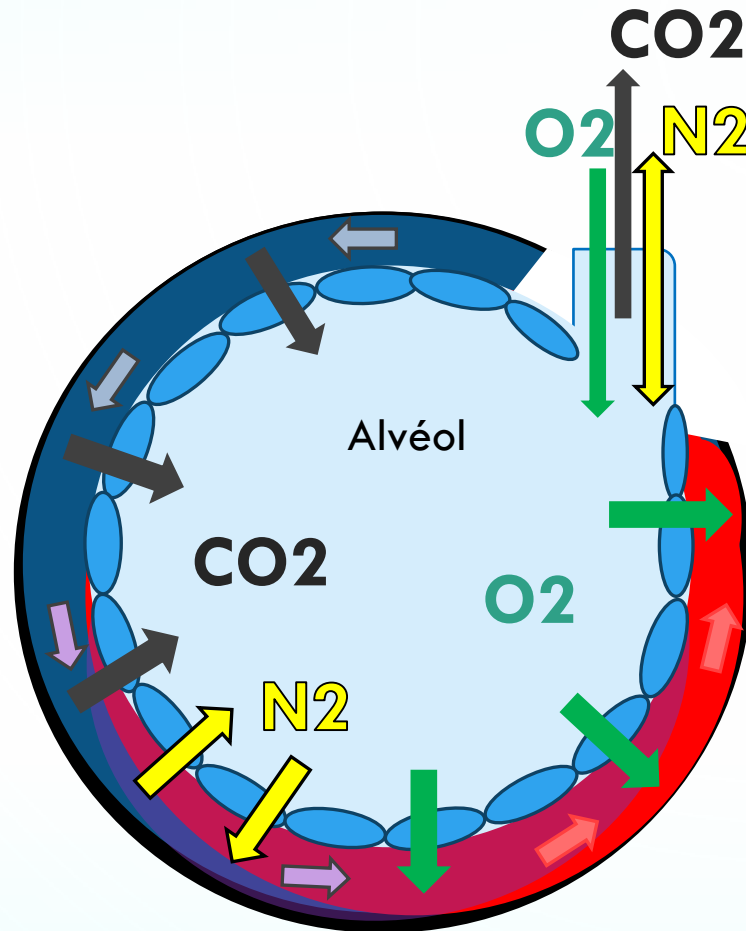




# L'histoire des bulles

CODEP 01  
Formation GP 2026  
Cécile BOZONNET

# Rappels les échanges gazeux



**La loi de HENRY**  
(physicien chimiste Anglais)

la masse de gaz dissoute dans un volume donné de liquide est proportionnelle à la pression

Recherche constante de l'équilibre entre la pression ambiante et la tension

# Rappel loi de Dalton

## C'est quoi un gaz ?

Un gaz est un ensemble d'atomes et de molécules très faiblement liés et quasi indépendant ayant des propriétés propres :

Il n'a pas de forme

Il occupe le volume qu'on lui donne -> gonflage

Il est compressible et est expansible -> problème des variations de pression

Il se dilate sous l'effet de la température

Il exerce une pression -> pression atmosphérique

Il est soluble dans un liquide -> problématique de la désaturation

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

$P_{\text{mélange}} = P_{\text{gaz 1}} + P_{\text{gaz 2}}$

1b d'air = 0,80 azote + 0,20 d'oxygène

## Loi de Dalton (pression partielle)

à une température donnée, la pression totale d'un mélange gazeux est égale à la somme des pressions partielles exercées par chacun des gaz composant le mélange.

$P_{\text{pgaz}} = P_{\text{abs}} \times \%_{\text{gaz}}$

PP d'azote à 40m ->  $5 \times 0,80 = 4b$

# La dissolution

## La dissolution

La dissolution d'un gaz dans un liquide est le **PROCESSUS** par lequel un gaz mis au contact d'un liquide passe à l'état liquide

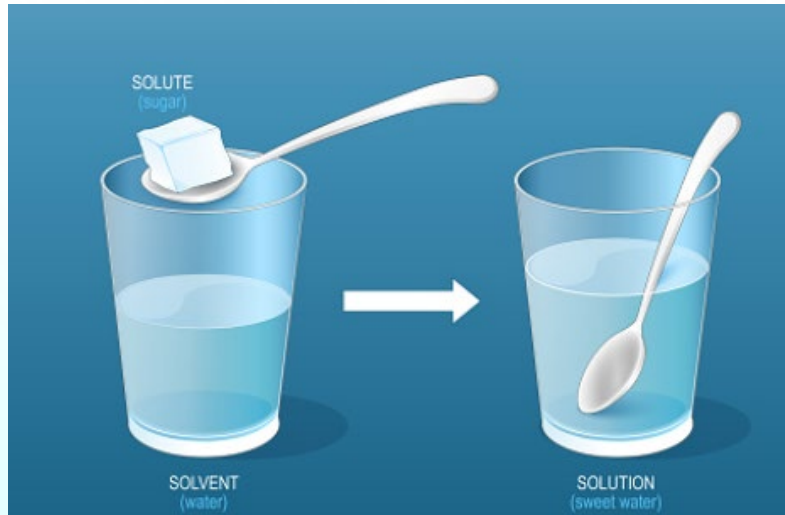
Facteurs de dissolution	En plongée	La dissolution augmente Si
températures	T° du liquide = T° du corps humain 37°C	Froid / Hypothermie
Nature du gaz	Gaz neutre (diluant)= Azote / Hélium	Solubilité Azote > Hélium -> Corrélation avec les effets narcotique
Nature du liquide	Environ 65% d'eau dans le corps Répartition différente selon les tissus	Solubilité différente selon les tissus
Pression du gaz	Profondeur	Plongée profonde
Durée	Temps d'immersion	Temps d'immersion
Surface de contact	Surface d'échange Alvéolocapillaire POUMONS Surface d'échange physiologique TISSUS	La vitesse de diffusion pour les tissus mieux vascularisés
Agitation	Palmage = effort augmentation du rythme cardiaque	Augmentation du rythme ventilatoire, débit sanguin -> perfusion

# La solubilité

La solubilité d'un gaz dans un liquide est la faculté d'un gaz à se dissoudre dans un liquide et désigne la quantité maximale de gaz qu'un liquide peut dissoudre à température donnée  
**= CAPACITE D'ABSORPTION**

Par exemple

1L de plasma à 37°C peut dissoudre : 13,4ml d'Azote et 8,7ml d'Hélium



**1l de plasma à 37°C peut dissoudre**

13,4 ml d'azote

8,7 ml d'Hélium

**1l d'huile à 37°C peut dissoudre**

67 ml d'azote (5x plus que dans le plasma)

# La capacité d'absorption en plongée

80% d'azote  
Surface 1 bar  
0,8 bar d'azote



CAPACITÉ  
D'ABSORPTION EST  
PROPORTIONNELLE À  
LA PRESSION  
AMBIANTE

20m - 3 bars  
Capacité  
d'absorption X3



UN PLONGEUR DE 50KG QUI MESURE 1,5M NE VA PAS ABSORBER LA MÊME QUANTITÉ D'AZOTE BRUT QU'UN PLONGEUR QUI PÈSE 100KG ET MESURE 1,90M, MAIS ILS AURONT TOUS LES 2 LA MÊME CONCENTRATION D'AZOTE

# Le gradient

Plus l'écart entre la pression ambiante et la tension est important plus la saturation et la désaturation sont rapide

**$P - T = \text{force motrice des échanges} = \text{gradient}$**

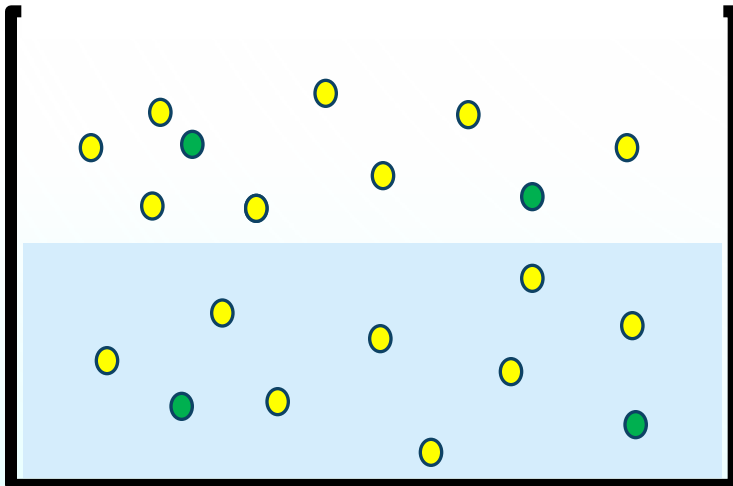
**A 60 M ON SATURE PLUS VITE QU'À 20M PARCE QUE  
L'ÉCART ENTRE LA PRESSION AMBIANTE ET LA TENSION EST PLUS IMPORTANT  
= LE GRADIENT EST PLUS IMPORTANT**

# Saturation / désaturation

## Etat en surface avant de plonger

### SATURATION

L'état d'équilibre entre la pression du gaz au dessus du liquide et la tension du gaz dans ce liquide est appelé **SATURATION**  
**P=T**



**Les échanges entre un gaz et la surface d'un liquide se font en permanence.**

#### Loi de Monsieur William HENRY

A saturation et a température constante, la concentration de gaz dans un liquide est proportionnelle à la pression qu'exerce ce gaz sur le liquide

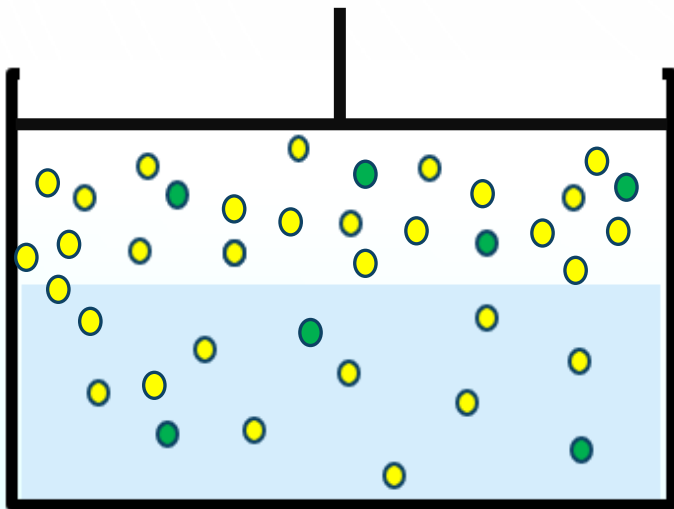
Cette loi ne s'applique qu'en **état d'équilibre = état de saturation**

- La capacité d'absorption d'un gaz par un liquide est liée à la pression subie par le liquide
- La quantité réellement absorbée par un liquide est limité par la PP du gaz

**Elle ne s'applique pas pendant les phases de charges et de décharges**

# Saturation / désaturation

A la descente et au cours de la plongée nous sommes  
en **SOUS-SATURATION**

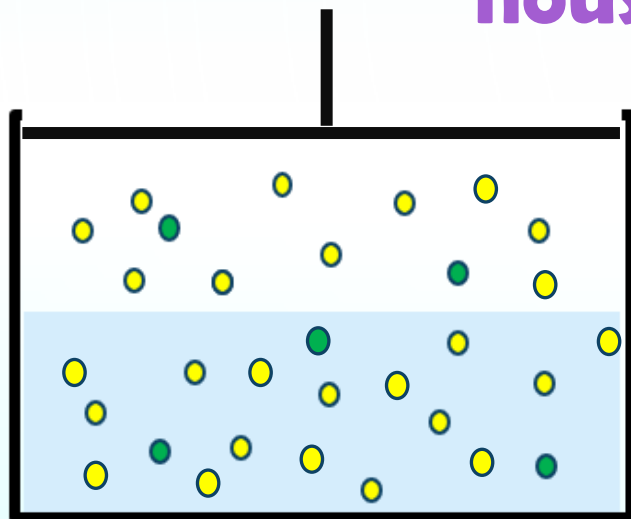


Si l'on augmente la pression du gaz  
Le liquide est en sous-saturation

- ⇒ **Phase de charge du liquide  $P > T$**
- ⇒ Les molécules de gaz entrent dans le liquide jusqu'à **l'équilibre = saturation**
- ⇒ Le temps pour atteindre l'état de saturation dépend des caractéristiques du liquide, du gaz et des conditions du milieu = facteurs de dissolutions
- ⇒ Plus le gradient est important plus la phase de charge est rapide
- ⇒ En plongée nous ne restons pas suffisamment longtemps pour atteindre un état de saturation = équilibre
- ⇒ **On charge** en azote

# Saturation / désaturation

## A la remontée et à la sortie de l'eau nous sommes en **SURSATURATION**



Si l'on **diminue la pression** du gaz = **DECOMPRESSION**

Le liquide chargé en gaz est en sursaturation

- ⇒ **Phase de décharge ou de désaturation du liquide  $P < T$**
- ⇒ Les molécules de gaz sous forme liquide ou de microbulles s'échappent du liquide jusqu'à l'**équilibre = nouvel état de saturation**
- ⇒ Plus le gradient est important plus le temps décharge diminue (nitrox)

**Le rapport de saturation** : Le rapport  $T/P$  = rapport de saturation

Pendant la désaturation le rapport de saturation doit être maintenu en dessous des valeurs critiques pour éviter un **dégazage anarchique**

- ⇒ Si la pression diminue fortement  $P \ll T$  le liquide passe en état de **sursaturation critique**
- ⇒ des bulles apparaissent dans le liquide = **dégazage anarchique** (bouteille de champagne)
- ⇒ Des bulles d'azote apparaissent dans l'eau si  $T/P = 100$
- ⇒ **Des bulles apparaissent dans le liquide physiologique si  $T/P = 2$**
- ⇒ => **tolérance physiologique  $PpN_2 \times 2$**

# Saturation / désaturation



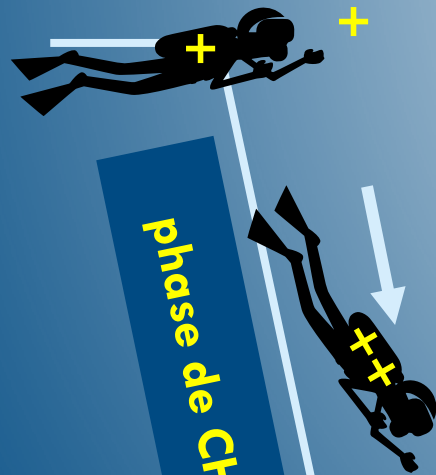
FFESSM

phase de DECHARGE  
Ou  
DESATURATION

**SURSATURATION  
CRITIQUE**  
= dégazage anarchique

état de SATURATION.

état de SURSATURATION.



phase de CHARGE

état de SATURATION.

phase de DECHARGE  
ou  
DESATURATION

+++

+++

40m

état de SOUS SATURATION .

phase de CHARGE

EN PLONGÉE SPORTIVE (DESCENTE + FOND), L'ÉTAT D'ÉQUILIBRE N'EST JAMAIS ATTEINT PAR LE PLONGEUR ET LES ÉTATS DE SATURATION ET DE SURSATURATION SURVIENNENT LORS DE LA DIMINUTION DE PRESSION AMBIANTE (REMONTÉE).

# Les modèles

# Un peu d'histoire

La première pompe à vide est fabriquée  
Des expériences et des constatations apparaissent  
En **1854** constat que la recompression soulage des hypothèses de bulles dans le sang sont formulées par Mr BUCQUOY

**Paul BERT** met en évidence le rôle de la pression partielle d'O<sub>2</sub>  
Plus tard il mettra en évidence le rôle des bulles d'Azote de l'apparition d'ADD et de décès lors de remonté trop rapides  
Il préconise 1 seule descente par jour pour les scaphandriers

**1 908** Mr John Scott Haldane



Les premières tables basé sur le premier modèle mathématique qui sert encore de référence et de base à la modernisation et de développement des logiciels d'aujourd'hui

1915 US NAVY tables  
Révisées plusieurs fois

1958 HEMPELMAN  
Diffusion peu utilisée

1970  
Mr spencer  
Mesure des bulles

1977  
Volume critique des bulles

1979 YOUNT  
VPM

**1 983**  
Mr Bühlmann  
M-value ZHL12  
Notion de microbulles et bulles circulantes

1990 RGBM

1998  
facteurs de gradients

Les recherches continues

1999 Mr Pyle  
la notion de paliers profonds intégrée dans certains ordinateurs  
Maintenant réservés aux plongées mélanges TRIMIX  
  
DANGEREUX A L'air, à désactiver et/ou ne pas faire  
-> paliers non obligatoires

# Monsieur BERT

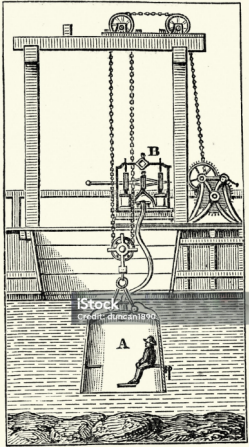
## Rôle de Paul Bert

Met en évidence le lien entre pression et gaz dissous  
Explique les effets toxiques et mécaniques des gaz  
Pose les bases scientifiques de la **saturation/désaturation**

**Monsieur BERT émet les premières hypothèses de l'accident de désaturation en 1878**

# Les modèles Monsieur HALDANE

Physiologiste écossais



Lors des travaux pour la construction de pont les travailleurs qui respiraient de l'air sous pression et les hommes lourd de l'époque avaient des problèmes en remontant à la surface

## Rôle de John Scott HALDANE

Crée les premières **tables de décompression** (premier modèle)  
Introduit la notion de **compartiments** (tissus du corps)  
Définit des **vitesse de remontée sécurisées**



# Les modèles

## C'est quoi un modèle ?

Observations  
Hypothèses  
Simplificatrices

Recherche  
Théorie  
Lien avec  
l'azote

Formules  
mathématiques  
= modèle  
mathématique  
Etabli des procédures  
de désaturation

Validation  
Expérimentale

Présentation sous forme  
de valeurs précalculées  
= **tables de plongées**

Programmation dans un  
logiciel  
= **ordinateur**

# Les compartiments

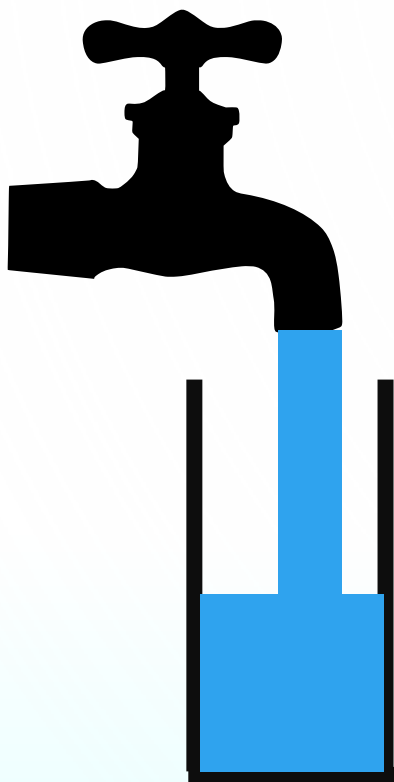
## Nos tissus ne sont pas tous égaux et ne saturent pas tous à la même vitesse

Les compartiments représentent un ensemble de tissus anatomiques

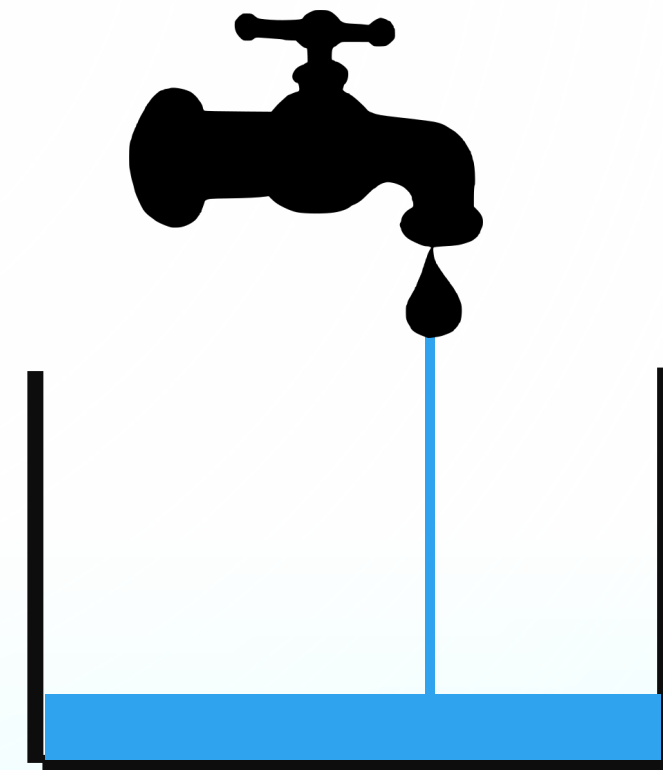
Ces tissus sont plus ou moins perfusés (irrigués)

Ils ont une certaine capacité à stocker de l'azote en fonction de leur volume et de la solubilité de l'azote dans ce tissu

1 compartiment ne contient pas un seul tissu -> les premières tables avaient 5 compartiments



Compartiment court



Compartiment long <sup>16</sup>

# Les modèles

## Modèle HALDANIEN

### Hypothèse physiologique :

Equilibre des pressions **INSTANTANE** au niveau alvéolaire

Equilibre des pressions **INSTANTANE** au niveau tissulaire

Sans bulle -> **BULLES = ACCIDENTS**

### PERFUSION

### La modélisation mathématique

Les tissus sont représentés par des compartiments : **5 compartiments** identifiés

Chaque compartiment est caractérisé par:

- **sa période ou demi-vie** (temps d'absorption ou restitution en minutes)
- **son seuil limite** de tolérance à la saturation (vitesse de remonté/stop)

La vitesse de charge = la vitesse de décharge -> **courbe symétrique**

# Les modèles

## Modèle HALDANIEN

### Une période

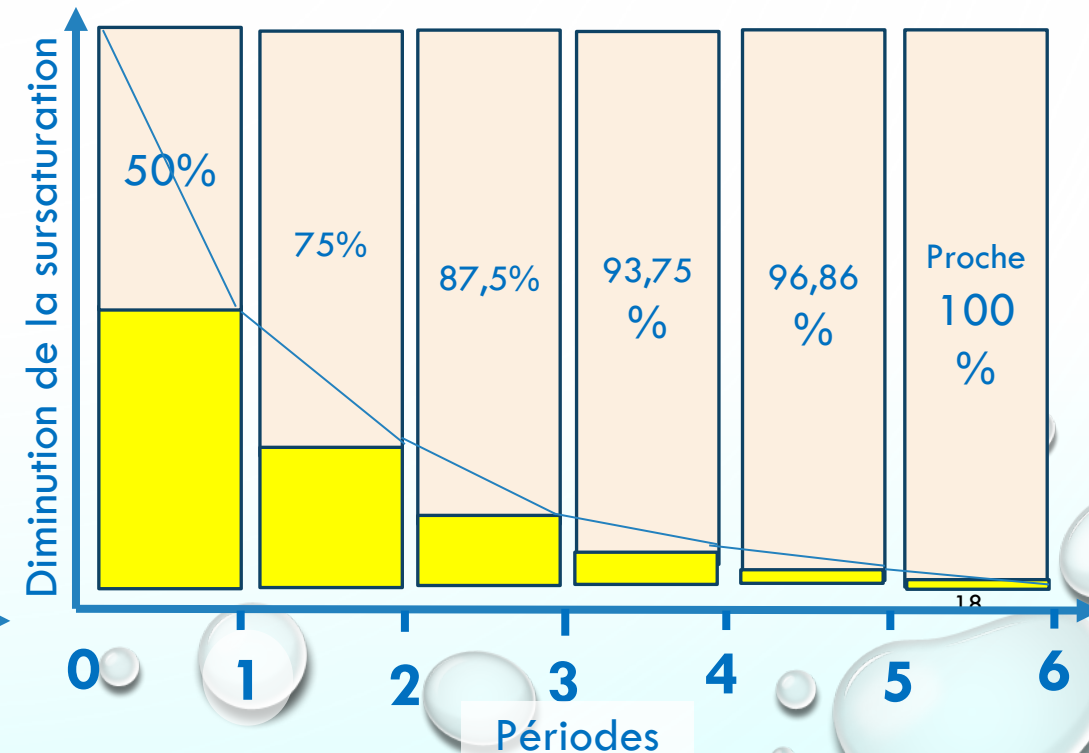
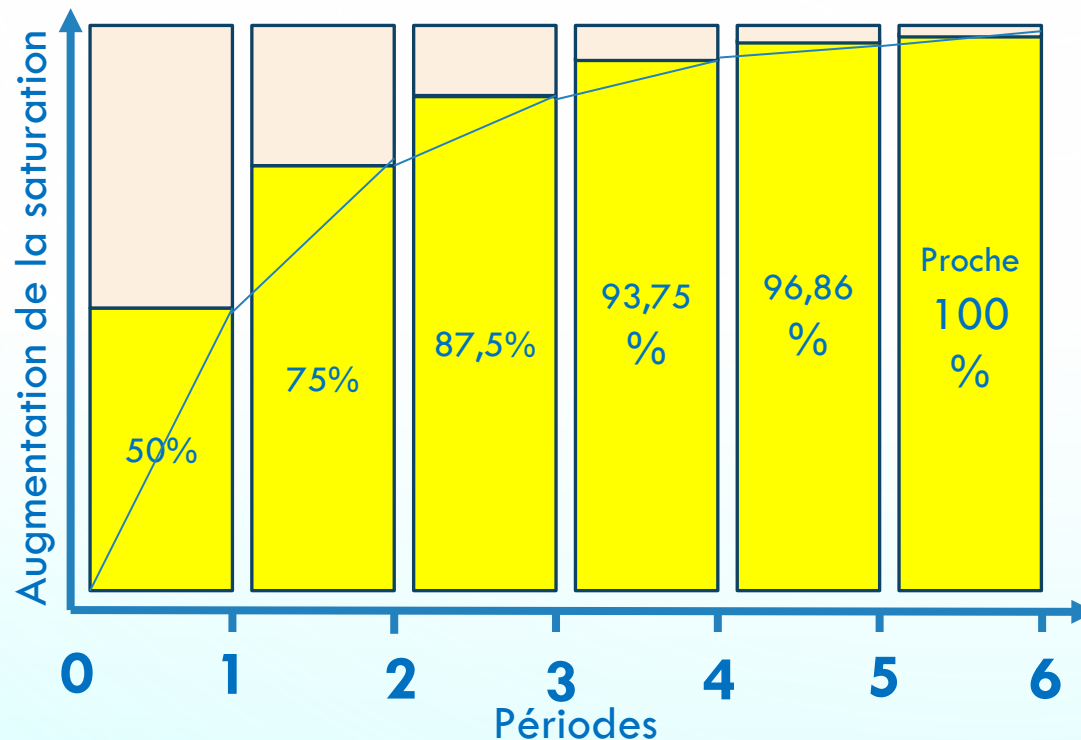
Temps constant mis par un compartiment pour échanger la moitié du gradient de pression

En phase de charge : absorber la moitié du gaz qu'il lui manque pour atteindre l'équilibre

En phase de décharge : pour restituer la moitié du gaz qu'il a en trop pour atteindre l'équilibre

La charge et la décharge son exponentielles

**Il faut 6 périodes à chaque compartiment pour atteindre un nouvel état de saturation**



# Les modèles

## Modèle HALDANIEN

compartiments	1	2	3	4	5
Demi-vie	5mn	10mn	20mn	40mn	75mn

**La diminution de la pression par 2 est tolérable par l'organisme**

$P_2$ (prof maxi admissible avant un ADD) divisée par  $P_1$  (prof de séjour)  $\leq 2$   
 $P_2 / P_1 \leq 2$

**La profondeur des paliers** est fixée à 10 pieds (tous les 3m)  
avec un coefficient de saturation critique fixe pour tous les compartiments (à l'époque)

**Les paliers sont imposés par le compartiment directeur**  
Le compartiment le plus pénalisant

# Les modèles

## Modèle HALDANIEN

### Les tables MN90

12 compartiments 5 à 120min

1 coefficient de Saturation critique par compartiment :  $TN 2 / Sc = P 2$  abs

Population test : 1095 plongeurs d'âge moyen de 32 ans

2 plongées par 24h et 5 jours consécutifs maximum

Plongée unique après 12h de surface au niveau de la mer (= 6 fois le compartiment 120min)

Le compartiment directeur impose le 1er palier : le palier le plus bas

Plongée profonde mais courte : → compartiment court Plongée

peu profonde et longue : → compartiment long Plongée

longue et profonde : → compartiment court

Plongées répétitives : → long compartiment très long !

# Les modèles

## Les Modèles HALDANIEN

### Aujourd'hui

#### Leurs avantages

Nb compartiments : 6 à 16

Périodes choisies : 3min à 720min

Coefficients  $Sc$  : fixes ou variables

Simplicité : un seul paramètre facile à mesurer : la pression

→ Facilité de mise en œuvre : ordinateurs

#### Les limites

Passage de la physiologie au calcul, traduction imparfaite de la réalité et ne prend pas en compte :

Présence de  $\mu$ -bulles circulantes à la décharge (forme gazeuse)

Équilibre alvéolaire ralenti par les  $\mu$ -bulles « silencieuses »

Décharge plus lente que la charge du fait des microbulles

Équilibre tissulaire non instantané notamment dans les tissus lents (cartilages articulaires...)

Taux de perfusion variable à l'effort (augmentation de la température et de la perfusion)

Composition du gaz alvéolaire différente de celle du gaz respiré

Développé pour des plongées « carrées » (quid des yoyos, remontées rapide etc ...)

# Les modèles

## Les Modèles HALDANIEN Monsieur Albert BÜHLMANN

Professeur

Il a fait 30 ans de travaux notamment sur la plongée profonde

En 1983, il publia la 1ere édition du seul ouvrage complet sur la décompression depuis celui de Paul Bert en 1878 et qui reprend la plupart des concepts et expériences réalisées.

C'est un modèle à **perfusion (équilibre instantané, sans bulles)**

Il prend en compte la composition **de l'air alvéolaire (vapeur d'eau et CO2)** et non la composition de l'air ambiant.

Il affine **le pourcentage d'azote dans le corps** (pression atmosphérique 0,95b au bord de la mer, concentration d'azote dans l'air 79% et non 80%)

L'intégration des plongées **en altitude**

### **16 compartiments**

Il calcule et publie 2 jeux de M-Values : ZH-L12 et ZH-L16 en 1990 (ZH pour Zurich / L pour Limite et 12 et 16 le nombre de couple de coefficients établis pour chaque compartiment et pour chaque période (pour l'azote et pour l'hélium).

Le compartiment le plus long est le **C635mn**

Les M-Values de BÜHLMANN sont similaires à celles de Workman.

# Les modèles

## Les autres modèles à PERFUSION

### Monsieur THALMANN

Projet de tester à nouveau les tables US Navy pour les incorporer dans un ordinateur

Il fait des tests de déco à l'air. On observera dans la tranche 15-57m de tripler le tps total de déco pour les plongées longues et peu profondes et de doubler ce tps pour les plongées plus profondes mais plus courtes.

**Il propose un modèle incorporable dans un ordinateur de plongée qui est proche du modèle de Haldane.**

**L'absorption est exponentielle mais l'élimination est linéaire donc bcp plus lente**

# Les modèles

## Modèle à DIFFUSION

**Monsieur HEMPLEMAN** a cherché à affiner la désaturation en prenant en compte

### **Les gaz dissous et la durée de diffusion**

les variations de risques de produire un ADD avec les variations de quantité de gaz neutre, du couple temps/profondeur, de l'effort, la consommation durant l'immersion, le froid, l'enchaînement des plongées

**Les paramètres trop nombreux et trop complexes ont rendu le modèle impossible à modéliser et à utiliser**

# Les modèles

## Modèle à MICRO BULLES VPM

**La notion de volume critique des bulles** (travaux d'Hemplemann et Hennessy)

Le modèle VPM-B : prend en compte la croissance des bulles par la loi de Mariotte à la remontée (Travaux d'Erik.C.Baker)

**Adapté à la plongée profonde et multi-gaz :**

Paliers + profonds Paliers + courts près de la surface

**Vitesse de remontée + lente** permettant un filtrage des bulles avant leur croissance pathogène  
Elimination ++ de l'Helium

Pour des plongées de durée courte, la déco est plus longue qu'avec les autres modèles  
Mais le phénomène s'inverse dès que la durée des plongées devient significative

Importance de la **vitesse de descente** et de la profondeur maxi atteinte. Plus la différence du gradient de pression est importante, moins le noyau gazeux est important (loi de mariote), plus c'est favorable au plongeur.

**Monsieur PYLE** a émis une théorie sur les paliers profonds qui est très aléatoire, mais qui a été intégré dans certains ordinateurs. Attention à l'utilisation

# Les modèles

## Modèle à MICRO BULLES RGBM

Ce modèle est la réponse **aux plongeurs tech** qui désiraient avoir des profils de plongée pouvant intégrer des **variations de mélanges**; des grandes profondeurs; des paliers profonds et de l'inhalation d'O<sub>2</sub> pure basée sur la fenêtre oxygène.

C'est une adaptation du modèle VPM.

Persistance des noyaux gazeux calculée  
Taux d'accident plus faible que VPM  
Prise en compte de l'agrégation de bulles

En 2002, le Dr Wienke collabore avec Mares à la mise au point du RGBM Mares-Wienke qui prend en compte toutes les dernières études dans le domaine de la déco. C'est le 1<sup>er</sup> algorithme à intégrer des paliers profonds permettant d'éliminer une partie des micro bulles à la remontée.