

Le voile en voltige aérienne (Gris, Noir, G-Loc...)



Séminaire instructeurs voltige

CREPS Ile-de-France

22 et 23 mars 2014

docteur.deschamps-berger@wanadoo.fr

Le voile en voltige aérienne

Tabou?

- Les risques
- Les mécanismes
- Les moyens de protection

Risque de perte de conscience sous facteur de charge

Ce risque est apparu très tôt dans l'histoire de l'aéronautique et, rétrospectivement, il a été rendu responsable d'un certain nombre de morts au cours de la première guerre mondiale.

Puis il fut rencontré dans la voltige de temps de paix : dès 1922, dans le cadre du trophée Pulitzer, aux États-Unis, le vainqueur de la coupe déclarait avoir été victime d'une incapacité en vol en cours d'évolution.

Puis des accidents mortels furent imputés à cette cause pendant la deuxième guerre mondiale.

Ensuite, reprise de travaux très importants au début des années 1970, aux USA :

Burns, Burton, Gillingham, Balldin, Leverett (entre autres).

Travaux de James Whinnery entre 1978 et 1991.

Bref historique :

1917-1918 : premières relations d'un effet physiologique lié aux accélérations : voiles gris et noir, puis perte de conscience

1920-1930 : travaux sur l'animal

1930-1940 : travaux sur l'homme

1945 : mise au point des pantalons anti-G à gaz

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 *.

*** *ce qui fait 6,2 G (NdR).***



Rappels physiques - représentation des différents vecteurs

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

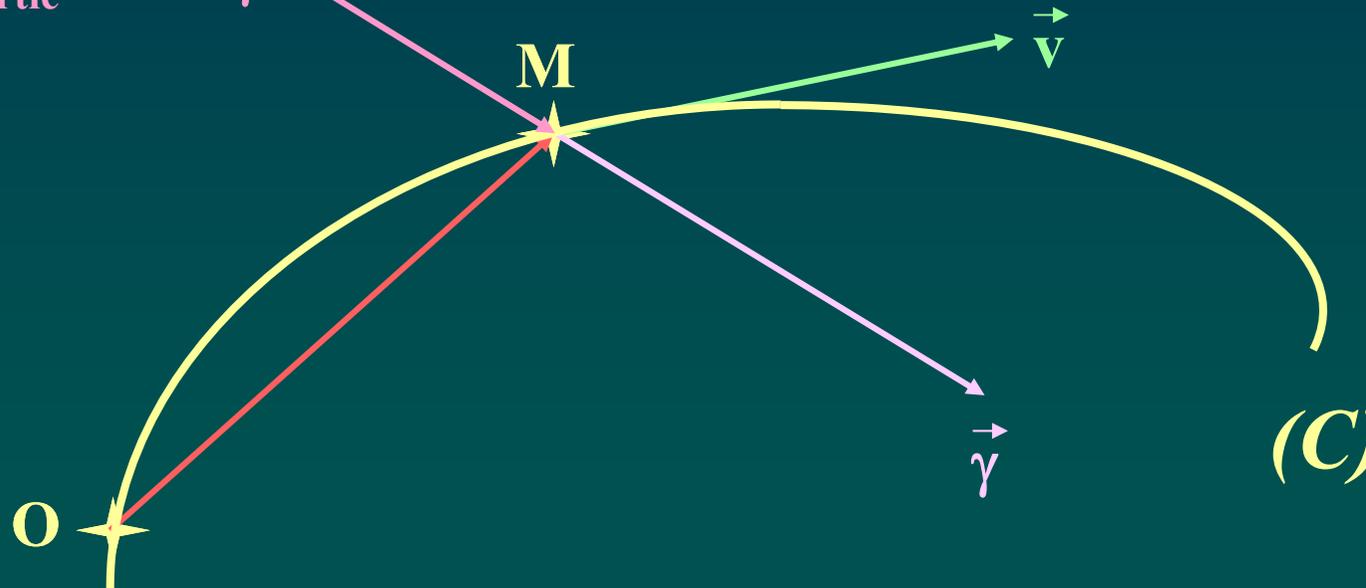
$$\vec{\gamma} = \frac{d(\vec{v})}{dt} = \frac{d^2(\vec{OM})}{dt^2}$$

$$1 \text{ G} = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

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

Elle est portée par le même axe que l'accélération, mais en direction opposée, vers l'extérieur du virage : c'est la force « centrifuge ».

• $\vec{F}_{\text{inertie}} = -m \vec{\gamma}$



Rappels mathématiques et physiques

Le déplacement : est exprimé en mètres

La vitesse : est la dérivée du déplacement.

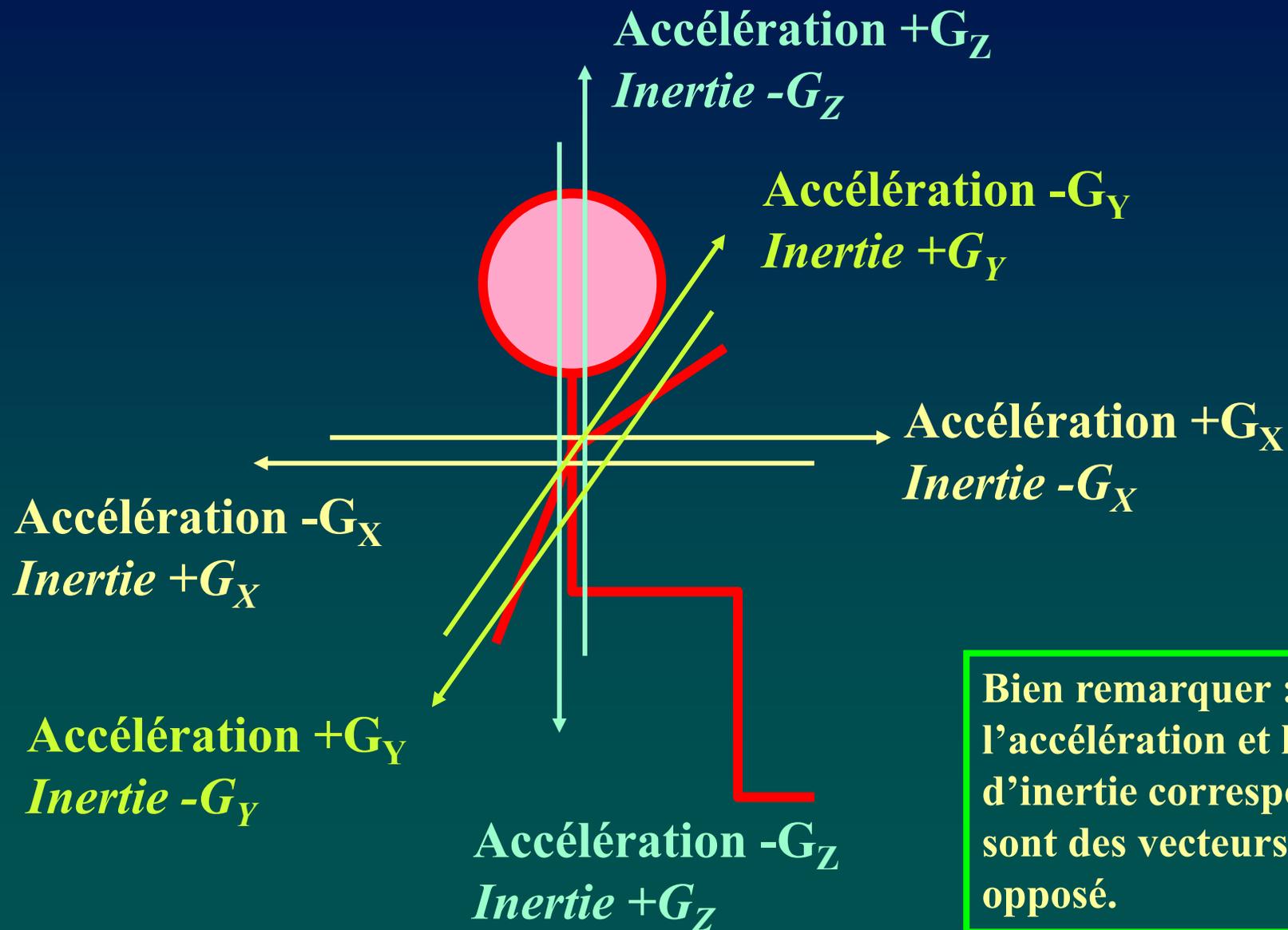
L'accélération : est la dérivée de la vitesse.

Le jolt : le jolt est la dérivée de l'accélération. Il est exprimé en « mètres par seconde au cube » (m.s^{-3}), ou en « G/s ».

Ordre de grandeur de certaines accélérations :

Décollage d'un avion performant :	0,5 à 1G
Décollage d'un avion de ligne :	0,2 à 0,3 G
Catapultage d'un porte-avions :	3 à 5 G
Départ d'une fusée (vol habité) :	2 à 7 G
Limites des avions de combat, à la butée élastique :	8 à 9 G
dépassement de la <i>butée élastique du M2000</i> :	11,5 G
Voltige aérienne de haut niveau :	+/- 12 G
Appontage (porte-avions) :	4 à 8 G
Atterrissage forcé, écrasement, amerrissage :	jusqu'à 5 G
Éjection :	15 à 20 G
Choc à l'ouverture d'un parachute (basse altitude) :	6 à 9 G
Turbulences :	> 5 G
Accident d'avion :	> 100 G

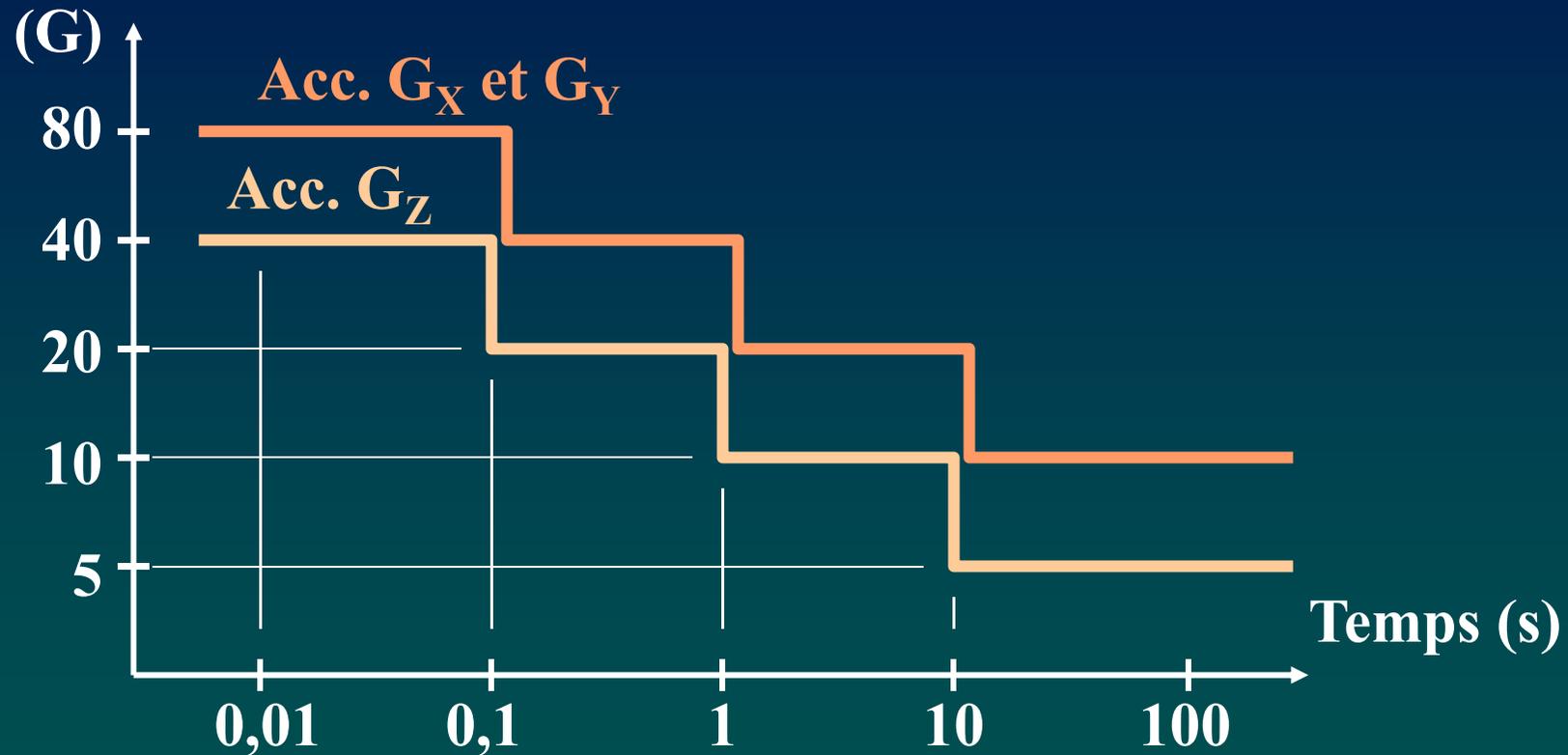
Classification des accélérations selon l'axe d'application



Bien remarquer :
l'accélération et la force d'inertie correspondante sont des vecteurs de sens opposé.

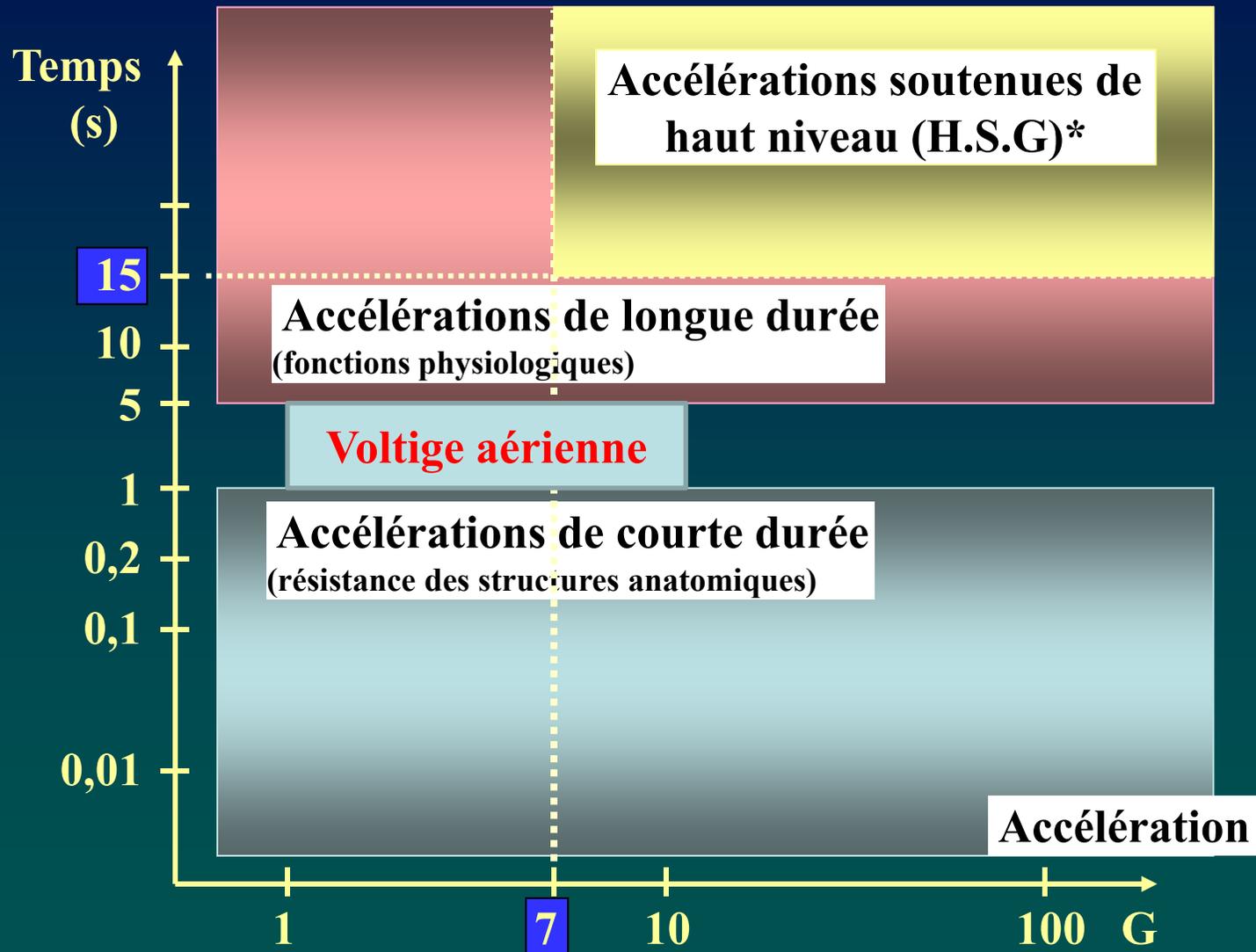
Tolérance aux accélérations : ordres de grandeur

Accélération



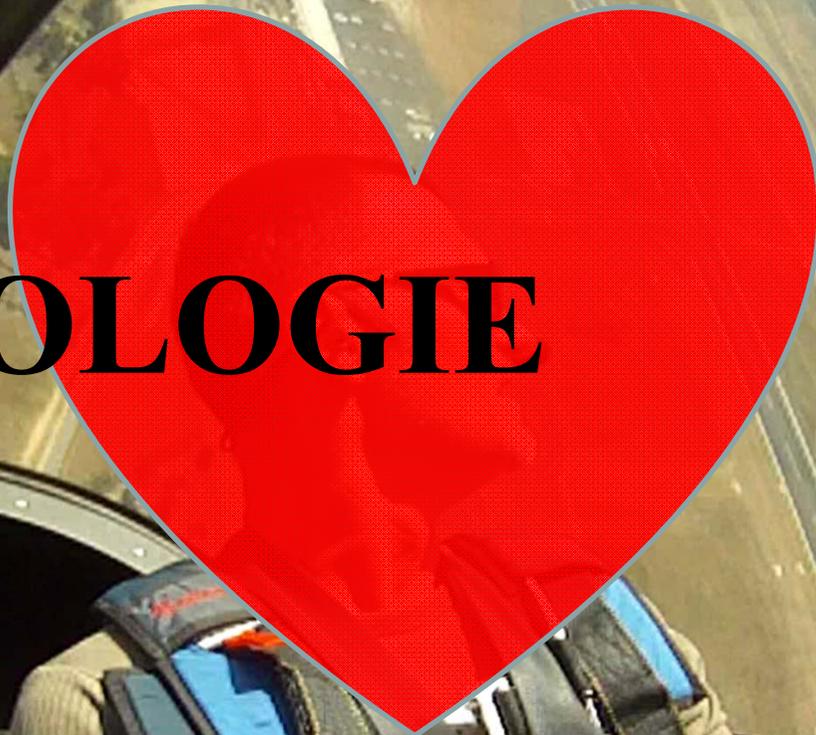
- La tolérance aux accélérations transverses (G_X , G_Y) est double de la tolérance aux accélérations longitudinales (G_Z),
- La tolérance est divisée par 2 lorsque la durée est multipliée par 10.

Classification des accélérations selon la durée d'application



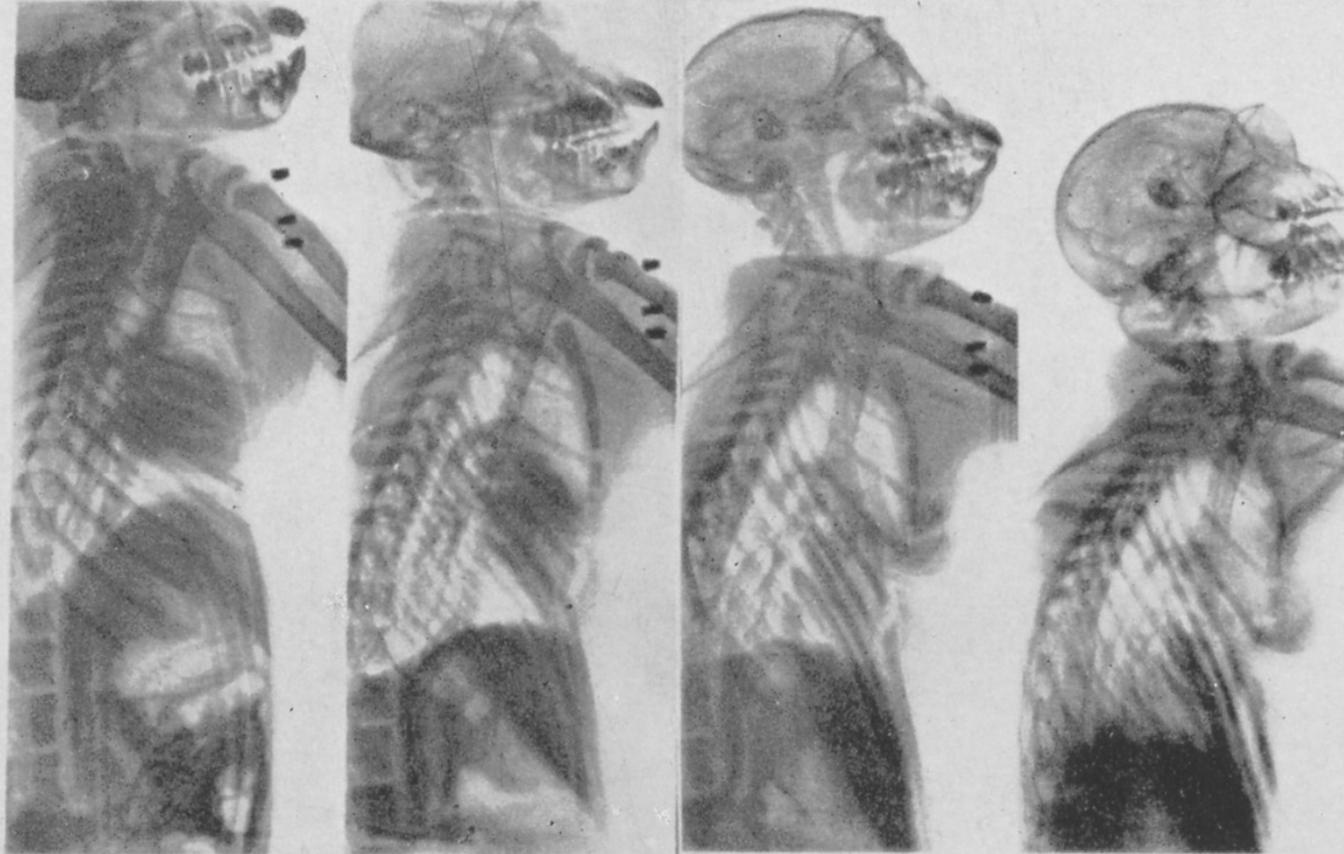
* H.S.G : High Sustained G

PHYSIOLOGIE





*Flieh-
kraft*



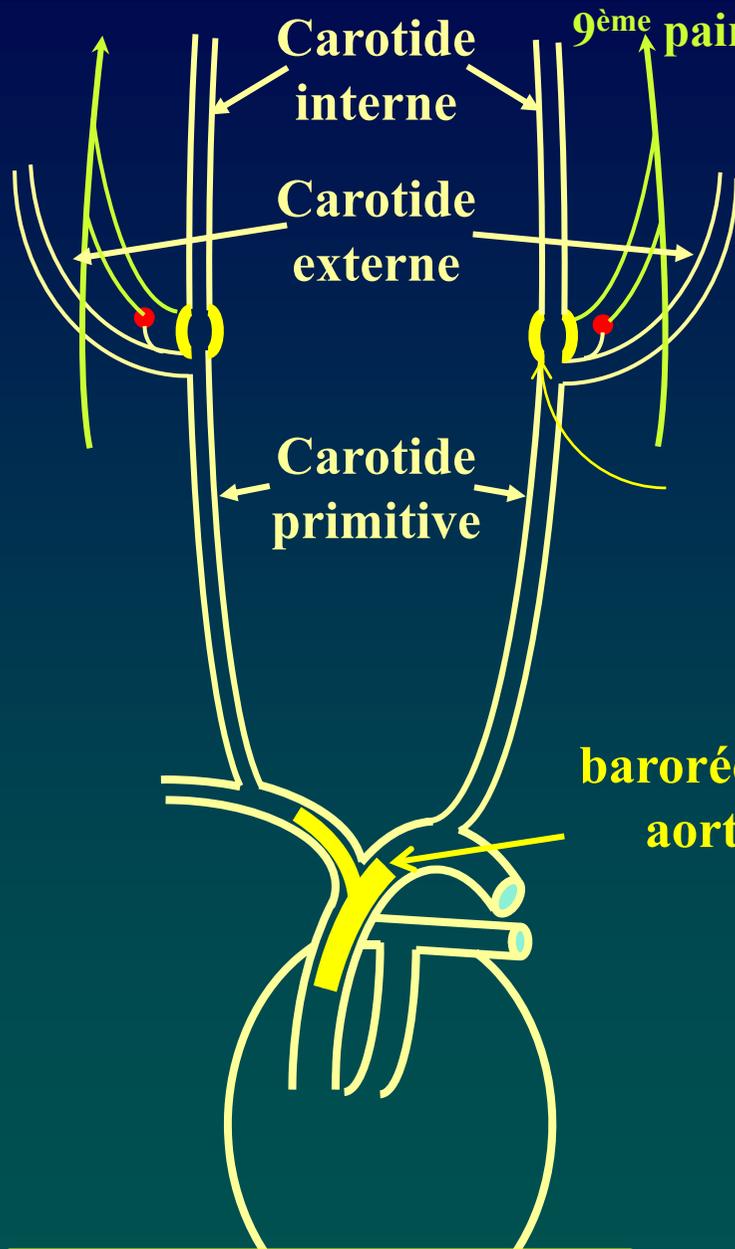
Beschleunigung: 0

2,2 g

4,4 g

6,6 g

S. Ruff und H. Strughold, 1942



9^{ème} paire de nerfs crâniens (n. glosso-pharyngien)

Carotide interne

Carotide externe

Carotide primitive

barorécepteurs carotidiens
(régulation mécanique de la PA)

La régulation à très court terme de la pression artérielle est décrite par le médecin comme un réflexe (et par l'ingénieur comme un système asservi). Ces deux concepts sont isomorphes.

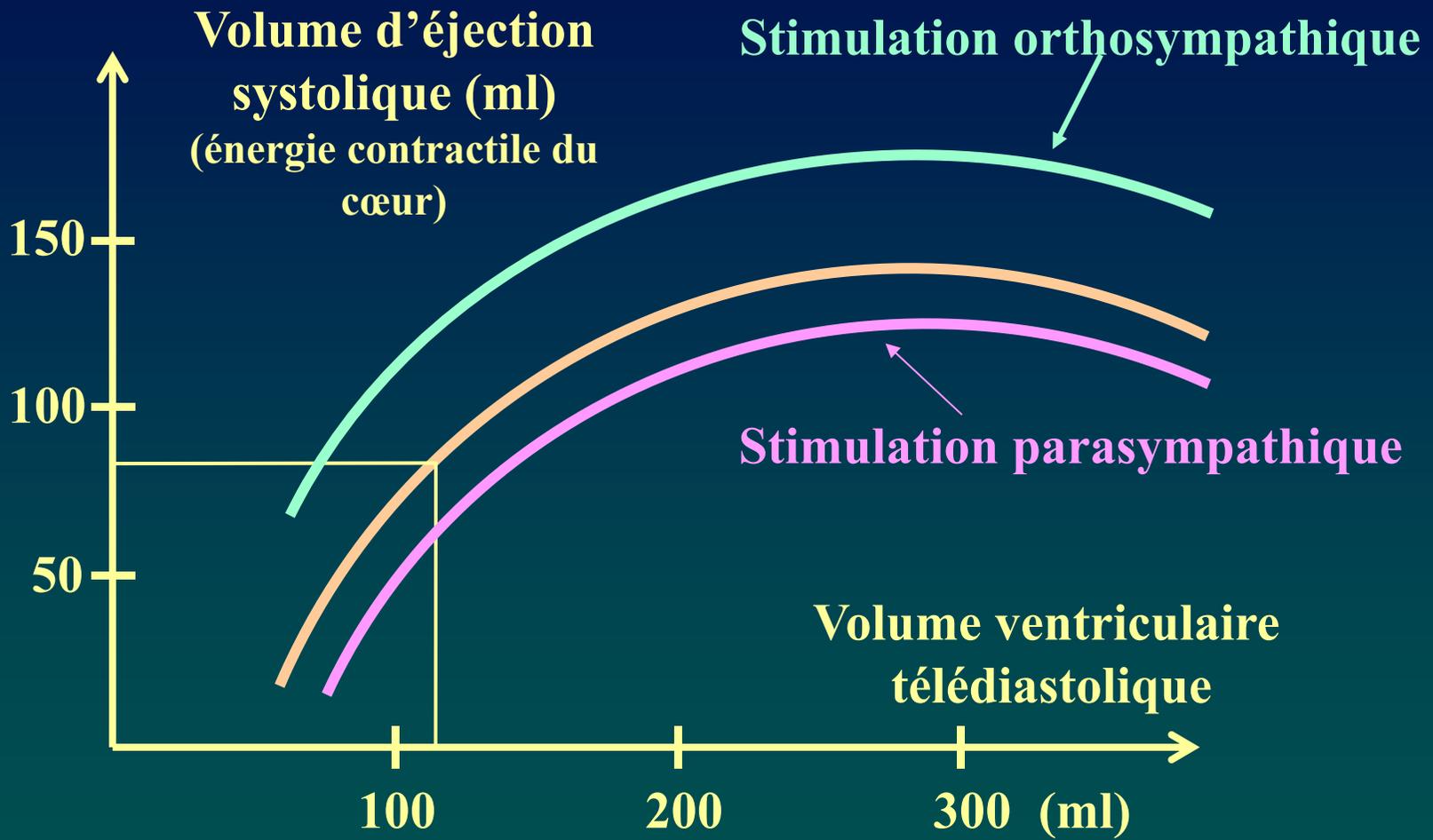
Lorsqu'une déviation par rapport à la valeur de consigne de la pression artérielle est détectée par un capteur périphérique (appelé barorécepteur), le signal est transmis au système nerveux, qui envoie les ordres de correction nécessaires.

Ce système est très rapide, mais non immédiat : le réflexe est actif avec un temps de réaction de 5 à 10 secondes .

barorécepteurs aortiques

Les capteurs

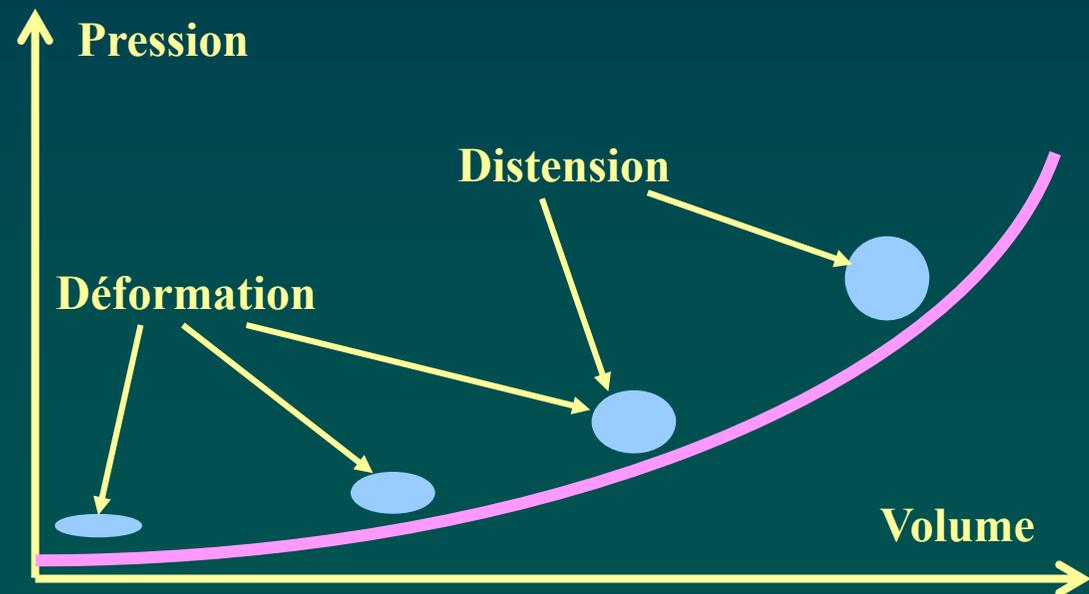
Loi de Starling (loi du cœur)



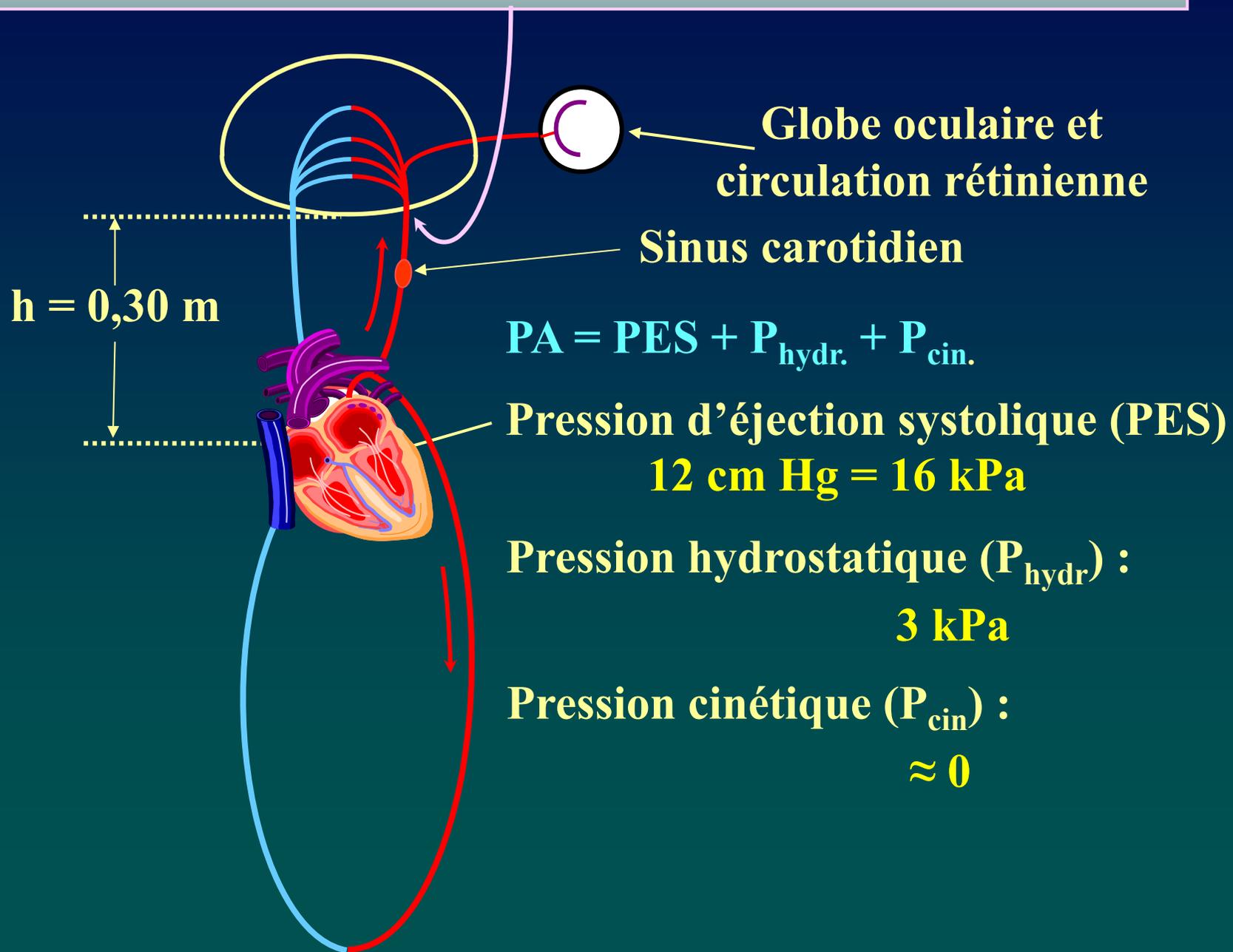
La circulation veineuse :

Les veines sont beaucoup plus nombreuses que les artères. Elles sont constituées d'une paroi souple et facilement déformable. Ce sont des conduits à très basse pression, à propriétés capacitives importantes. À l'état de base, les veines sont très aplaties (collabées). Il est d'ailleurs pratiquement impossible de pratiquer une ponction veineuse dans ces conditions (d'où le garrot).

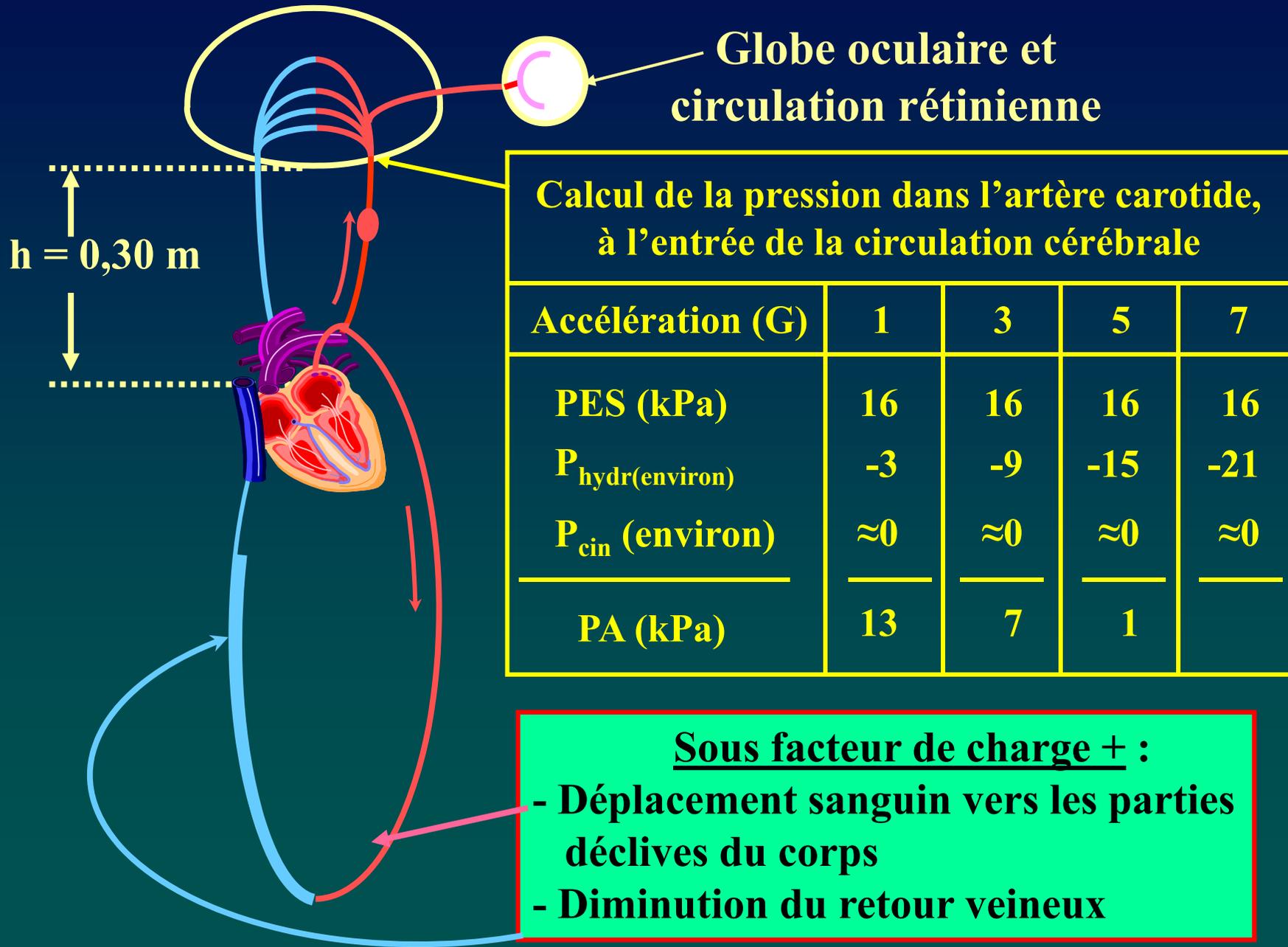
Une faible augmentation de pression suffit à augmenter beaucoup le volume de sang contenu dans le réseau veineux. Lorsque cela se produit, temporairement, le sang qui s'accumule dans les veines ne revient pas au cœur, ce qui entraîne la diminution instantanée du retour veineux et, par application de la **loi du cœur**, la diminution de l'énergie de la contraction cardiaque. C'est le mécanisme (très indésirable) qui est observé au début de l'application d'une accélération $+G_Z$ de longue durée.



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



Évaluation de la pression artérielle :



À faible jolt, l'organisme s'adapte, notamment en augmentant l'énergie de contraction du ventricule gauche (c'est-à-dire la PES), ainsi que la vitesse circulatoire, qui ne peut alors plus être négligée (terme de pression cinétique $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$).

Rappelons que ces mécanismes adaptatifs ne sont efficaces qu'après un délai de 5 à 10 secondes.

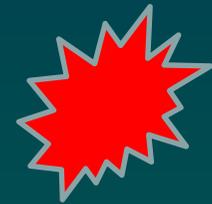
Il faut en déduire qu'il est INTERDIT de tirer à froid un fort facteur de charge. Le pilote doit toujours commencer par stimuler son organisme avec une manœuvre à 3 G avant de tirer une manœuvre maximale (warm-up).

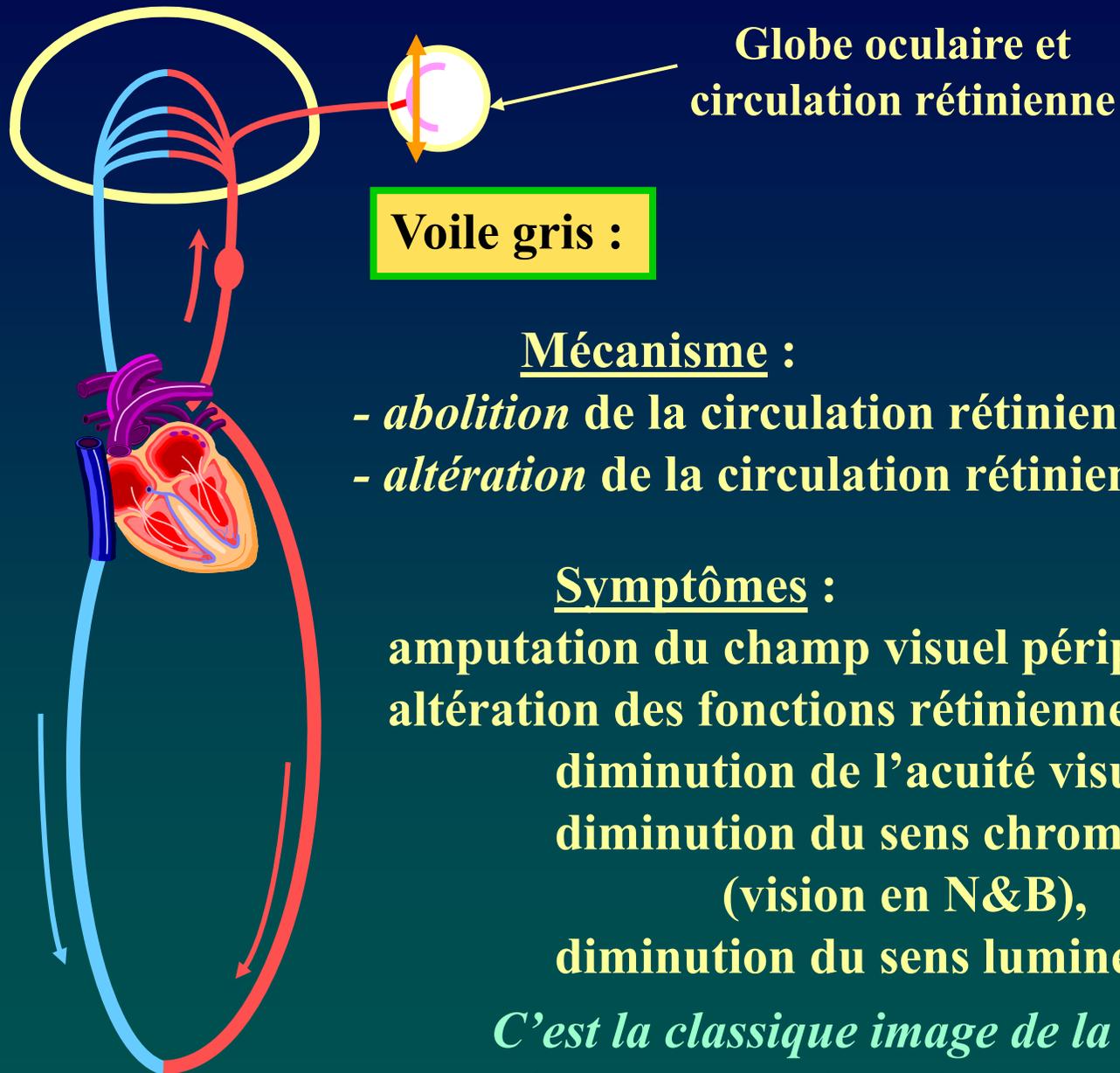
Effets physiologiques

- Voile gris

- Voile noir

- Perte de conscience





Globe oculaire et
circulation rétinienne

Voile gris :

Mécanisme :

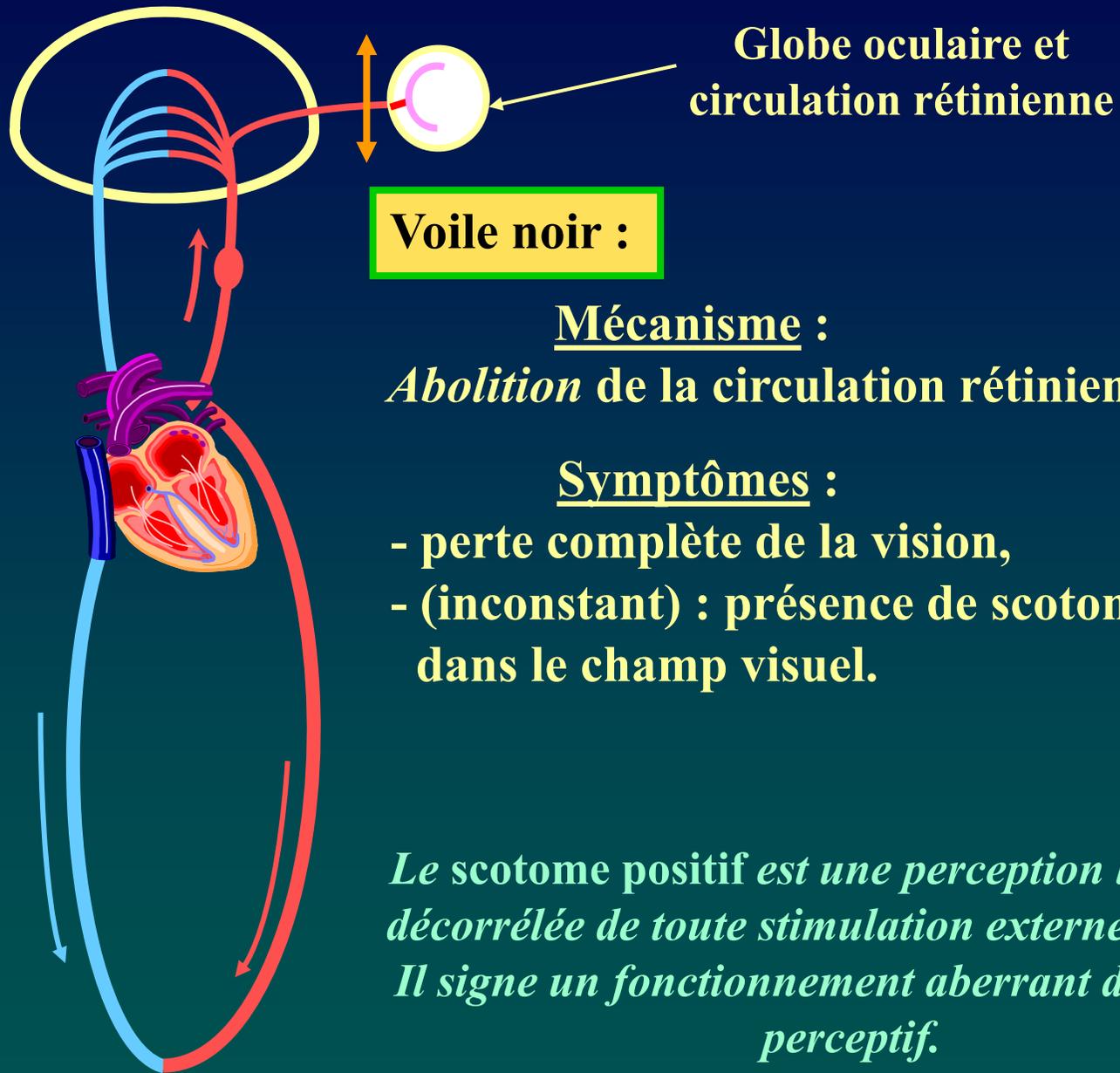
- *abolition* de la circulation rétinienne périphérique,
- *altération* de la circulation rétinienne centrale.

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 :

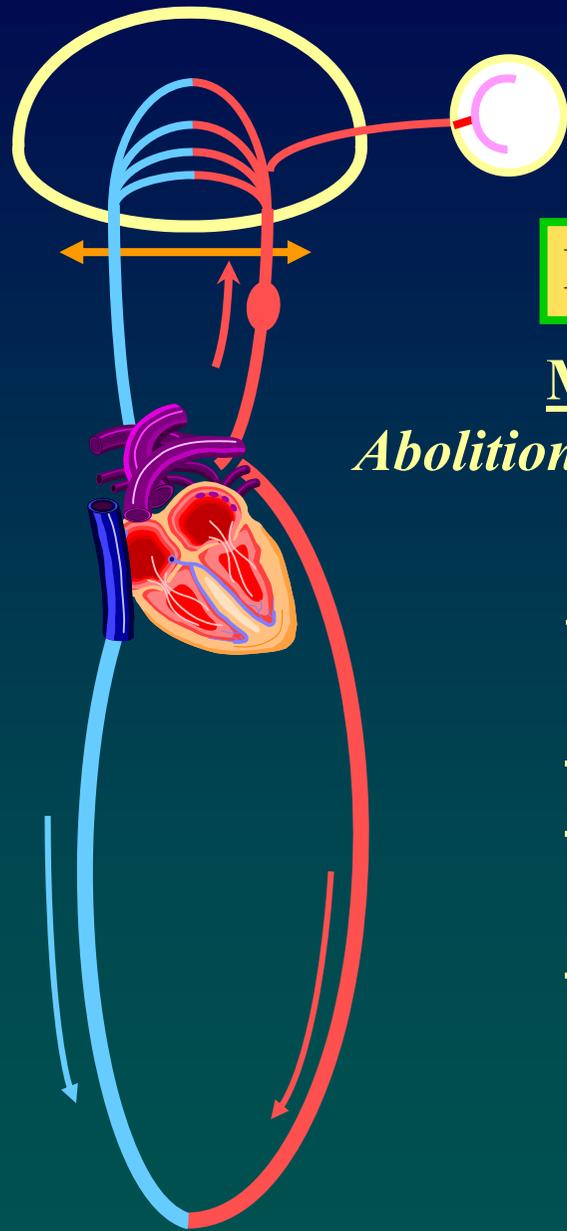
Mécanisme :

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.



Globe oculaire et
circulation rétinienne

Perte de conscience :

Mécanisme :

Abolition de la circulation cérébrale

Symptômes :

- Perte de conscience inaugurale ou après voile gris ou noir
- amnésie totale possible
- souvenirs hallucinatoires possibles (visuels et auditifs)
- mouvements cloniques possibles des membres supérieurs et de la tête

In English : G-Loss of Consciousness (G-LOC)



Précisions sur la perte de conscience :

2 sortes de troubles :

- **les troubles de la conscience,**
décrits comme un état de « confusion »
- **les pertes de conscience,** elles-mêmes distinguées dans
les années 1985-1990 en pertes de conscience
de type 1
de type 2

Les pertes de conscience (P.C.) : déroulement de l'événement

P.C. de type 1 : durée brève – parfois 3 à 5 secondes seulement, sans mémorisation ni symptôme associé ; le sujet ne garde aucun souvenir de la perte de conscience.

Il peut ne s'être rendu compte de rien (déli possible).

P.C. de type 2 : durée supérieure, de 15 à 30 secondes, tonus musculaire aboli dès le début de la perte de conscience, puis activité musculaire désordonnée et hallucinations visuelles et/ou auditives.

Le G-LOC peut être suivi d'une période d'amnésie antérograde*

En fait, aucun critère ne permet de prévoir de quel type sera la perte de conscience.

amnésie antérograde : oubli (amnésie) touchant les minutes ou les heures précédant la perte de conscience. Elle a été observée en centrifugeuse. Elle peut être assez ennuyeuse en vol.

L'un des problèmes principaux est que la perte de conscience sous facteur de charge présente une forte disparité, totalement aléatoire d'un épisode à l'autre.

Une grande énergie a été déployée pour tenter de relier les symptômes observés à des facteurs physiques identifiables, d'où le découpage en deux grands types de perte de conscience (voir diapositive précédente). Ce fut un échec.

La perte de conscience sous facteur de charge reste un phénomène aléatoire.

Description de la perte de conscience sous facteur de charge : Phases et durée de la perte de conscience

	Minimum	Moyenne	Maximum
Intervalle libre :		4 à 5 s	
Incapacité absolue :	5 s	16,6 s	30 s
Incapacité relative :	1 s	14,5 s	51 s
Incapacité totale :	10-15 s	31 s	64 s
Incapacité opérationnelle :		2 à 3 min	

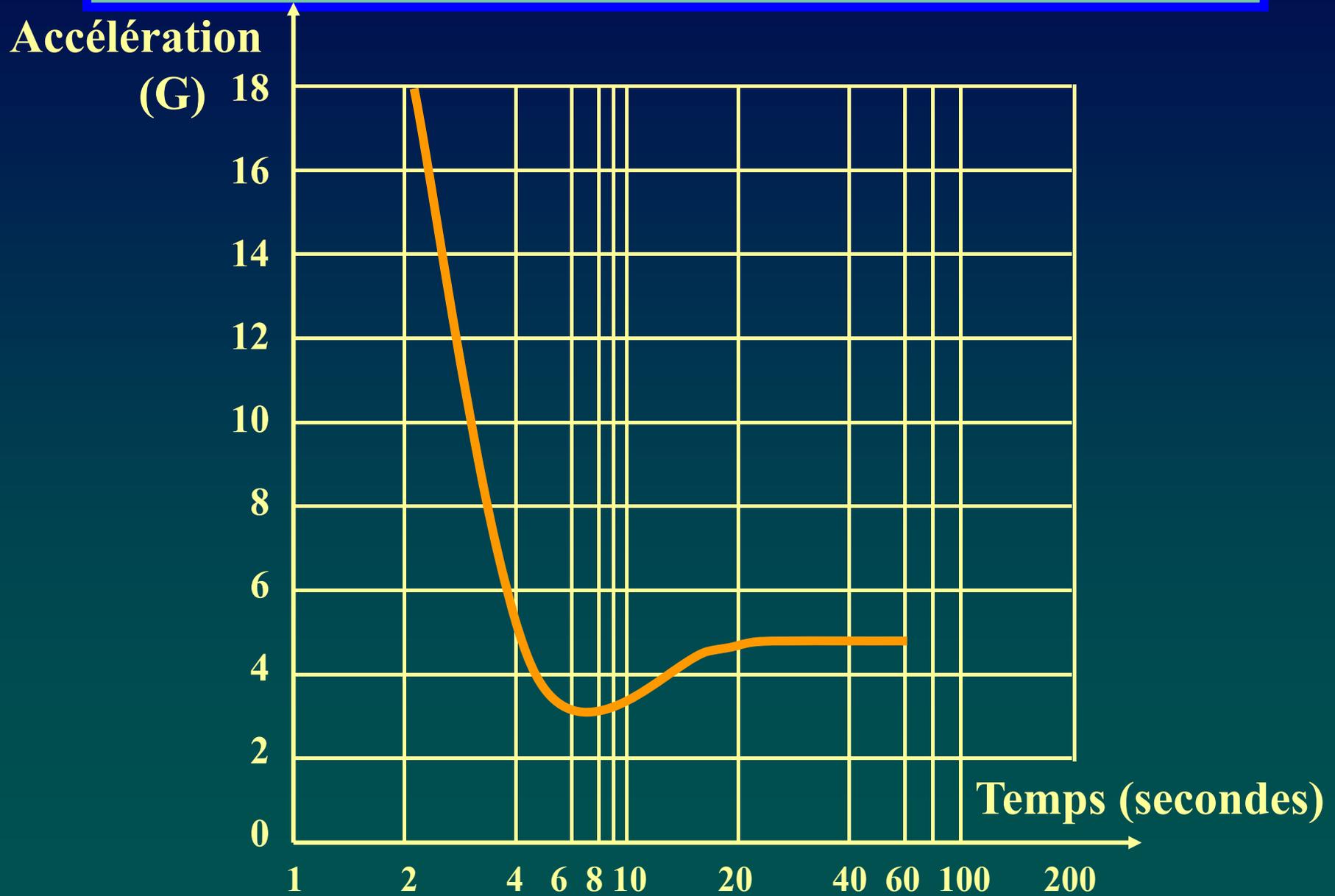
Tolérance aux accélérations (sujets en état de relâchement musculaire)

	Voile gris	Voile noir	Perte de conscience
Valeurs moyennes	4,1	4,7	5,4
écart-type	0,7	0,8	0,9
Minimum	2,2	2,7	3,0
Maximum	7,1	7,8	8,4

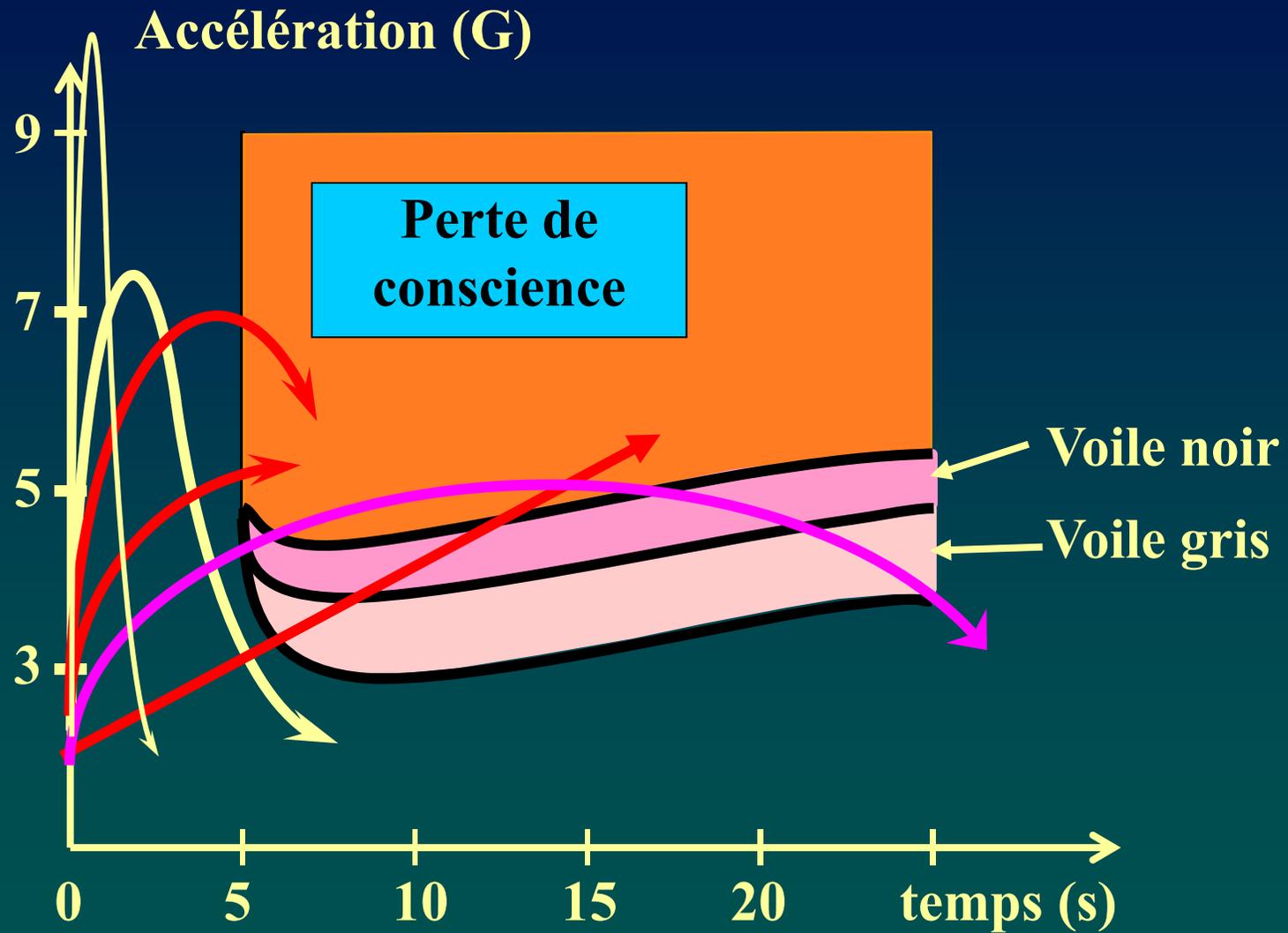
Facteur aggravant potentiel...

- **Troubles de la conduction et du rythme cardiaques**

Tolérance aux accélérations : la courbe de A. Stoll (1956)



Tolérance aux accélérations : scénarios (d'après VandenBosch)



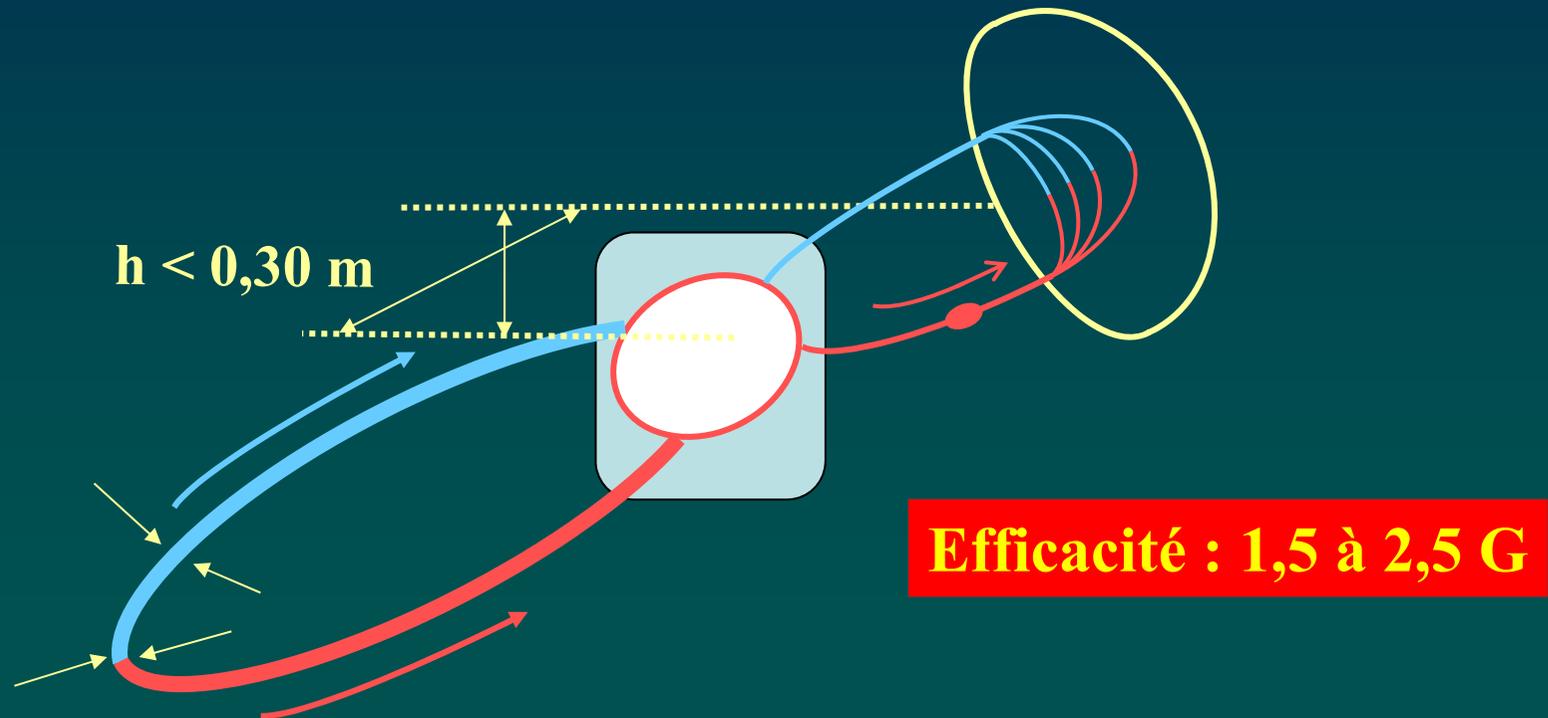
Les moyens de protection



Les manœuvres musculo-respiratoires

3 composantes:

- position du corps (diminution du facteur hydrostatique),
- contraction musculaire de l'abdomen et des membres inférieurs,
- surpression thoracique par la manœuvre de Valsalva.



Instruction en centrifugeuse



L'instruction des personnels en centrifugeuse est une méthode qui permet non pas d'accoutumer les personnels au facteur de charge (cette accoutumance est acquise en vol) mais d'apprendre à effectuer correctement les manœuvres respiratoires de protection (d'où l'emploi du mot « instruction » au lieu du mot « entraînement », d'emploi fréquent).

Efficacité : jusqu'à 4 G

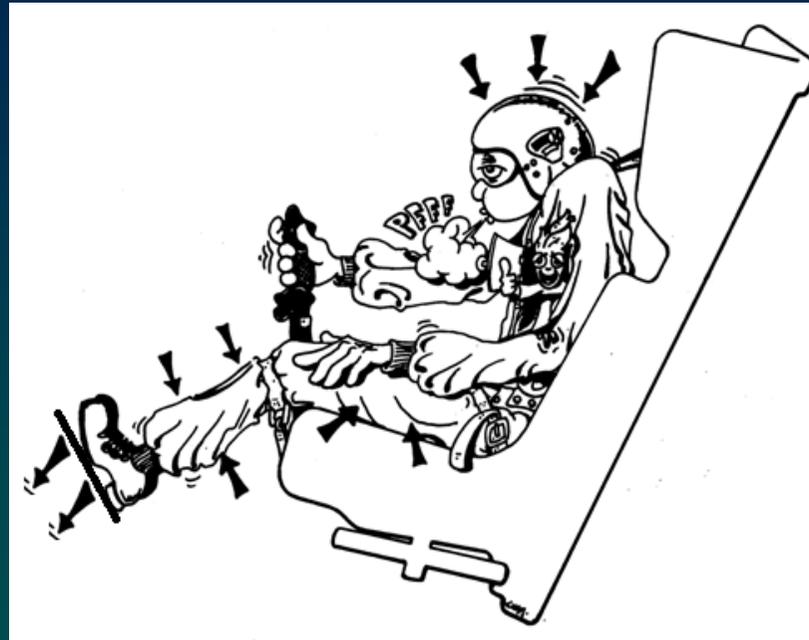
La protection par les manœuvres anti-G volontaires « classiques » :

Contraction musculaire

- cuisses, mollets, abdominaux, ...
- appui sur le palonnier

+

Blocage inspiratoire
par la manœuvre
de Valsalva

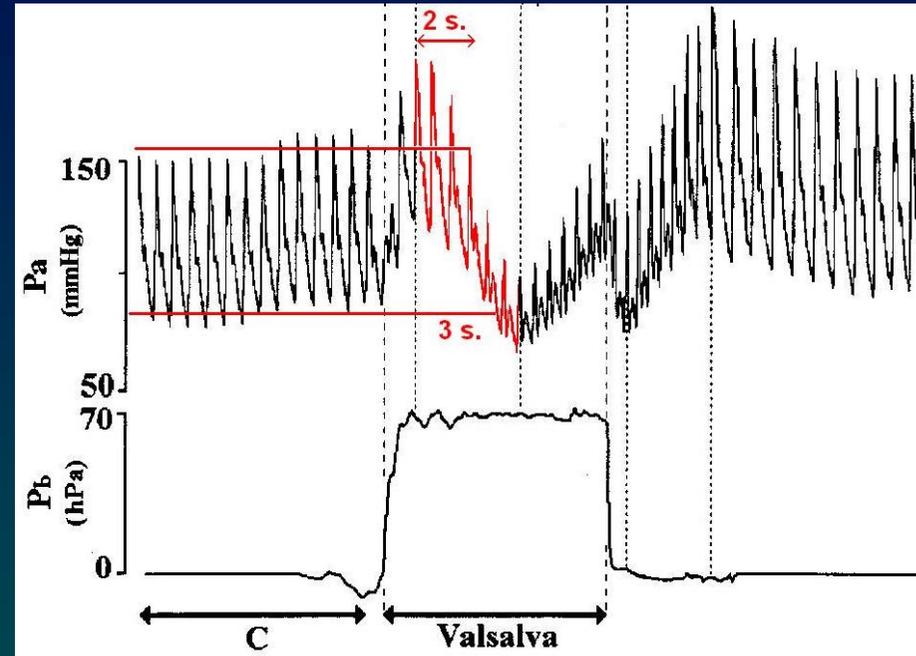


en « rentrant la tête
dans les épaules »

Efficacité : Gain de 1,5 à 4 G

Risque des manœuvres anti-G volontaires : le rôle d'une manœuvre respiratoire isolée sur la pression artérielle et son interprétation

Au cours de cette expérience, la pression intrathoracique (tracé du bas) est maintenue par le sujet à une valeur imposée et calibrée, d'importance modérée pour ce type de manœuvre (70 hPa). L'enregistrement de la pression artérielle (tracé supérieur) montre une augmentation de la pression artérielle pendant 2 secondes (effet recherché), suivie de sa diminution, voire de son effondrement (effet fortement indésirable). Pourquoi ?

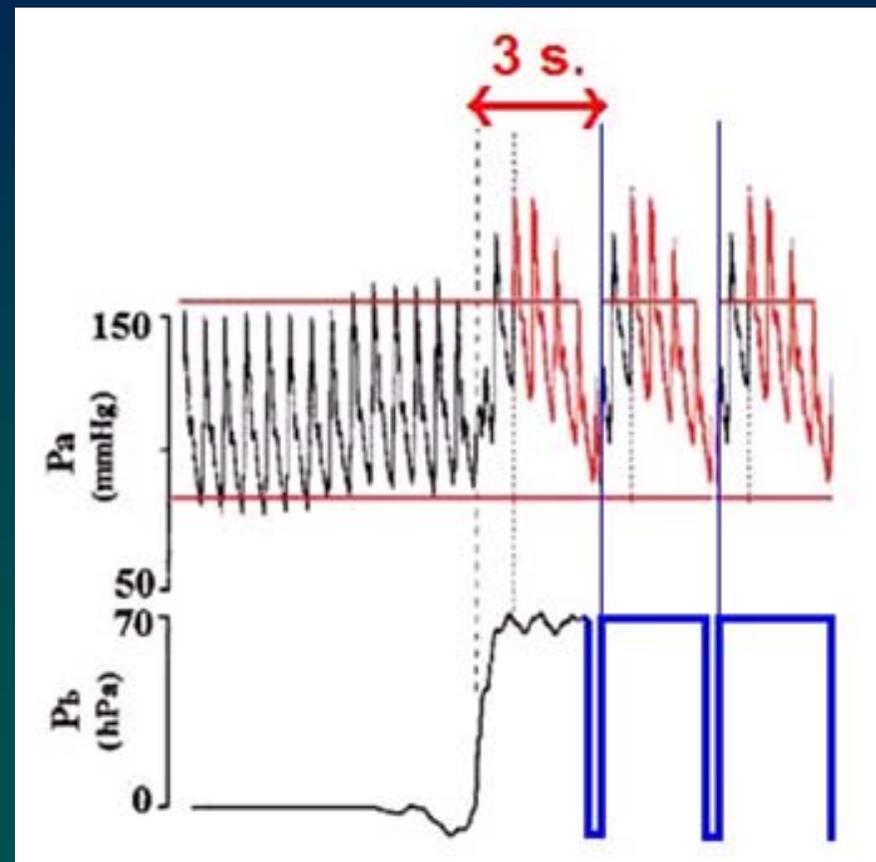


Au cours de la manœuvre de Valsalva, la pression dans les alvéoles pulmonaires devient supérieure à la pression dans la circulation sanguine interne au poumon (circulation pulmonaire, dont la pression maximale est de l'ordre de 20 hPa dans les conditions normales) et à la pression dans les veines qui ramènent le sang au cœur (de l'ordre de quelques hPa). En d'autres termes, en quelques secondes, la circulation sanguine veineuse et pulmonaire est interrompue par un véritable garrot pneumatique, d'où la diminution de la puissance du cœur (voir *loi de Franck-Starling expliquée précédemment*) et de la pression en aval.

Rôle de manœuvres respiratoires brèves et répétées rapidement

Cette expérience démontre que, lorsqu'une reprise inspiratoire est effectuée toute les 3 secondes, la circulation sanguine se rétablit suffisamment pour que l'enchaînement des manœuvres se révèle bénéfique.

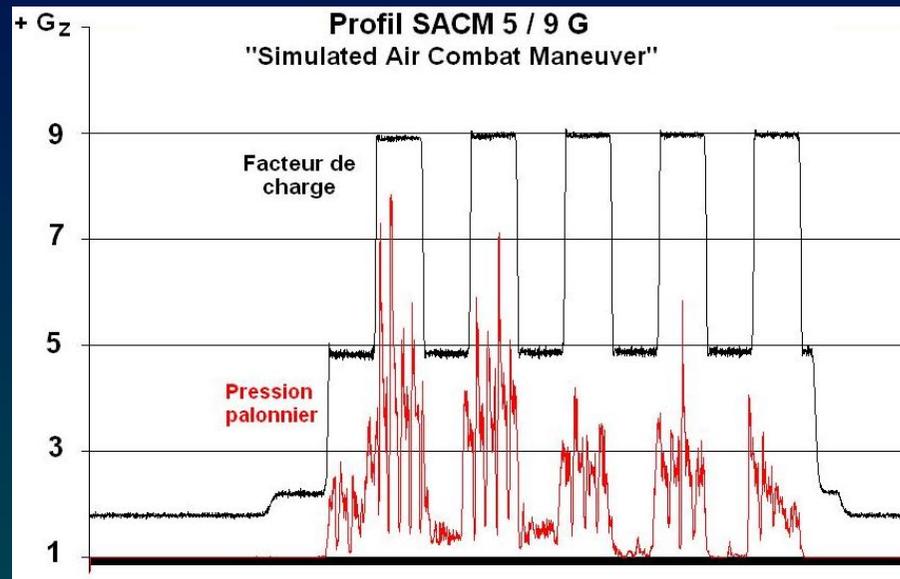
Le cadencement des manœuvres successives doit être précis.



Limite des manœuvres anti-G volontaires (suite)

La fatigue musculaire

Ces tracés montrent en superposition l'accélération au cours d'une manœuvre SACM (*Simulated Aerial Combat Maneuvers*), par plateaux d'accélération alternés entre 5 et 9 G, et la force exercée sur les palonniers.



Le résultat est dépourvu d'ambiguïté : le sujet s'épuise.

Le risque est alors clair :

c'est celui de la perte de conscience sous facteur de charge, dû à l'insuffisance par épuisement de la protection anti-G.

Le tracé présenté ici est relativement « standard ».

Entraînement!!!

Inclinaison du siège vers l'arrière

Optimum actuel : 30 à 35 °

(efficacité proportionnelle au cosinus de l'angle d'inclinaison)

Efficacité: 1 G

Entraînement physique

L'entraînement physique spécifique est à discuter car il introduit des modifications physiologiques complexes dont l'impact sur la tolérance aux accélérations est très divers, favorable, neutre ou parfois franchement défavorable.

Il peut augmenter les capacités de la sangle abdominale et améliorer l'exécution des manœuvres respiratoires de protection.

Mais il peut aussi provoquer l'augmentation du lit vasculaire de la partie inférieure du corps, donc l'augmentation des possibilités de stockage sanguin dans cette zone, augmenter le tonus parasympathique et diminuer la tolérance aux accélérations $+G_z$.

L'entraînement physique, comme moyen d'améliorer la tolérance aux accélérations $+G_z$, est encore en évolution, avec notamment deux objectifs :

- trouver des protocoles d'entraînement physique spécifiques à certains aspects de la contrainte des accélérations rencontrées en voltige: c'est le domaine de la musculation spécifique de l'axe tête-cou.
- mise au point de protocoles d'entraînement physique adaptés à l'objectif physiologique recherché.

Combiner différentes techniques de protection anti-G

Conditions	Tolérance moyenne (G)	Gain de tolérance (G)
Sujets au repos	3,23	
Équipements anti-G	6,35	3,12
Manœuvres	4,93	1,71
Siège incliné	4,25	1,02
Manœuvres & Siège incliné	6,22	3,00
Équipements anti-G & Siège incliné	7,60	4,37
Équipements anti-G & Manœuvres	8,50	5,27
Équipements anti-G & Manœuvres & Siège incliné	9,60	6,37

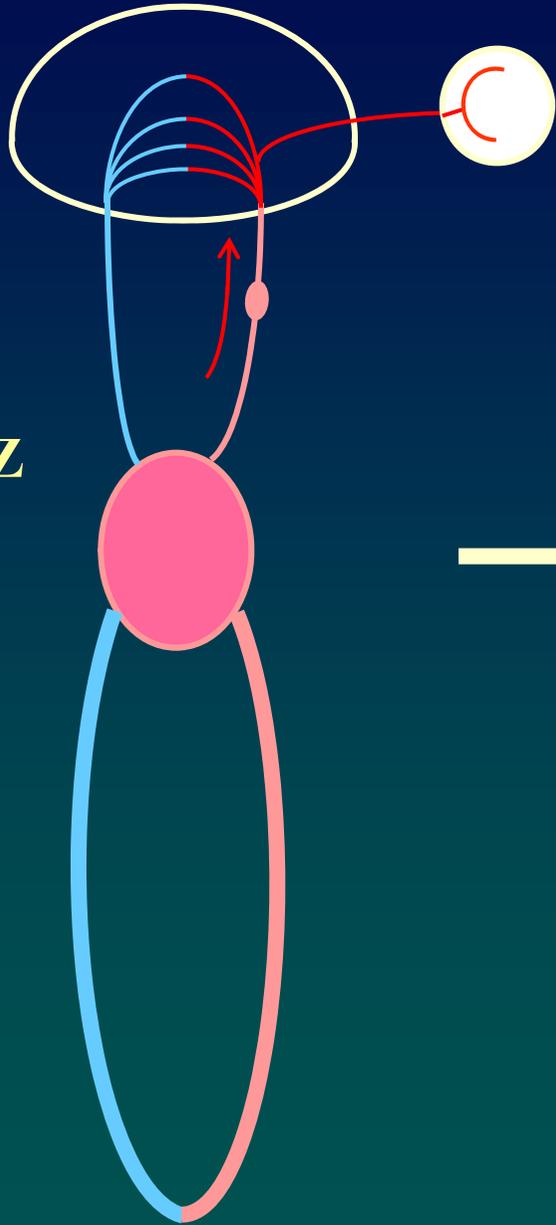
(Cohen, 1983)

Accélérations $-G_z$

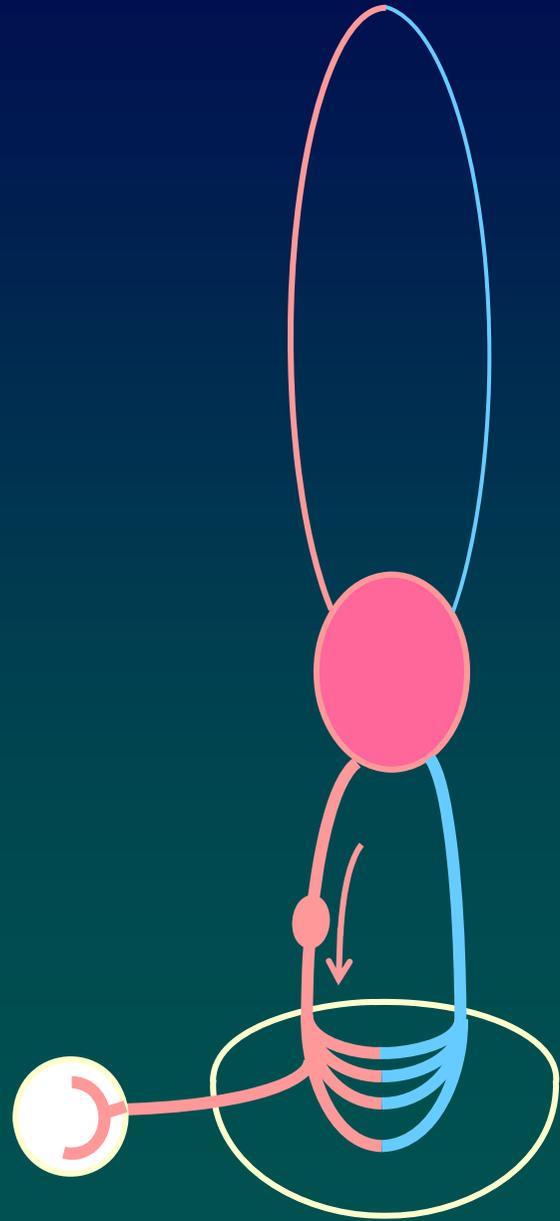
Généralités :

- Voltige inversée
- Accélérations dirigées de la tête vers le siège
- \Rightarrow Forces d'inertie dirigées du siège vers la tête
- Accélérations moins bien supportées que les accélérations $+G_z$
- Ont été étudiées uniquement avec des vitesses lentes de mise en accélération

$+G_z$



$-G_z$



Accélérations $-G_Z$

Tolérance :

- de l'ordre de 5 secondes pour $-4,5 G$,
- de l'ordre de 30 secondes pour $-3 G$.
- Pas de moyen de protection contre les accélérations $-G_Z$.

 *En pratique, le principal problème lié à la tolérance aux accélérations $-G_Z$ est celui de la succession d'accélérations $-G_Z$ puis $+G_Z$, qui "casse" la tolérance aux accélérations $+G_Z$ qui suivent. Le voile noir et la perte de conscience peuvent ainsi apparaître à des valeurs très basses de l'accélération $+G_Z$, de l'ordre de 2 à 3 G ($+G_Z$).*

C'est l'effet « push-pull », qui entraîne des perturbations cardiovasculaires pouvant persister pendant plusieurs heures.

Le risque de perte de conscience



- Association accélération $+G_z$ - chaleur - digestion

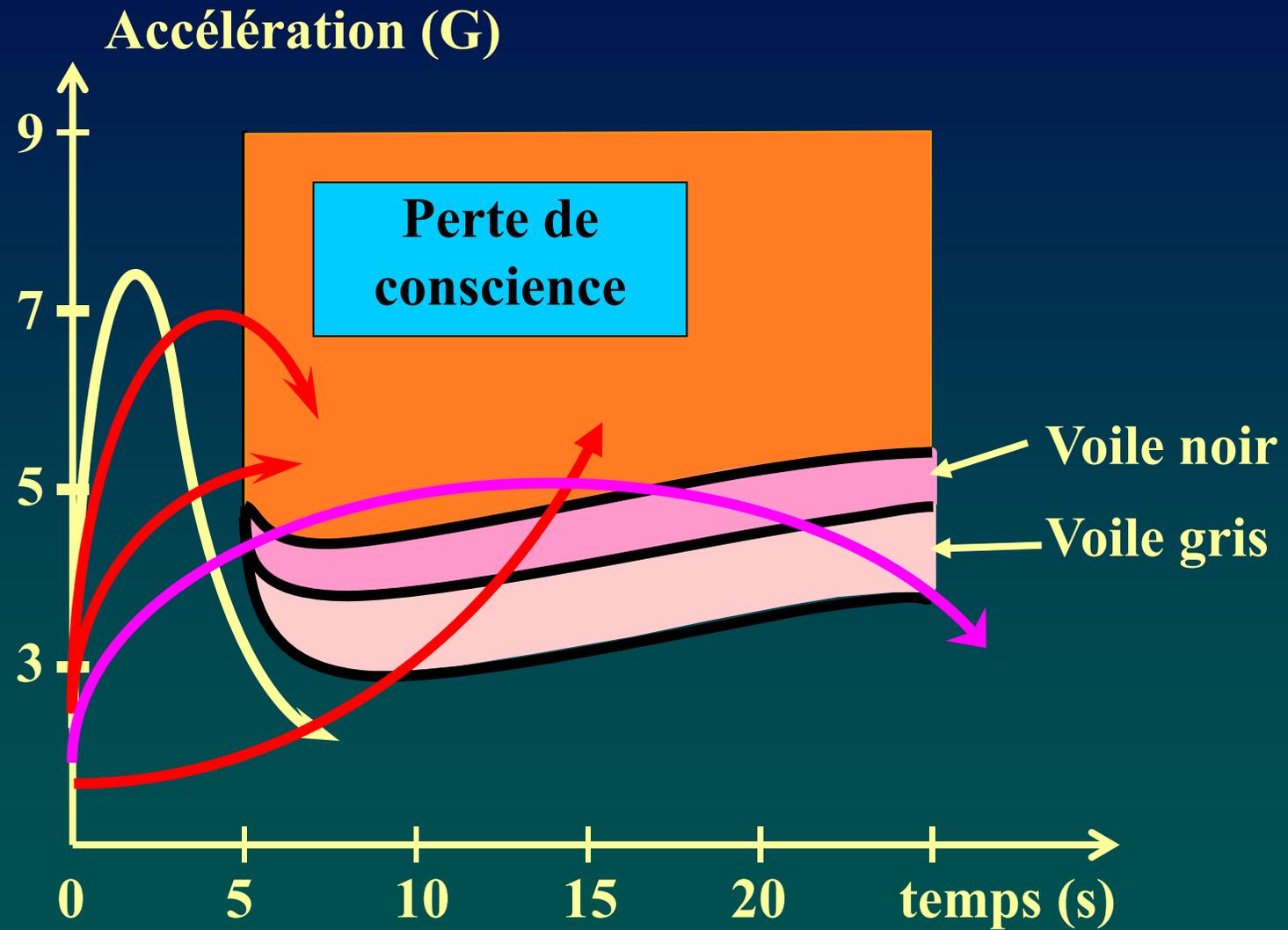
Le problème posé est celui de la ressource (limitée) que représentent le débit et le travail cardiaques.

La fonction la plus prioritaire de l'organisme est le maintien de la température. À la chaleur, 25% du débit sanguin peuvent être réservés à cette fonction, sans négociation possible.

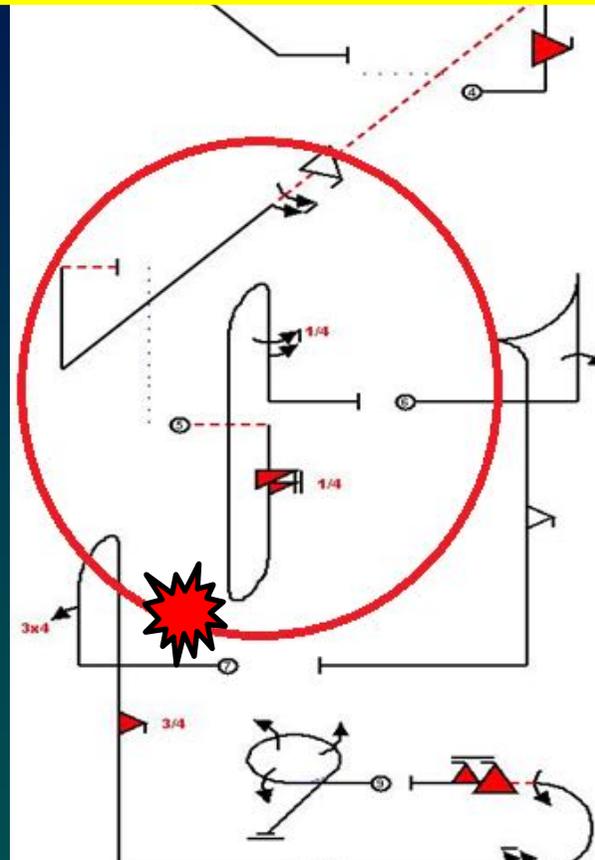
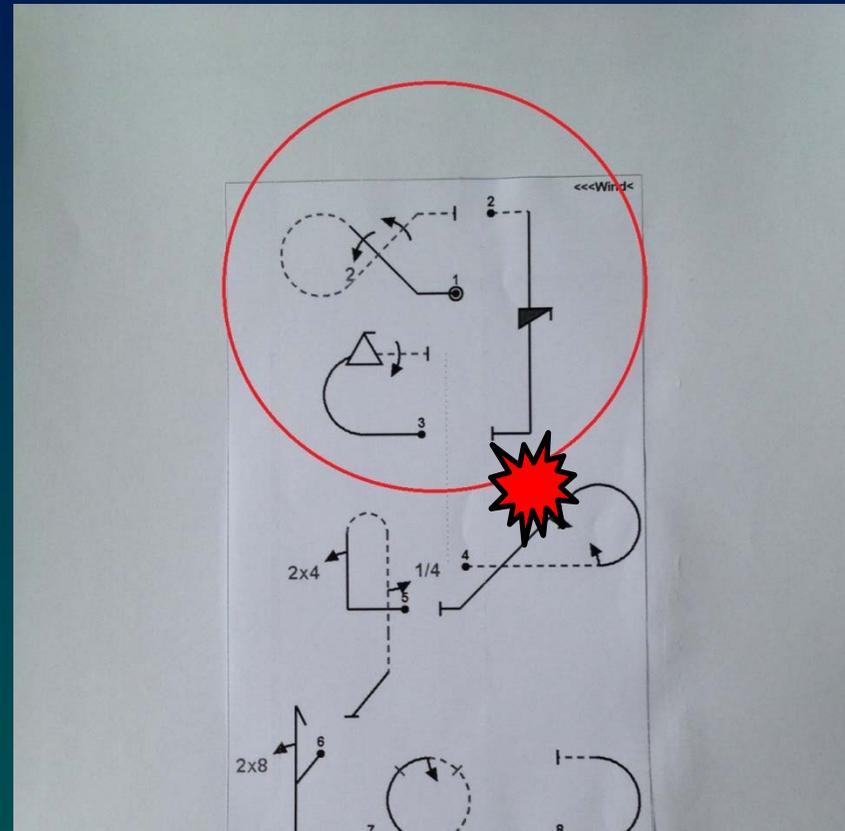
En phase digestive, 35 % de ce même débit sont réservés à cette fonction sans davantage de négociation ! La ressource disponible pour les autres fonctions ou réponses aux contraintes est amputée d'autant.

Toutes les forces aériennes au monde ont perdu des équipages dans ces conditions... la voltige aérienne civile connaît le même sort!!!

Tolérance aux accélérations : scénarios (d'après VandenBosch) (risque de perte de conscience inaugurale)

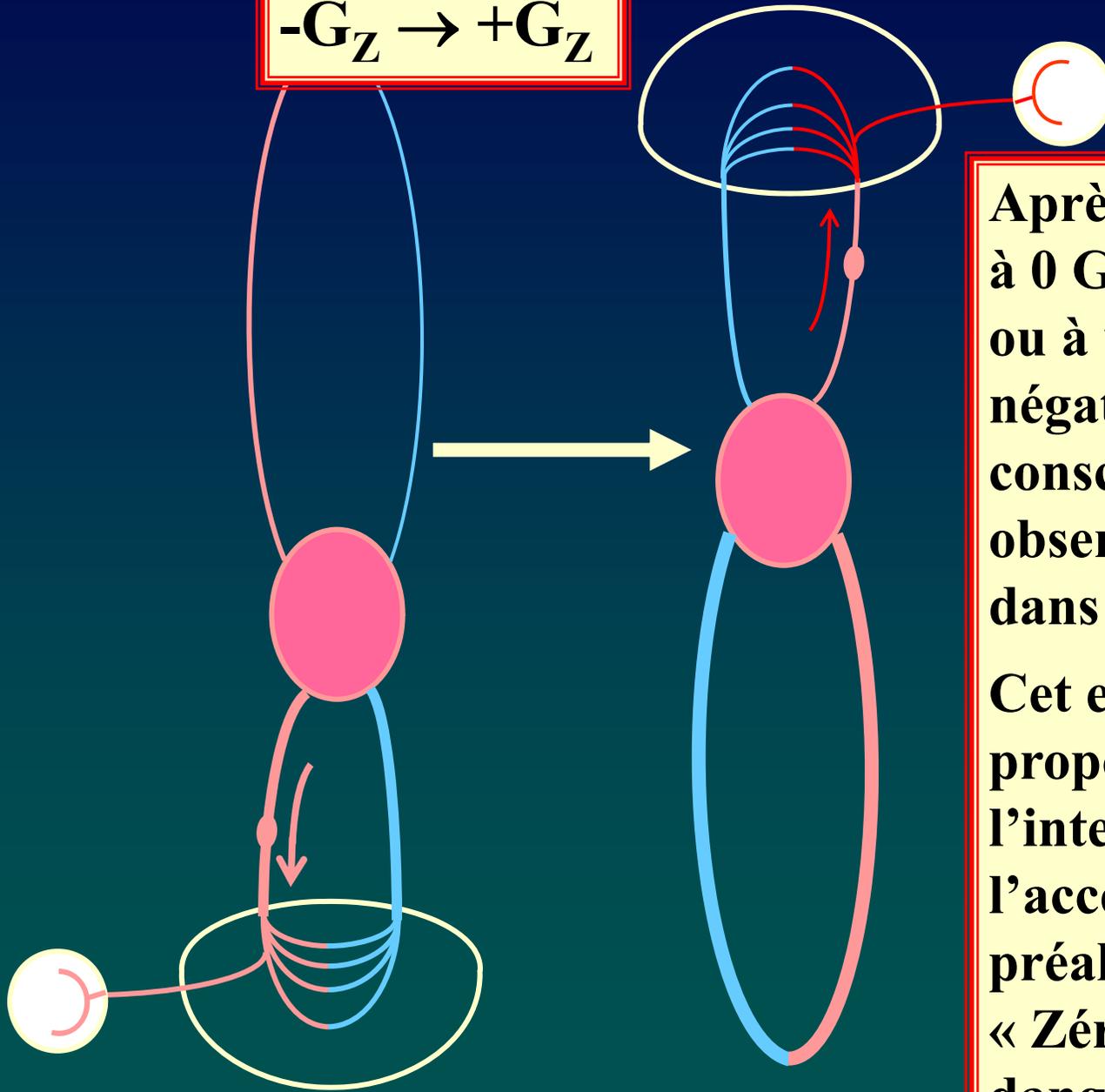


Perte de conscience au cours des enchaînements -G_Z/+G_Z (effet push-pull +++)



L'effet push-pull serait responsable du quart des G-LOC.
Il a été décrit par les médecins canadiens dans les *squadrons* de F-18
L'AA française en a connu un fort beau cas sur M2000.

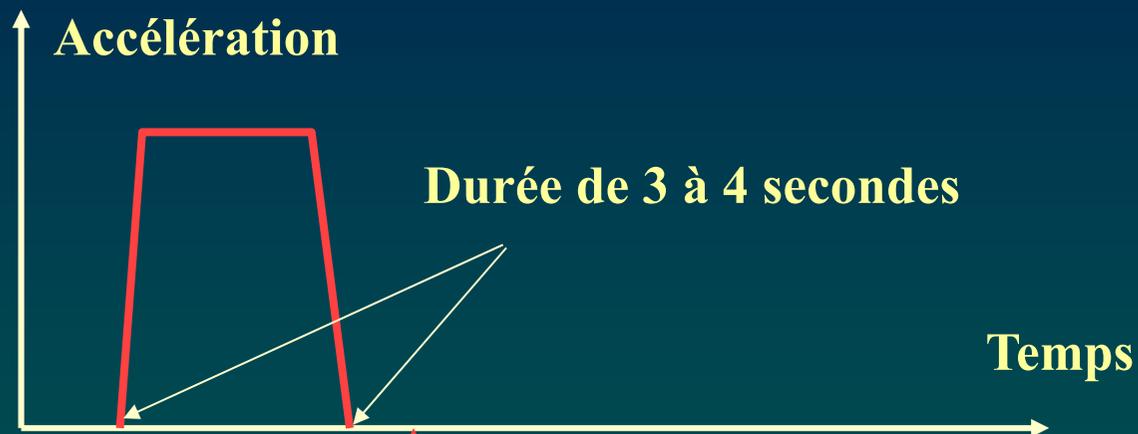
$-G_Z \rightarrow +G_Z$



Après une exposition à 0 G (microgravité) ou à une accélération négative, la perte de conscience **peut** être observée à 2 G (+2G_Z) dans la minute qui suit.

Cet effet n'est pas proportionnel à l'intensité de l'accélération négative préalable. En vol, le « Zéro-G » est aussi dangereux que le « -G_Z ».

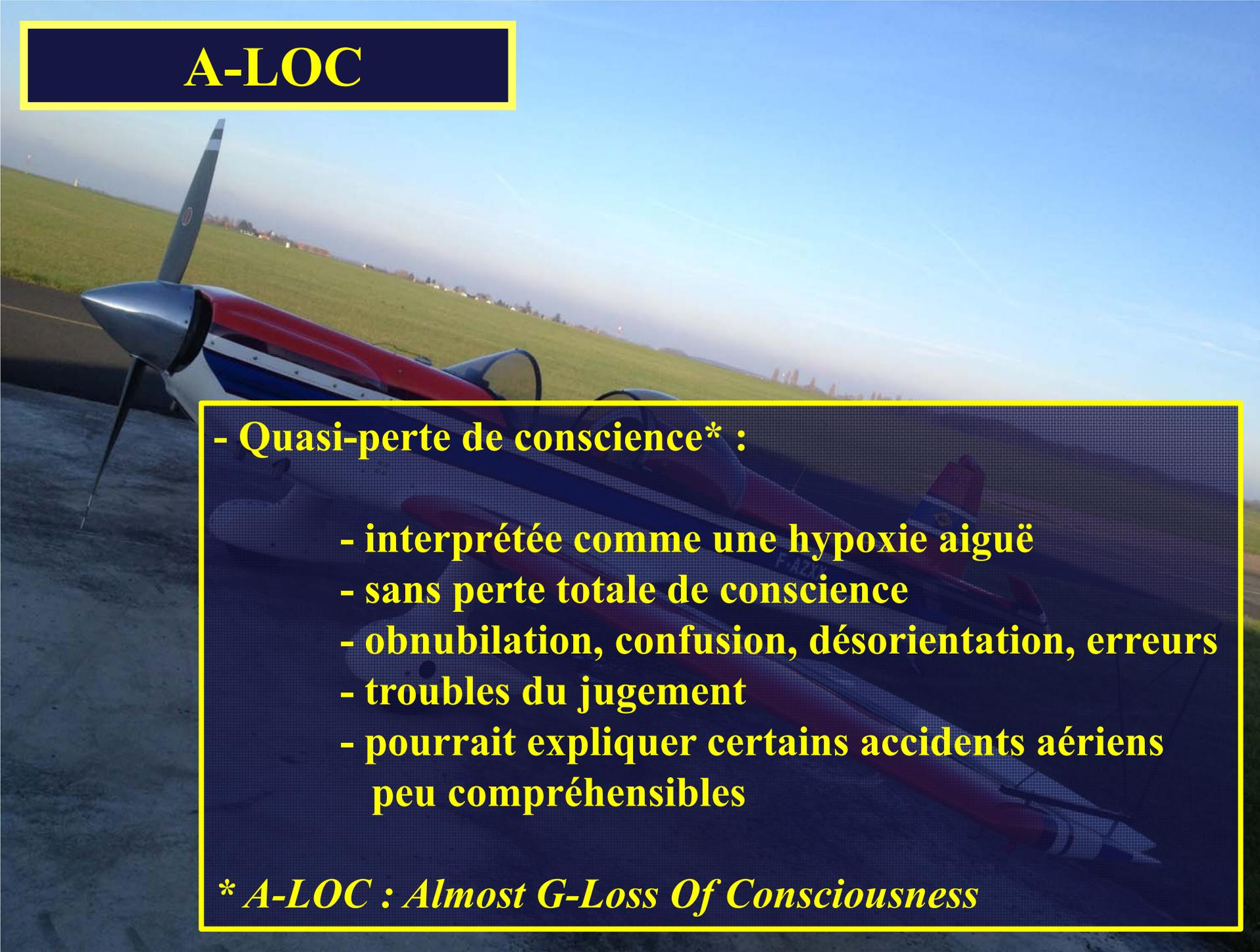
- Perte de conscience retardée après une accélération brève et intense (G-pulse)



Perte de conscience (retardée par rapport à l'accélération)

En pratique : l'existence de ce risque invaliderait la détection automatique du G-LOC à bord.

A-LOC



- Quasi-perte de conscience* :
 - interprétée comme une hypoxie aiguë
 - sans perte totale de conscience
 - obnubilation, confusion, désorientation, erreurs
 - troubles du jugement
 - pourrait expliquer certains accidents aériens peu compréhensibles

* *A-LOC : Almost G-Loss Of Consciousness*

Voile/G-LOC: CONCLUSIONS

- Peut concerner tout pilote de voltige (individu sensible ou non, biplace, monoplace)
- Aléatoire
- Impact sur la sécurité mais aussi sur les performances en vol



- Chaleur et en phase de digestion



- Enchainements $-Gz+Gz +++$



- Enchainements roulis-tangage

CONCLUSIONS (suite)

- **Warm-up**
- **Qualité des manœuvres musculo-respiratoires (entraînement spécifique)**
- **Trimer l'avion**
- **Pantalon anti-G?**
- **Ne pas hésiter à en parler!!!**



Remerciements au

Pr Henri Marotte

Professeur Agrégé du Val-de-Grâce

Directeur de la Capacité de Médecine Aérospatiale de Paris

Centre Universitaire des Saints-Pères

Paris

**qui très amicalement m'a autorisé
une large utilisation de son cours
de médecine aérospatiale**

A photograph of two men in a cockpit. The man on the left is older, wearing glasses and a headset, smiling. The man on the right is younger, wearing sunglasses and a headset, looking forward. They are both wearing harnesses. The background shows a landscape of fields and a runway from an aerial perspective.

**Remerciements à
Patrick GIGOT**

**Qui n'hésite pas à payer de sa personne pour m'assister dans
mes expérimentations**