

# L'avion est-il un monde à part ?



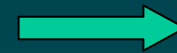
**Henri Marotte**  
**Val-de-Grâce, 21 Juin 2007**

# L'avion est-il un monde à part ?



Oui car l'avion vous transporte rapidement d'un point à l'autre de notre planète, en traversant un milieu hostile, **la haute atmosphère**, où la vie n'est pas possible.

La cabine de l'avion vous isole de ce milieu hostile, au prix de techniques onéreuses. La protection contre l'altitude n'est pas totale.



Altitude &  
Fonction  
respiratoire

L'avion est en mouvement par rapport à l'environnement : les accélérations ne sont pas neutres sur le corps humain.



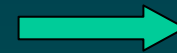
Accélérations &  
Fonction  
cardiovasculaire

# L'avion est-il un monde à part ?



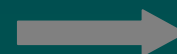
Oui car l'avion vous transporte rapidement d'un point à l'autre de notre planète, en traversant un milieu hostile, **la haute atmosphère**, où la vie n'est pas possible.

La cabine de l'avion vous isole de ce milieu hostile, au prix de techniques onéreuses. La protection contre l'altitude n'est pas totale.



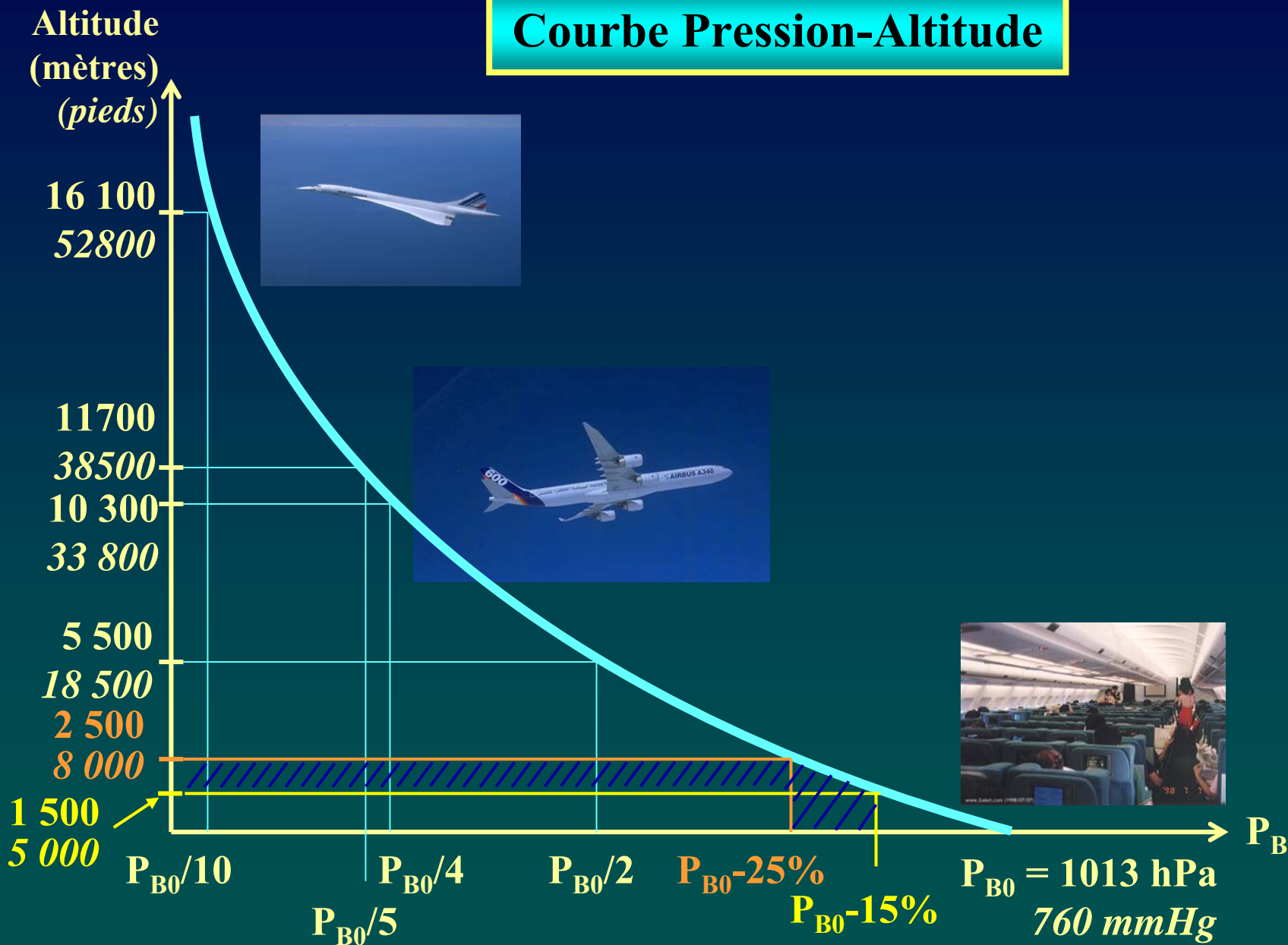
Altitude &  
Fonction  
respiratoire

L'avion est en mouvement par rapport à l'environnement : les accélérations ne sont pas neutres sur le corps humain.



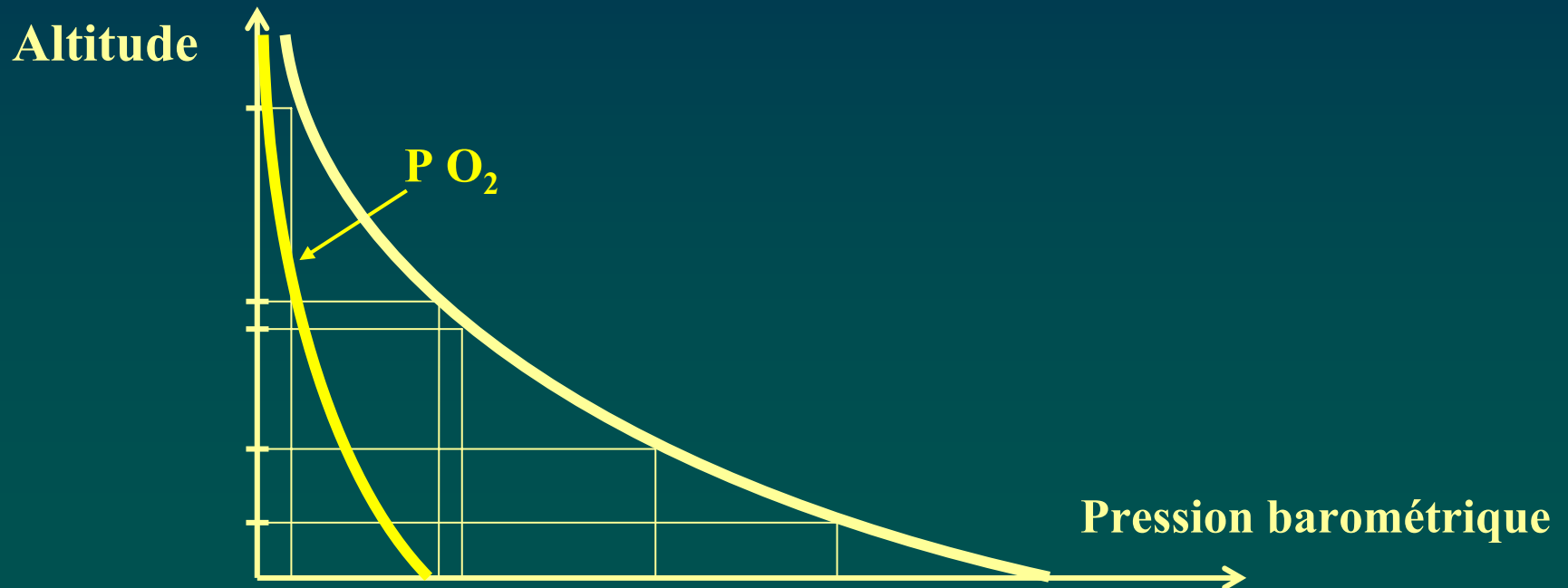
Accélérations &  
Fonction  
cardiovasculaire

# Courbe Pression-Altitude



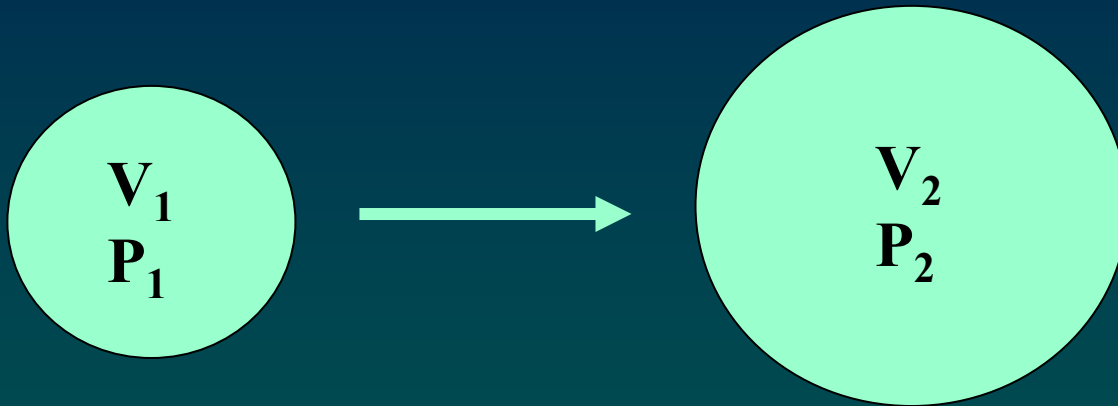
# Composition gazeuse de l'atmosphère terrestre

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



## Altitude et physique des gaz : loi de Boyle-Mariotte

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



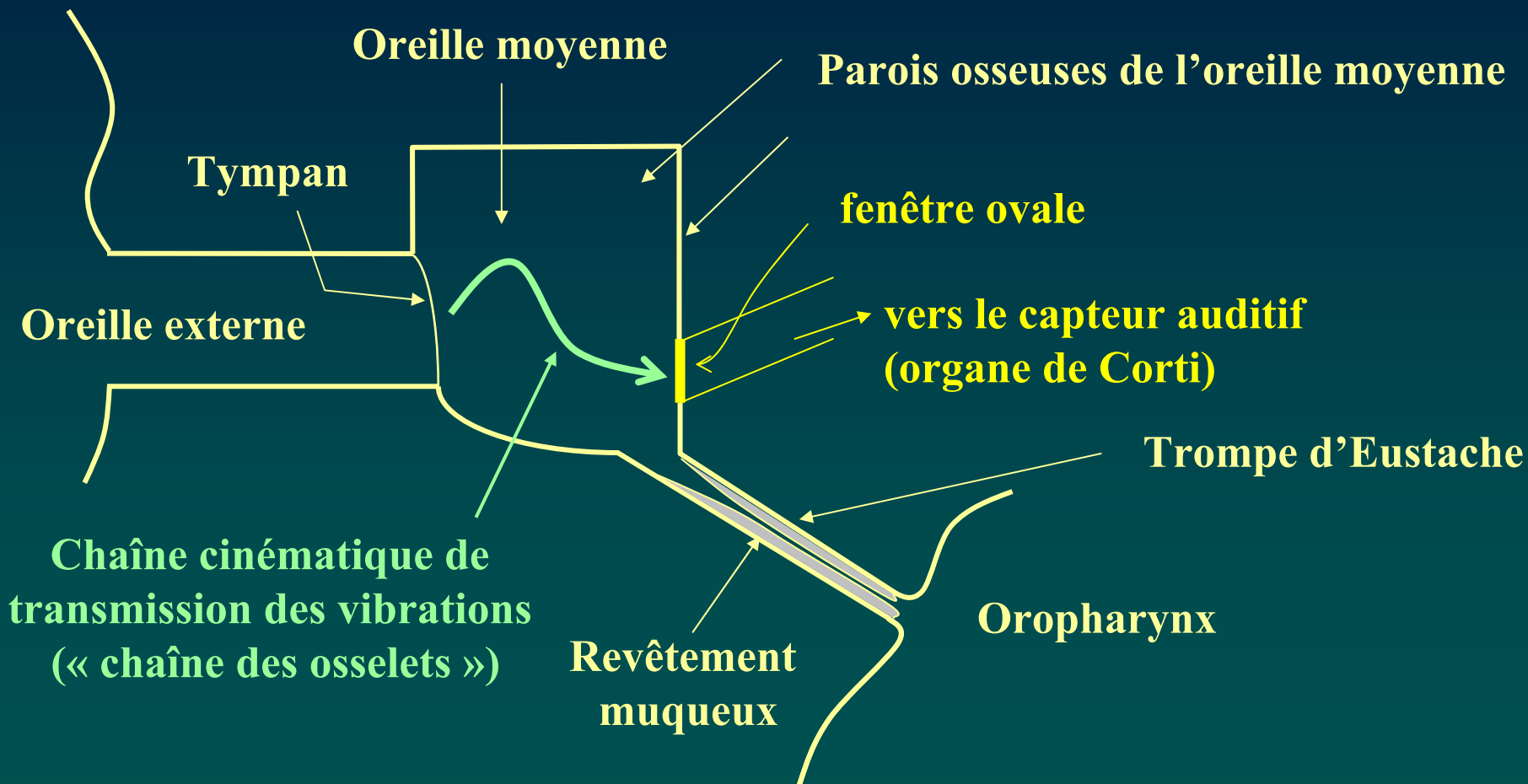
$$V_1 \cdot P_1 = V_2 \cdot P_2$$

« si V augmente,  
P diminue »

*Application physiopathologique : les barotraumatismes*

# Exemple : l'otite barotraumatique

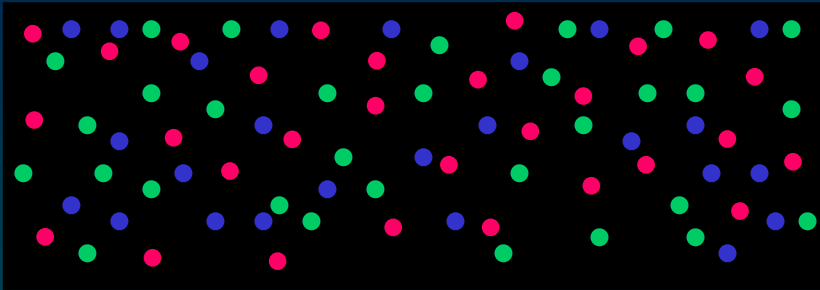
## Représentation schématique de l'oreille moyenne



## Altitude et physique des gaz : 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,**

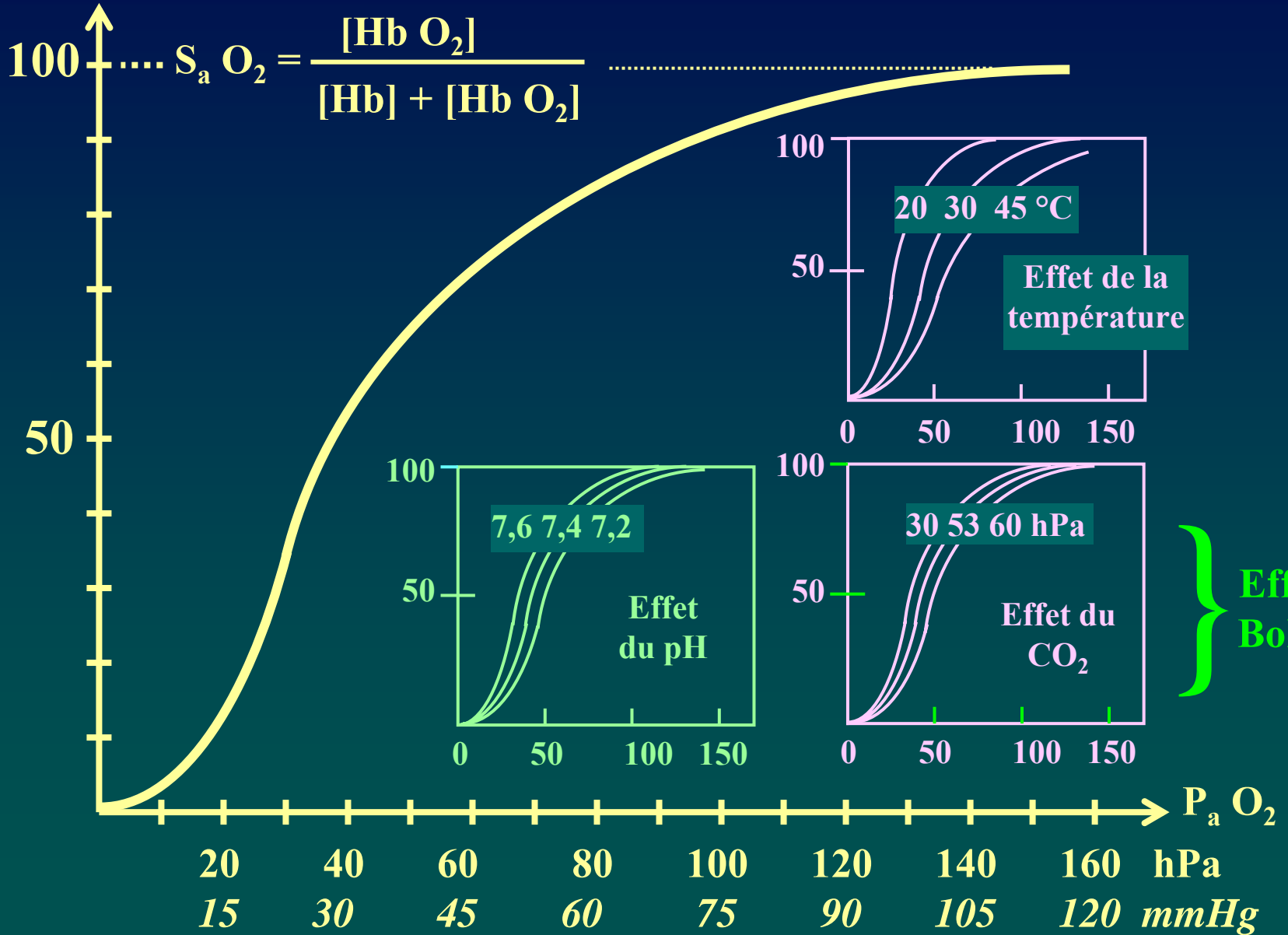
- la pression partielle d'un gaz est égale au produit de sa fraction par la pression totale du mélange gazeux :  $P_{O_2} = F_{O_2} * P_B$



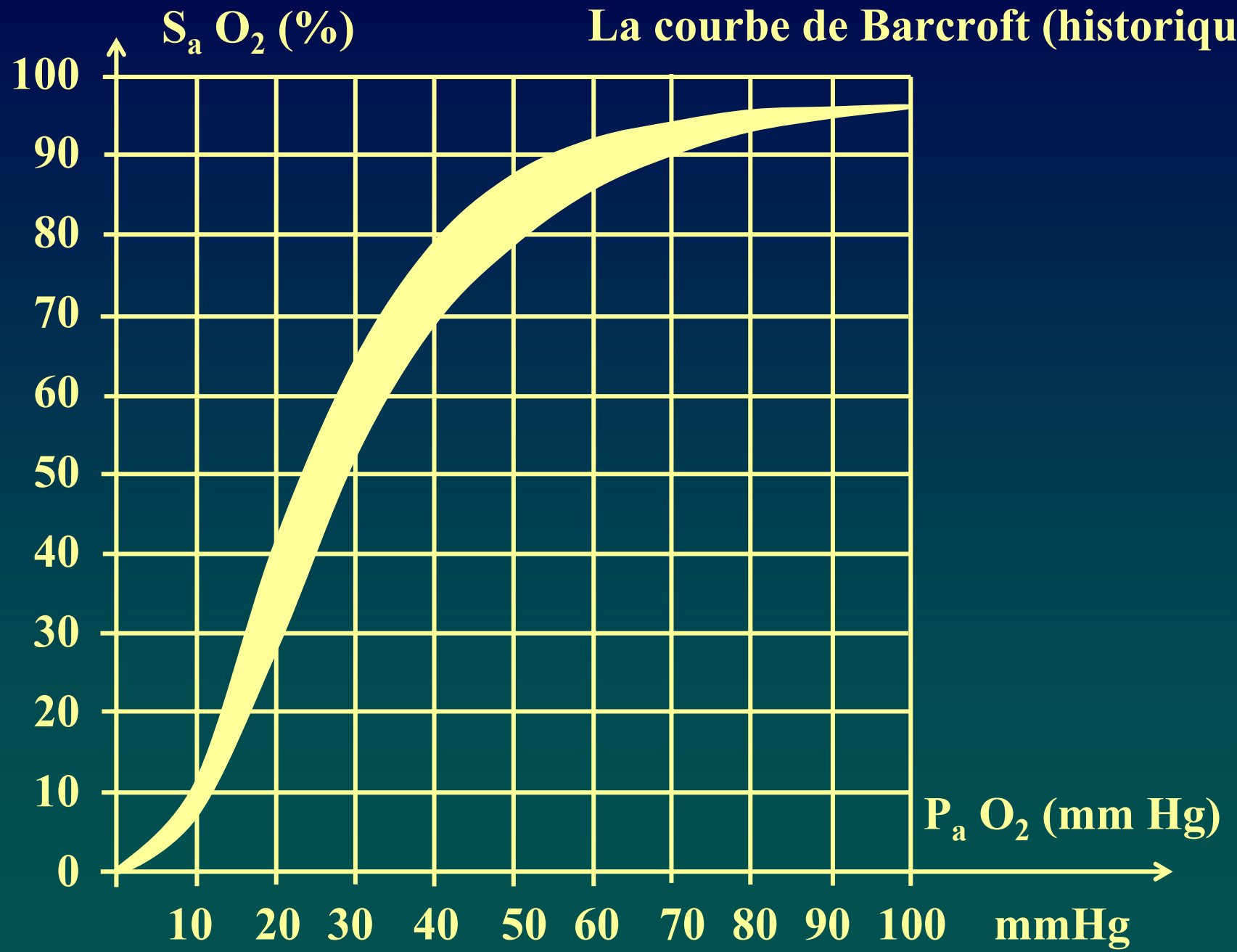
# Altitude et gaz du sang (oxygène)

$S_a O_2$  (%)

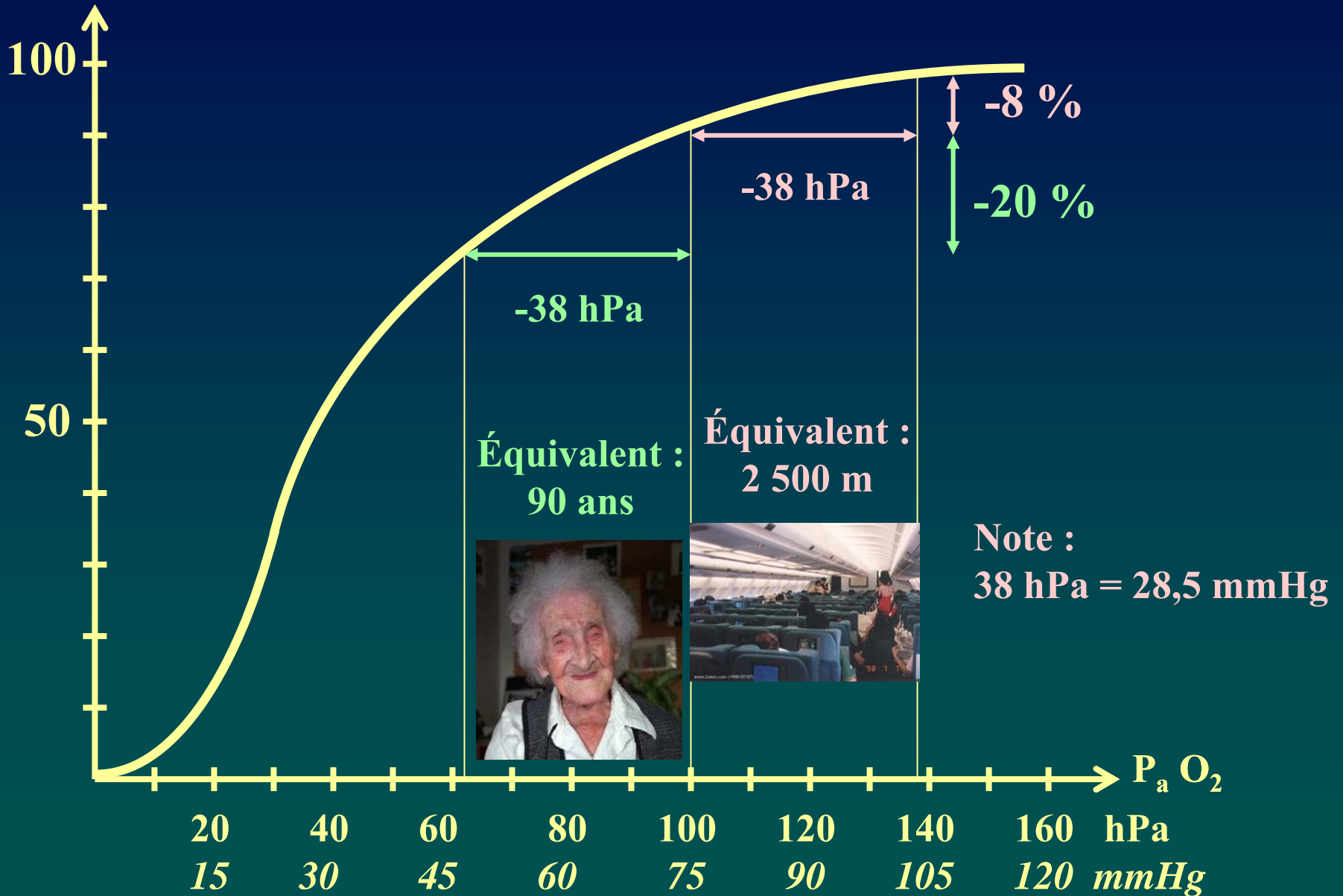
$$S_a O_2 = \frac{[Hb O_2]}{[Hb] + [Hb O_2]}$$



# La courbe de Barcroft (historique)



$S_a O_2$  (%)



*Effets physiologiques de l'hypoxie aiguë d'altitude : classifications selon le type (d'après 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>Type 5</b>	<b>Court-circuit artério-veineux</b>	
<b>Sang</b>	<b>Type 6</b>	<b>Hypoxie « anémique »</b>	<b>CO : feu cabine</b>
	<b>Type 7</b>	<b>Insuffisance circulatoire (localisée ou généralisée)</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>

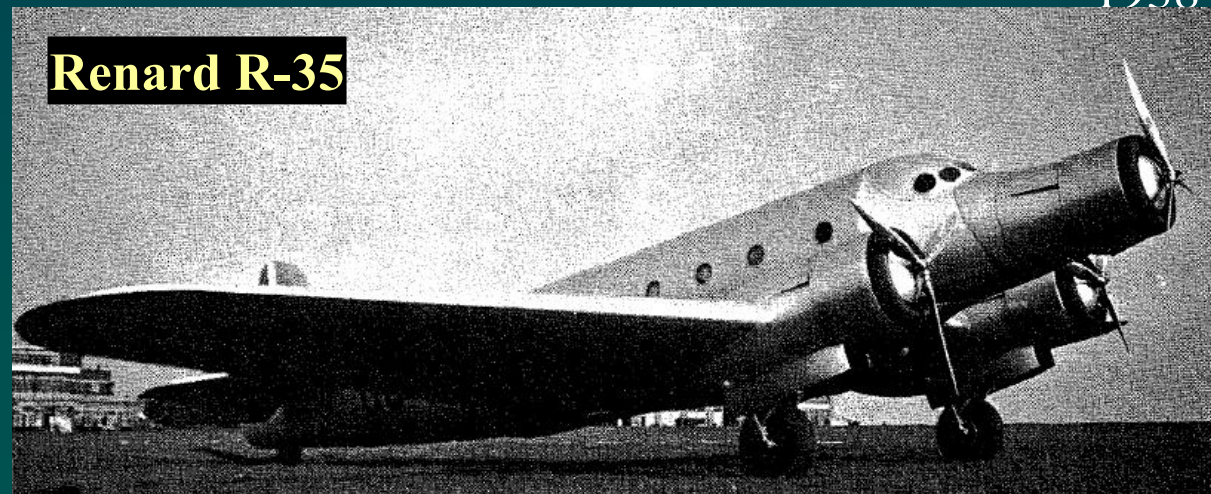
# Les cabines pressurisées

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

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

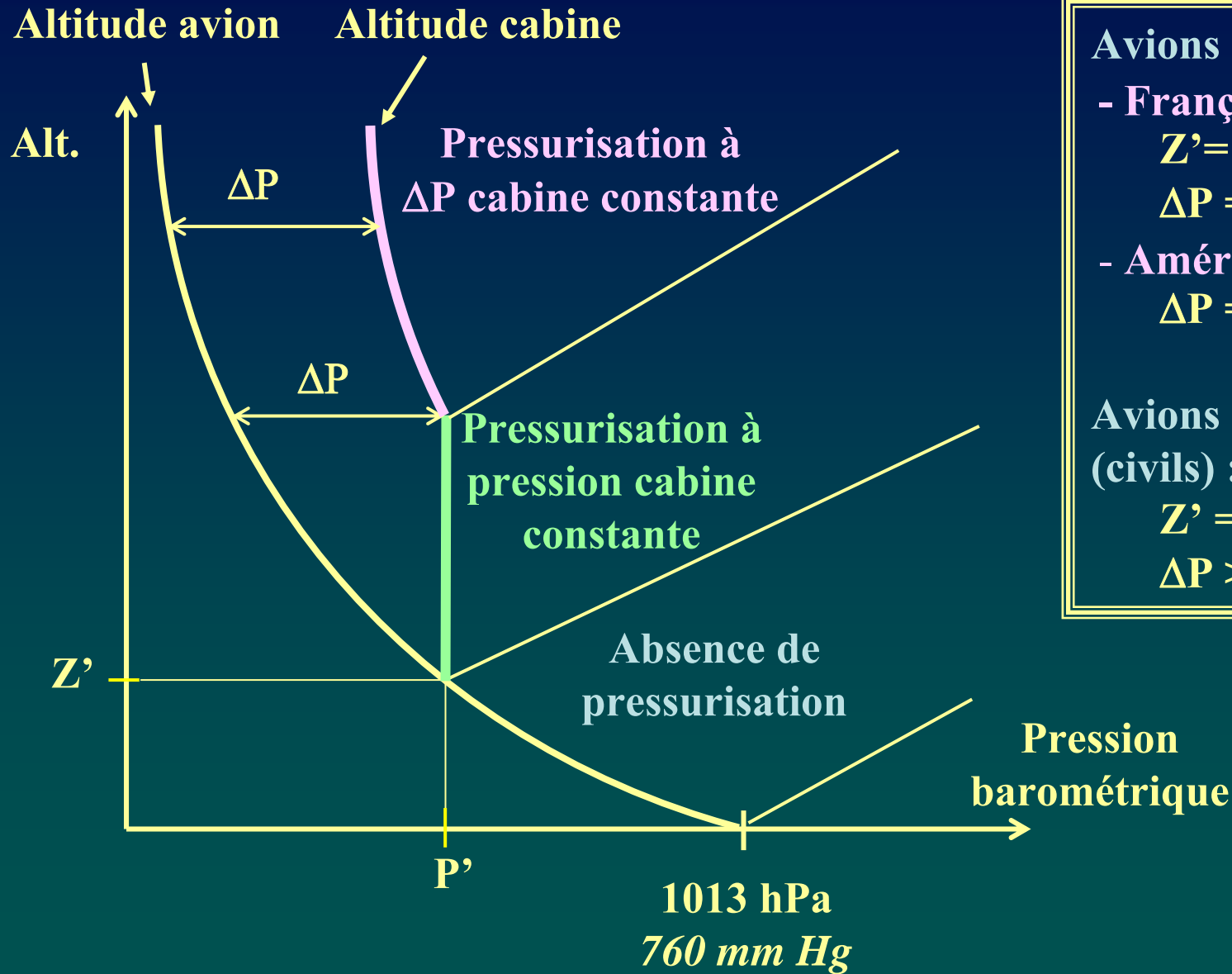


Boeing 307 « Stratoliner »,  
1938



**Renard R-35**

# cabines pressurisées : principes de fonctionnement



Avions de chasse :

- Français :

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

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

- Américains :

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

Avions de transport  
(civils) :

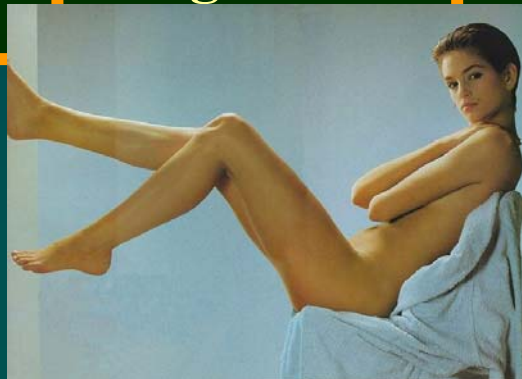
$Z' = 0\text{ à }1\,500\text{ m}$

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

## 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



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

**OTAN : STANAG 3198 AMD**  
**Paragraphe 4.a, alinéas (1), (2) et (3)**



**(résumé) : lorsque l'altitude dans la cabine dépasse 12 000 ft (3 650 m), les personnels doivent être munis d'un système inhalateur d'oxygène.**





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

**international : CS-25 (Europe) et FAR 25 (USA), §841**  
**L'altitude de rétablissement dans la cabine doit être**  
**< 8 000 ft en conditions normales de vol, et < 15 000 ft**  
**en cas de panne *raisonnablement* probable (i.e.  $p < 10^{-5}$ ).**

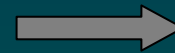


# L'avion est-il un monde à part ?



Oui car l'avion vous transporte rapidement d'un point à l'autre de notre planète, en traversant un milieu hostile, la haute atmosphère, où la vie n'est pas possible.

La cabine de l'avion vous isole de ce milieu hostile, au prix de techniques onéreuses. La protection contre l'altitude n'est pas totale.



Altitude &  
Fonction  
respiratoire

L'avion est en mouvement par rapport à l'environnement : les accélérations ne sont pas neutres sur le corps humain.



Accélérations &  
Fonction  
cardiovasculaire

**Premières descriptions historiques :**

**Henry Head, 14 nov. 1918**

**Major V.B., ..., after an unsuccessful attempt to discover the smallest horizontal banked circle in which a Sopwith triplane could be spun, he got the machine into a turn at 3,000 ft.**

**On starting the second turn, “the sky appeared to go grey”.**

**“A mist gradually arose like going under anaesthetic”, and he “fainted”. It was not an unpleasant sensation. When he came to himself, he was flying over a village about a**



**mile from the place of the experiment. The unconsciousness must have lasted about 20 seconds. During the first turn “g” reached 4,5, during the second, 4,6. The turn was about 140 feet at a speed of 114 miles an hour \*.**

**\*6,2 G**

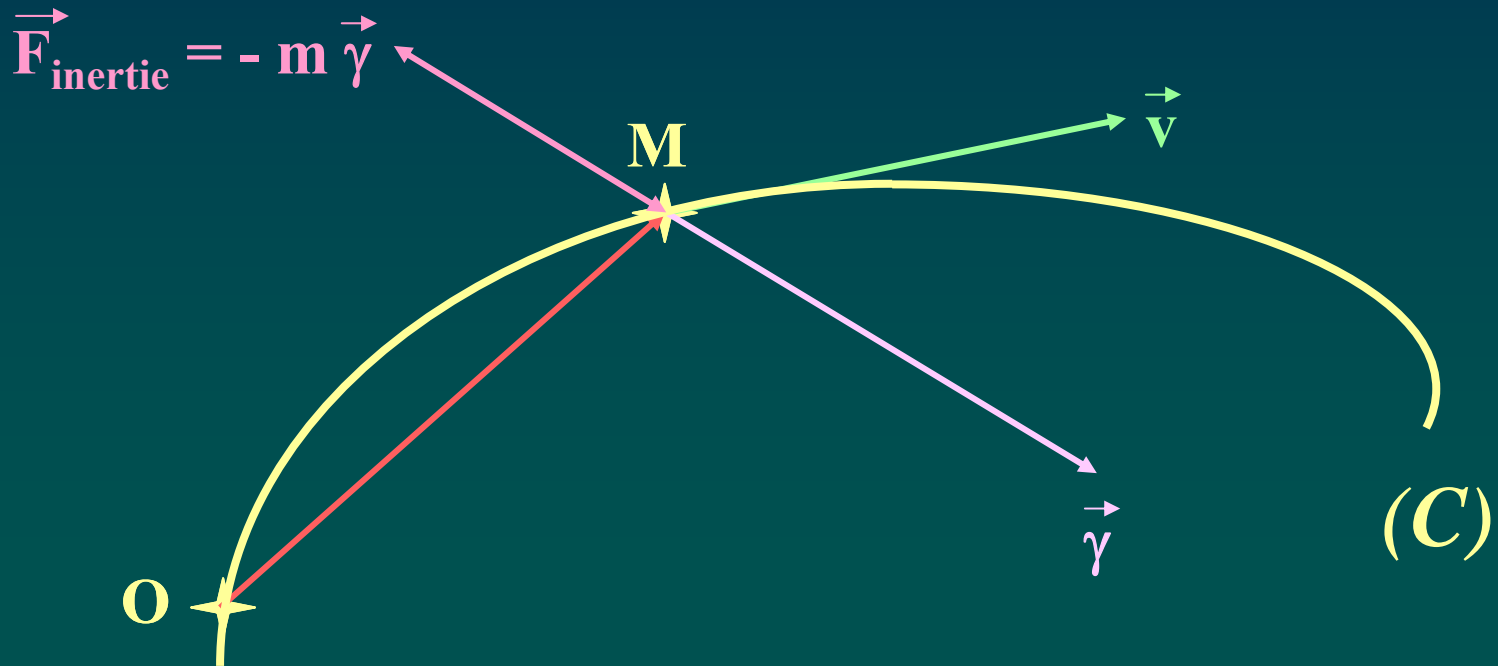
## Accélérations : définitions

**L'accélération :** est la variation (dérivée) de la vitesse. Elle est exprimée en mètres par seconde, par seconde ( $\text{m/s/s}$ ,  $\text{m/s}^2$ ,  $\text{m.s}^{-2}$ ), ou en « G ».

$$\vec{\gamma} = \frac{d(\vec{v})}{dt} = \frac{d^2(\overrightarrow{OM})}{dt^2}$$

est exprimée en mètres par seconde, par seconde ( $\text{m/s/s}$ ,  $\text{m/s}^2$ ,  $\text{m.s}^{-2}$ ), ou en « G ».

**La force d'inertie** est opposée à l'accélération.



# Les accélérations

L'accélération est mesurée en « mètre par seconde carrée » ( $\text{m.s}^{-2}$ ).

De façon plus intuitive, elle est comparée à l'accélération d'un objet qui tombe au niveau de la surface de la terre.



L'accélération de la pesanteur est proche de  $10 \text{ m.s}^{-2}$ .

$1 \text{ G} = 10 \text{ m.s}^{-2}$  - exactement :  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$  (à Paris)

# Les accélérations

**En d'autres termes, vous comparerez la force d'inertie à laquelle vous êtes soumis en raison d'une accélération à votre poids à la surface de la terre.**

**Exemple : vous pesez 70 kg.**

**Sous une accélération de 5 G ( $49 \text{ m.s}^{-2}$ ), votre poids apparent est de 350 kg (votre siège doit résister à 350 kg).**

# Les accélérations

Une application ?

La résistance d'un siège pour passagers de l'aviation commerciale. Poids « standard » du passager : 77 kg (+ le poids du siège)

L'hypothèse de « décélération » maximale est de 16 G.

Les fixations du siège au plancher doivent résister à

$77 \text{ kg (+ le poids du siège)} * 16 \text{ G}$   
= plus de 1,5 tonne-force  
(15 « kN »)

(pour le seul passager - + le siège).

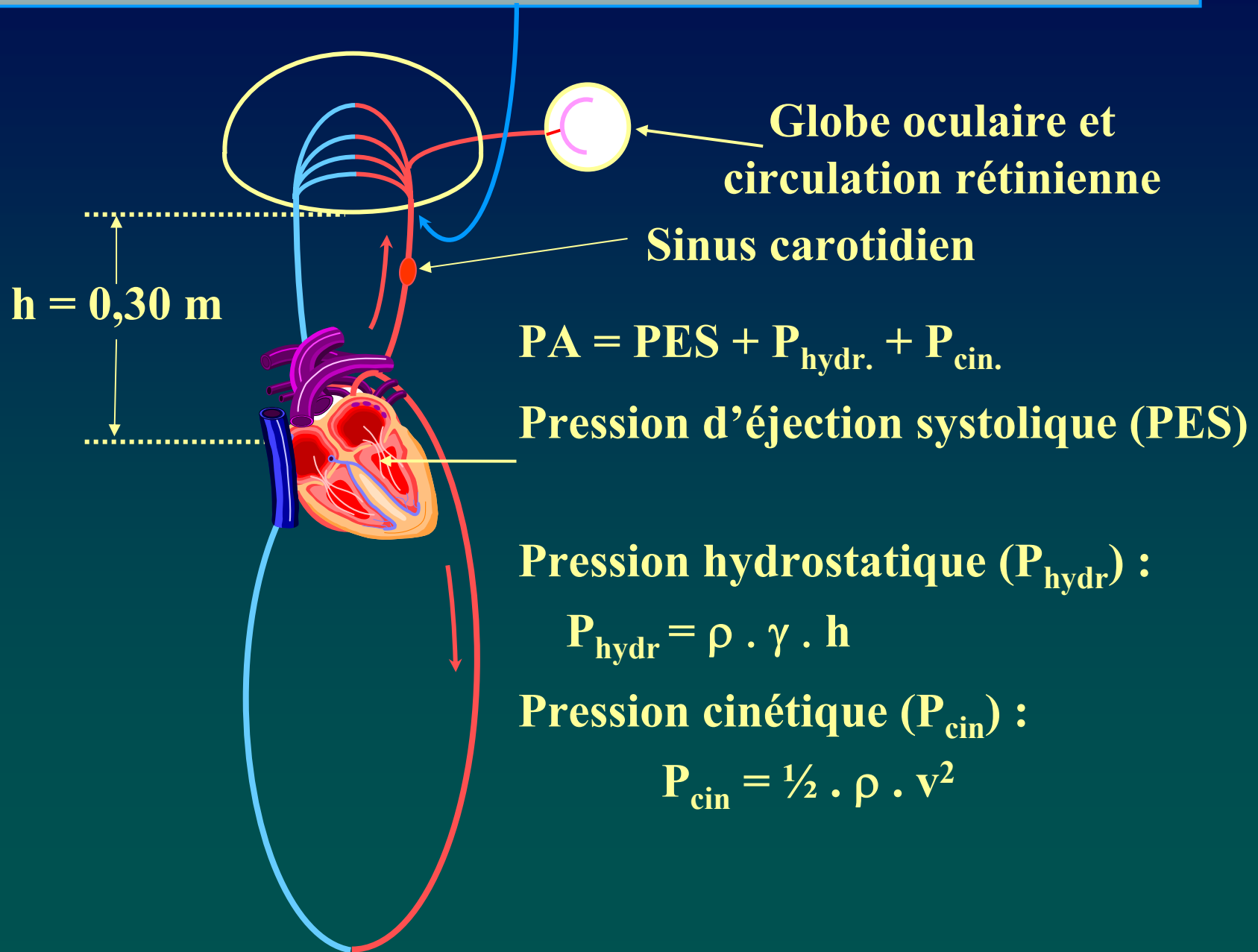


# Les accélérations

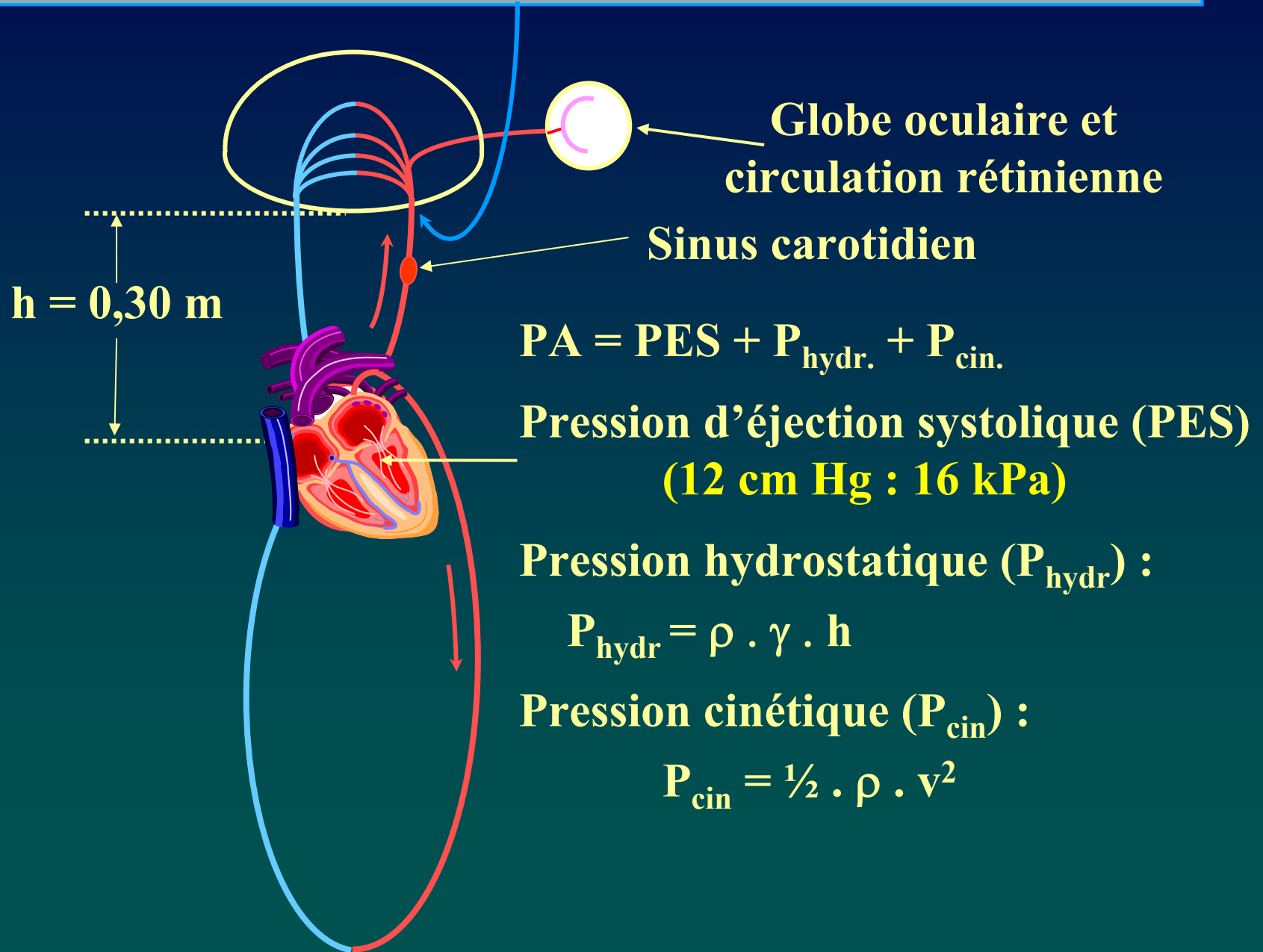
L'application physiologique



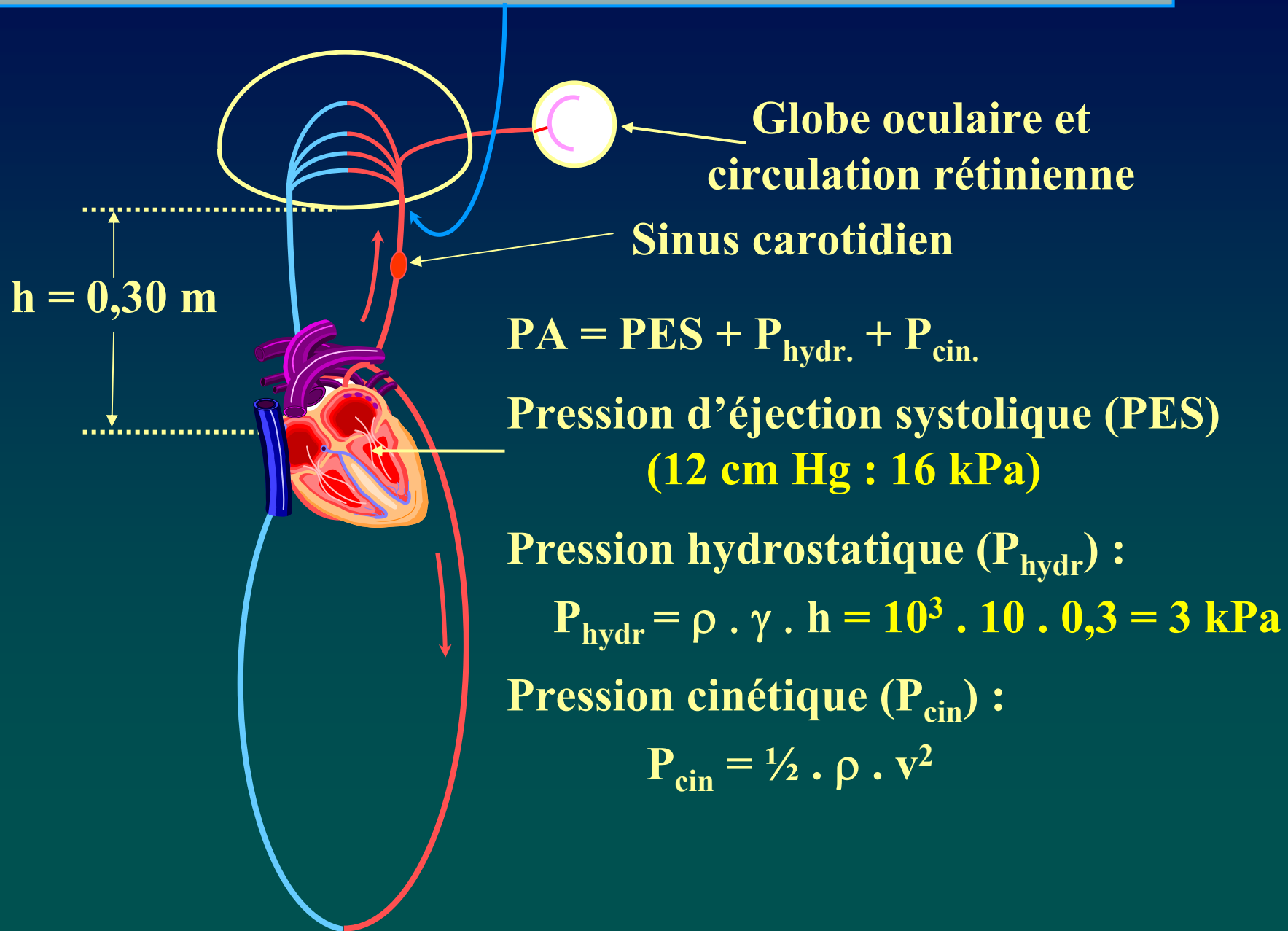
# Évaluation de la pression artérielle à l'entrée dans le cerveau :



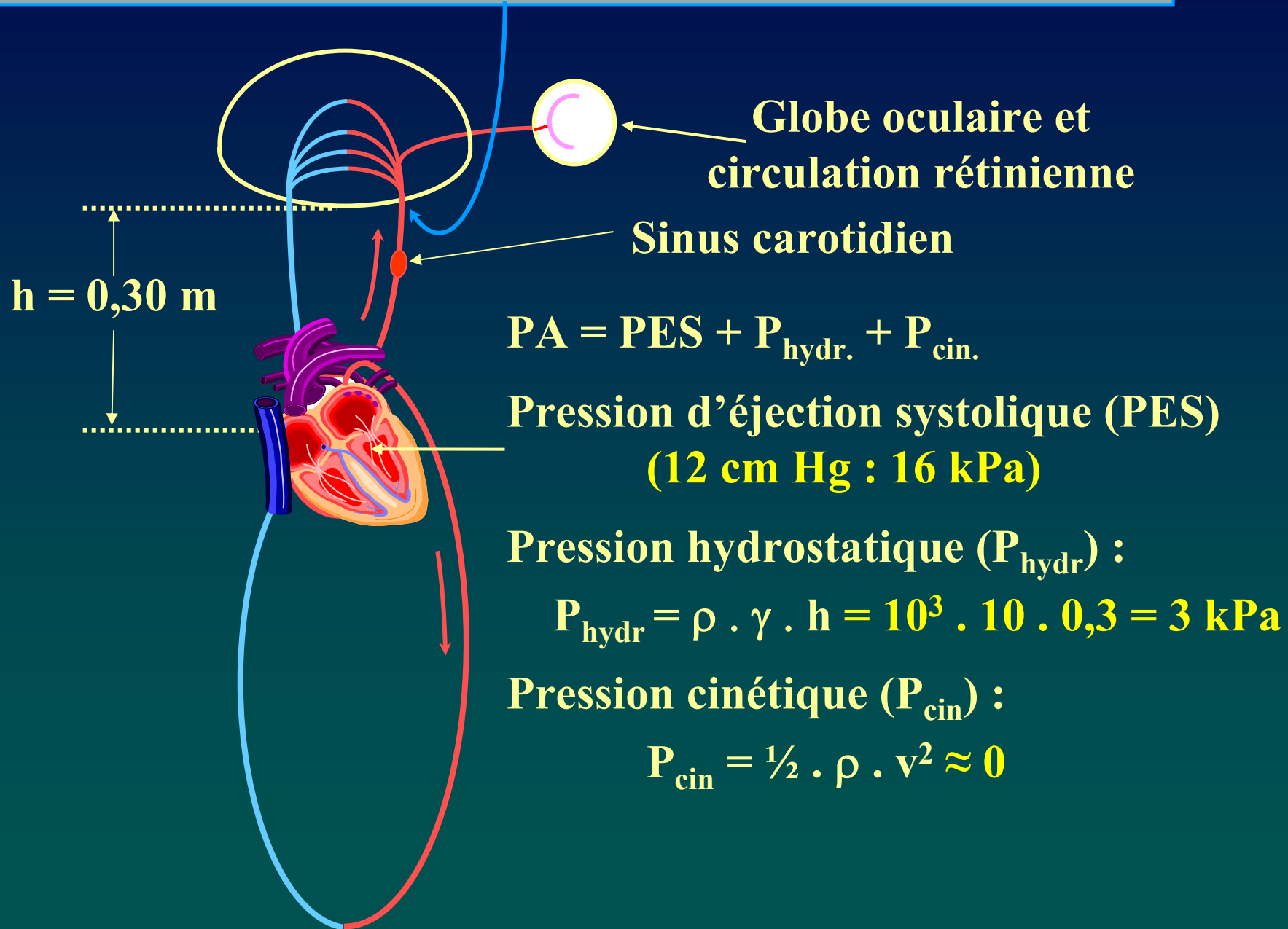
# Évaluation de la pression artérielle à l'entrée dans le cerveau :



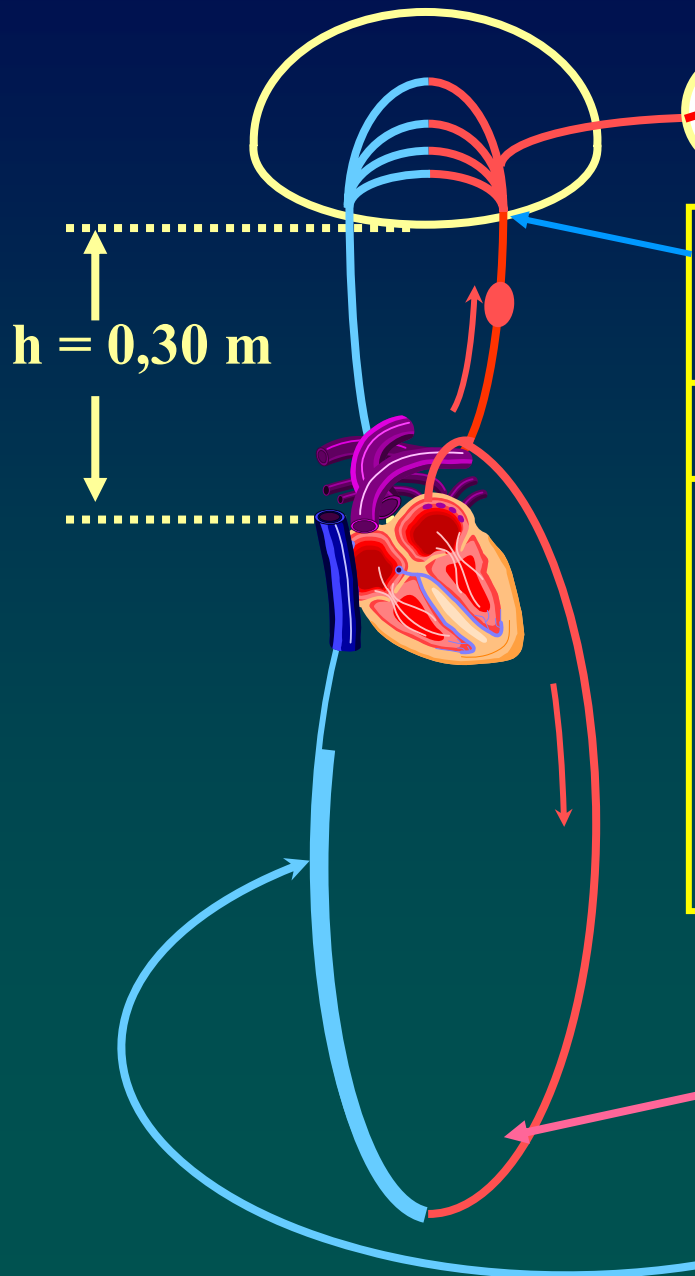
# Évaluation de la pression artérielle à l'entrée dans le cerveau :



# Évaluation de la pression artérielle à l'entrée dans le cerveau :



# Évaluations de la pression artérielle :



Globe oculaire et circulation rétinienne

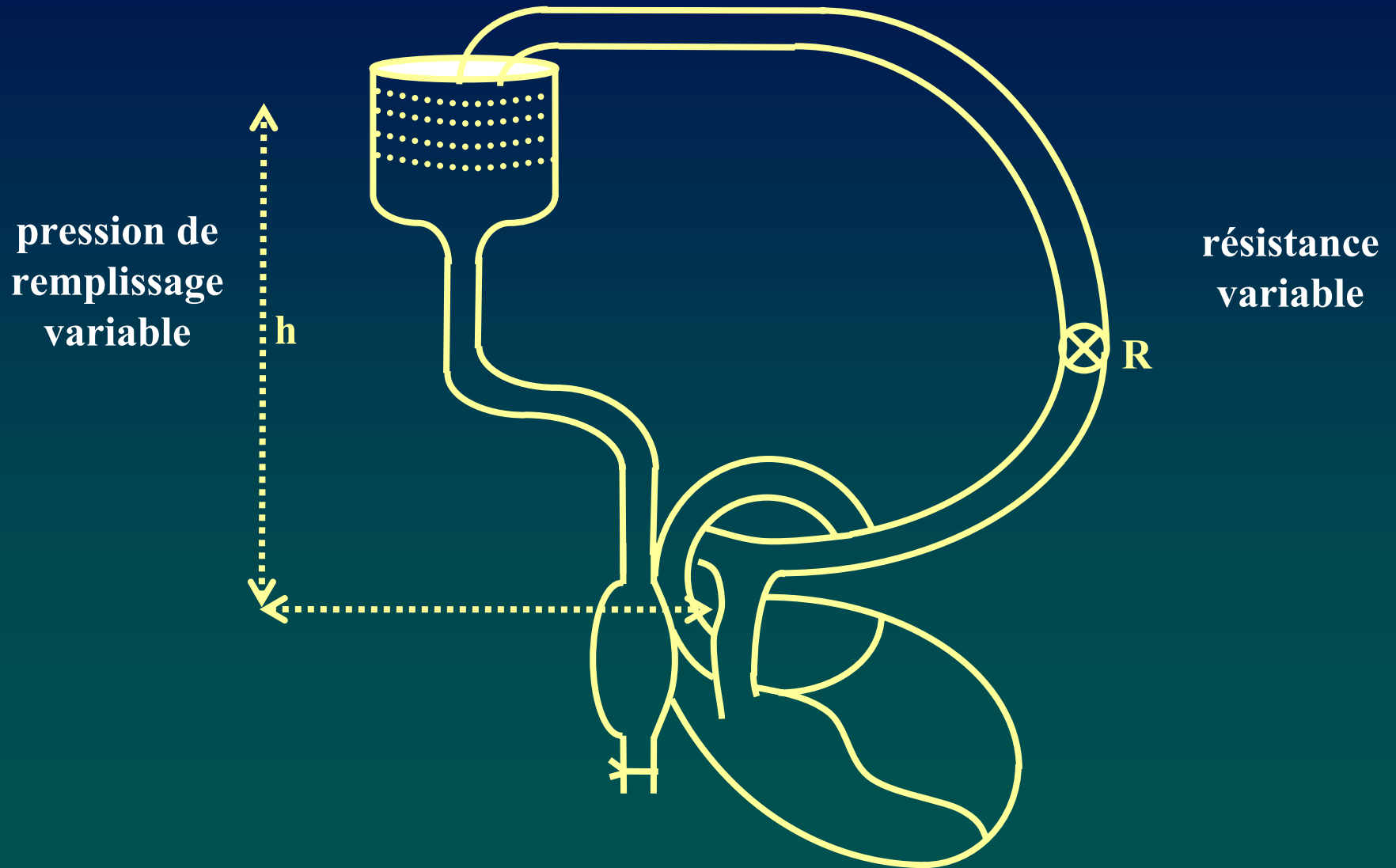
Calcul de la pression dans l'artère carotide, à l'entrée de la circulation cérébrale

Accélération (G)	1	3	5	7
PES (kPa)	16	16	16	16
$P_{hydr(viron)}$	-3	-9	-15	-21
$P_{cin(viron)}$	$\approx 0$	$\approx 0$	$\approx 0$	$\approx 0$
PA (kPa)	13	7	1	

Sous facteur de charge :

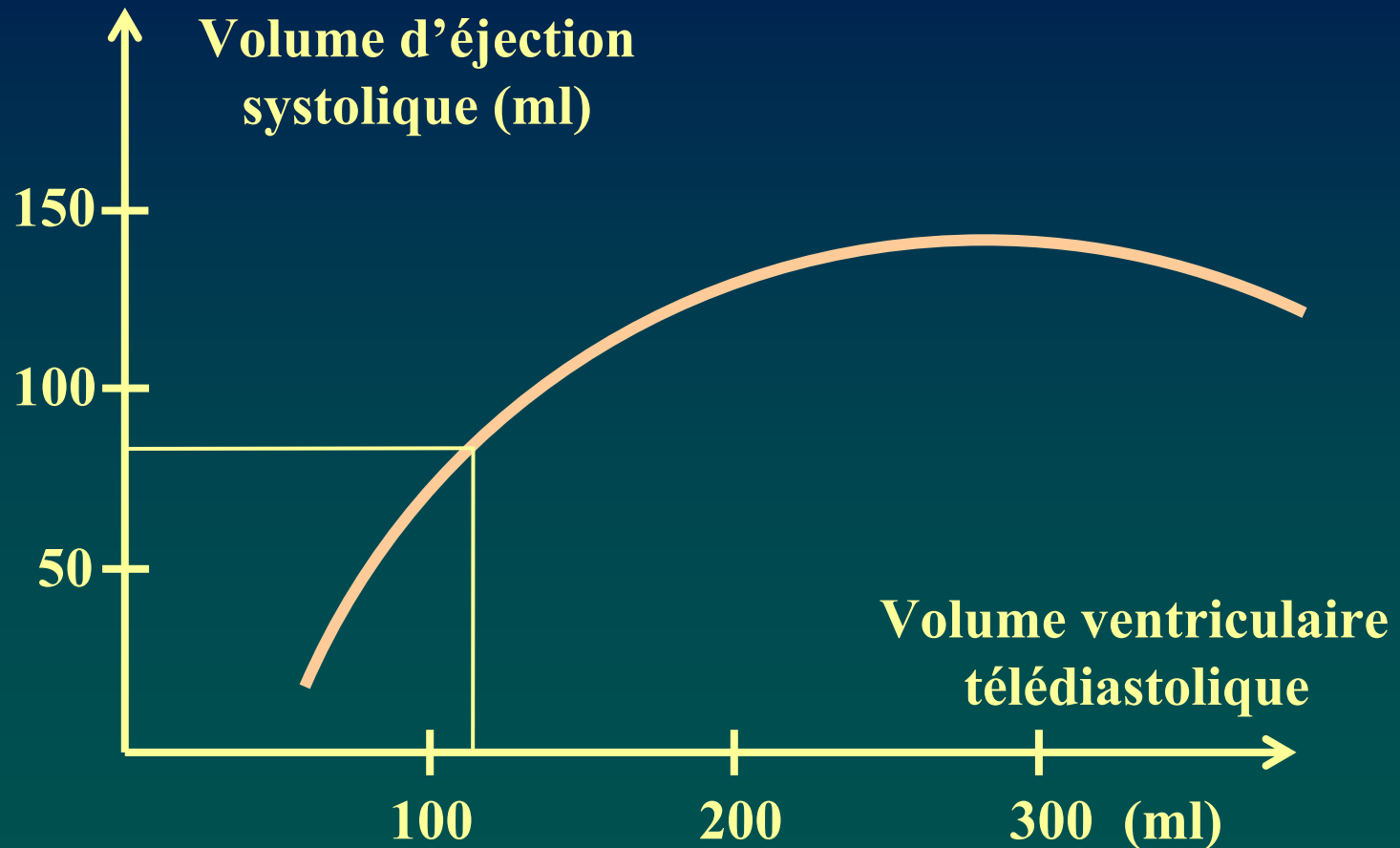
- Déplacement sanguin vers les parties déclives du corps
- Diminution du retour veineux

# La « loi du cœur » (ou « loi de Franck-Starling »)

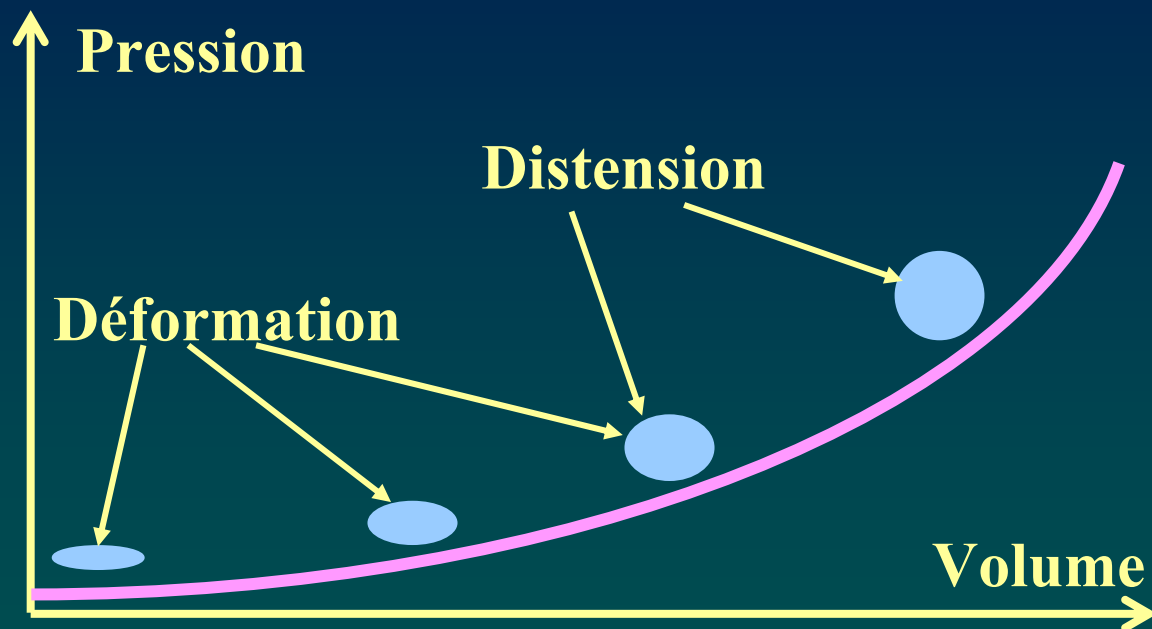


## La « loi du cœur » (ou « loi de Franck-Starling »)

La « loi du cœur » : l'énergie de la contraction est réglée par la longueur de la fibre juste avant la contraction (adaptation *intrinsèque*)



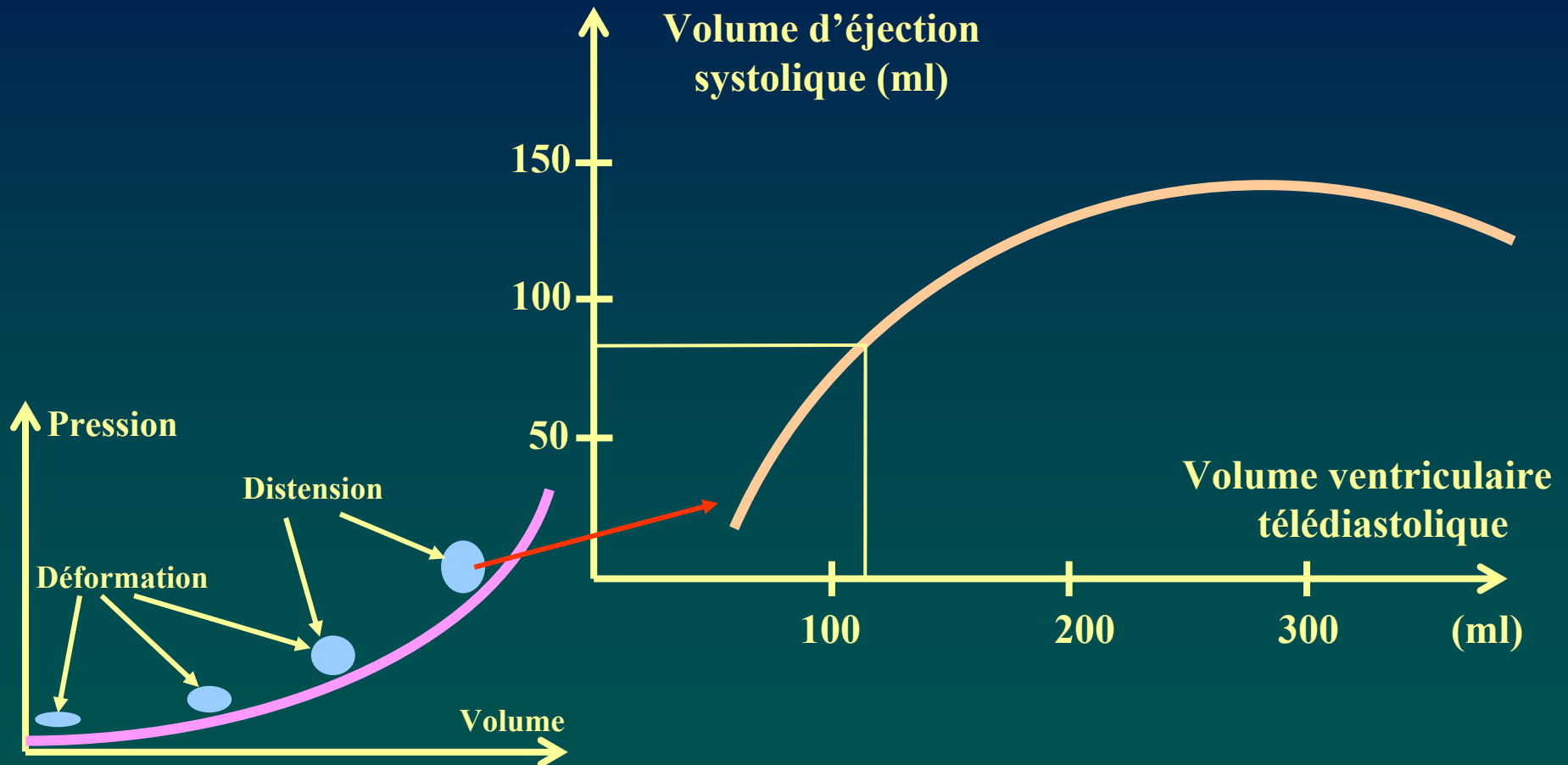
# Physiologie veineuse basique

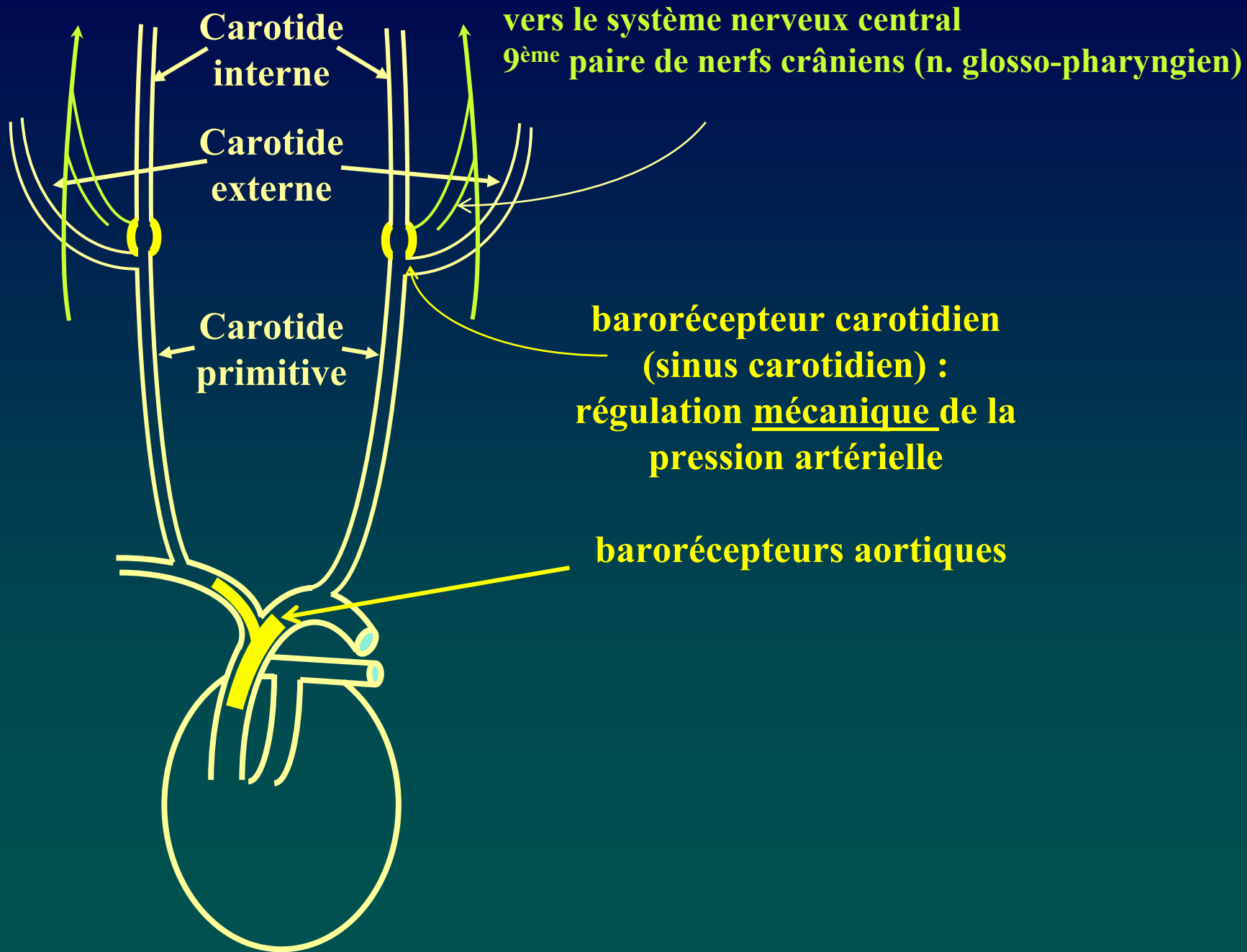


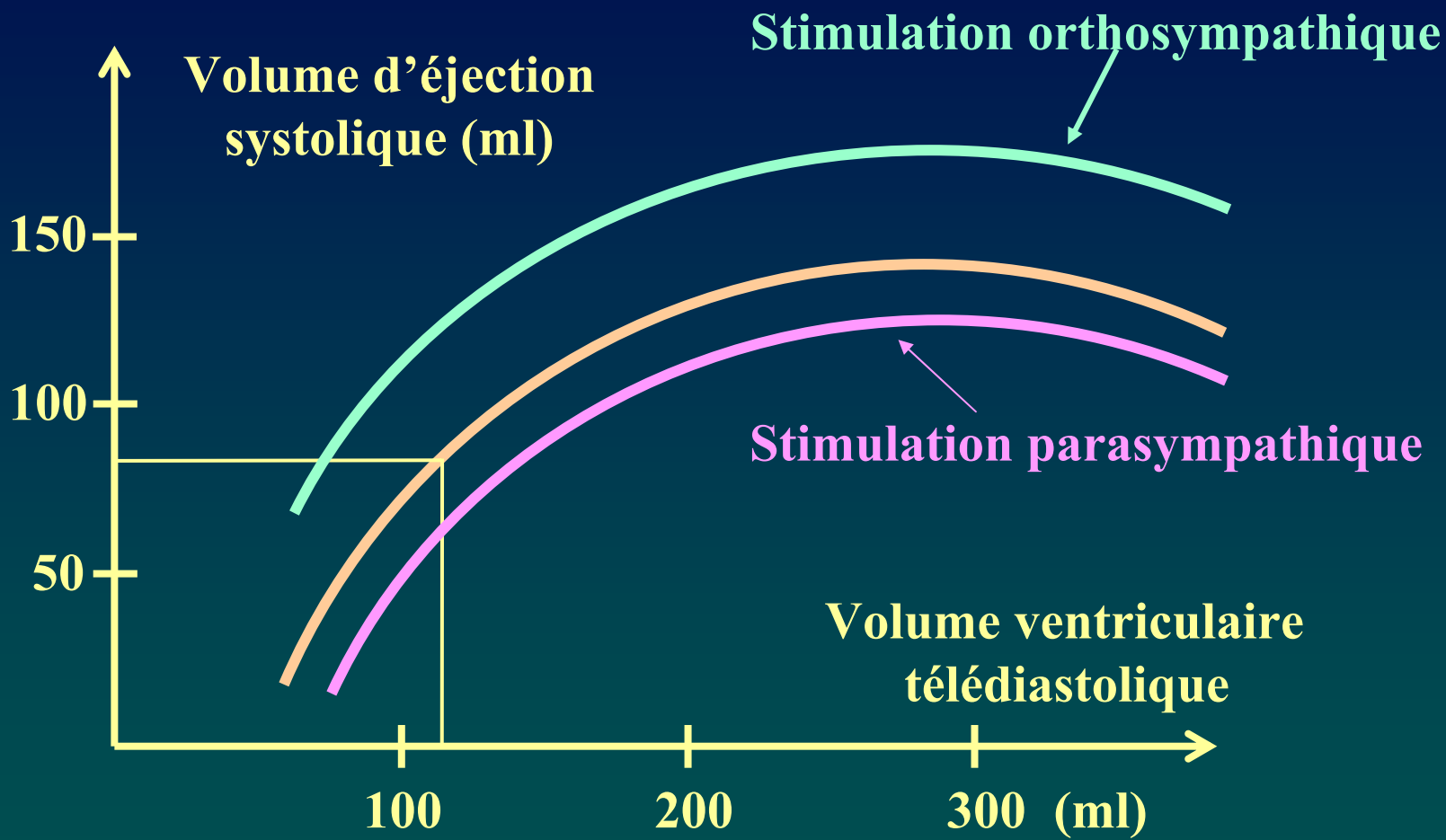


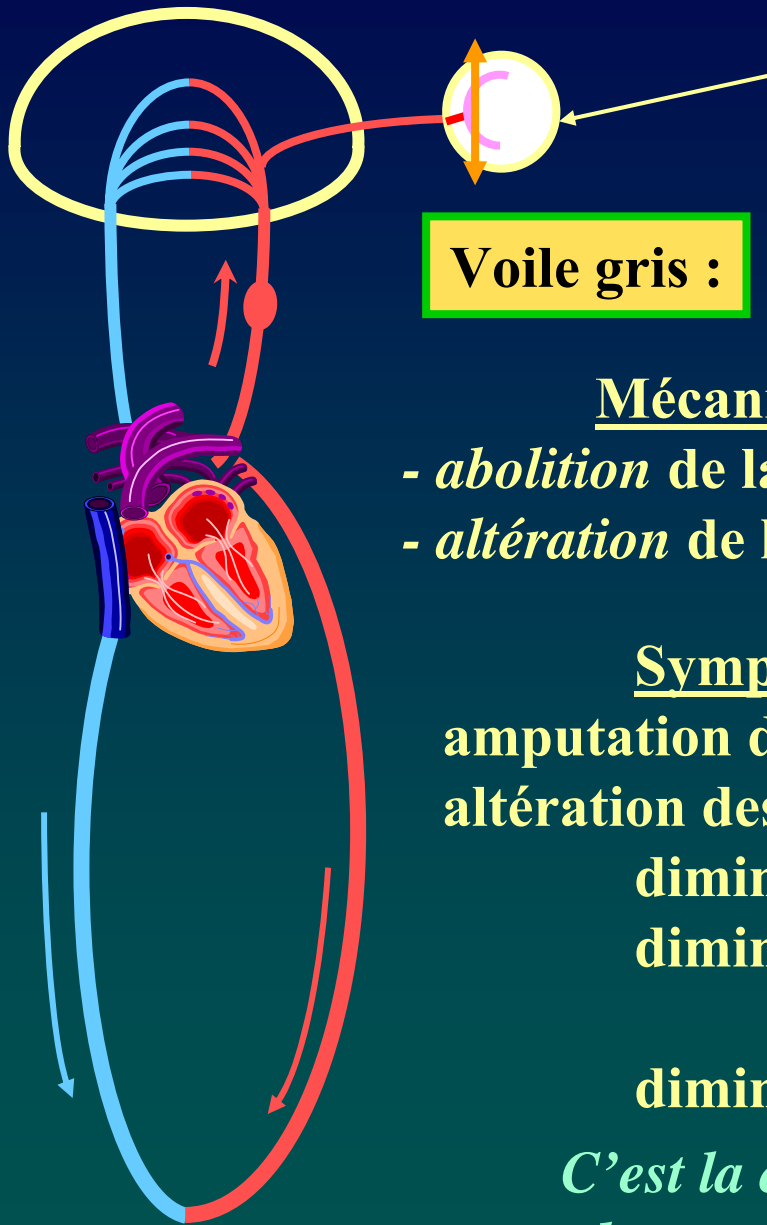
# La « loi du cœur » (ou « loi de Franck-Starling »)

Une application clinique : le passage brusque de la position couchée à la position debout.









Globe oculaire et  
circulation rétinienne

**Voile gris :**

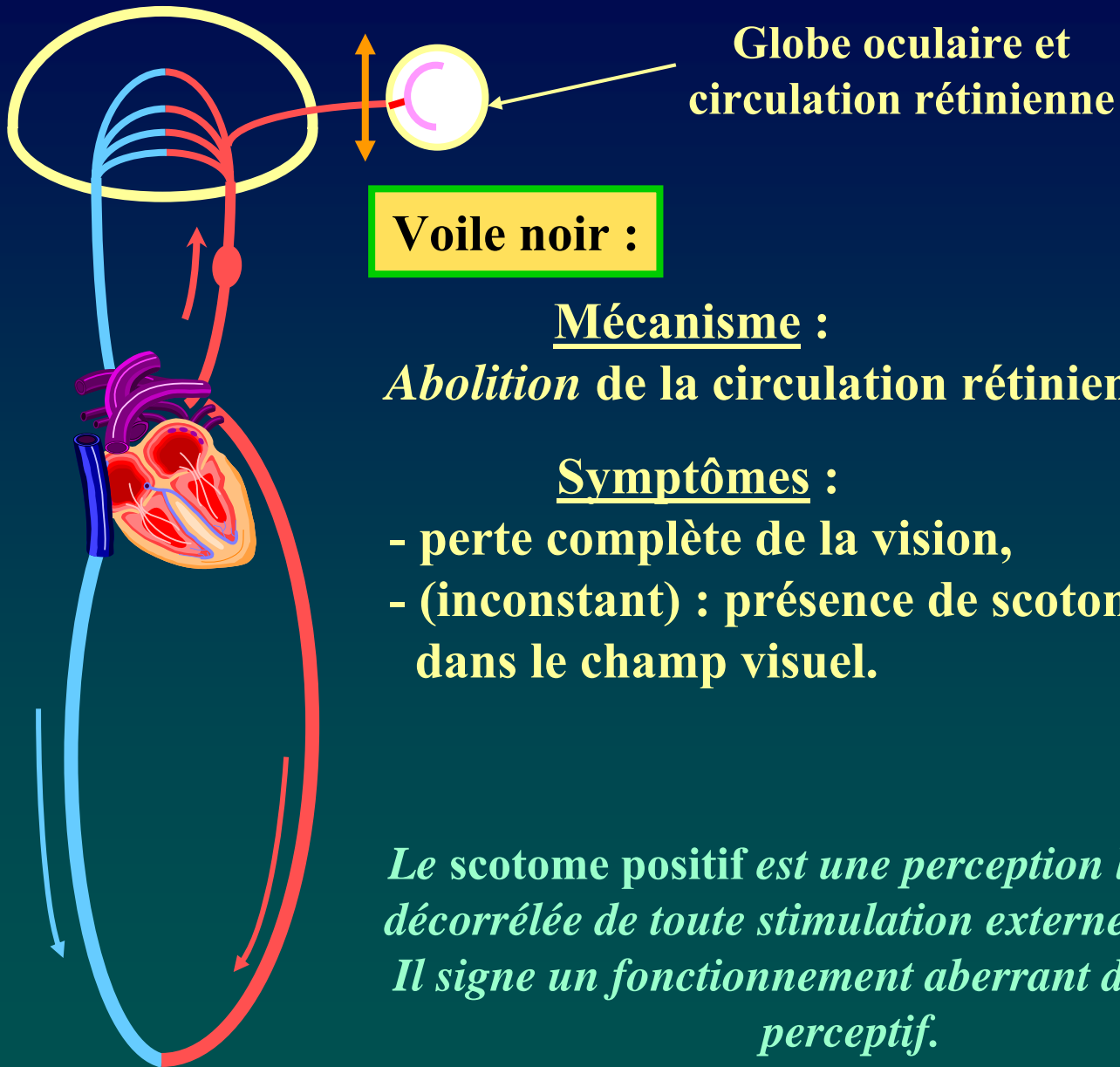
Mécanisme :

- *abolition* de la circulation rétinienne périphérique,
- *altération* de la circulation rétinienne centrale.

Symptômes :

amputation du champ visuel périphérique,  
altération des fonctions rétiniennes centrales:  
diminution de l'acuité visuelle,  
diminution du sens chromatique  
(vision en N&B),  
diminution du sens lumineux

*C'est la classique image de la vision  
dans un tunnel empli de brouillard  
(vision tunnalisée, floue, décolorée et assombrie)*



Globe oculaire et  
circulation rétinienne

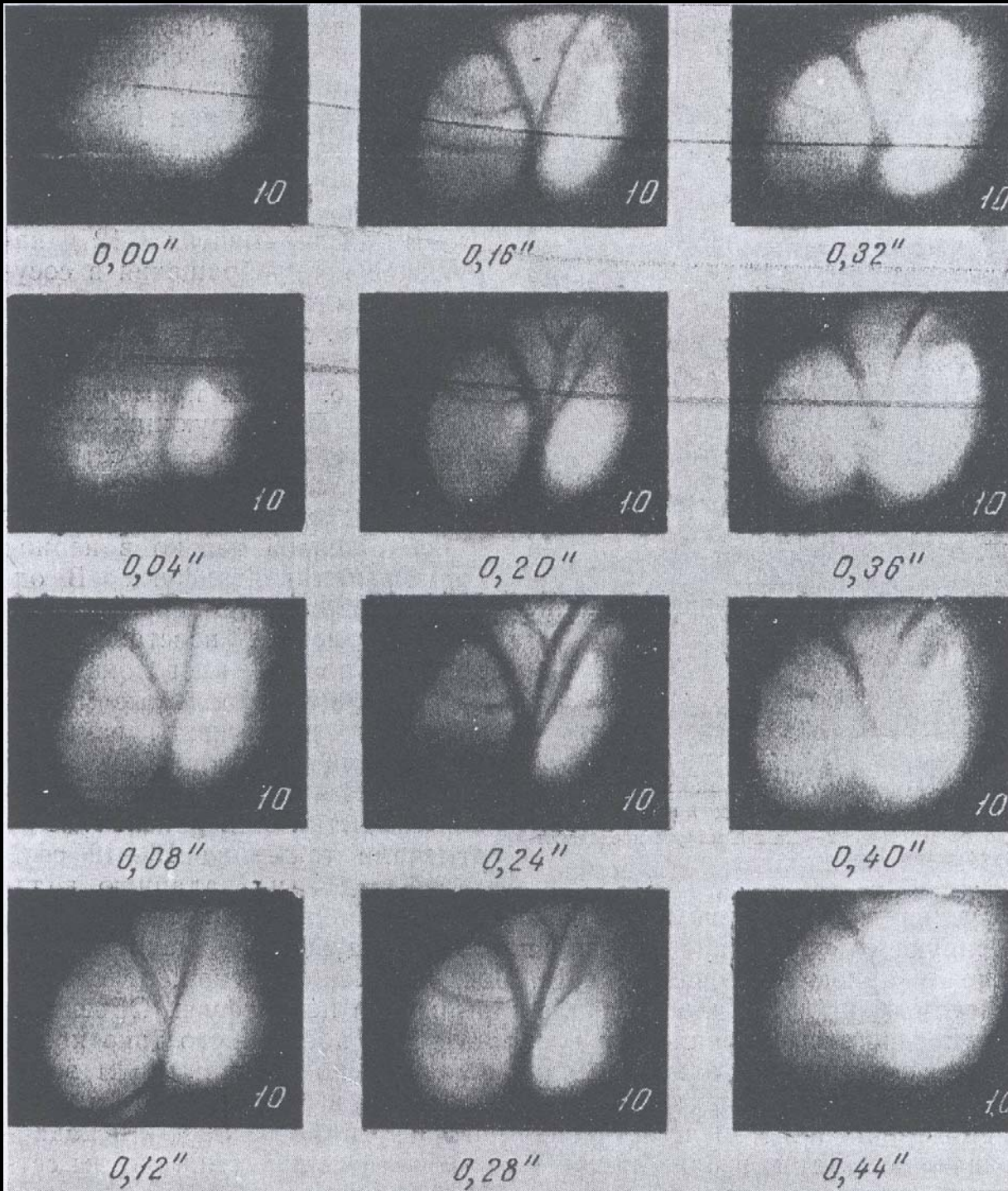
**Voile noir :**

Mécanisme :  
*Abolition de la circulation rétinienne*

Symptômes :  
- perte complète de la vision,  
- (inconstant) : présence de scotomes positifs  
dans le champ visuel.

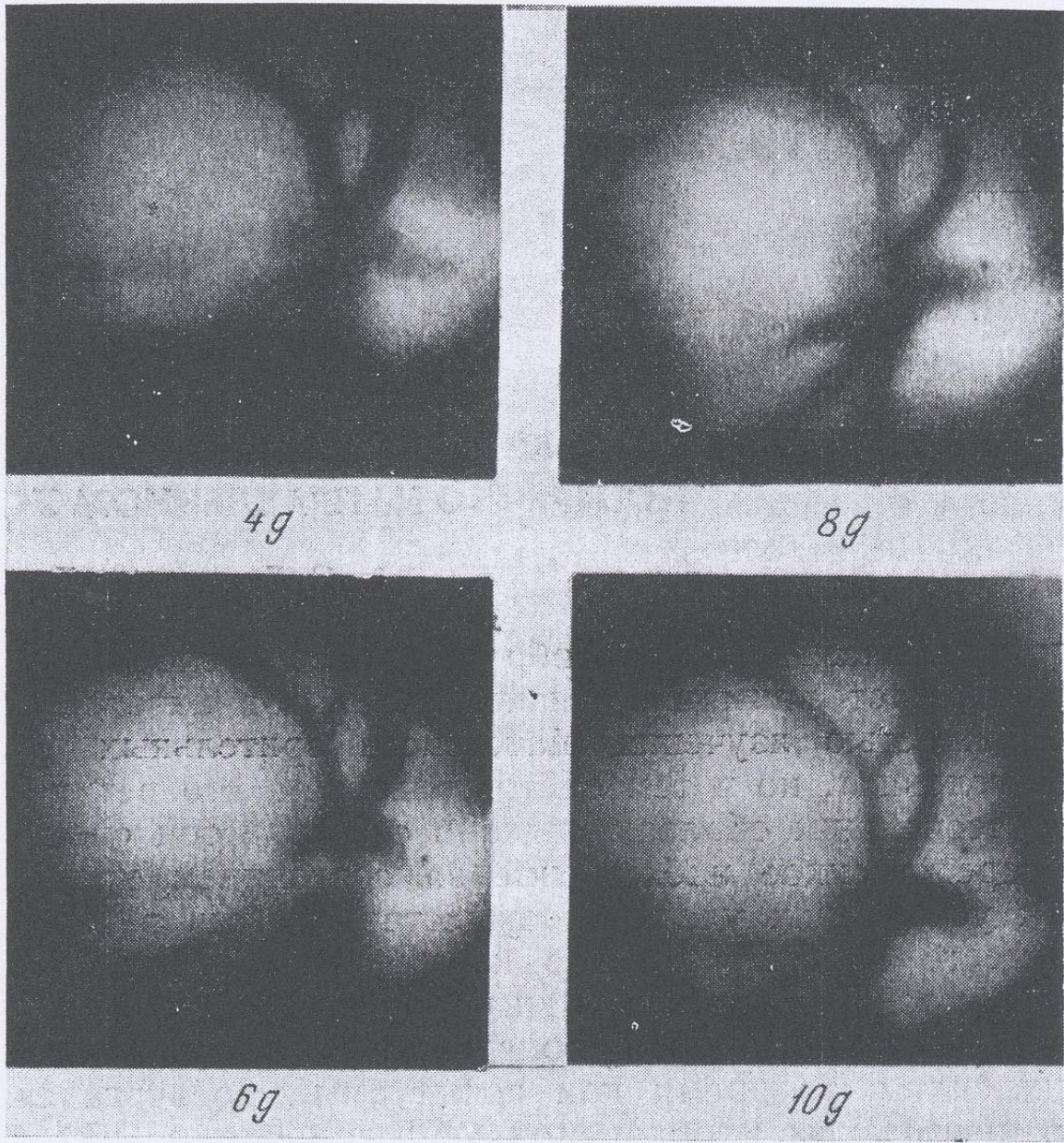
*Le scotome positif est une perception lumineuse  
décorrélée de toute stimulation externe objective.  
Il signe un fonctionnement aberrant du système  
perceptif.*

**Validation  
expérimentale  
de l'hypothèse  
hydrostatique  
(1)**



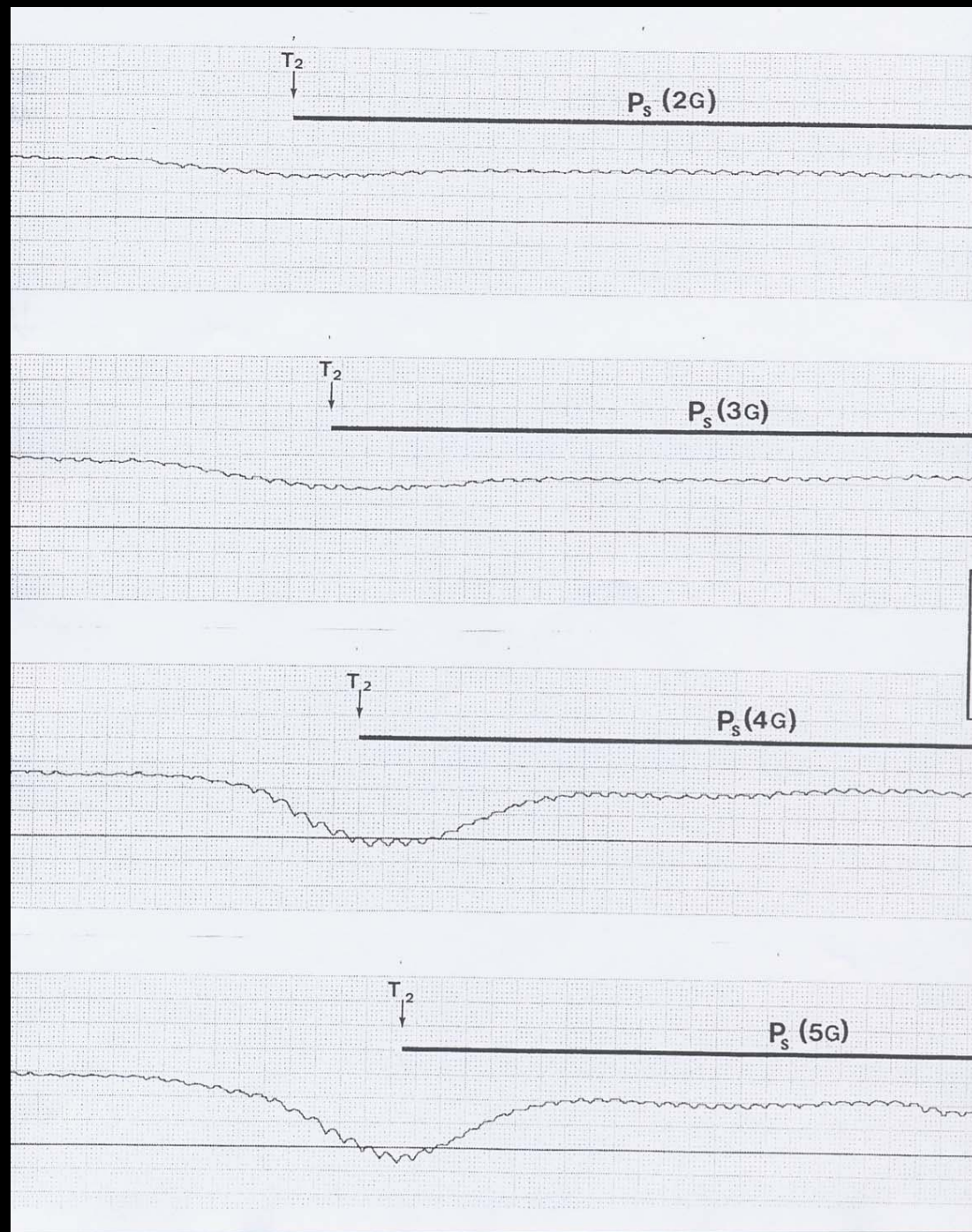
(Barer *et al.*, 1971)

**Validation  
expérimentale  
de l'hypothèse  
hydrostatique  
(2)**



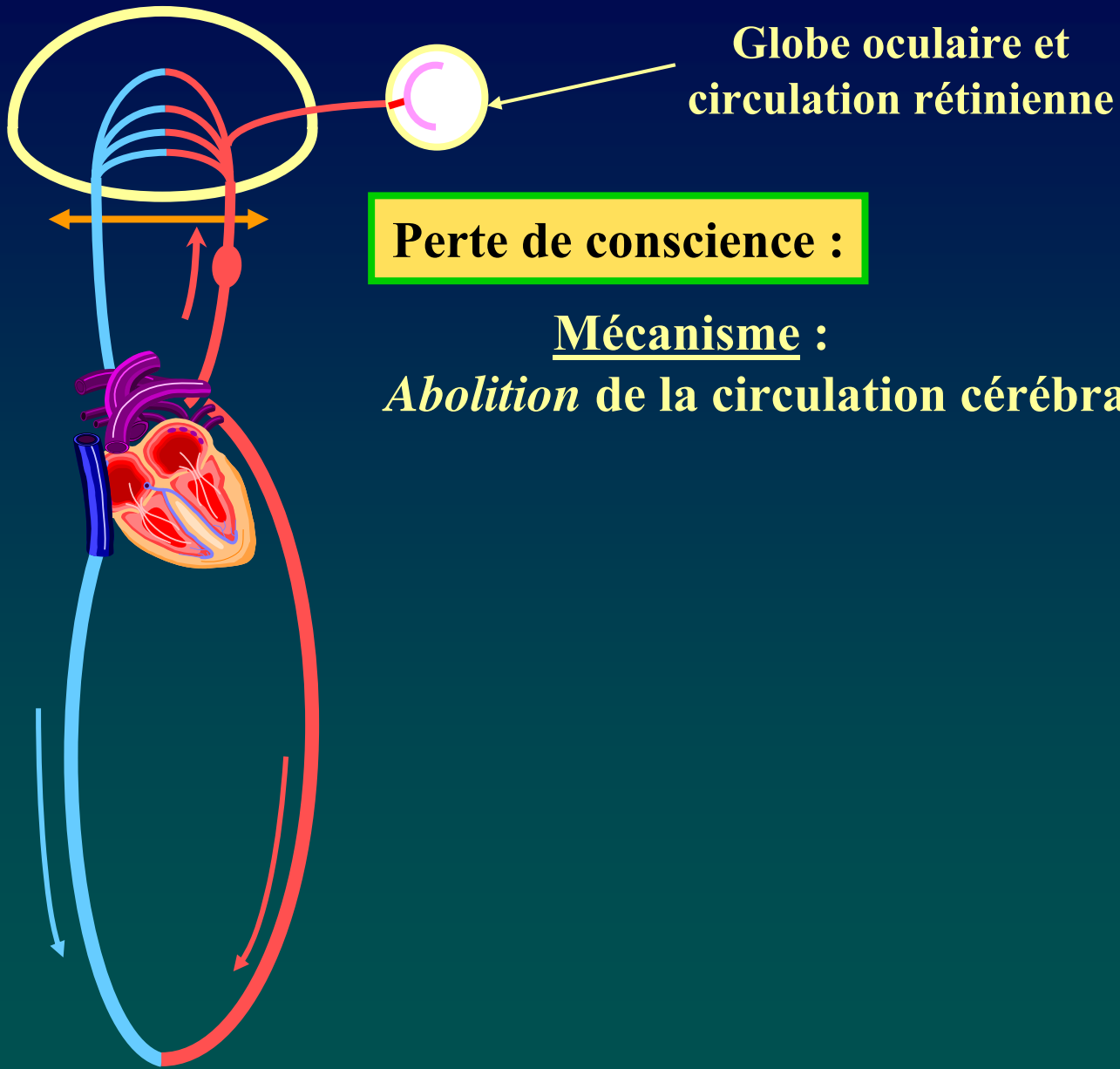
(Barer *et al.*, 1971)

# Validation expérimentale de l'hypothèse hydrostatique (3)



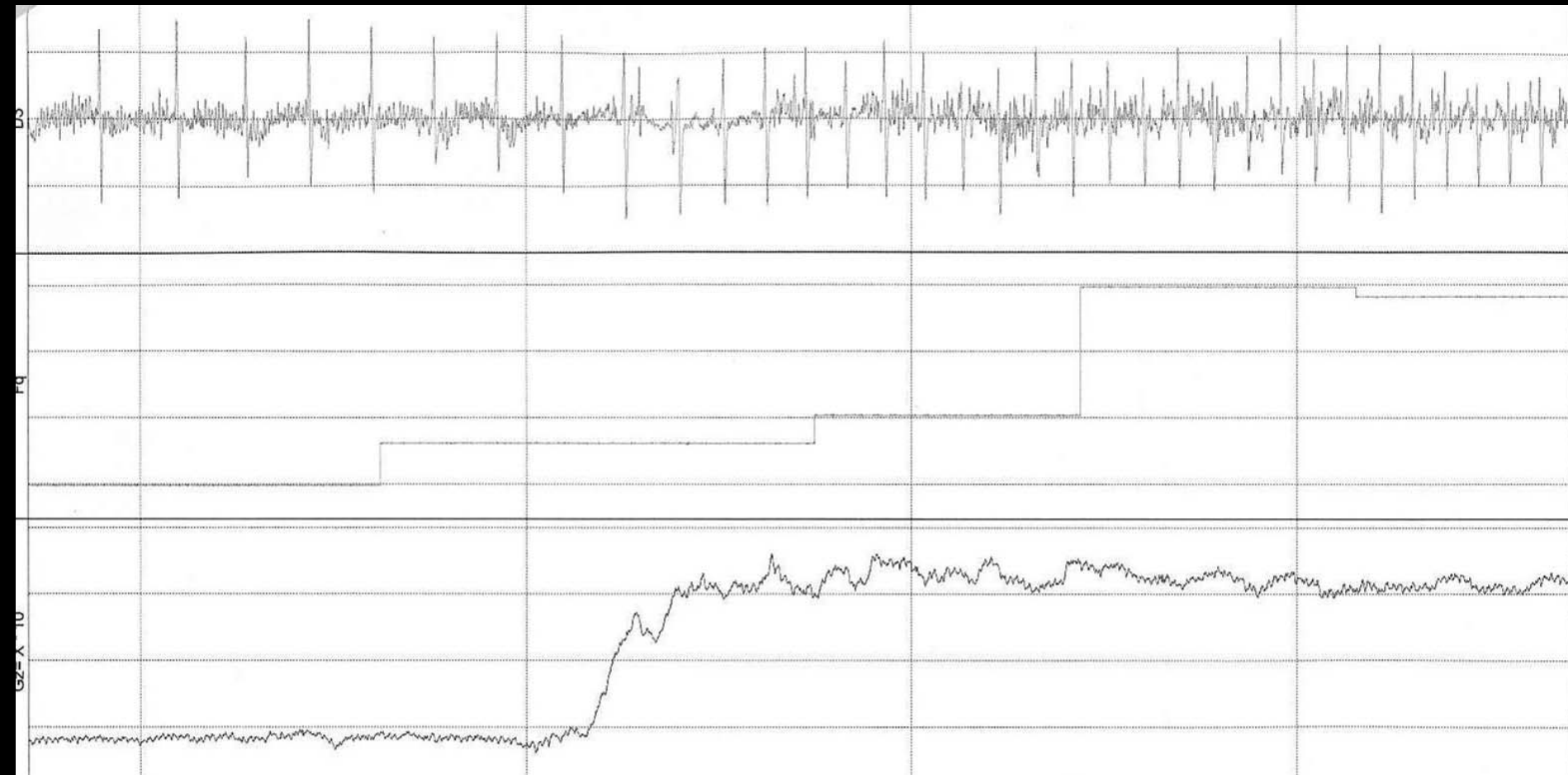
(Ossard *et al.*, 1991)





## **Quelques conséquences myocardiques des variations de pesanteur**

# Accélérations : effets physiologiques





CAP-232

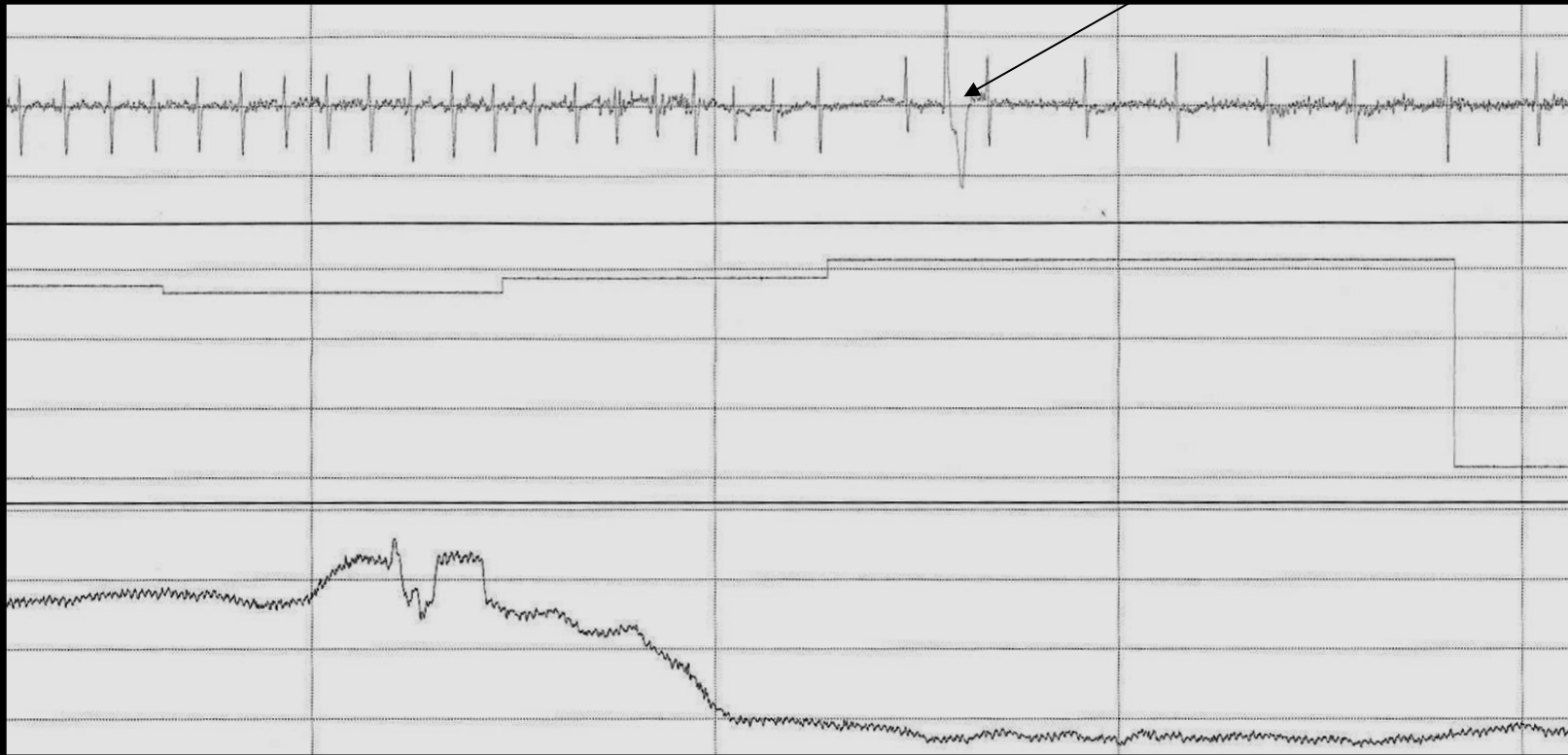


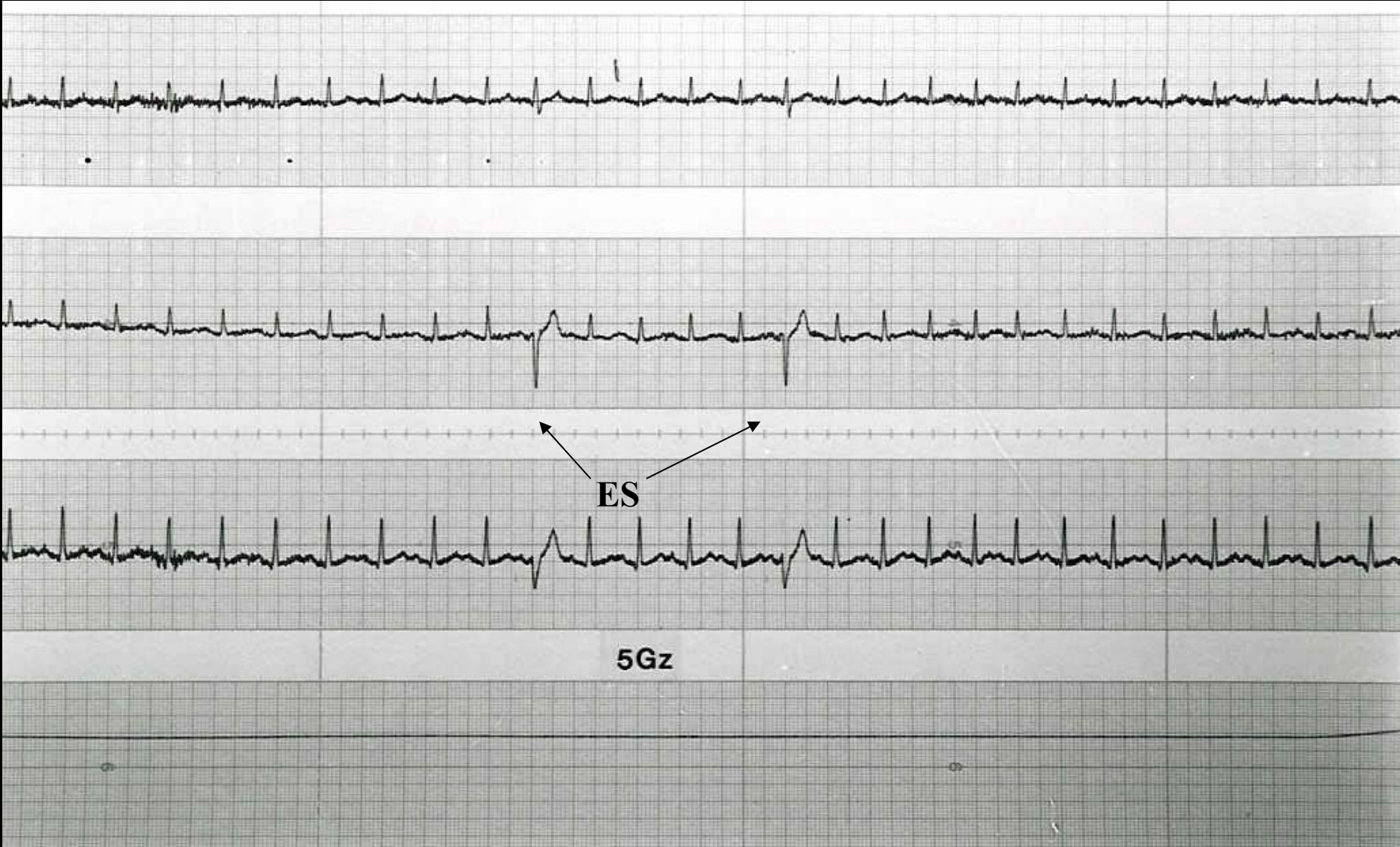
**Conséquences physiologiques de l'exposition aux accélérations +G<sub>Z</sub> de longue durée : augmentation franche de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle.**

<b>Accélération (G)</b>	<b>Fréquence cardiaque</b>	<b>Pression artérielle</b>
1	75	120
3	109	150
5	147	180
7	164	220

**L'exposition à un fort facteur de charge est, pour le myocarde, l'équivalent d'une épreuve d'effort maximale.**

# Accélérations effets physiologiques





**ES**

**5Gz**





Gould Inc., Instrument Systems Division

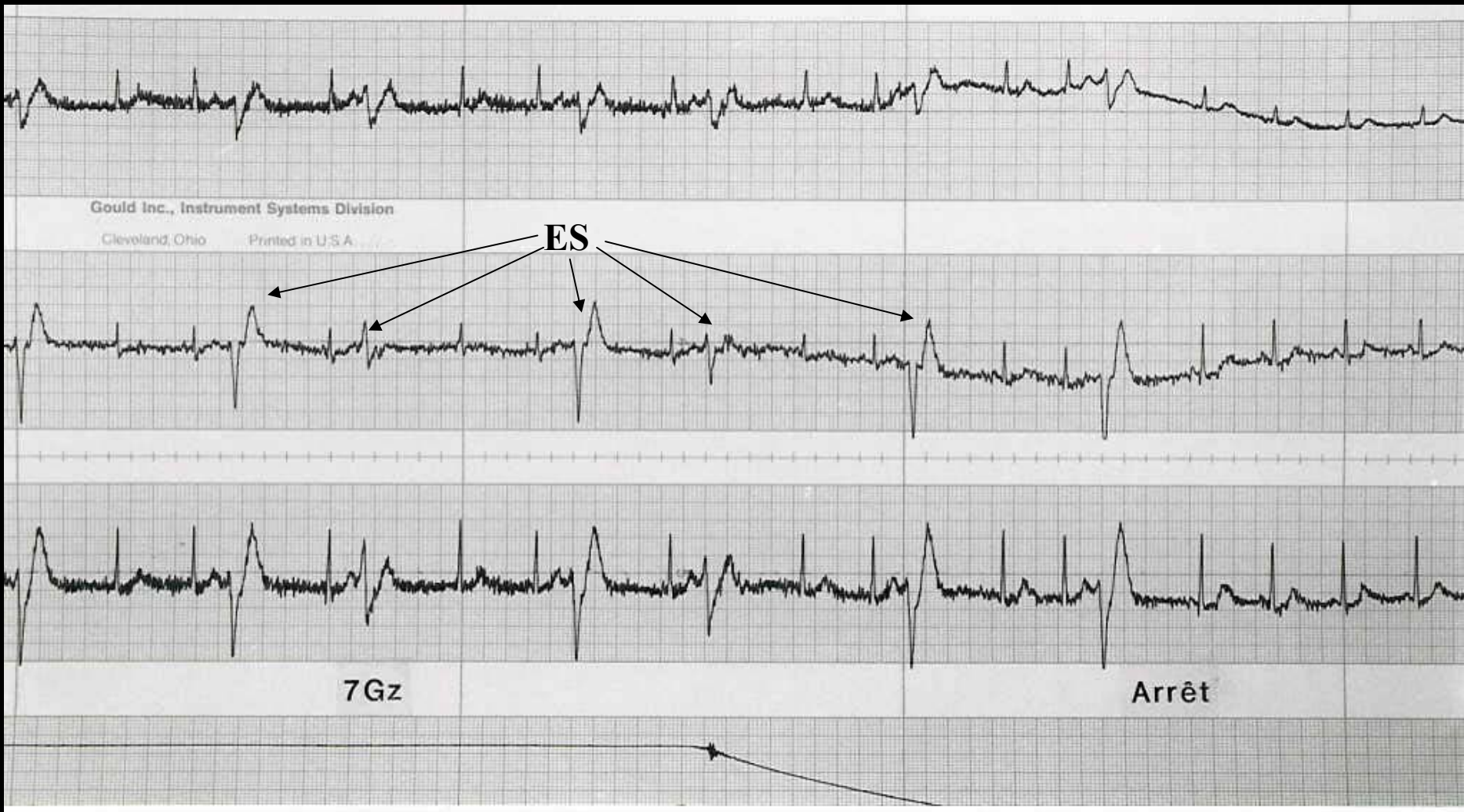
Cleveland, Ohio

Printed in U.S.A.

**ES**

7Gz

Arrêt

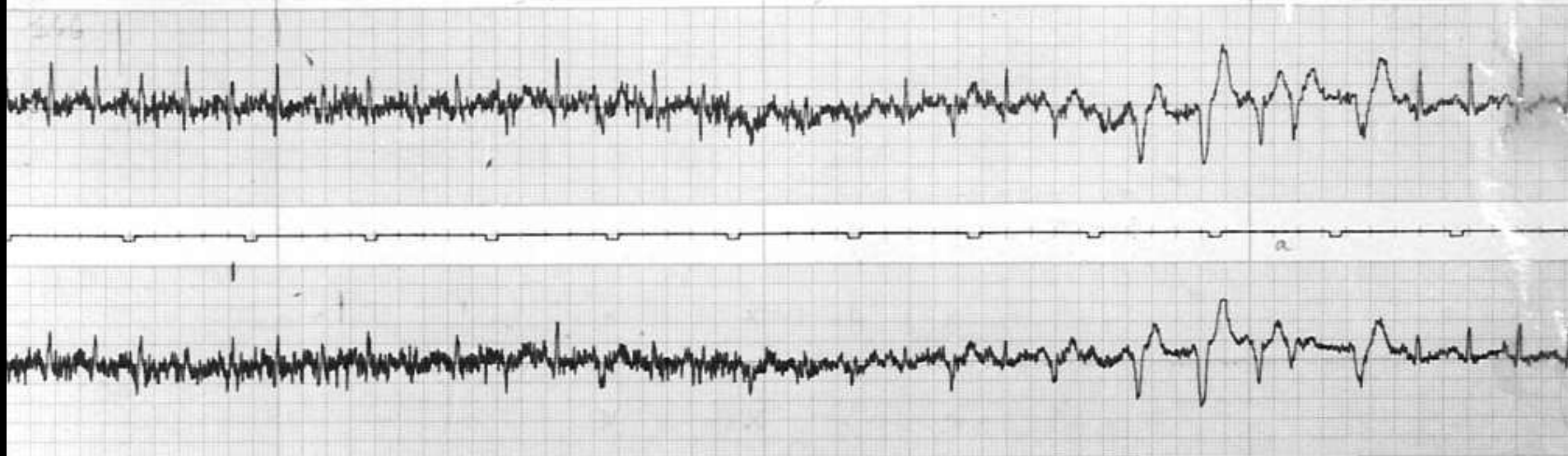




ESU

5.9

⑤ Du. Freinage - arrêt



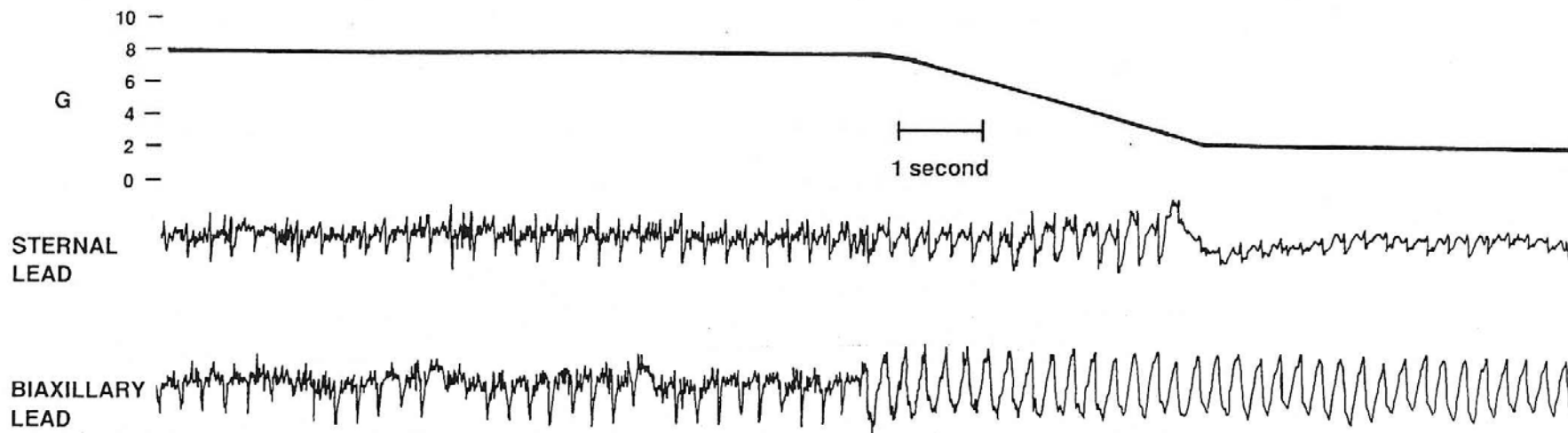
Gould Inc., Instrument Systems Division

Cleveland, Ohio Printed in U.S.A.

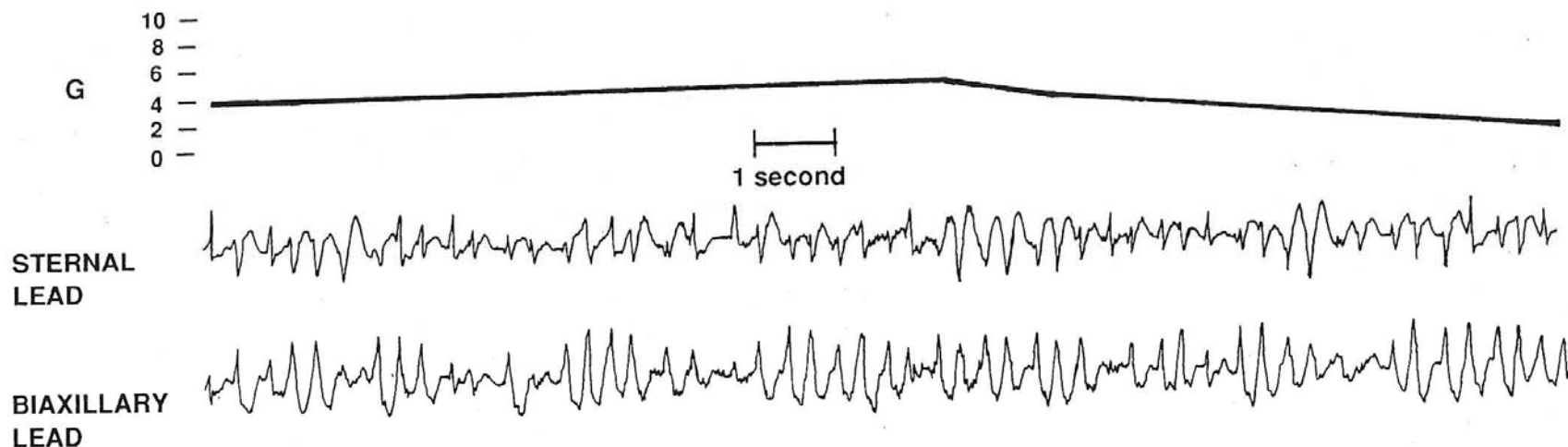
**Arrêt(5Gz)**

ACCUCART

## DYSRHYTHMIAS DURING G TRAINING—MCKENZIE & GILLINGHAM



**Fig. 2.** An example of supraventricular tachycardia with aberrant conduction occurring during an 8-G rapid-onset (6 G/s) run, initially diagnosed as ventricular tachycardia by the medical monitor. Subsequent cardiology review led to the reinterpretation of the ECG. This episode lasted 20 s, extending into the post-G recovery period.



**Fig. 1.** An example of ventricular tachycardia occurring at 5 G during a gradual-onset run. The onset of ventricular tachycardia was preceded by increasing ventricular ectopy. This episode persisted for 50 s, extending 30 s into the post-G recovery period.



MiG-29



BRUSH ACCUCHART

Gould Inc., Instrument Systems Division  
Cleveland, Ohio Printed in U.S.A.



30 Sec après arrêt



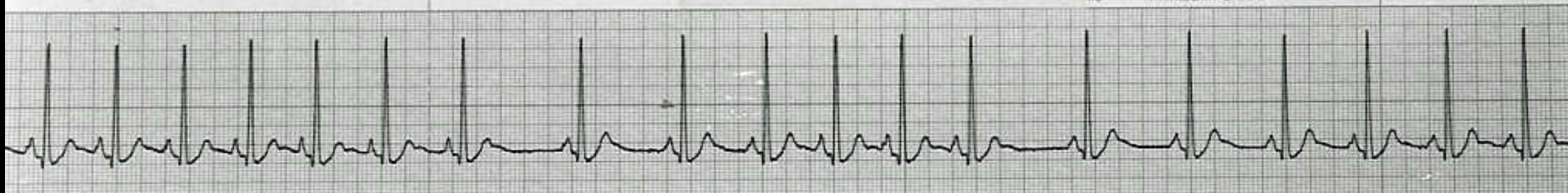




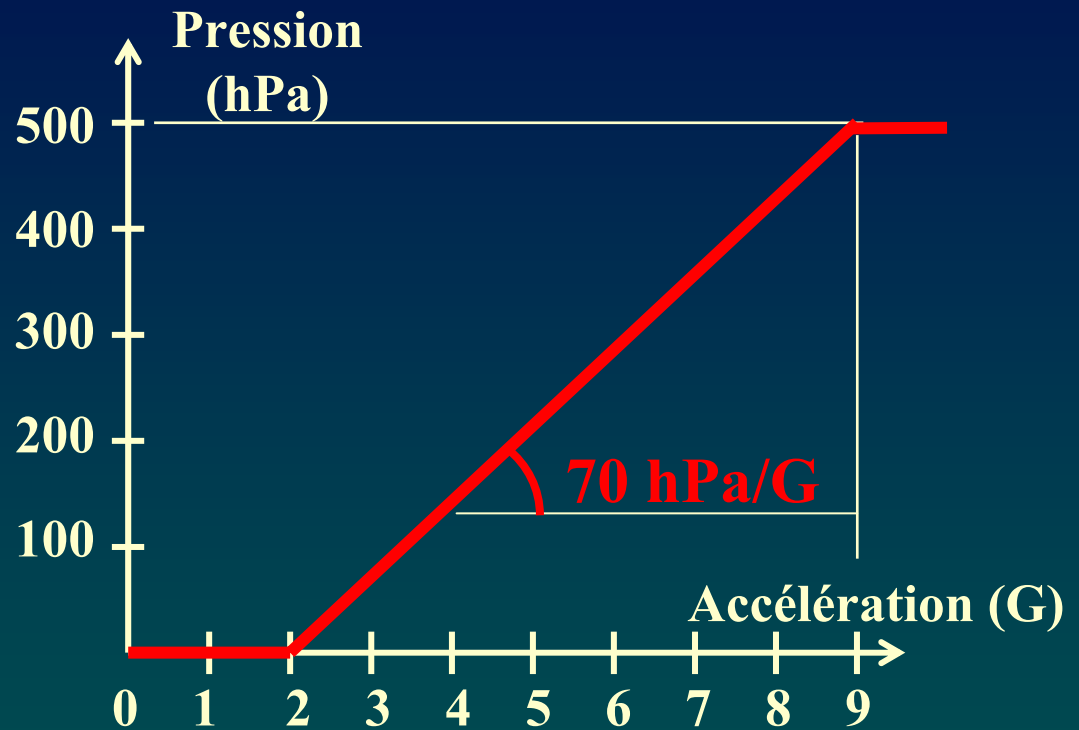
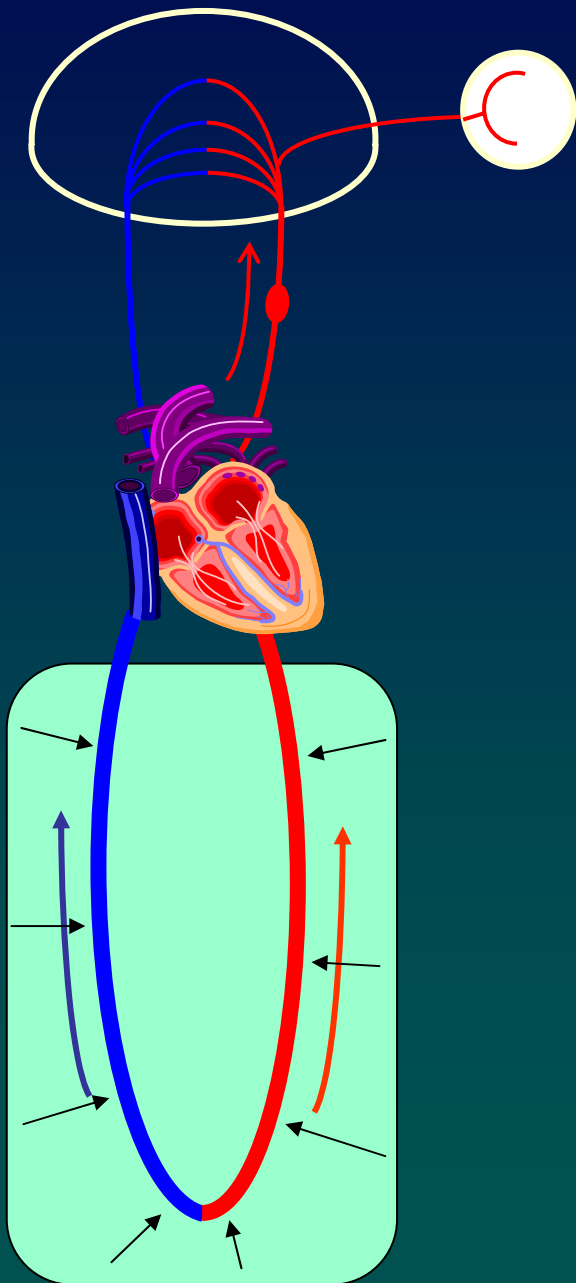
BRUSH ACC **1Mn après arrêt (8Gz)**

Instrument Systems Division

410 Printed in U.S.A.

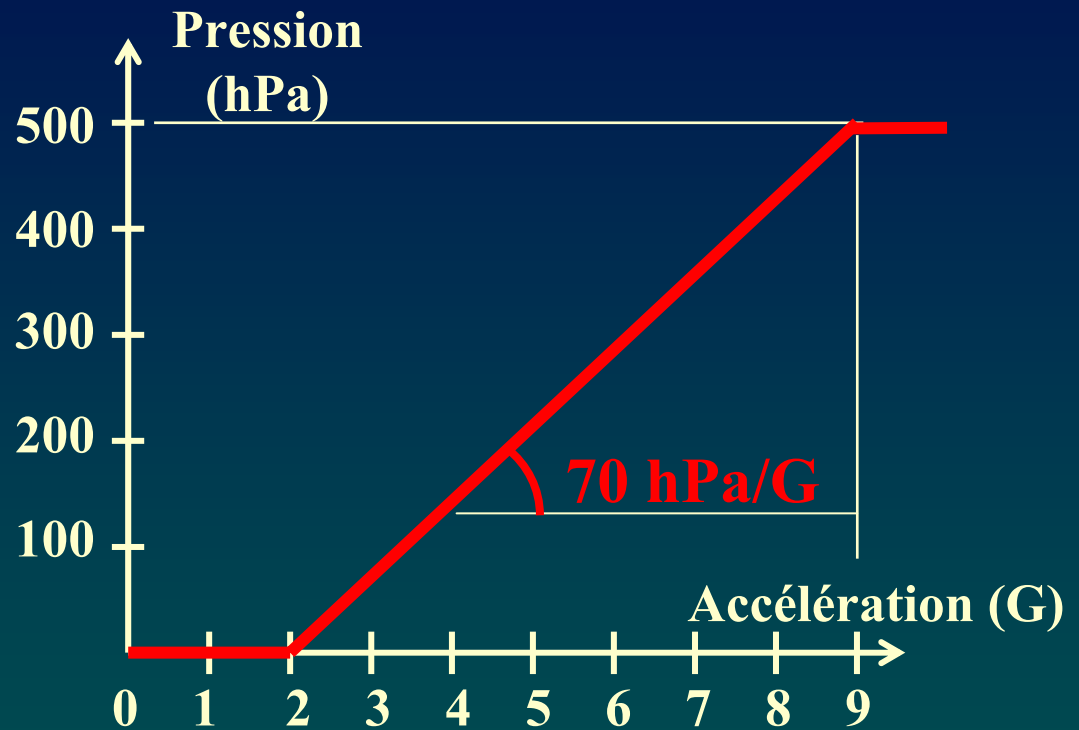


## Équipements anti-G (principe)

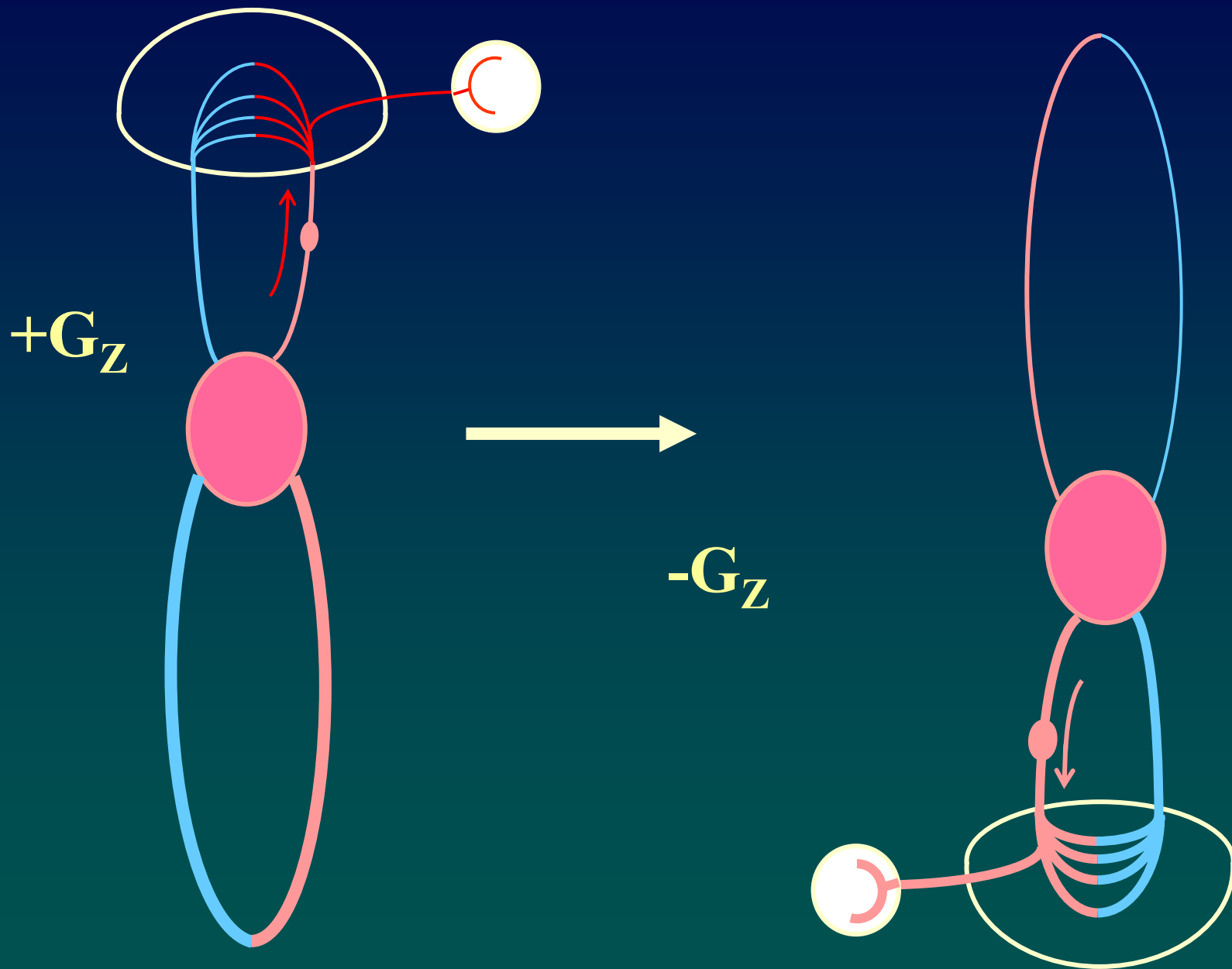


Efficacité :  $+1,5 \pm 0,5$  G

## Équipements anti-G (principe)



Efficacité :  $+2 \pm 0,5$  G



## Le risque de perte de conscience

- Association accélération  $+G_z$  - chaleur - digestion
- Perte de conscience au cours des enchaînements  $-G_z/+G_z$   
(effet push-pull)



## Le risque de perte de conscience

- Associer les causes de déséquilibre CV : par exemple accélération  $+G_z$  - chaleur - digestion



## Le risque de perte de conscience

- Associer les causes de déséquilibre CV : par exemple accélération  $+G_z$  - chaleur - digestion :

