSF (F-35)



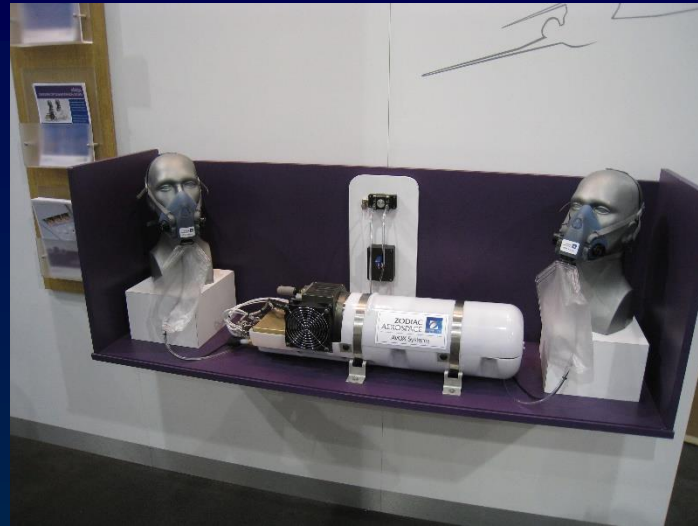
A400M



**OBOGS développé par L'Air Liquide (France) pour l'Airbus A 380  
170 kg – prévu pour alimenter 600 passagers après décompression de cabine, sans limitation  
de durée.**



Zodiac -Aerotechnics



Zodiac -AVOX



SeQual



OBOGS (Proto 1980's)



OBOGS du Rafale

# L'oxygène à bord : concentrateurs d'oxygène

## Avantages et inconvénients

### Avantages :

- **Production illimitée de gaz enrichi en oxygène à bord, pourvu que de l'énergie soit disponible ;**
- **Pas de stockage d'oxygène à bord ;**
- **Pas de circuit « haute pression » d'oxygène à bord.**

### Inconvénients :

- **(très) basse pression d'alimentation en aval, d'où : adapter tous les circuits en aval de l'OBOGS ;**
- **« gaz enrichi en oxygène » seulement.**

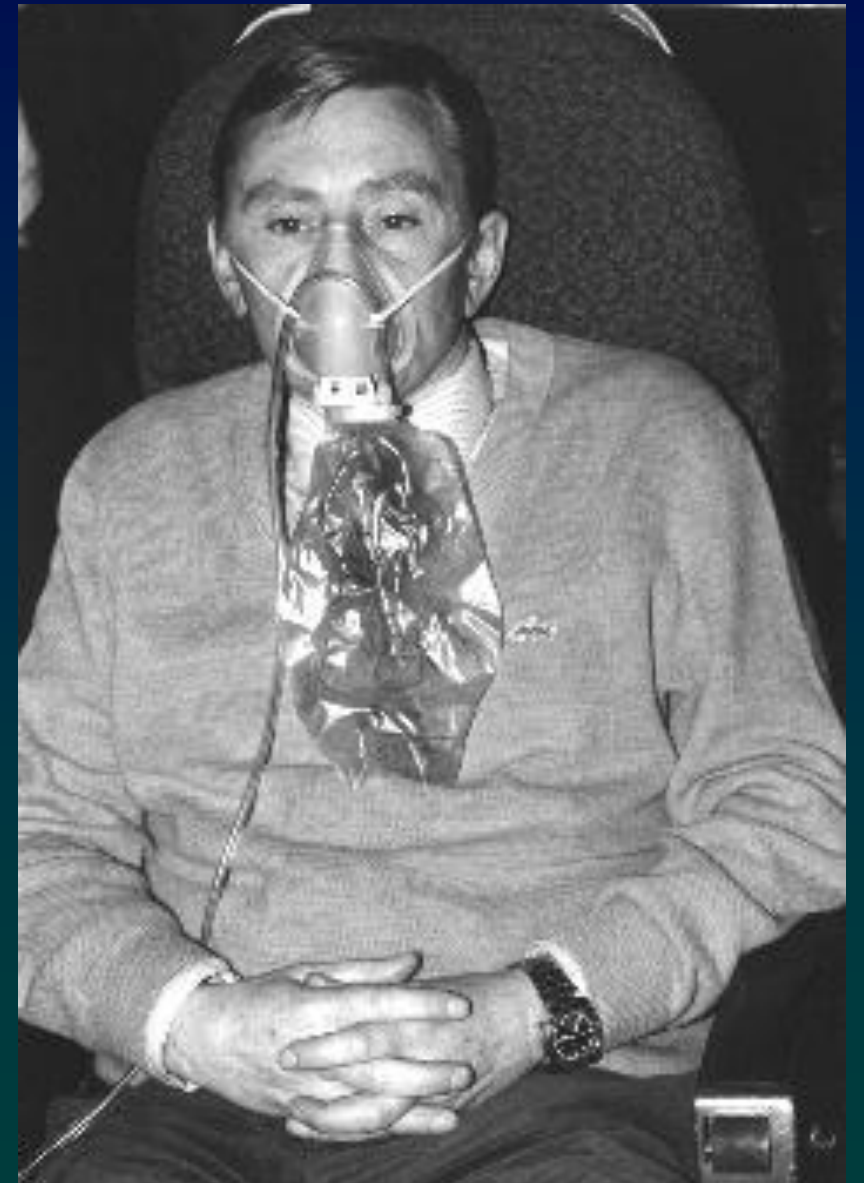
# L'oxygène à bord : la distribution d'oxygène

**Systemes à débit continu**

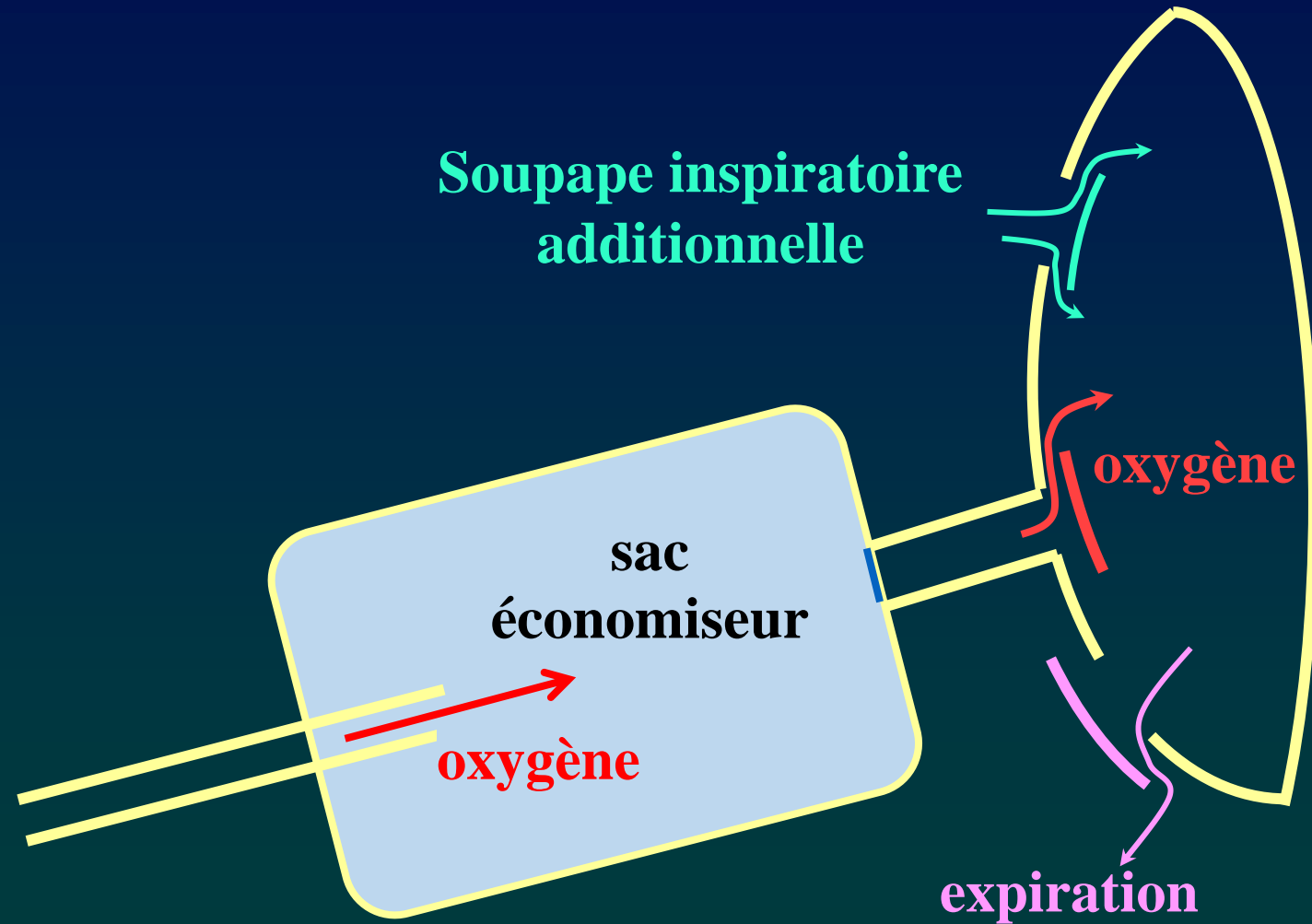
**Systemes à la demande**

# L'oxygène à bord : la distribution d'oxygène

## Systemes à débit continu

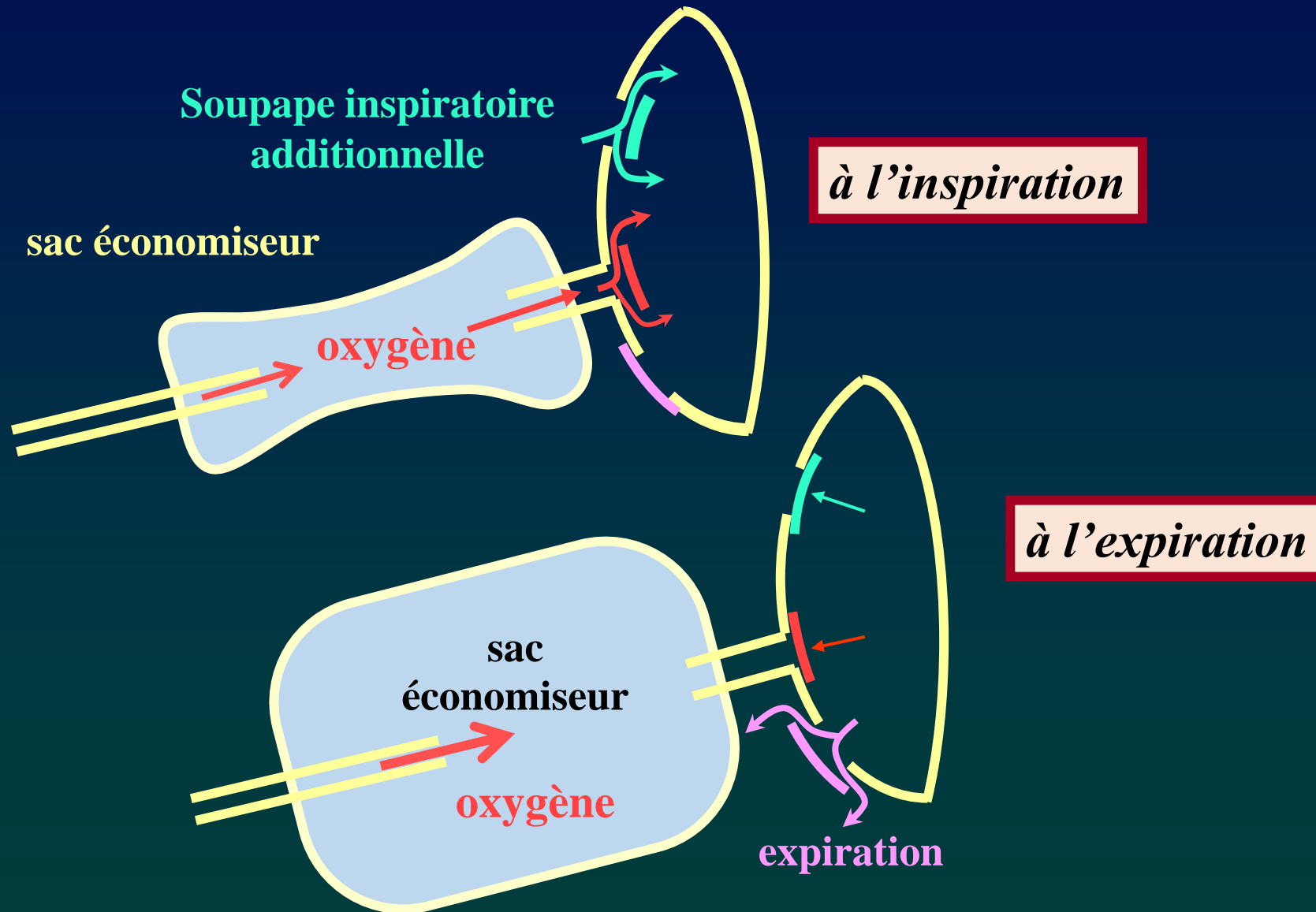


# Masque-inhalateur d'oxygène à débit massique fixe et sac économiseur : schéma général





# Masque-inhalateur d'oxygène à débit massique fixe et sac économiseur : fonctionnement

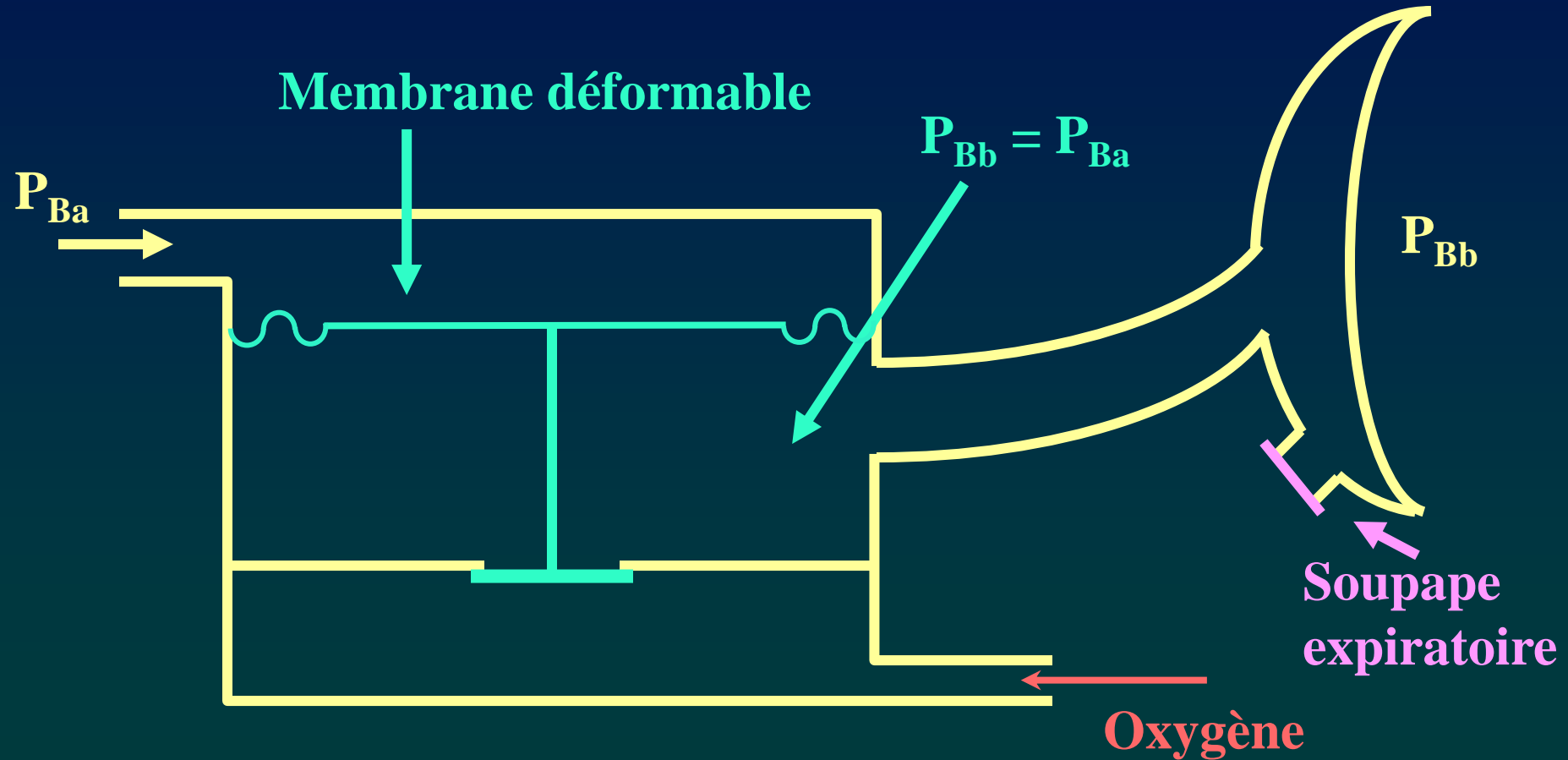


# L'oxygène à bord : la distribution d'oxygène

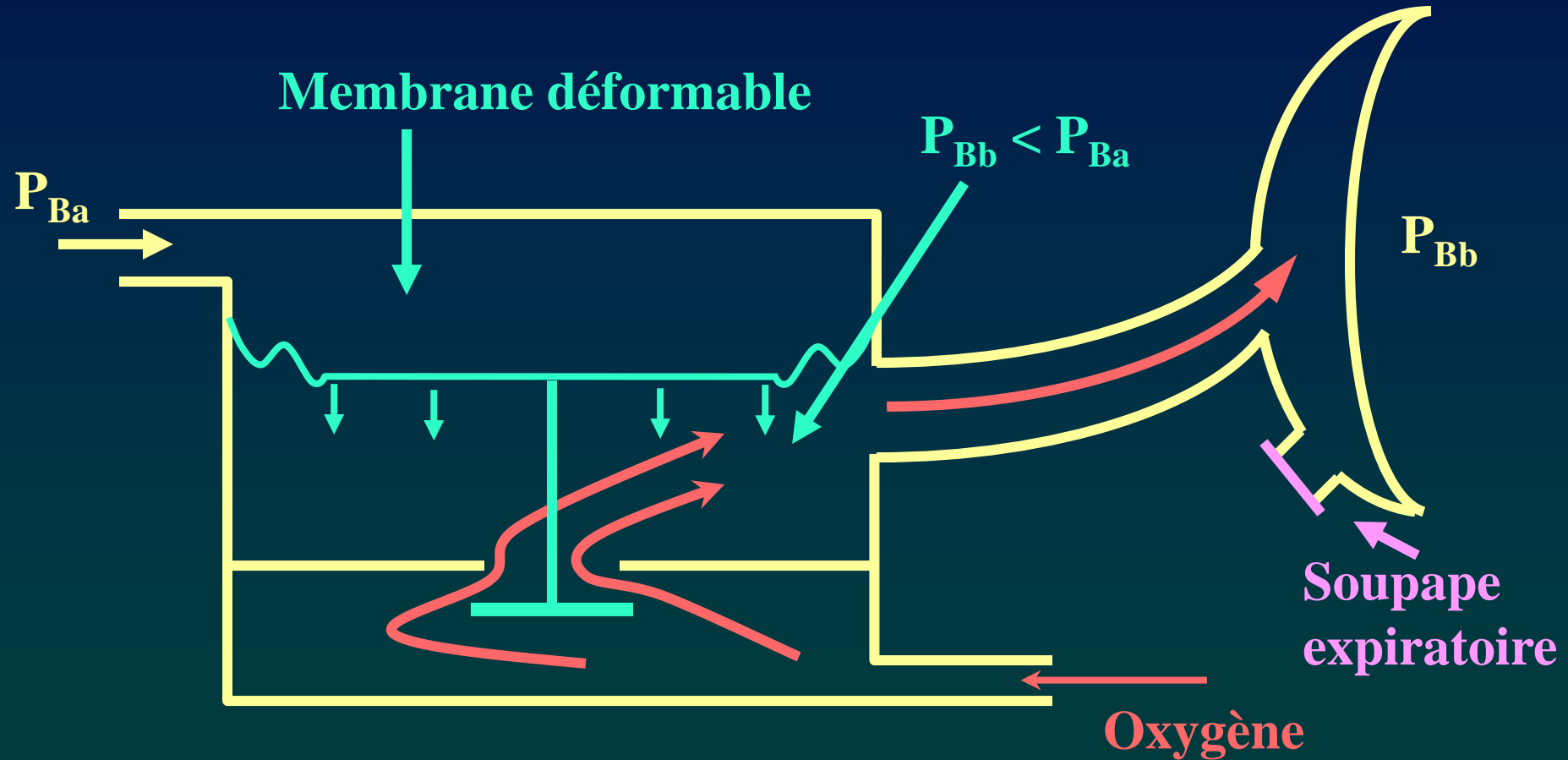
Systemes à débit continu

Systemes à la demande

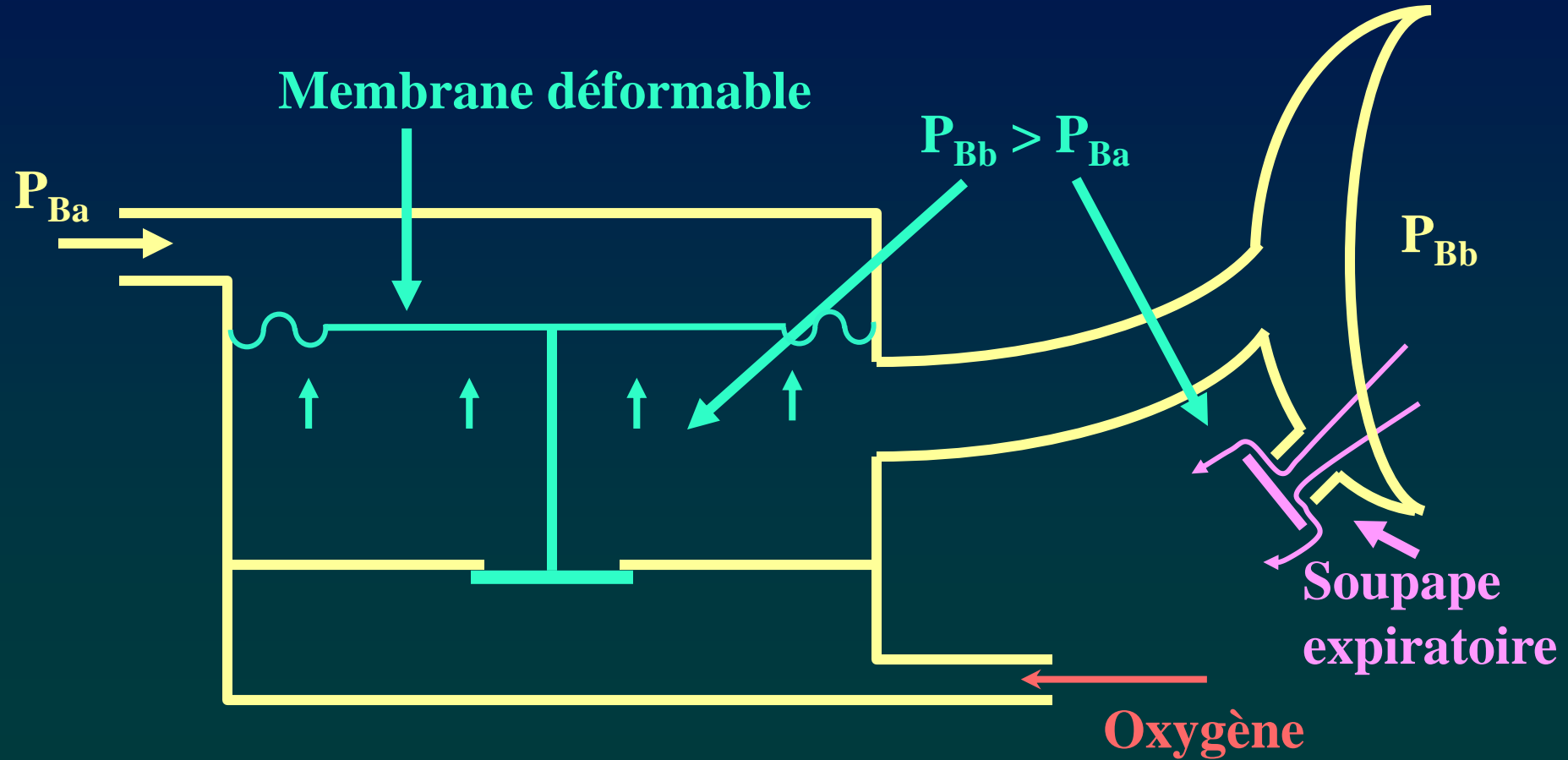
Principe du régulateur d'oxygène à la demande :  
asservissement de la fourniture d'oxygène à la demande inspiratoire  
du sujet (dépression inspiratoire) - au repos



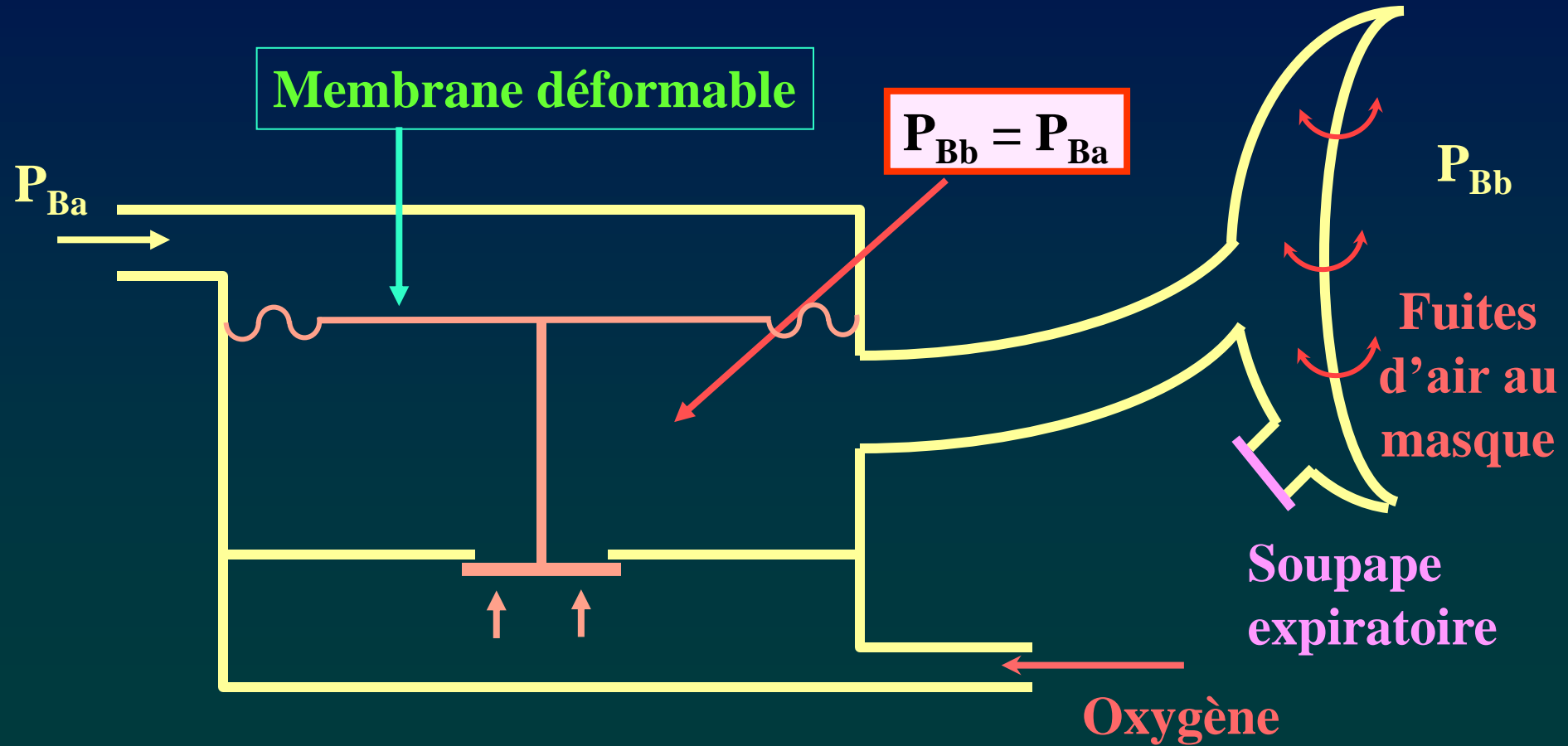
Principe du régulateur d'oxygène à la demande :  
asservissement de la fourniture d'oxygène à la demande inspiratoire  
du sujet (dépression inspiratoire) - à l'inspiration



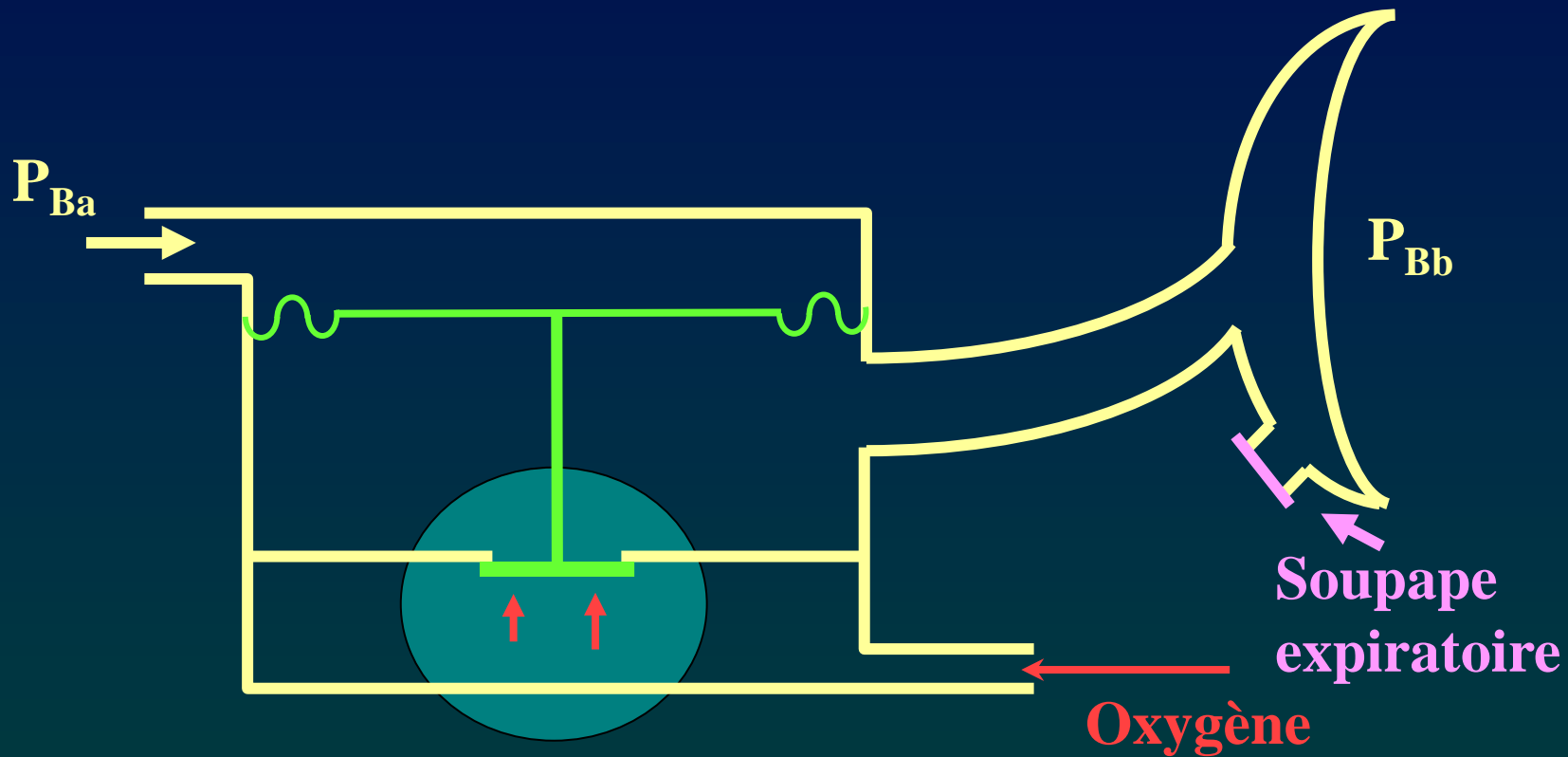
Principe du régulateur d'oxygène à la demande :  
fonctionnement à l'expiration



Principe du régulateur d'oxygène à la demande :  
**si masque non étanche, fonctionnement impossible**



# Les systèmes inhalateurs d'oxygène à la demande



L'ouverture du clapet contre la pression d'oxygène demande une certaine force, fournie par l'appareil ventilatoire. Elle augmente donc le travail mécanique ventilatoire.

## Masque-régulateur à mise en place rapide



Équipement destiné aux pilotes des avions de transport (civils ou militaires). 90% des avions de transport dans le monde sont équipés de ce modèle ou de ses dérivés (industrie française).





## Masque-régulateur à mise en place rapide



**Masque-régulateur à mise en place rapide,  
avec fonction anti-fumées**



### Information :

**Création, au sein de la Capacité de Médecine Aéronautique de Paris, de 2 « D.U. »**

- **physiologie en environnement aéronautique et moyens de protection**
- **expertise médicale des personnels navigants**

**« Capacité » = ne peuvent être admis que des Docteurs en Médecine**

**« D.U. » = pas d'exigence de titre de Docteur en Médecine**

### Contacts :

**Secrétariat de la Capacité de Médecine Aéronautique de Paris**

**Centre Universitaire des Saints-Pères**

**45, rue des Saints-Pères**

**75270 Paris Cedex 06**

**Téléphone : 01 76 53 46 06**

**[cmas@parisdescartes.fr](mailto:cmas@parisdescartes.fr)**

**[cmas@u-pariscite.fr](mailto:cmas@u-pariscite.fr)**

**Merci de votre attention !**



**Livres de référence :**

**Médecine Aérospatiale, J. Colin et J. Timbal éd.  
L'Expansion Scientifique Française, Paris, 680 p.**

**Physiologie Aéronautique, Henri Marotte  
S.E.E.S., Lognes, 2<sup>ème</sup> éd. 2022, 230 p.**

**Ersnting's Aviation Medicine, D. Rainford et D. Gradwell  
Oxford University Press Inc., New York**

**Contacts personnels de l'auteur :**

**Henri Marotte**

**Directeur de la Capacité de Médecine Aérospatiale de Paris  
Centre Universitaire des Saints-Pères**

**45, rue des Saints-Pères**

**75270 Paris Cedex 06**

**Téléphone : 01 76 53 46 06**

**Mèl (personnel) : [henri.marotte@orange.fr](mailto:henri.marotte@orange.fr)**

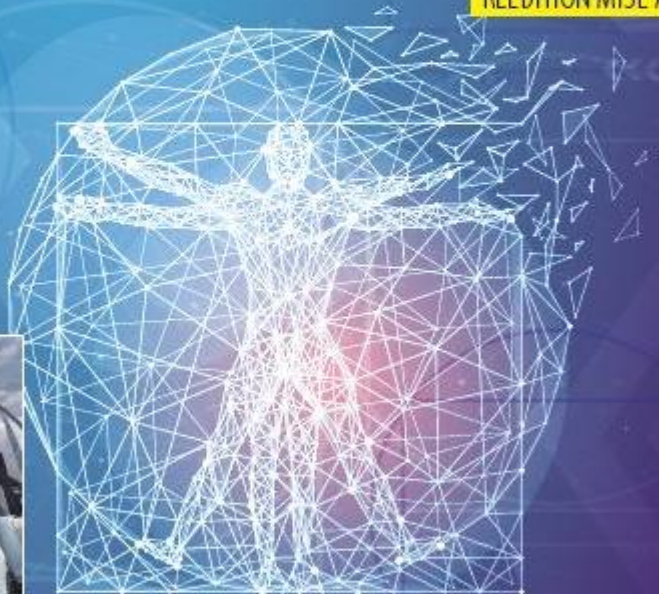
**(à la fac) : [cmass@u-pariscite.fr](mailto:cmass@u-pariscite.fr)**

PROFESSEUR HENRI MAROTTE

# PHYSIOLOGIE AÉRONAUTIQUE

COMPORTEMENT DE L'ORGANISME HUMAIN DANS L'ENVIRONNEMENT AÉRONAUTIQUE ET SPATIAL

RÉÉDITION MISE À JOUR



SEES

Livre écrit pour un public le plus large possible.  
Il explique ce qu'est le milieu aéronautique et décrit le comportement de l'homme, ses limites d'adaptation, les moyens de protection et leurs limites.  
Cette étude traite de l'altitude, des écarts de température observés en aéronautique, des accélérations et des perturbations (illusions) sensorielles.  
Le dernier chapitre permet au lecteur de s'échapper de l'atmosphère et de la pesanteur terrestres et l'invite au voyage dans l'espace.

**livre disponible**

- auprès de l'auteur ([henri.marotte@orange.fr](mailto:henri.marotte@orange.fr))
- aux éditions SEES,  
Aérodrome de Lognes-Émerainville  
77185 Lognes (France)

**au prix de 50 €**

