

# TOUT SAVOIR SUR LES DÉCOMPRESSIONS ?

Jean Claude Le Péchon

Ingénieur Conseil

**Toute utilisation ou reprise devra  
faire référence à l'auteur**



Le Chesnay - 2 Avril 2012

# TOUT SAVOIR SUR LES DÉCOMPRESSIONS ?

A - Rappels : Modèle de Haldane

B - Variations depuis Haldane

C - Bulles et Noyaux Gazeux

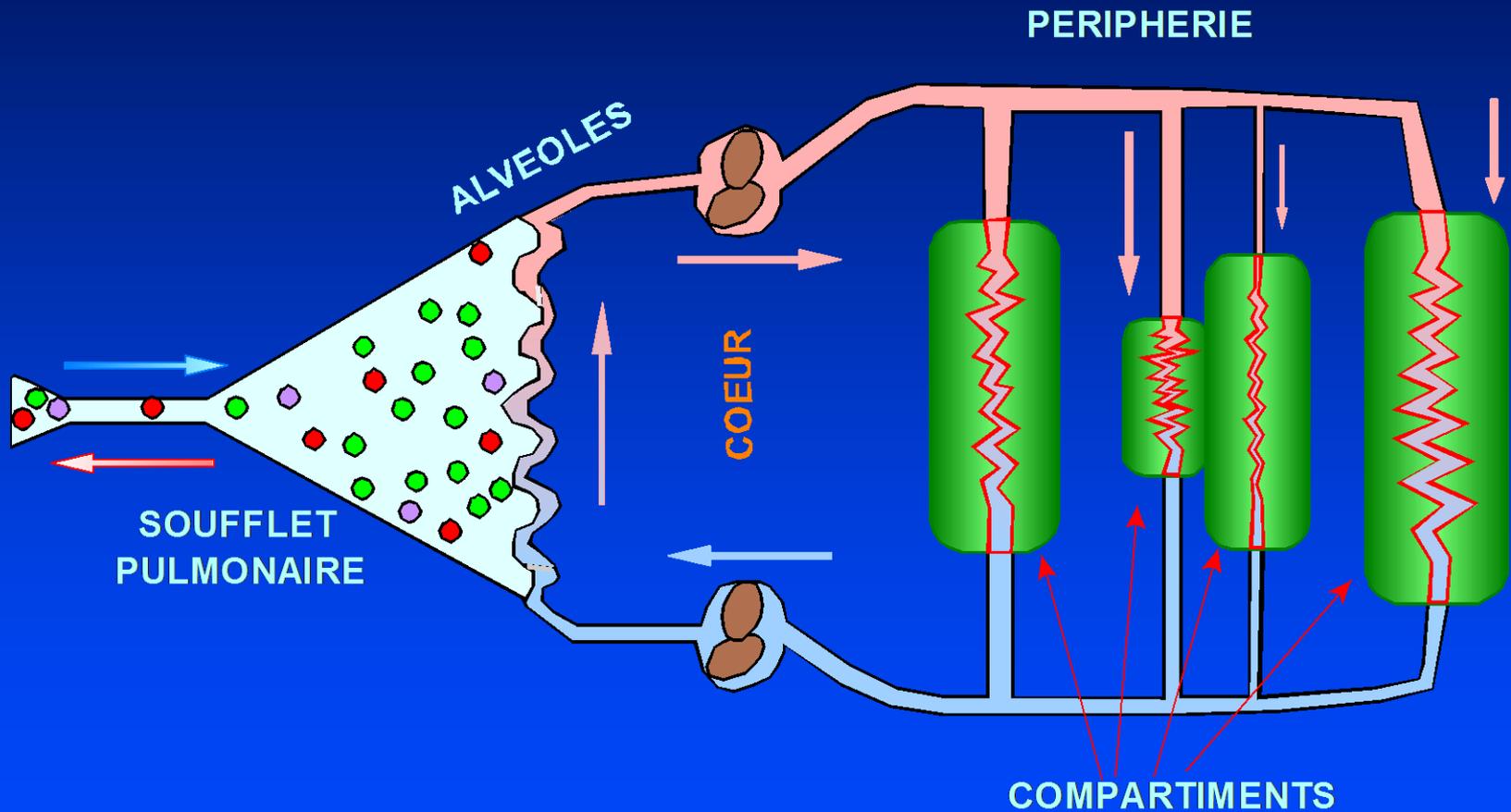
D – Perspectives

E – Cas particuliers (?)



# A - Rappel : Modèle de Haldane

L'organisme peut être divisé en compartiments/tissus



**Alors : Compartiments ou tissus ???**

**Haldane, Bühlmann, Gers 65...., Wienke**

Considèrent des zones anatomiques :

**Tissus**

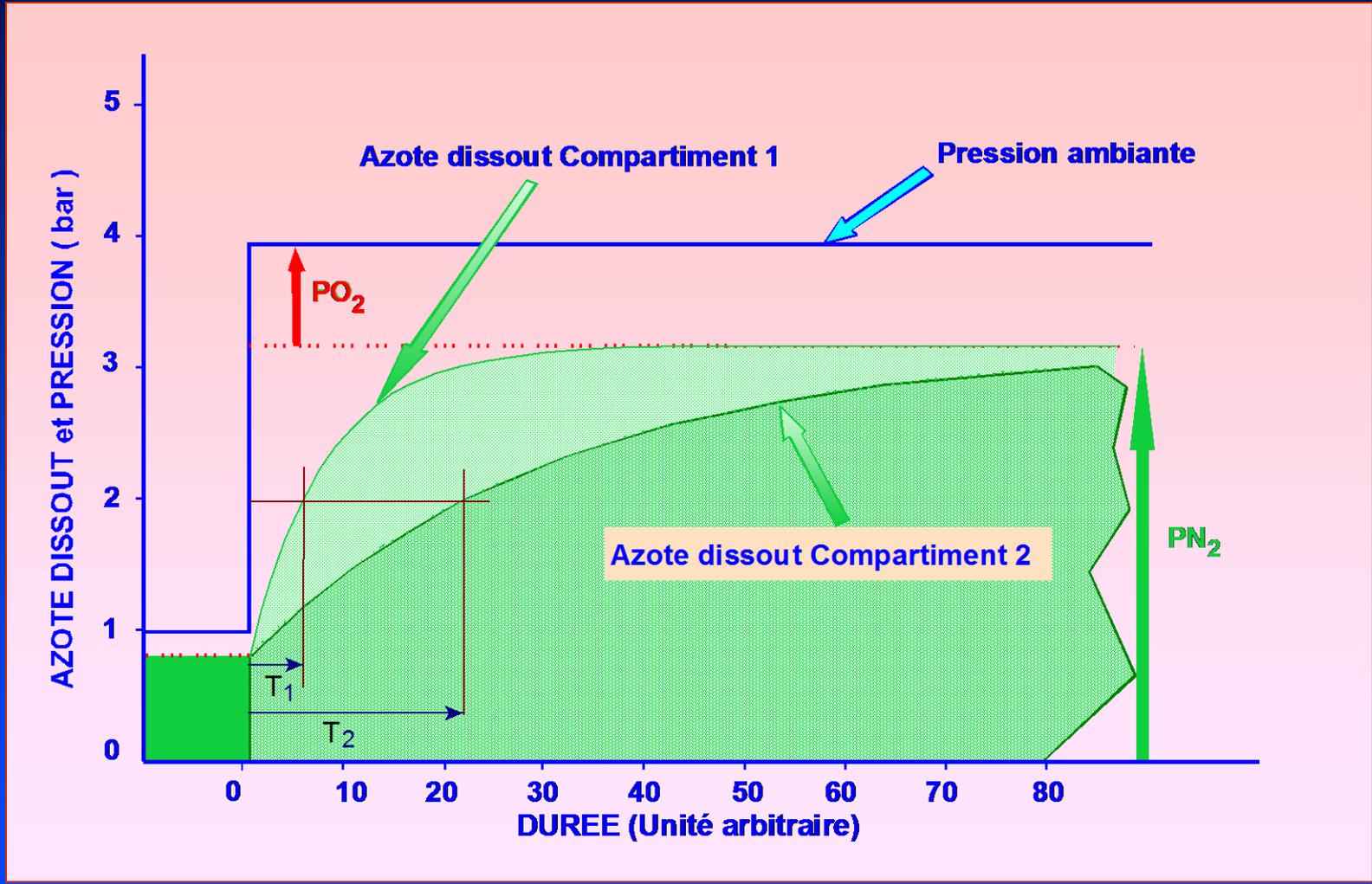
**Workman, MN90, Spencer, Imbert J.P.**

Considèrent un découpage mathématique :

**Compartiments**

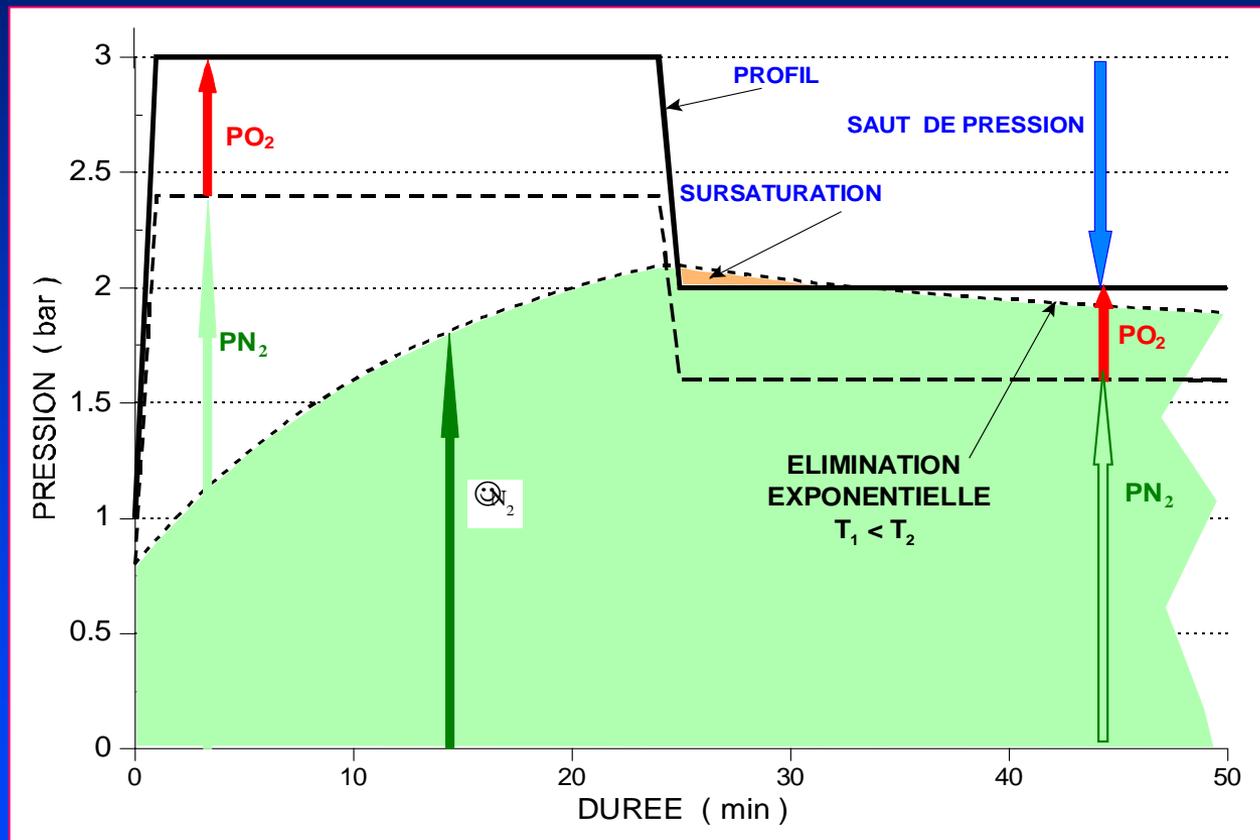


# La charge en gaz inerte est exponentielle...



L'élimination est aussi exponentielle...

**MAIS** : La sursaturation peut créer des bulles

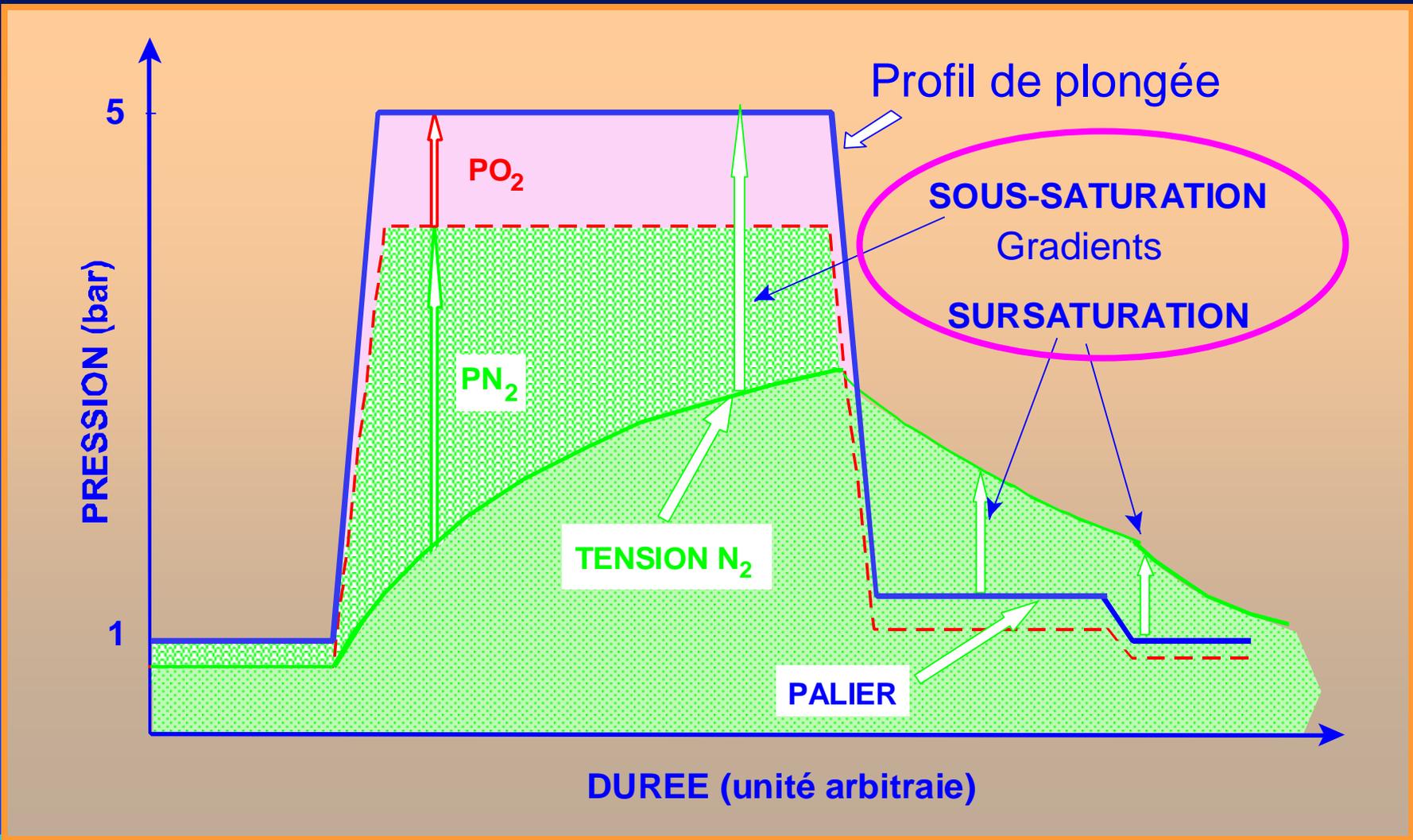


L'élimination est surtout **NON** symétrique !

Le Chesnay - 2 Avril 2012



# La sursaturation doit être limitée (Coefficient = 2 selon Haldane)



La sursaturation doit être limitée (critère de remontée)

La sursaturation s'évalue par rapport à la pression totale

Avec cette limite (coef. = 2) il ne se formerait pas de bulles...



Sous-saturation et Sur-saturation se mesurent en bar

La sursaturation peut s'exprimer de plusieurs façons :

1 - Valeur absolue de la tension de gaz à une pression

donnée :  $\text{P}_{\text{N}_2}$  à P

Limites : M Values

2 - Rapport de sur-saturation :  $\text{P}_{\text{N}_2} / P$

Limites : Coefficient de Sursaturation critique

3 - Gradient de sur-saturation (Delta) :  $\text{P}_{\text{N}_2} - P$

Limites : Delta P maximum à une Pression donnée



S'il existe plusieurs gaz **INERTES** dissous,  
la «saturation» se calcule à partir  
de la somme des tensions de chacun des gaz dissous  
dans le compartiment considéré

Bühlmann, Keller, Wienke



## B - VARIATIONS DEPUIS HALDANE

### 1 - Changement des limites acceptées

Le nombre de tissus croît (16 – Buhlmann)

Ils sont aussi devenus compartiments mathématiques

(Workman)

La sursaturation limite est devenue une M Value

Workman, Bühlmann, Fructus, Wienke (RGBM)



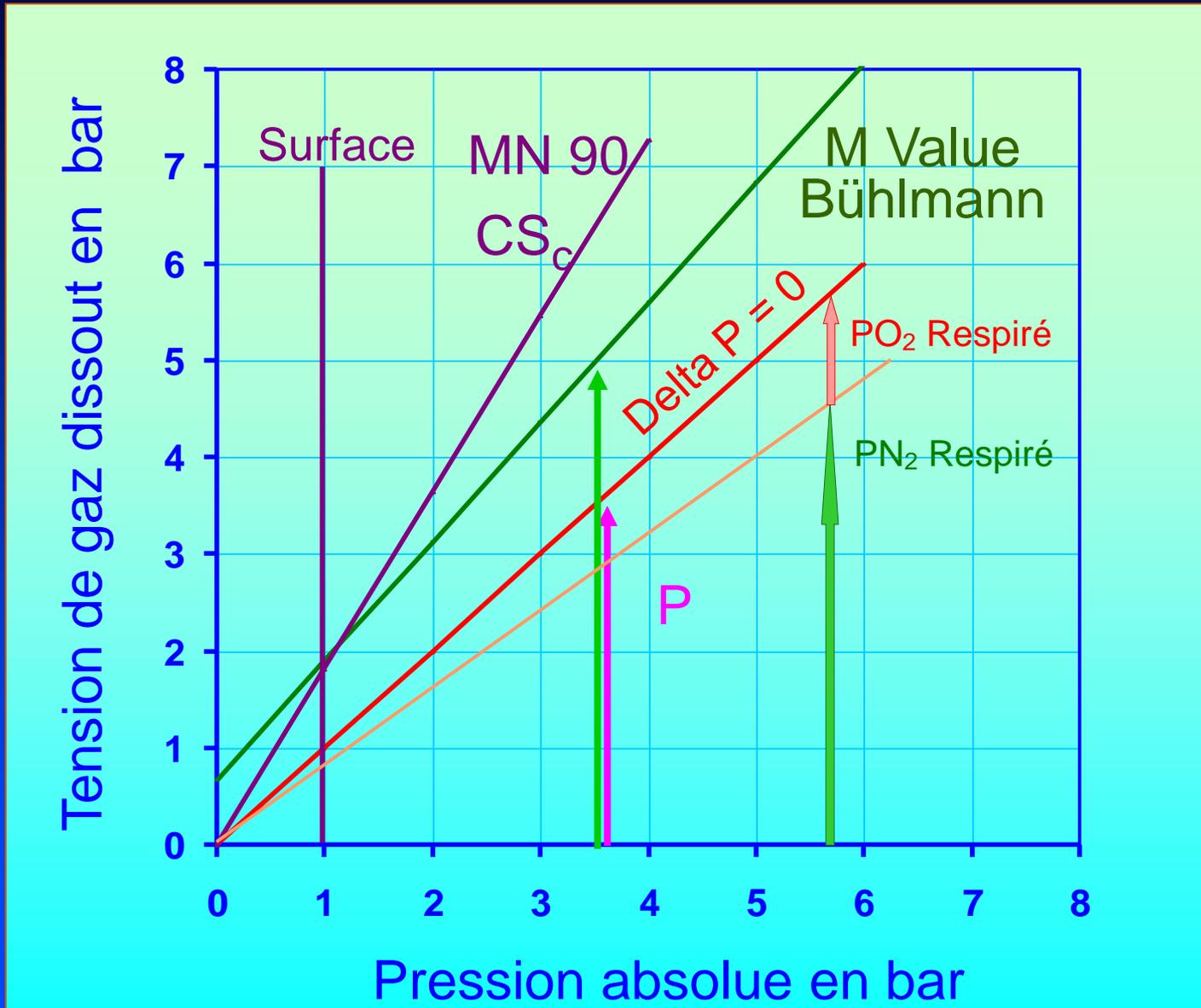
## 2 – Les M Values et leur utilisation

M Values selon X. Fructus (Tables MT 74) en bar

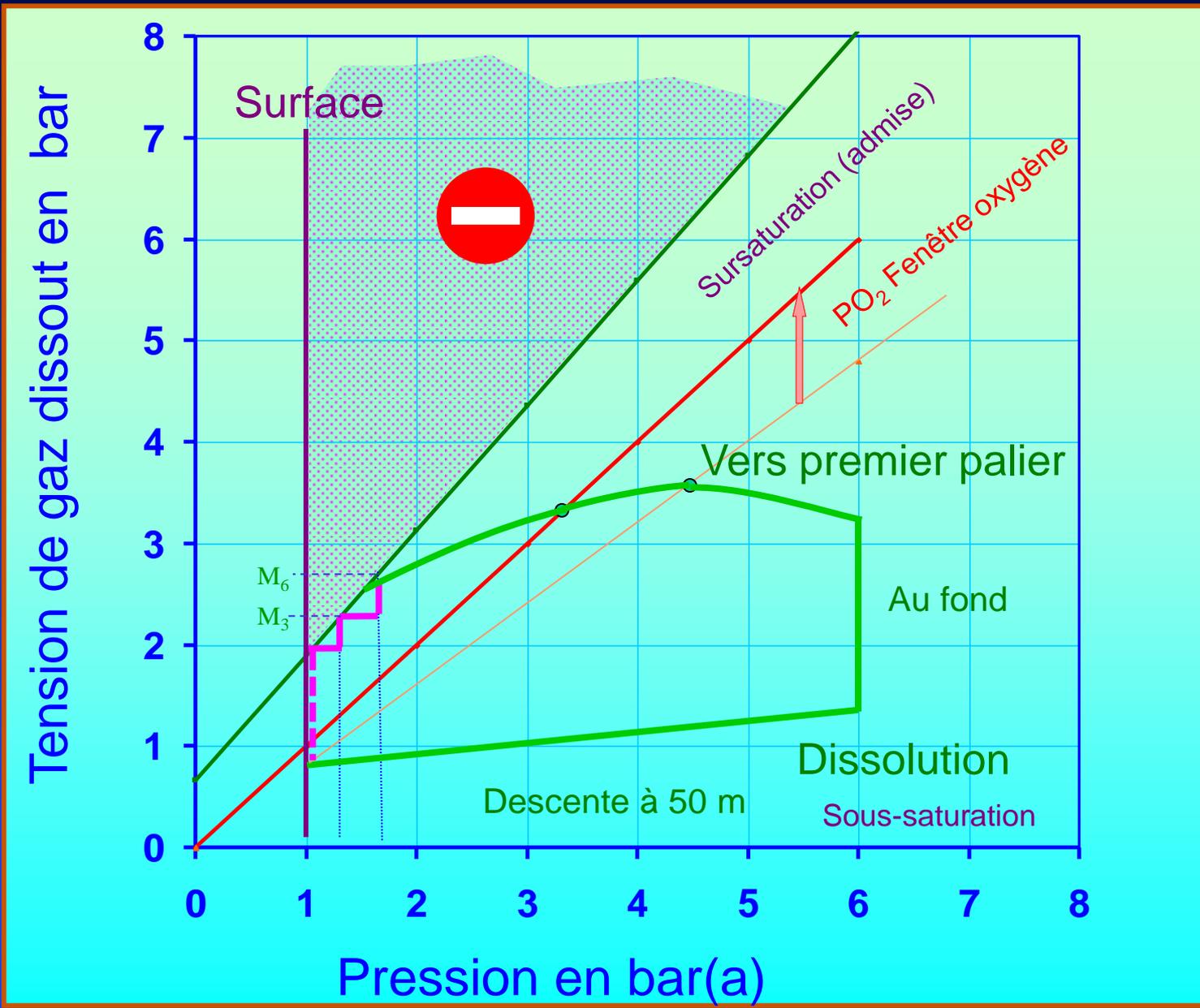
Période	5	10	20	40	80	120	240
Surf	2,7	2,4	2,05	1,72	1,56	1,52	1,4
3 m	3,3	2,9	2,5	2,12	1,91	1,85	1,70
6 m	3,9	3,4	2,95	2,52	2,26	2,18	2,0
9 m	4,5	3,9	3,4	2,92	2,61	2,51	2,3
12 m	5,1	4,4	3,85	3,32	2,96	2,84	2,6

Coefficient sursaturation critique correspondant :  $2,95 / 1,6 = 1,84$

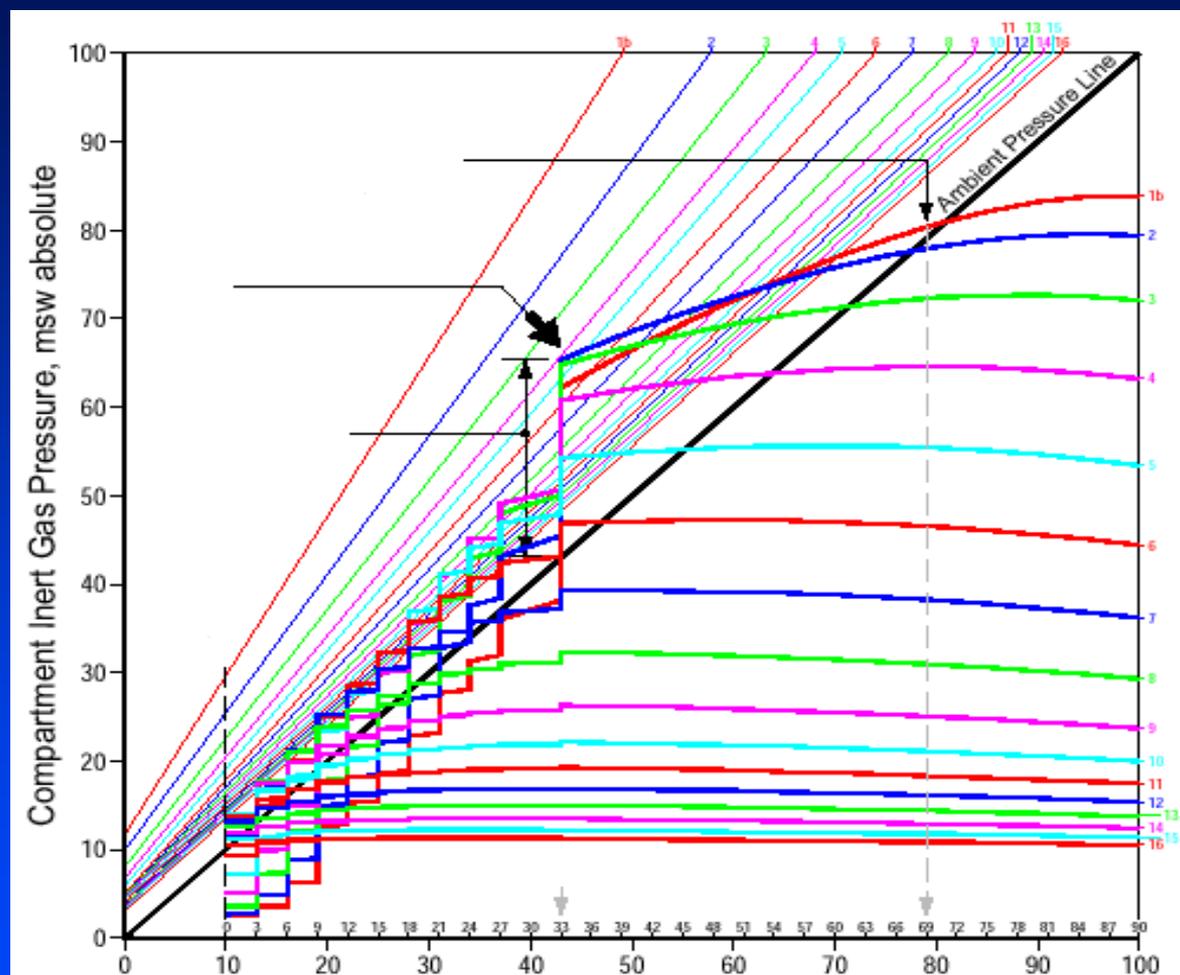




## 2 – M Values et leur utilisation (suite...)



## Exemple multi-compartiment (Wienke)



## 3 - Changements de la fonction d'élimination

L'élimination considérée comme linéaire

**U S Navy** (Thalman)

Gradient de sursaturation pour la décompression de saturation

Constant (US Navy, Cx, MT 92 sat...)

Progressivement décroissant (JCLP)



## 4 - Introduction à la notion de

### « Fenêtre **oxygène** tissulaire »

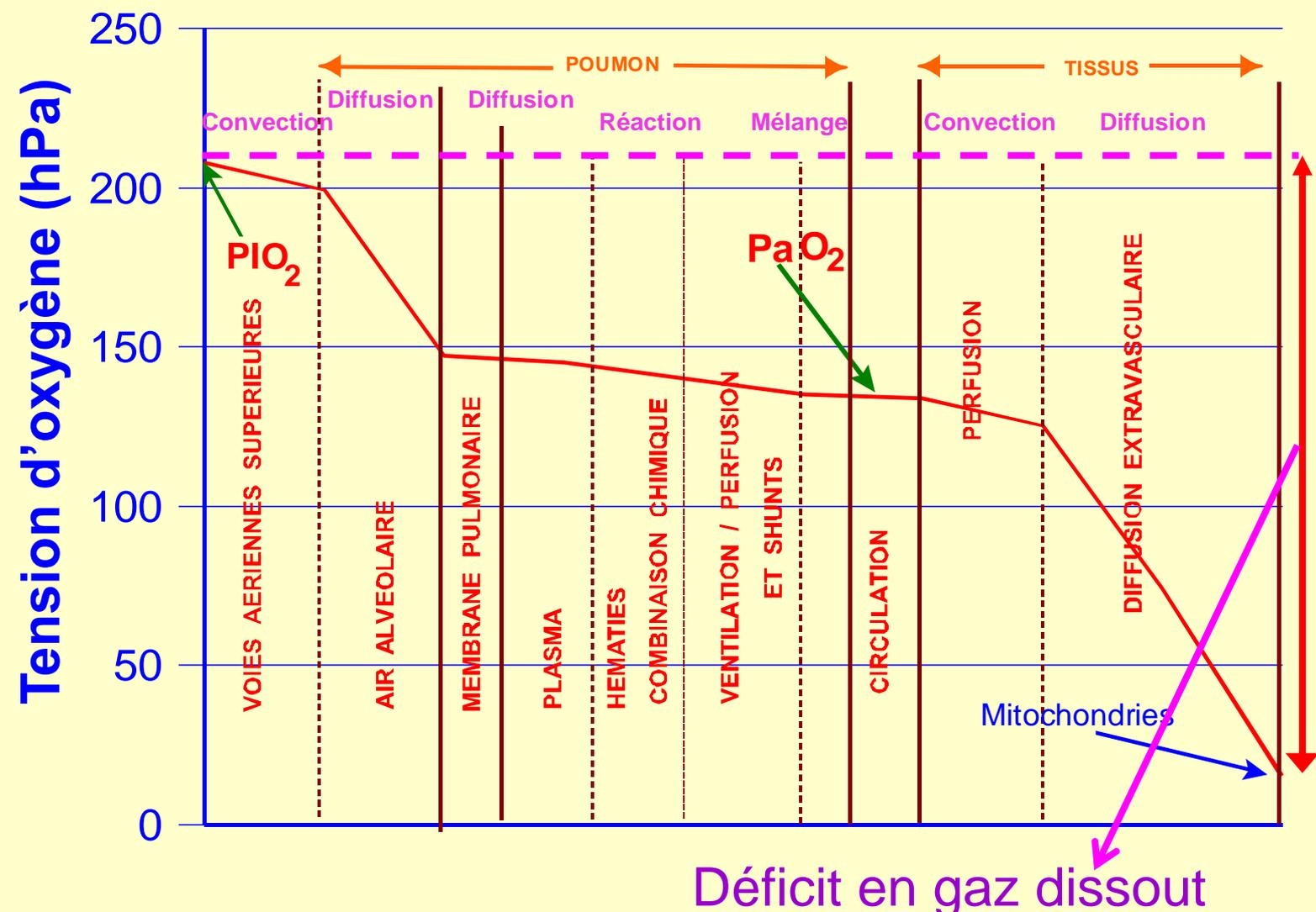
Depuis l'échange alvéolaire jusque dans les  
tissus, ou les cellules,

puis par la consommation,

la tension **d'oxygène** dissout diminue

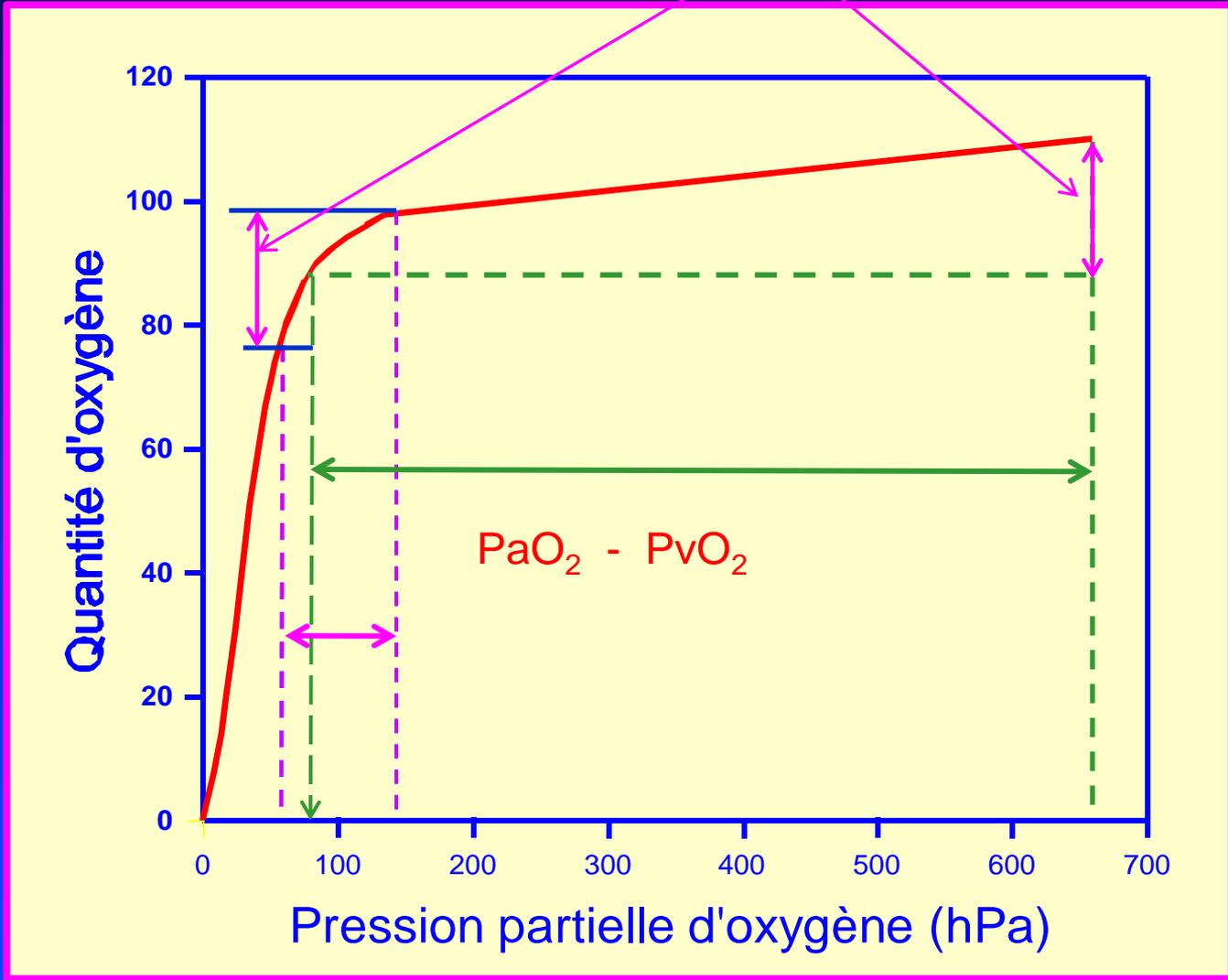


# En normoxie



# En hyperoxie

Consommation  
métabolique



## Et le gaz carbonique ?

La consommation d'oxygène s'accompagne de production de gaz carbonique

Les volumes sont presque équivalents

(Quotient respiratoire voisin de 1)

Le gaz carbonique est très soluble, et cette quantité de gaz, une fois dissoute ne correspond qu'à une pression partielle très faible

Il disparaît au moins 60 hPa d'oxygène alors que seulement environ 5 hPa de gaz carbonique sont produits



Il existe donc une sous-saturation inhérente, due à la  
« fenêtre oxygène »

En négligeant la vapeur d'eau, et en profitant de  
l'effet gaz carbonique

cette sous saturation est presque égale à :

$$PO_2 = P - P_{(\text{Gaz Inerte})}$$



## 5 - Paliers à l'oxygène

### 5.1 – Principe



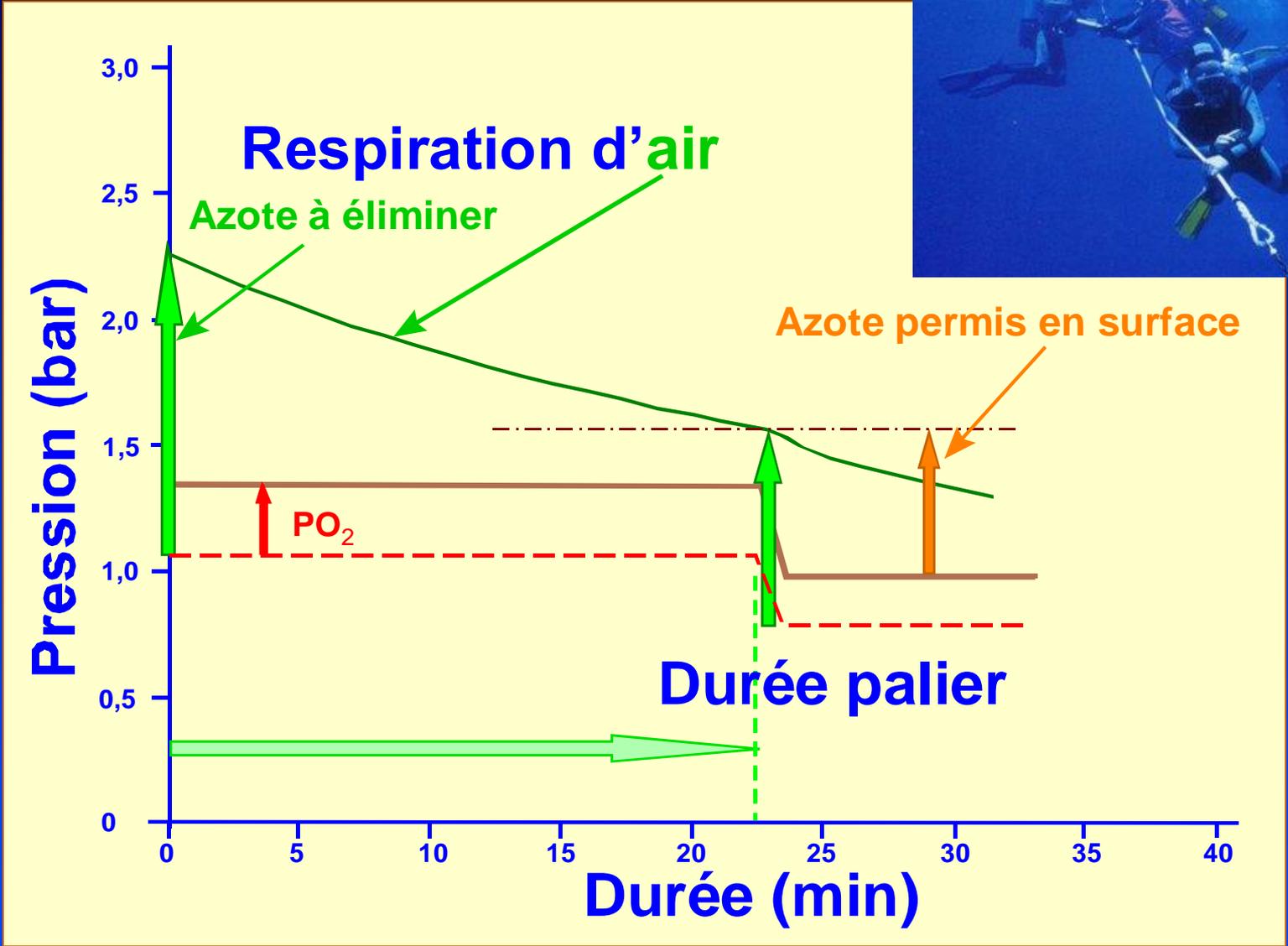
L'utilisation de la respiration d'oxygène au palier fait partie du cours Nitrox 2 FFESSM !

Il ne s'agit pas d'une technique « Nitrox », notamment parce que la pratique du Nitrox vise à minimiser la décompression au point qu'il n'y ait presque plus de palier....

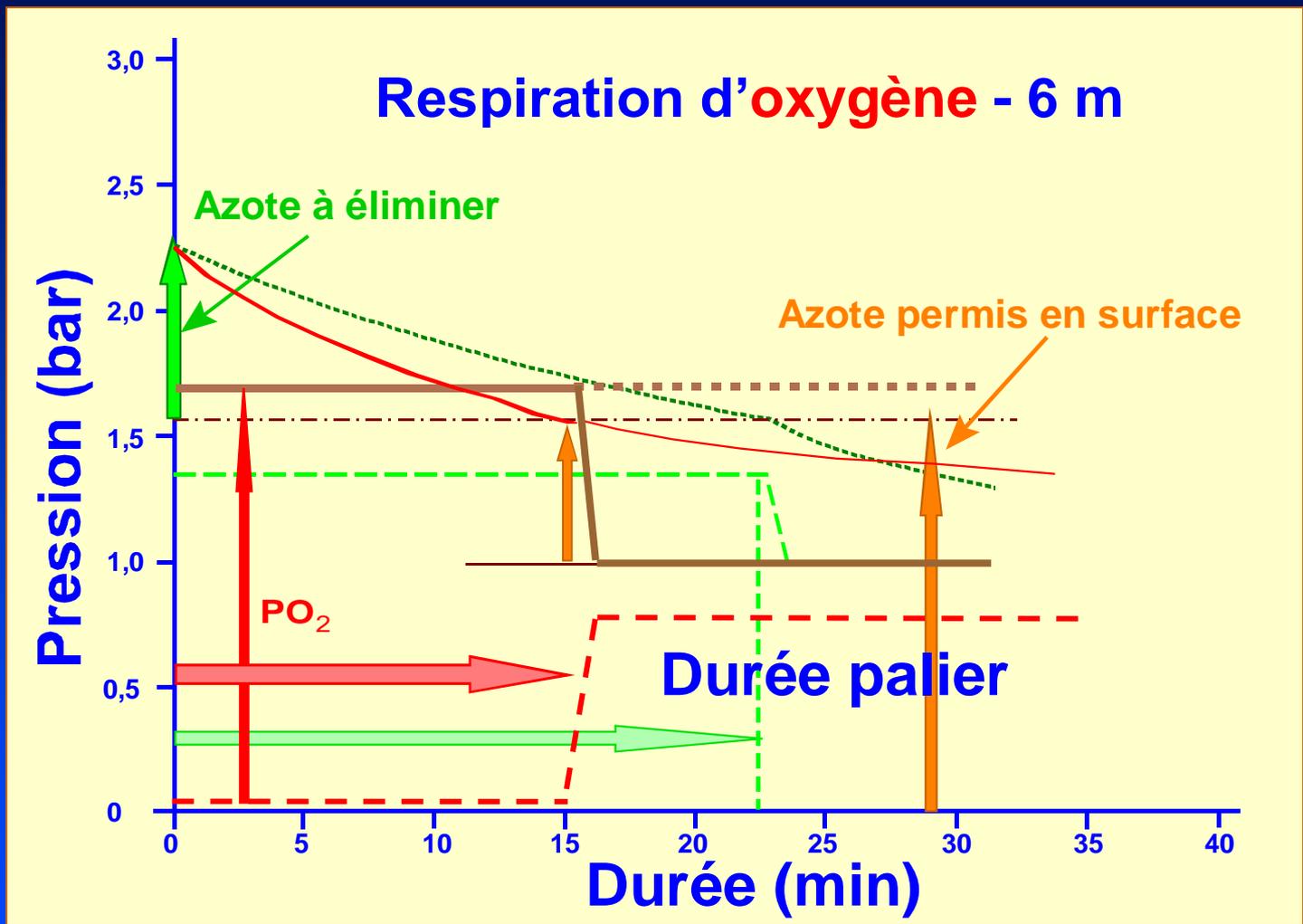
L'oxygène au palier améliore la qualité de la décompression et en diminue la durée.



# 5.2 – Palier à l'air (rappel ?)



### 5.3 – Durée du palier à l'Oxygène



## 5.4 – Conséquences pratiques

La profondeur d'un palier à l'**oxygène** n'a pas d'influence sur l'élimination de l'**azote**

Ce qui induit la formation des bulles c'est une pression trop faible

Donc lors d'un palier à l'**oxygène** il faut rester le plus profond possible compatible avec la toxicité de l'**oxygène** : 6 m

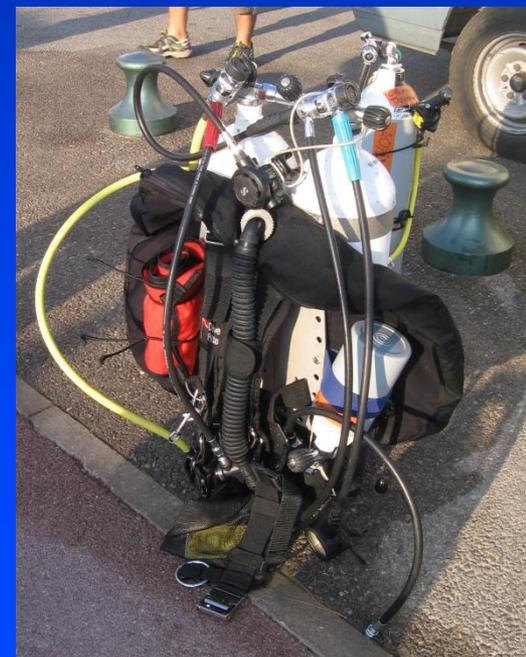


Un palier à l'**oxygène** peut être fait avec un narguilé « **oxygène** »...



Un palier à l'oxygène peut être fait avec une bouteille d'**oxygène** (pendeur ou portée par le plongeur) munie d'un détendeur adéquat. Attention au respect de la profondeur...! Et au risque de respiration sur ce détendeur au fond !

Au moindre signe d'inconfort, repasser sur air et doubler les temps de paliers restant...



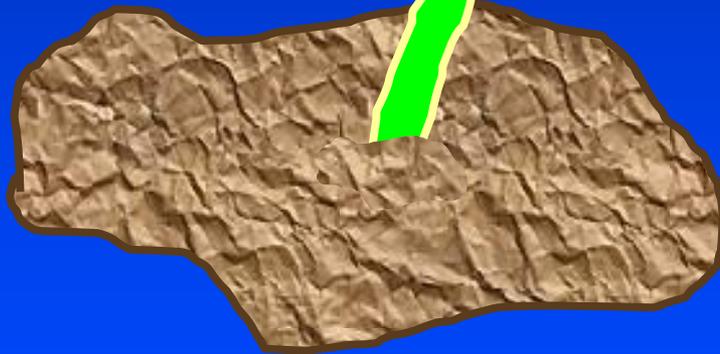
Un palier à l'**oxygène** peut être fait en caisson (décompression de surface, ou travaux hyperbares au sec)



# B - Variations depuis Haldane (suite...)

Et fin

Pause 5 min  
Questions



Le Chesnay - 2 Avril 2012



# C - BULLES et NOYAUX GAZEUX

1 - DÉFINITIONS

2 - SOURCE DES BULLES DE DÉCOMPRESSION

3 - ÉQUILIBRE D'UNE MICRO-BULLE (sphérique)

4 - INSTABILITÉ D'UNE MICRO-BULLE

5 - CONSÉQUENCES POUR LA DÉCOMPRESSION



# 1 - DÉFINITIONS

## 1.1 - TENSION SUPERFICIELLE $\gamma$

PROPRIÉTÉ SE MANIFESTANT À L'INTERFACE GAZ / LIQUIDE

Il en résulte une force centripète tendant à réduire le diamètre de la bulle ou à créer un ménisque

Loi de Laplace

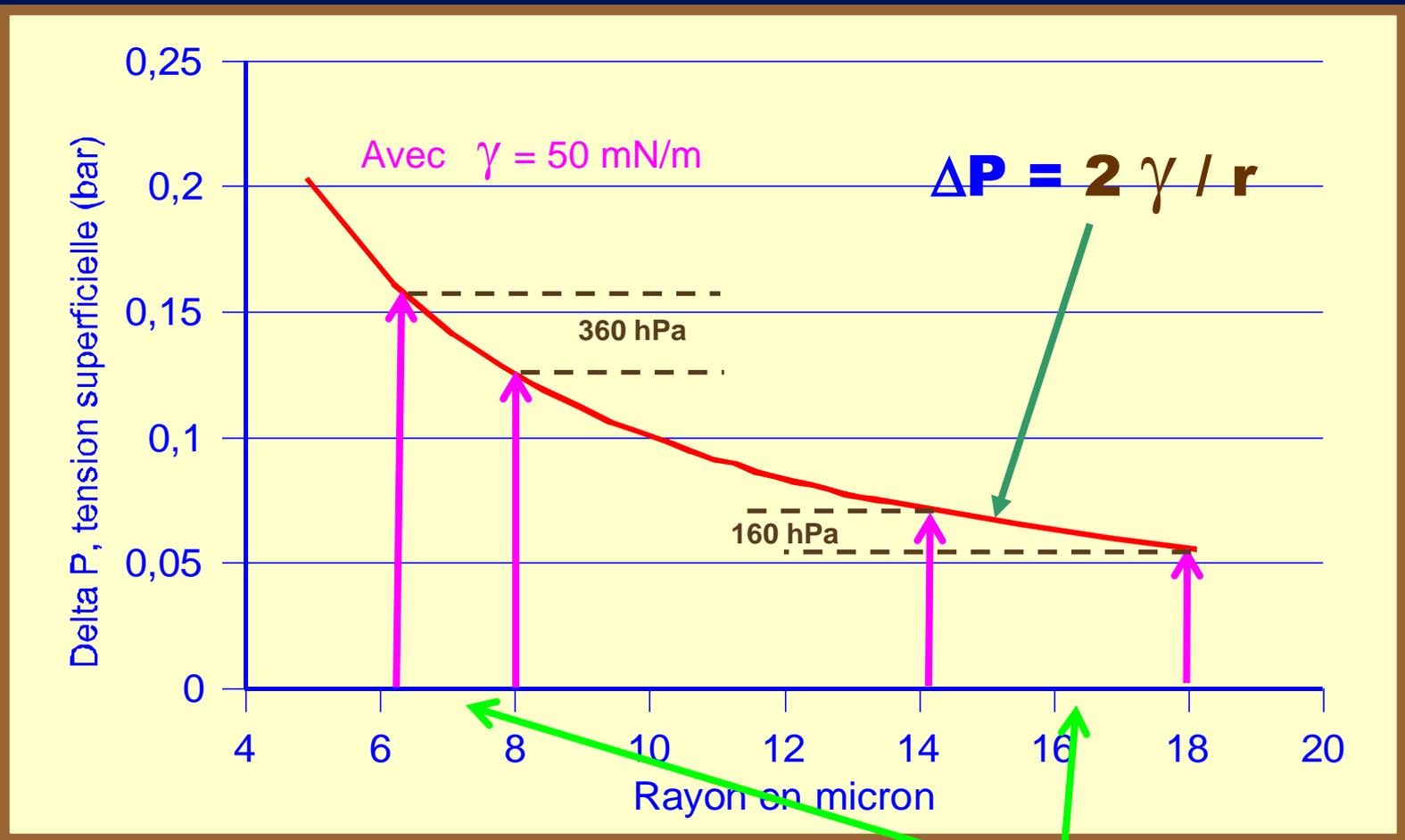
Dans une bulle cela crée un complément de pression

$$P = 2 \gamma / r$$

$r$  = rayon de courbure du ménisque



# Effet sur les petites et les grosses bulles

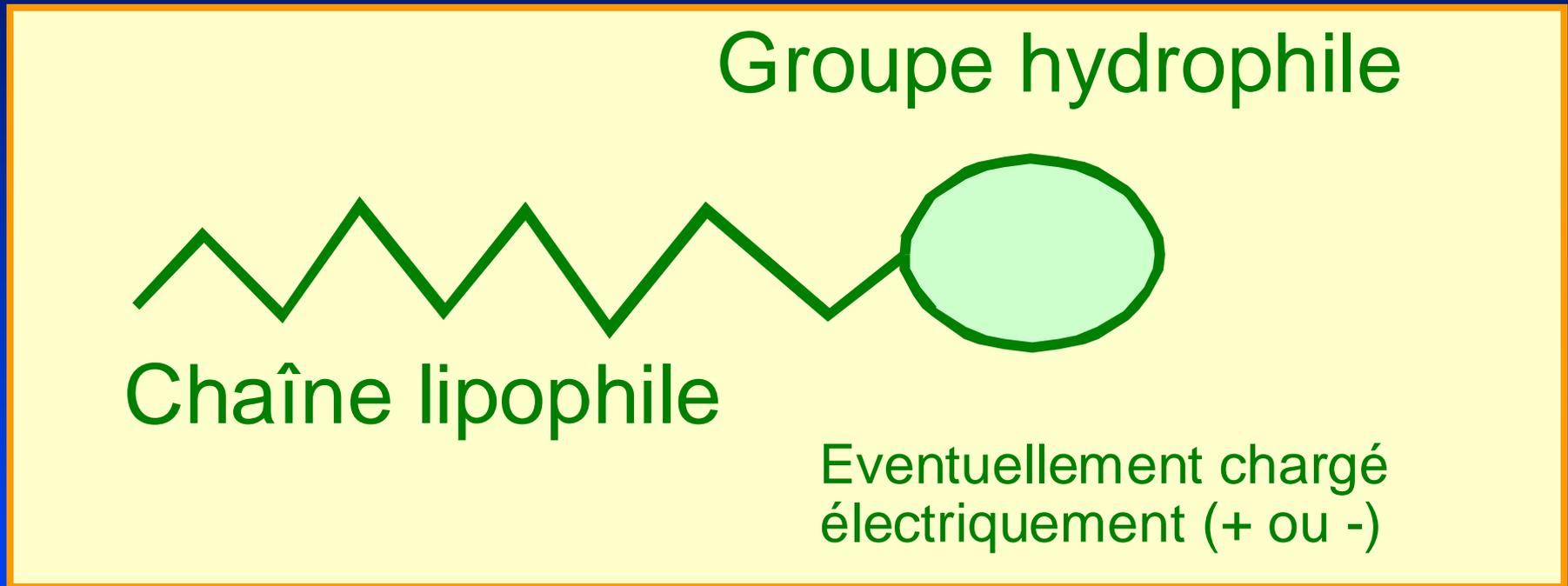


Rappel : Si  $P \times 2$  V est / 2 et  $r / 1,29$



## 1.2 – LES SURFACTANTS

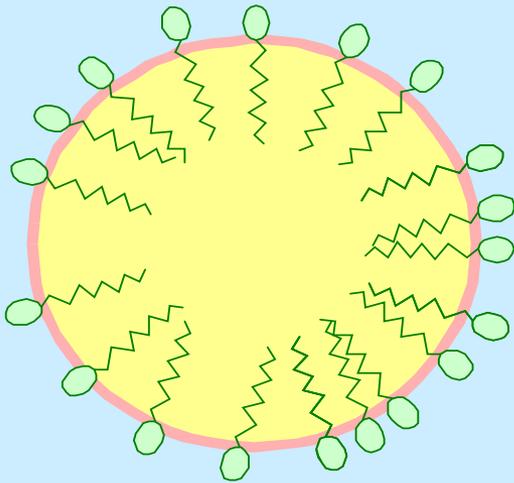
Substances dont la longue molécule comporte une chaîne lipophile et un groupe hydrophile



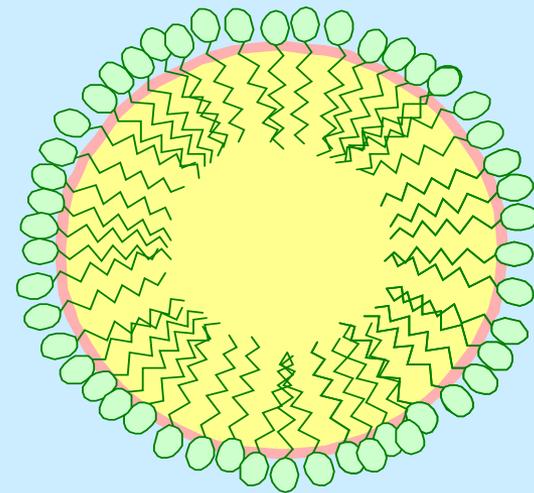
Ils sont présents dans les liquides biologiques notamment dans la moelle épinière (Hills 1994)



## Un surfactant tend à réduire la tension superficielle à l'interface liquide-gaz



Micro-bulle non stabilisée  
par le surfactant



Micro-bulle stabilisée  
par le surfactant

Les surfactants stabilisent les bulles et sont  
favorables à la croissance des microbulles



### 1.3 - NOYAUX GAZEUX, TRÈS PETITS (<1 $\mu$ )

ILS NE SUIVENT PAS LA LOI DE MARIOTTE

ILS NE SUIVENT PAS « ARCHIMÈDE »

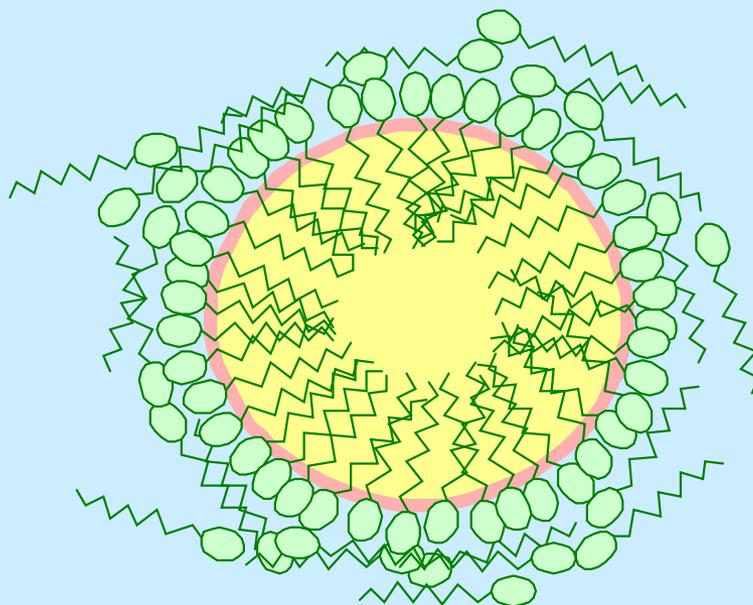
ILS SONT PRÉSENTS SUR CERTAINES SURFACES

ILS SONT ÉLIMINÉS PAR COMPRESSION OU FILTRATION

ILS SONT RELATIVEMENT IMPERMÉABLES AUX GAZ (YOUNT)



## Un Noyau Gazeux peut être imperméable aux gaz (VPM)



Noyau gazeux  
à perméabilité réduite



## 1.4 - MICROBULLES, PETITES (1 - 50 $\mu$ )

### SPHÉRIQUES EN GÉNÉRAL

SUIVENT LA LOI DE MARIOTTE MAIS :  $2\gamma/r$  EST GRAND

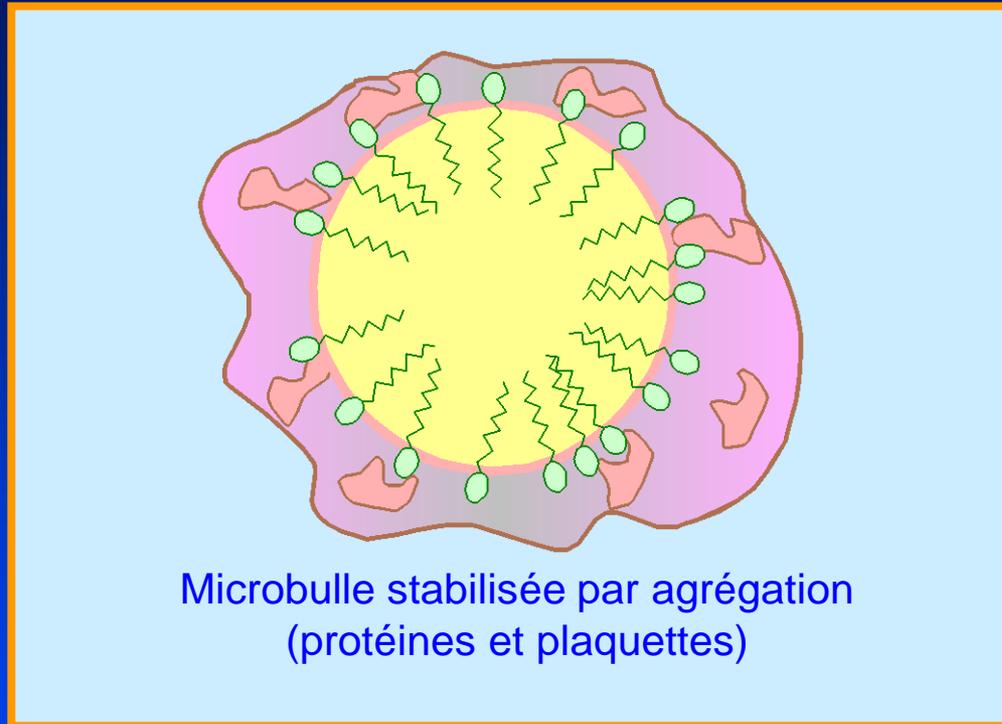
ÉVENTUELLEMENT PERMÉABILITÉ VARIABLE (VP MODEL)

DÉCELABLES AU DÉTECTEUR DE BULLES (Doppler - Echographie)

ÉVENTUELLEMENT STABILISÉES



## Une Microbulle peut être stabilisée par agrégation



Une microbulle peut aussi être stabilisée  
par l'équilibre gazeux avec son environnement



## 1.5 - BULLES, GROSSES VOIRE "LONGUES"

Suivent Mariotte en volume et parfois en longueur

Elle peuvent être observées à l'œil nu

En décompression elles résultent d'erreurs grossières



## 2 – À PROPOS DE BULLES

### 2.1 – CONTENU DES NOYAUX GAZEUX

**VAPEUR D 'EAU**

**$P_{H_2O} = 62 \text{ hPa}$**

**GAZ INERTE +++++**

**$P_{N_2}$**

**OXYGÈNE**

**$P_{O_2}$**

**GAZ CARBONIQUE**

**$P_{CO_2} = 53 \text{ hPa}$**

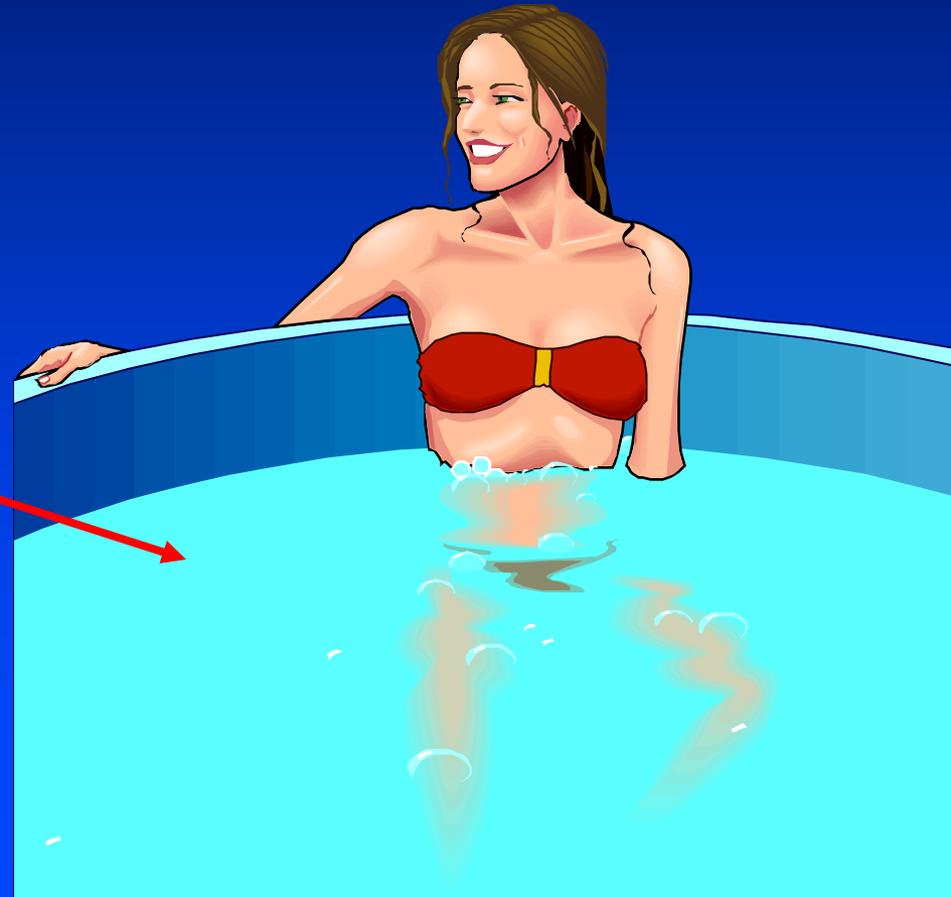


## 2.2 – D'AUTRES BULLES !

EAU CHAUDE



CHAMPAGNE

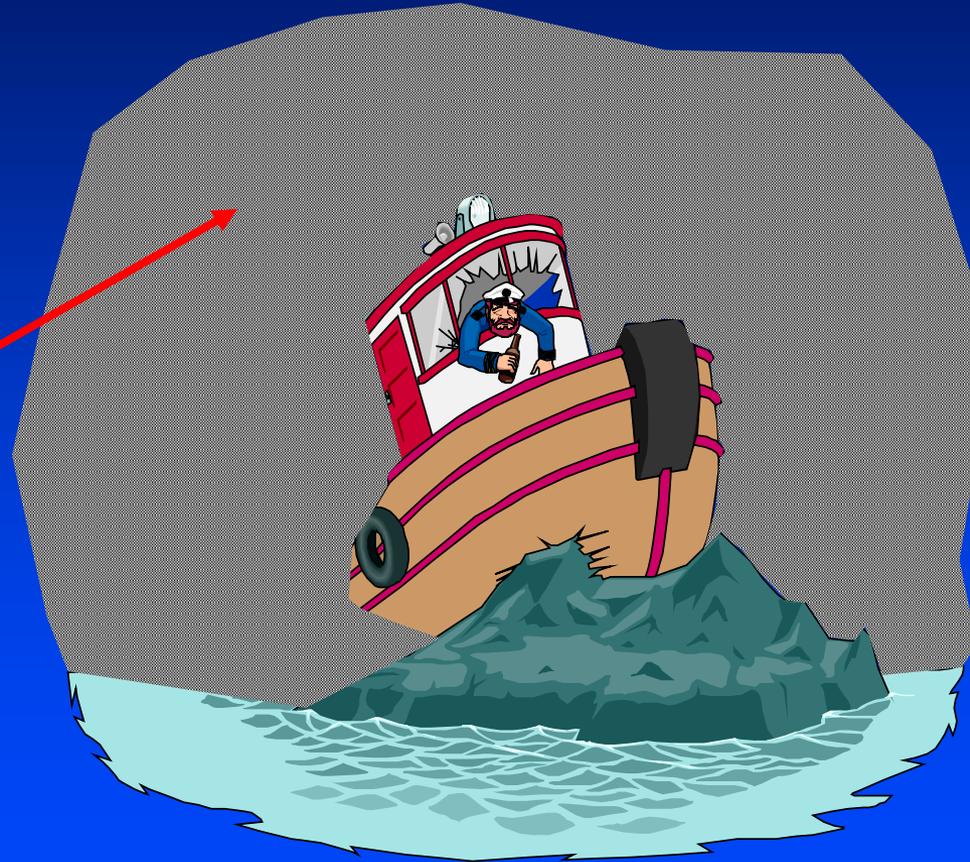


## 2.3 - CHANGEMENT D'ÉTAT (analogie)

**BROUILLARD**



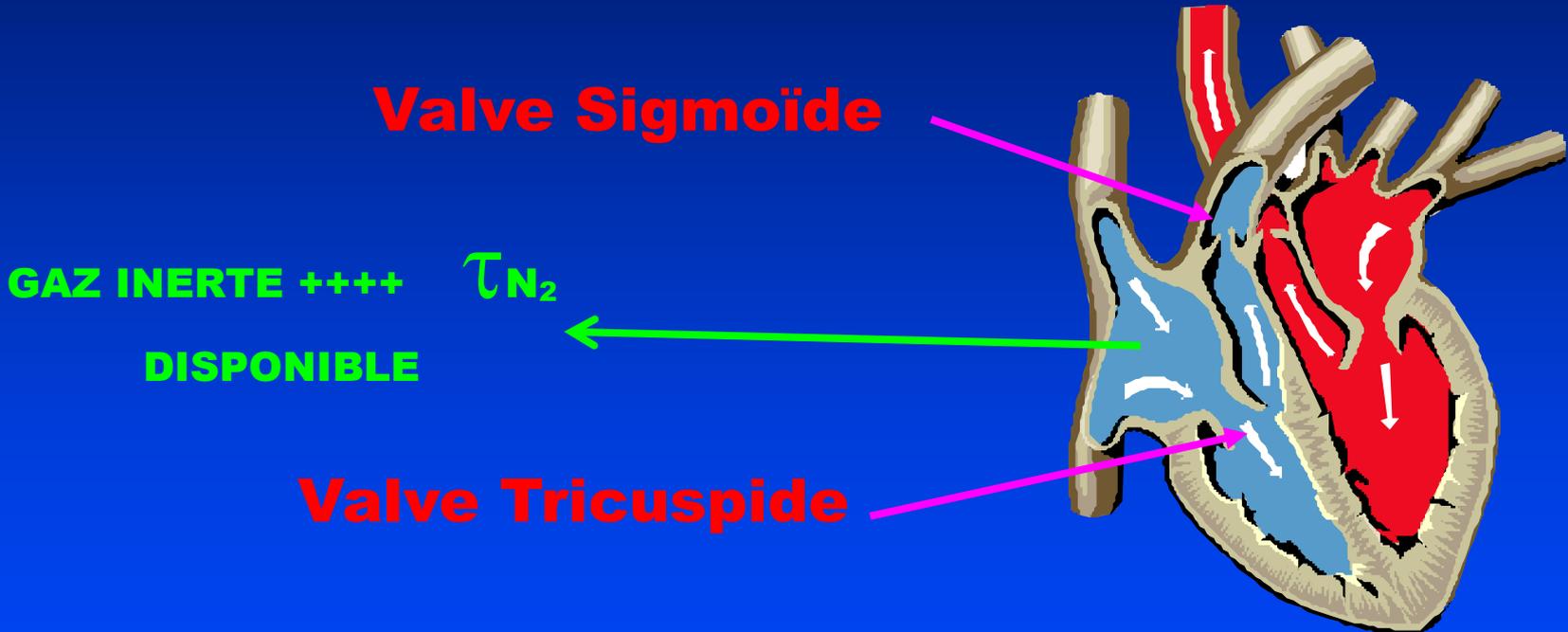
**AVERSE**



## 2.3 - CAVITATIONS

### 2.3.1 - CAVITATION PAR A-COUP DE PRESSION





### 2.3.2 - CAVITATION PAR TRIBONUCLEATION

ARRACHAGE D'UN ADHESIF

FROTTEMENTS

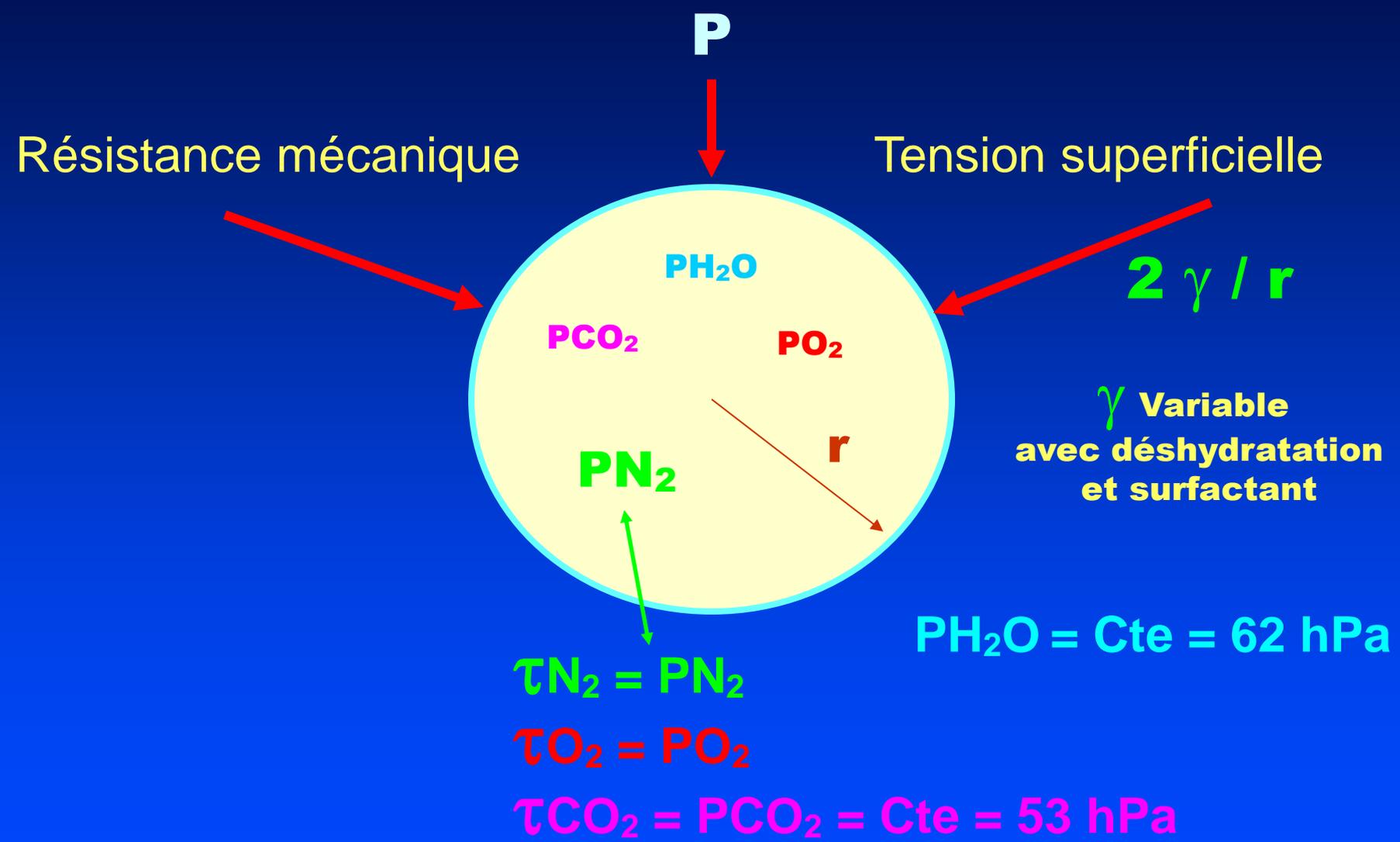
FROTTEMENTS DES VALVES CARDIAQUES

FROTTEMENTS DES MUSCLES ENTRE EUX

Il résulte de toutes ces sources de cavitations  
une génération permanente de noyaux gazeux,  
qui s'éliminent spontanément

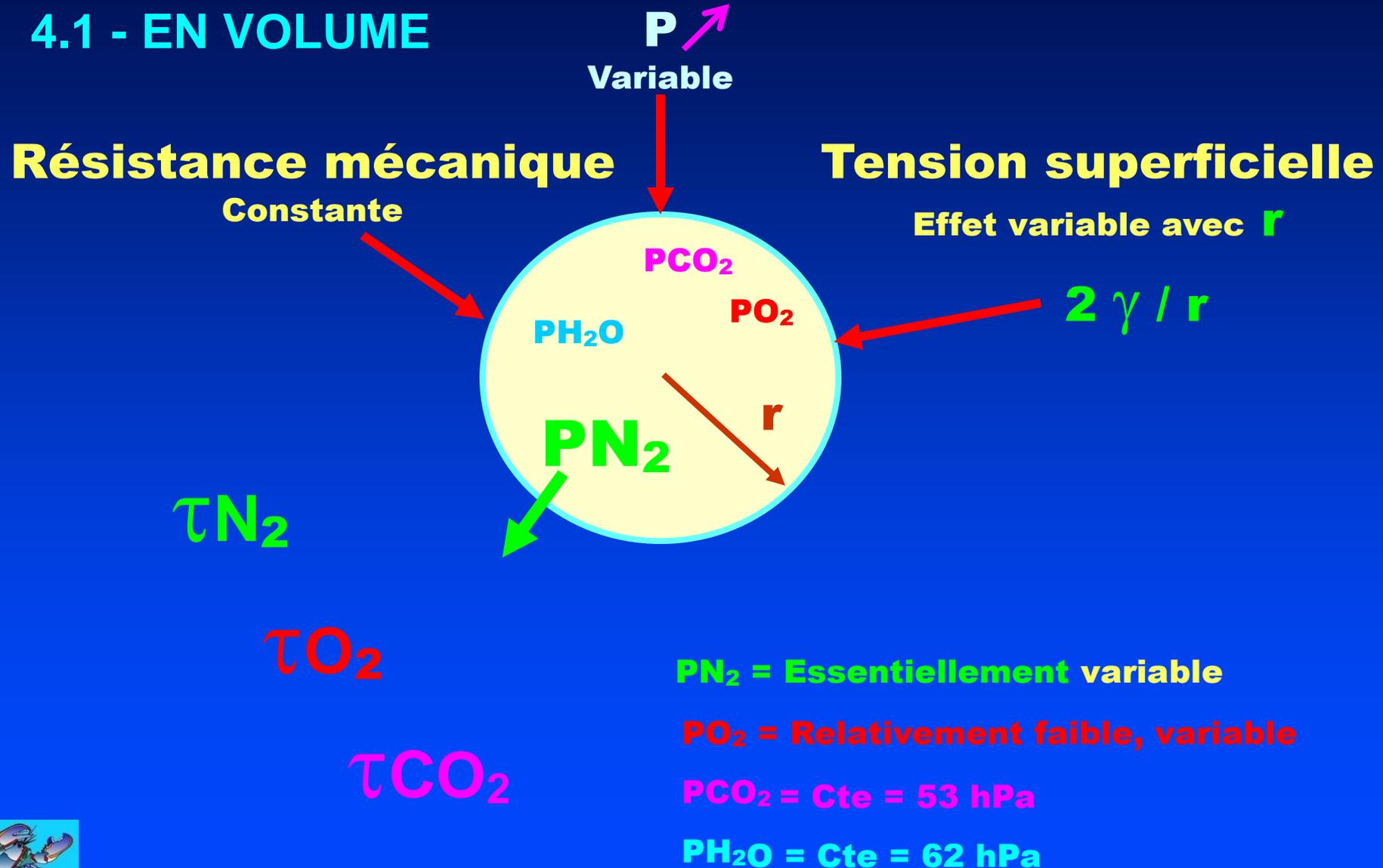


### 3 – ÉQUILIBRE D'UNE MICRO-BULLE (sphérique)

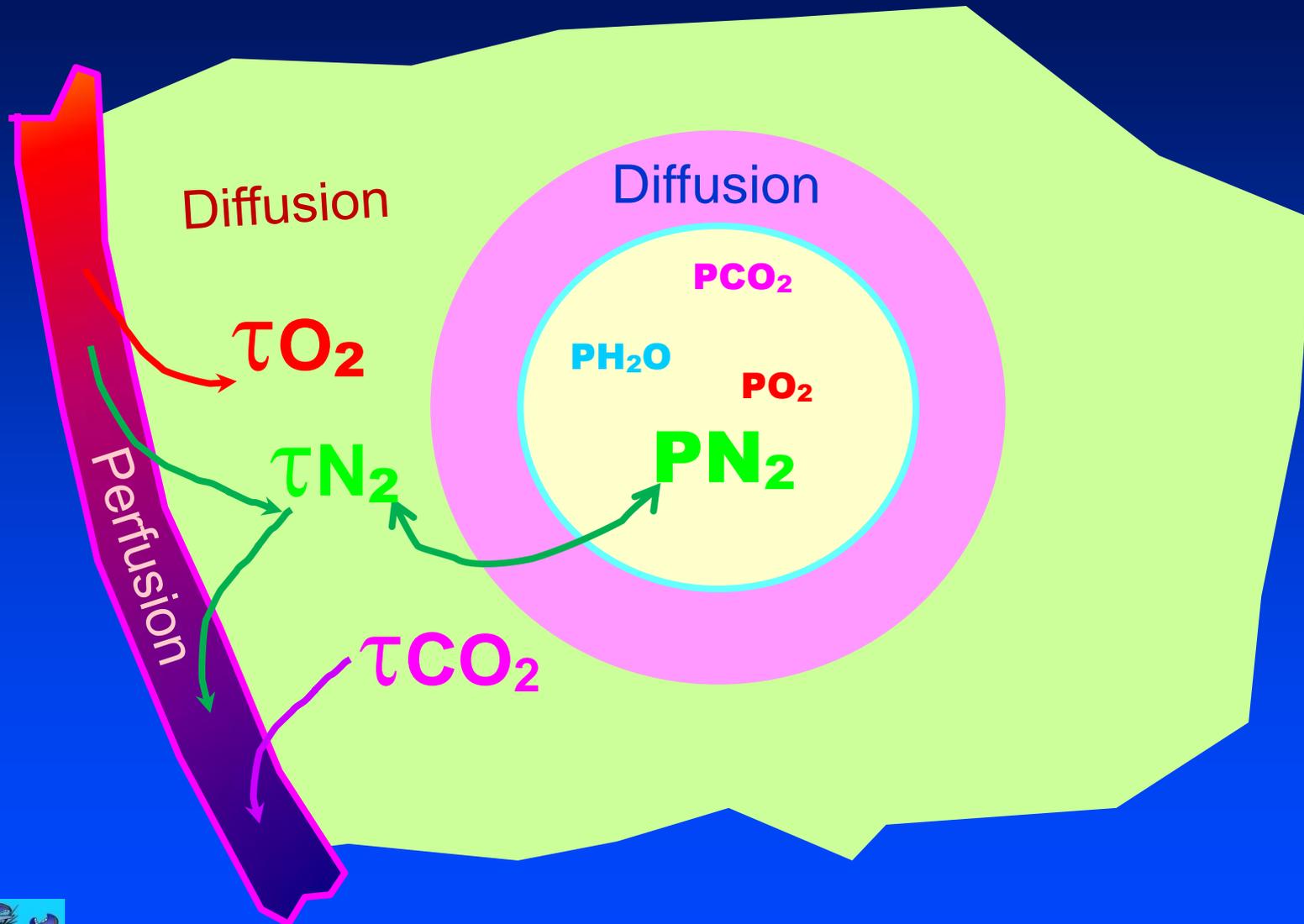


# 4 - INSTABILITÉ D'UNE MICRO-BULLE

## 4.1 - EN VOLUME



## 4.2 – MICROBULLES DANS UN TISSU

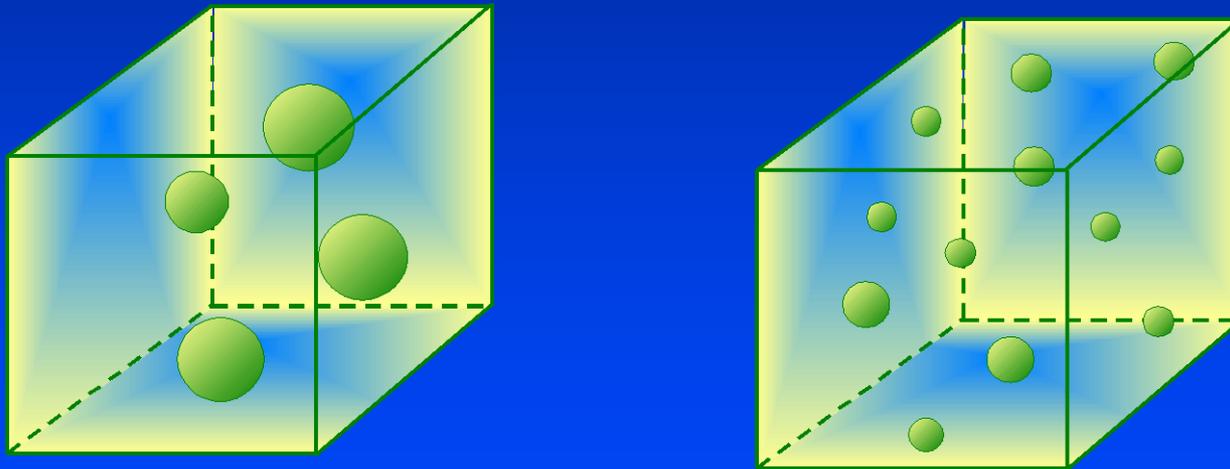


## 4.3 – VOLUME CRITIQUE

Critère de remontée :

Si dans un volume de tissu le volume de gaz dépasse un seuil....

Nombre de bulles ou volume total ?



La situation est très différente s'il s'agit d'une seule grosse bulle ou de multiples petites bulles



#### 4.4 – « CLAMPAGE »

Lorsque plusieurs bulles voisines grossissent :

Elles mobilisent tout le gaz inerte disponible

Cela les stabilise : il n'y a plus de gaz disponible pour grossir

Mais ralentit l'élimination vers le capillaire... !

Le terme « Clampage » définit cette situation



## 5 - CONSÉQUENCES POUR LA DÉCOMPRESSION

### 5.1 - DIMENSIONS DES BULLES

Pour le même volume total, beaucoup de petites bulles, disparaissent plus vite qu'une seule « grosse » bulle.

Diffusion (clampage) !

Évolutions des Volume-Surface-Rayon ( $r^3$ ,  $r^2$ ,  $r$ )

Effet de la tension superficielle ( $1/r$ )

Variation de la perméabilité ( $f(r)$ )?



## 5.2 – DÉSHYDRATATION ET DÉCOMPRESSION

L'immersion de longue durée entraîne une déshydratation importante (diurèse)

Le froid, par la vasoconstriction, est diurétique...

La perfusion tissulaire diminue en cas de déshydratation, réduisant l'élimination des gaz

La déshydratation diminue la tension superficielle et donc la pression bullaire, ce qui favorise la croissance des bulles



## 5.3 – EFFETS DE LA RECOMPRESSION

La recompression est plus efficace sur les petites bulles

**Donc :** Ne pas attendre qu'elles grossissent....

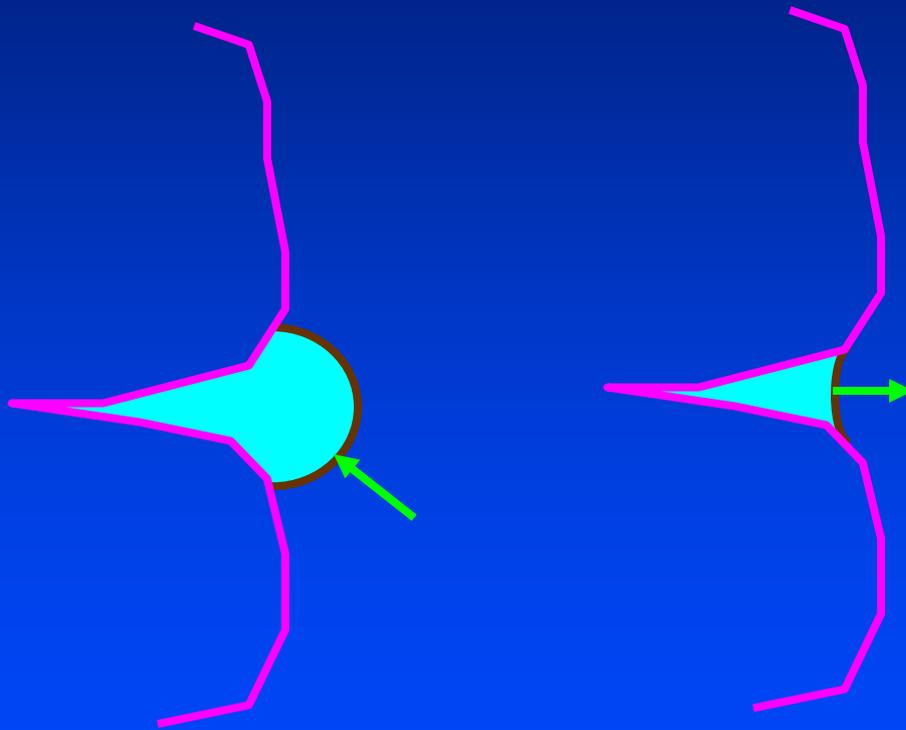
**Ou :** Plus le délai est long plus il faut recomprimer!

**Et :** Boire après les plongées longues



## 5.4 – NOYAUX EN CREVASSE

La tension superficielle peut inverser ses effets !



## 5.5 – ELEMENTS D'UN « BON » MODELE

1 – Existence spontanée de noyaux gazeux...

2 – Croissance des bulles par décompression et/ou apport gazeux

3 – Pression de la bulle :

Pambiante + Pression due à la tension superficielle

+ Pression des forces élastiques tissulaires

+ Pression hydrostatique fluides corporels  
(au sec, debout, immersion....)



4 – Sous saturation due à la « fenêtre oxygène »

5 – Effets de la perfusion spécifique de chaque zone tissulaire

6 – Les petites bulles peuvent être considérées comme sphériques

7 – Lorsqu'une bulle croît, elle vide le compartiment voisin  
et réciproquement, par diffusion (clampage)



**DONC**

**Il n'est pas surprenant  
qu'il n'y ait pas encore de  
modèle physiologique définitif**

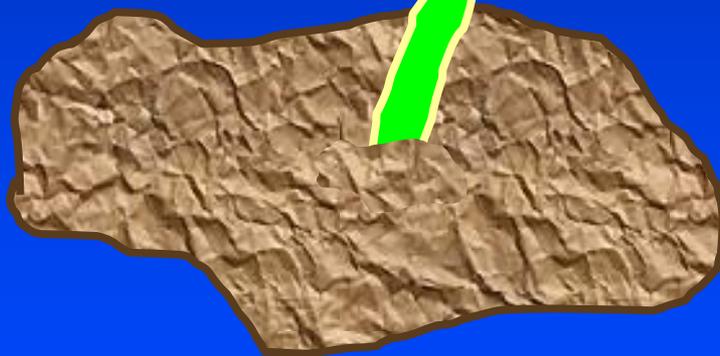
**Les bulles p**



Le Chesnay - 2 Avril 2012



Pause 5 min  
Questions

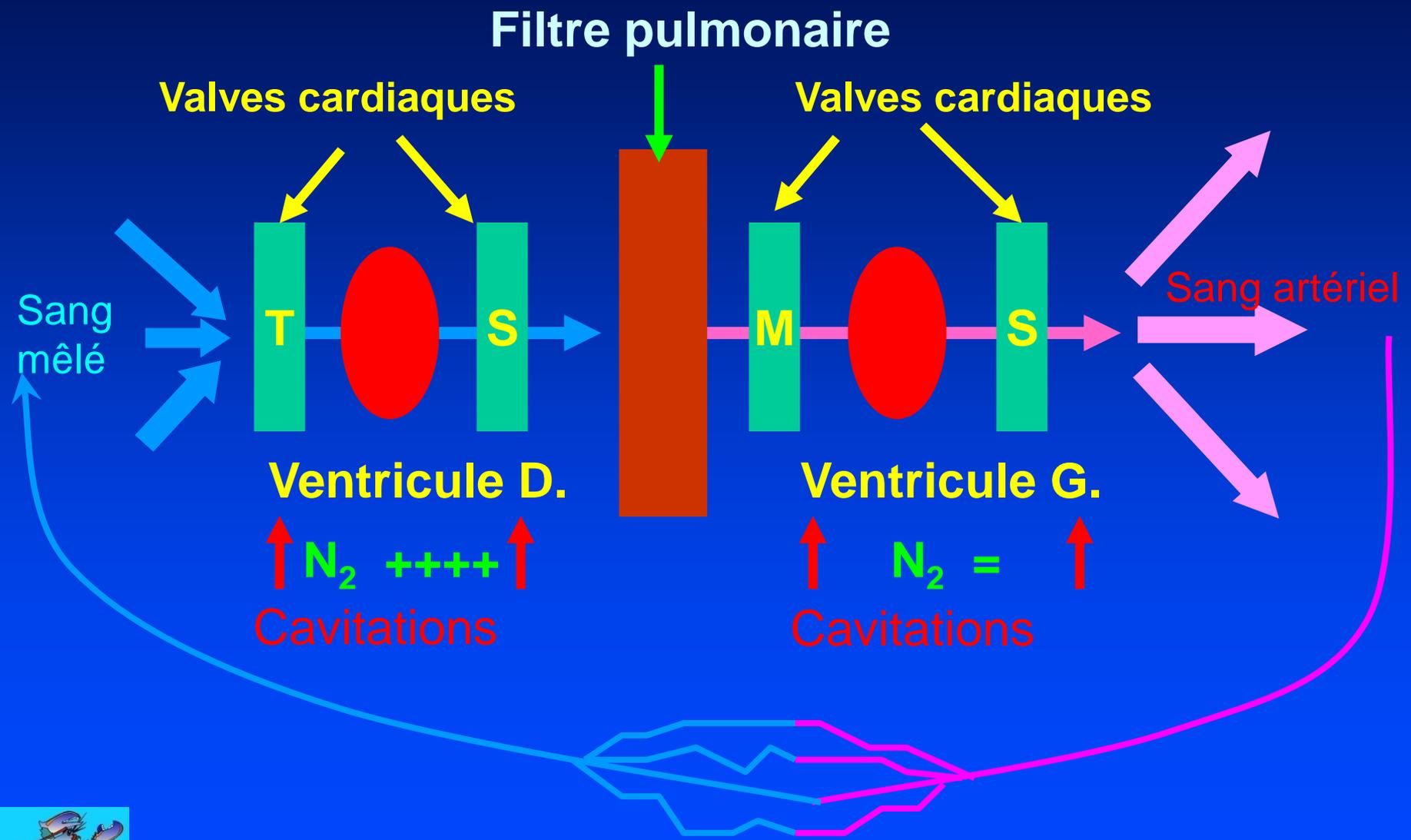


Le Chesnay - 2 Avril 2012



# 6 – BULLES VASCULAIRES

## 6.1 – BULLES ARTÉRIELLES ?



**L'origine peut donc être :**

**Bulles du retour veineux**

**Cavitation cardiaque droite**

**Shunt artério-veineux pulmonaire**

**Forçage capillaire alvéolaire**

***Foramen Ovale***  
**Perméable**

**Bulles artérielles**



COLLAPSE

COLLAPSE

**Tissu déjà sous-saturé :** COLLAPSE

CAPTAGE PAR

**Tissu encore sur-saturé :** GROSSIT

GROSSIT

Et se stabilise

**Tissu sans fonction  
Physiologique majeure**

**Tissu avec fonction  
Physiologique majeure**

AUCUN EFFET PERÇU

SYMPTÔMES SPÉCIFIQUES



## 6.2 - VITESSE DE REMONTÉE !

**NE PAS GÉNÉRER DE BULLES (même petites) « PROFOND »**

## 6.3 - PLONGÉES YOYO

**FAVORISENT LE FRANCHISSEMENT PULMONAIRE**

## 6.4 - PALIER A ½ PROFONDEUR

**PERMET LA « VIDANGE » DES TISSUS TRÈS RAPIDES**



## 6.5 – DÉLAI D'APPARITION DES SIGNES

Le temps pour « forcer » le passage pulmonaire

Dans le capillaire pulmonaire la bulle se vide... ce qui peut lui permettre de passer...

Pour que les bulles piégées en périphérie grossissent

Pour que les bulles génèrent des symptômes



## 6.6 – ÉLIMINER LES BULLES ?

### AVANT ?

Réduire les noyaux gazeux avant la plongée

Blatteau a montré qu'un exercice calibré, 2 h avant la plongée, pouvait réduire le score de bulles...

Mais aussi vibrations, choc thermique, chocolat, NO....

Par élimination des noyaux gazeux ??? Probablement...

Les travaux récents de Blatteau et Coll confirment...



## Casque « bulle » LAMA



Chili – 1992 – 4517 m

Ne fait pas de bulles en circuit  
semi fermé « SCANUBA »



## APRÈS ? (sans symptômes)

Ne pas provoquer :

Pas d'exercice physique intense

Pas d'apnées profondes

Précautions pour l'altitude et l'avion

Successives....



APRÈS ? (avec symptômes)

Recomprimer **tôt** = Collapse

Réduire la tension d'azote dans le tissu  
voisin de la bulle (perfusion et diffusion...)

EN RESPIRANT DE L'OXYGÈNE PUR ( $PO_2 = 2,8$  b)

EN RESPIRANT DE L'HELIOX ( $PO_2 > 1,6$  b)

Accroître la tension superficielle et la perfusion :

ré-hydrater



**L'hypothèse sur la possibilité de l'origine  
artérielle  
des bulles dangereuses de la  
décompression**

**a été présentée dès 1988**

**par**

**TOM HENNESSY**

Le Chesnay - 2 Avril 2012



## 6.7 - MODÈLES TENANT COMPTE DES BULLES

### 6.7.1 - VPM (Variable Permeability Model) - Yount

#### Hypothèses initiales

Il existe (dans les gels) des noyaux gazeux préexistants stabilisés.

Répartition des rayons est exponentielle décroissante

Rayons : inférieurs au rayon critique, donc NG stables

La perméabilité de l'interface gaz/liquide diminue pour les petits rayons (facteur de stabilisation)...



## Mécanisme de formation des bulles

La compression puis la décompression modifient  $\tau_{N_2}$ , les rayons et le contenu des NG.

Certains vont être activés ( $R > R_{critique}$ ) et développer des bulles (Mariotte, Diffusion)

## Contrôle du dégazage

Le volume total de gaz dans un volume de tissus doit rester inférieur à un seuil déterminé et ajusté empiriquement à partir de tables qui marchent....



## 6.7.2 – RGBM (Reduced Gradient Bubble Model)

### Hypothèses initiales

Il existe des noyaux gazeux pré-existants **NON** stabilisés.

Répartition des rayons est exponentielle décroissante

La perméabilité de la membrane **NE** diminue **PAS** pour les petits rayons (facteur de collapse).

Cet aspect est différent de VPM



## Mécanisme de formation des bulles

La compression puis la décompression modifient:

$\tau N_2$ , les rayons et le contenu des Noyaux Gazeux  
certains vont être activés ( $R > R_{critique}$ )  
et développer des bulles

## Contrôle du dégazage et facteur critique de remontée :

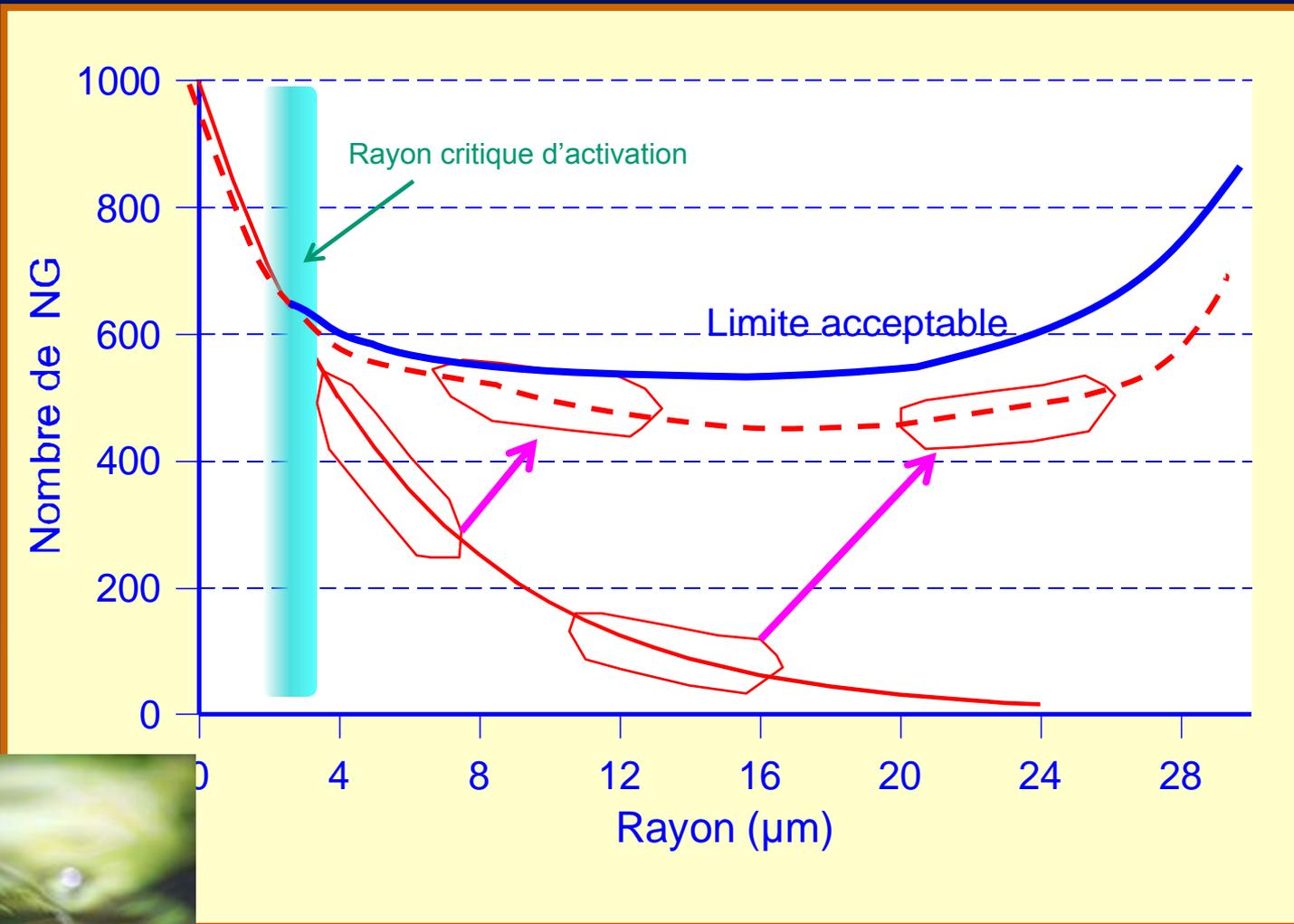
Selon un profil  $P = f(t)$  la Nouvelle répartition des  
rayons des bulles ( $r$ ) est calculée...

pour limiter les rayons en deçà des rayons critiques

C'est un procédé de calcul itératif.



# Représentation imagée !



**Bien que ce soit un succès commercial**

**le « RGBM » de Wienke**

**ne tient pas compte des migrations de bulles  
et reste assez loin  
d'un modèle « physiologique »...**

**Et la vitesse de remontée ?**



## D - PERSPECTIVES

Charge en gaz, Facteur limitant :                      **Perfusion**

Elimination du gaz :

    Du tissu vers sang :                      **Diffusion + Perfusion**

    Des bulles vers tissus ou l'inverse :      **Diffusion**

**Bulles formées à partir de noyaux gazeux préexistants**

**Passage des bulles des tissus vers circulation ?????**



## Détection de bulles tissulaires

Pour mieux apprécier l'apparition des premières bulles

Pour déterminer les vraies valeurs critiques

Pour analyser le passage tissus/sang (lymphe ?)

## Détection automatique et continue des bulles circulantes

Pour mieux quantifier leur débit (nombre, volume, durée...)



**Modéliser par type de symptômes / tissu cible (J. Hugon)**

**Pour comparer modèles et contenu des bases de données**

**Utiliser l'outil statistique du maximum de vraisemblance**



# HALDANE EST-IL ABANDONNÉ ?

Pour la charge en gaz

**NON !**

Pour l'élimination et le dégazage

**OUI !**

et depuis longtemps... définitivement ?



# E – CAS PARTICULIERS

Successives



Altitude



# E – CAS PARTICULIERS

Successives



Altitude

Nitrox





**MERCI DE VOTRE ATTENTION**

Site : <http://hyperbar.perso.sfr.fr>

Mail : [hyperbar@club-internet.fr](mailto:hyperbar@club-internet.fr)

Le Chesnay – Avril 2012