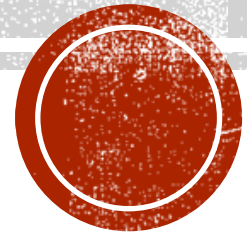


DECOMPRESSION

Laurent moreau

2023



PLAN . . .

- Dissolution de l'azote dans l'organisme
 - Principe physique
 - Différents états de saturation
- Modèle de Haldane
 - Gradient, période, compartiment, compartiment directeur, **coefficient** de saturation et sursaturation critique, courbe de saturation
- Autres modèles de décompression
 - Bühlmann, VPM, RGBM
 - Connaissance des grandes lignes de ces modèles
 - Principe des algorithmes (notion de M-Values et tailles critiques de bulle)



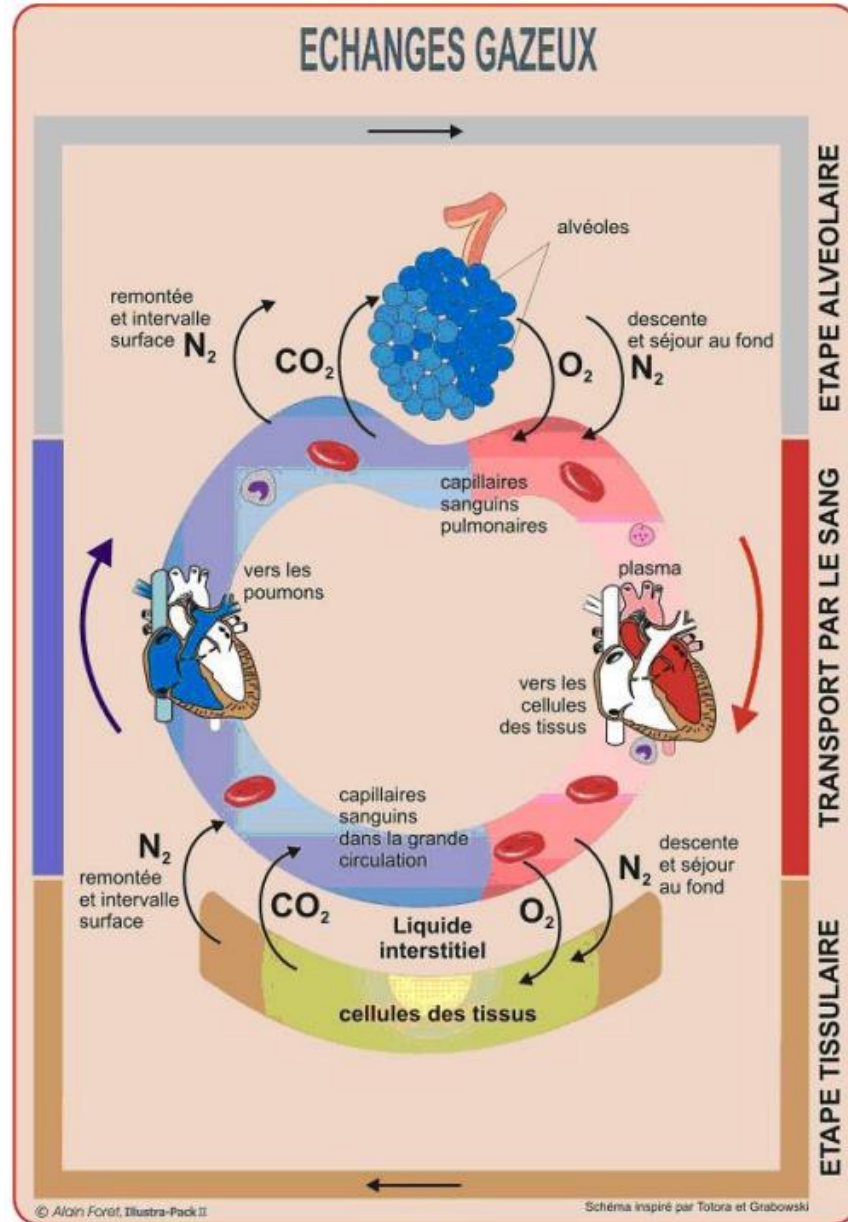
DISSOLUTION DE L'AZOTE DANS L'ORGANISME

- Henry met en évidence la saturation et la désaturation

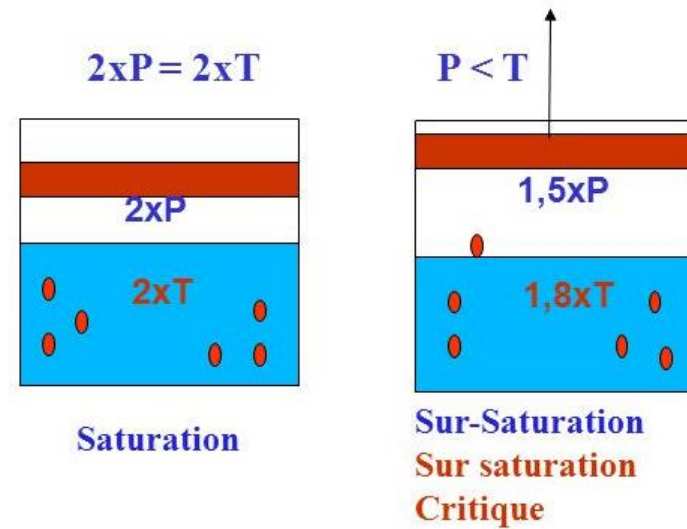
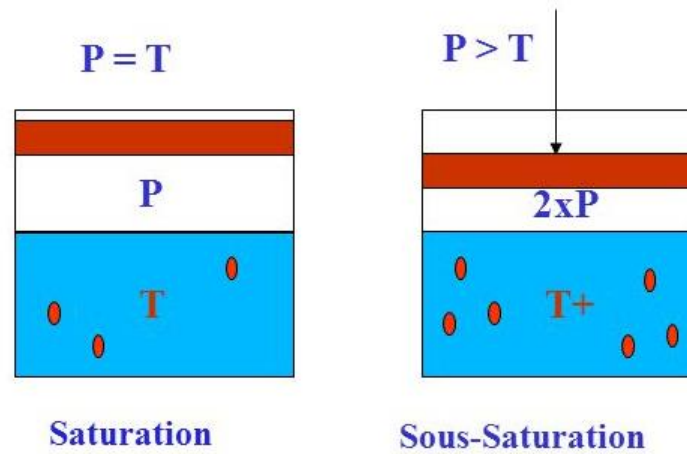
À température donnée, la quantité de gaz dissous dans un liquide est directement proportionnelle à la pression qu'exerce ce gaz sur ce liquide...



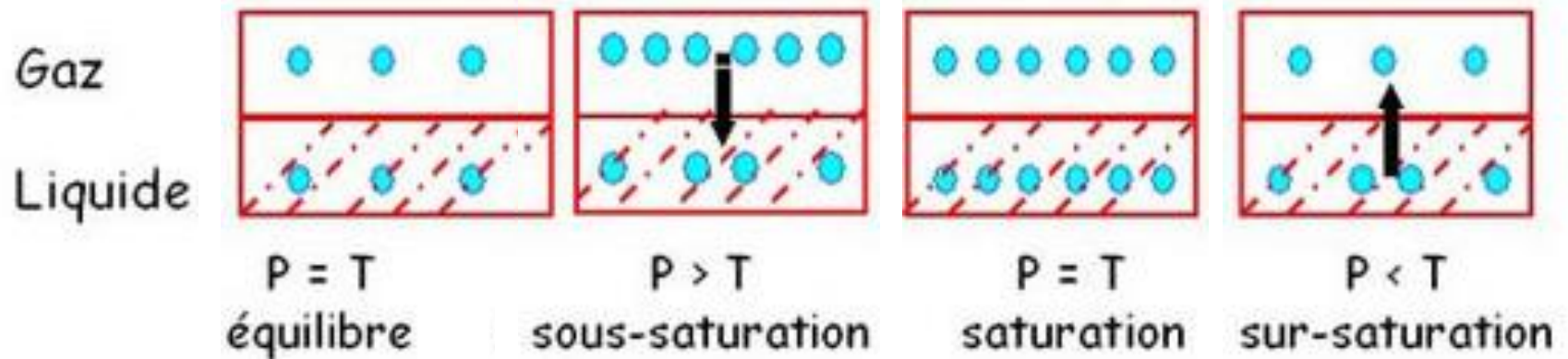
DISSOLUTION DE L'AZOTE DANS L'ORGANISME



DISSOLUTION DE L'AZOTE DANS L'ORGANISME



DISSOLUTION DE L'AZOTE DANS L'ORGANISME

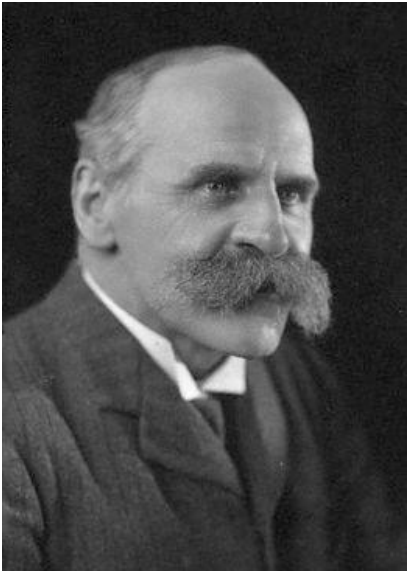


DISSOLUTION DE L'AZOTE DANS L'ORGANISME

- Facteurs qui influencent la dissolution ...
 - La durée / le temps
 - La température ... du corps, des liquides, du gaz
 - La pression... ou tension
 - L'agitation
 - *La surface de contact..*
 - *Nature du liquide*
 - *Et la solubilité du gaz (P_{pN_2} importante en plongée)*



MODÈLE DE HALDANE



- Un modèle, c'est quoi ?
 - C'est une représentation mathématique d'un phénomène complexe....
- Et Haldane , c'est qui ?
 - À la fin des années 1800, le monde s'industrialise. Les grands travaux débutent et le commerce maritime bat son plein. Les travailleurs sous pression présentent de nombreux problèmes médicaux inconnus et il devient nécessaire d'étudier les phénomènes afin de conserver une main d'œuvre en bonne santé.
 - Paul BERT a constaté que l'azote était responsable des maladies de décompression et que ces mêmes maladies étaient liées à la vitesse de remontée. Il préconise une remontée lente mais, comme cela se pratique au doigt mouillé, les accidents perdurent.
 - La marine anglaise demande à un physicien d'établir une procédure de sécurité qui limiterait les accidents.
 - Donc, en 1908, JS Haldane élabore une table de remontée par palier. Ces tables seront la base et seront utilisées par d'autres pays et modifiées.



MODÈLE DE HALDANE

- Ou modèle Haldanien:
 - Les 4 hypothèses de départ:
 - L'équilibre alvéolaire est instantané (poumons / sang)
 - L'équilibre tissulaire est instantané (tissus / sang)
 - Le corps humain est divisé en **compartiments** (5 au départ)
 - Chaque compartiment a un comportement homogène vis-à-vis de la charge et de la décharge d'azote.
 - Les compartiments n'ont pas d'interaction entre eux
 - Une seule plongée par jour
 - Remontée à une vitesse de 20 m/mn



MODÈLE DE HALDANE

- Le modèle Haldanien est un modèle par perfusion
 - c'est à dire qu'il suppose que la diffusion du gaz dans un tissu est instantanée, comme si rien ne s'interposait entre le gaz (azote) et les liquides qui le dissolvent (sang et eau). Le modèle ne prend pas en compte ni la vitesse d'écoulement du sang ni la résistance des parois que les gaz doivent traverser.
 - Haldane a défini un seuil unique de **sursaturation critique** valable pour tous les compartiments. Les seuils de sursaturation critique sont indépendants de la profondeur atteinte. Pour Haldane, si l'on respecte ces seuils, il n'y a pas de bulles d'azote qui se forment.



MODÈLE DE HALDANE

- Les termes utilisés:
- **Compartiment :**
 - C'est un ensemble de tissus qui se comportent de la même façon vis-à-vis de la charge et de la décharge.

Compartiment	période	organes
C1	5 min	Reins
C2	10 min	Estomac, viscères, foie, système nerveux
C3	20 min	viscères, foie, système nerveux central
C4	40 min	peau
C5	1h20 min	Peau, muscles, cœur
C6	2h40 min	muscles
C7	5h20 min	Muscles, articulations, graisses, os
C8	10h40 min	Muscles, articulations, graisses, os, reste du corps

Sources Scubapro/Uwatec , ZH-L8 ADT



MODÈLE DE HALDANE

- Les termes utilisés:
- **TENSION :**
 - C'est la quantité de gaz dissout dans un liquide , en Bar.
 - Au niveau de la mer , la pression atmo. est de **1 Bar**, la PPn2 et de 0,8 Bar . La tension d'azote sera donc de 0,8 Bar car le corps est à saturation.
 - **Tension initiale** : quantité de gaz dissous au départ de la plongée
 - **Tension finale** : quantité de gaz dissous au début de la remontée.
- **GRADIENT :**
 - C'est la différence entre la tension initiale (*au départ de la plongée*) et la tension finale (*au début de la remontée*).
- **PERIODE :**
 - C'est le temps nécessaire pour un compartiment pour dissoudre la moitié du gradient restant (C5/ C10 etc..)
 - **On considère que 6 périodes = 100% de saturation**



MODÈLE DE HALDANE

PERIODE	1	2	3	4	5	6
FRACTION	1/2	3/4	7/8	15/16	31/32	63/64
%	50%	75%	87.5%	93.75%	96.87%	Env 100%

- **SEUIL DE SURSATURATION CRITIQUE:**
 - Au cours de la remontée, le rapport entre la tension de chaque compartiment et la pression absolue ne doit pas dépasser un seuil de sursaturation critique : **SC**
 - **$P_{abs} = T_f N_2 / SC$**
 - **Il faut toujours que le rapport soit inférieur à 1, sinon un palier est nécessaire.**
- **COMPARTIMENT DIRECTEUR :**
 - Lorsque lors d'une plongée, plusieurs compartiments ont un rapport supérieur à 1, celui dont la valeur est la plus élevée est appelé **compartiment directeur**.

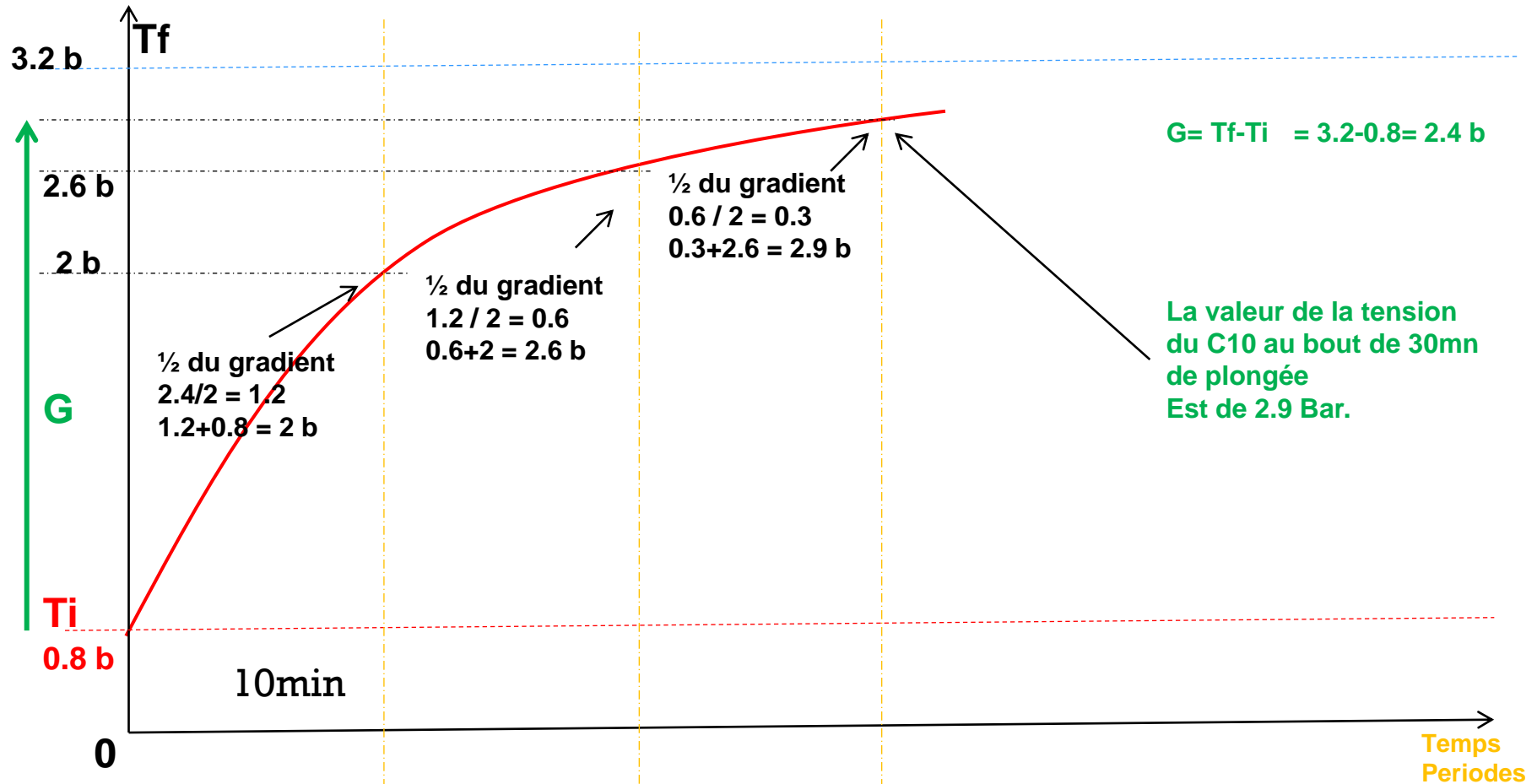


MODÈLE DE HALDANE

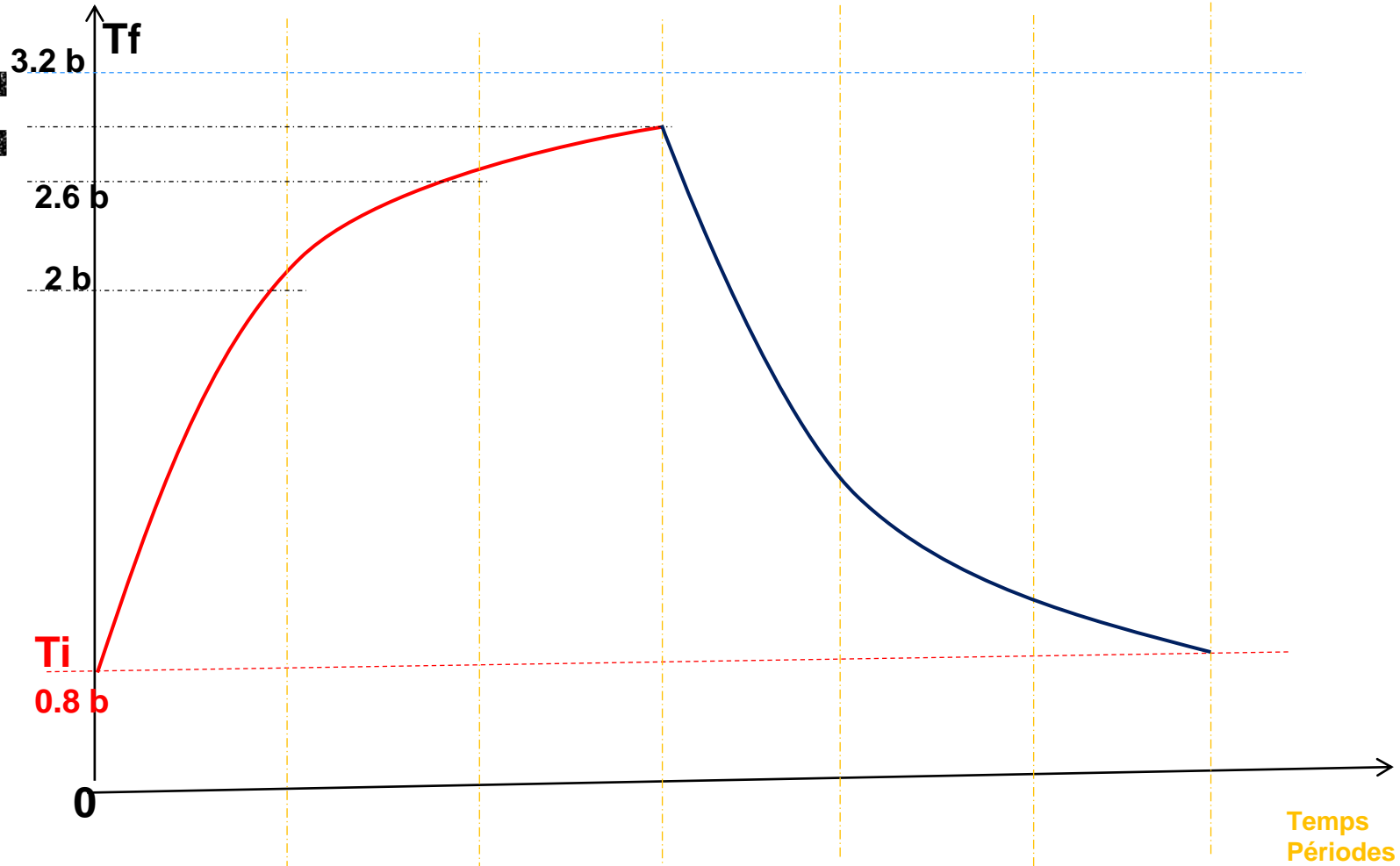
Exemple : C10 – plongée à 30m (4b) pendant 30mn

$$T_i = 0,8 b$$

$$T_f = 4 \times 0,8 = 3,2 b$$



MODÈLE DE HALDANE



MODÈLE DE DÉCOMPRESSION

- **Haldane**

- 1^{er} modèle qui date de 1908
- Modèle à perfusion
- Charge et décharge symétrique
- Diffusion tissulaire et alvéolaire instantané
- Compartiments indépendants
- Tout le gaz est dissous
- Au départ, 5 compartiments
- Vitesse de remontée de 20m/min



MODÈLE DE DÉCOMPRESSION

- **Workmann**

- Il adapte le modèle de Haldane afin de contrôler la déco pour des plongées plus longues et plus profondes,
- Il introduit la notion de **M-VALUES** qui est la limite de surpression tolérée.
 - **C'est la tension maximum admissible pour chaque compartiment et pour chaque profondeur**



MODÈLE DE DÉCOMPRESSION

■ **BUHLMANN**

- Il modifie l'approche de Workmann pour l'adapter à des plongées en altitude et surtout développe les M-VALUE.
- Il définit plusieurs M-Value par compartiment pour une profondeur donnée
 - Deux jeux de coefficient par compartiment . (ZH-L12 / ZH-L16)
- Il prend en compte l'air alvéolaire (eau + CO₂)
- Les algorithmes deviennent adaptatifs . ZH-L16 ADT
- Les GF Low et Hight
 - Ce sont des coefficients définis personnellement afin d'appliquer un conservatisme propre à chaque plongeur et pour chaque plongée.



MODÈLE DE DÉCOMPRESSION

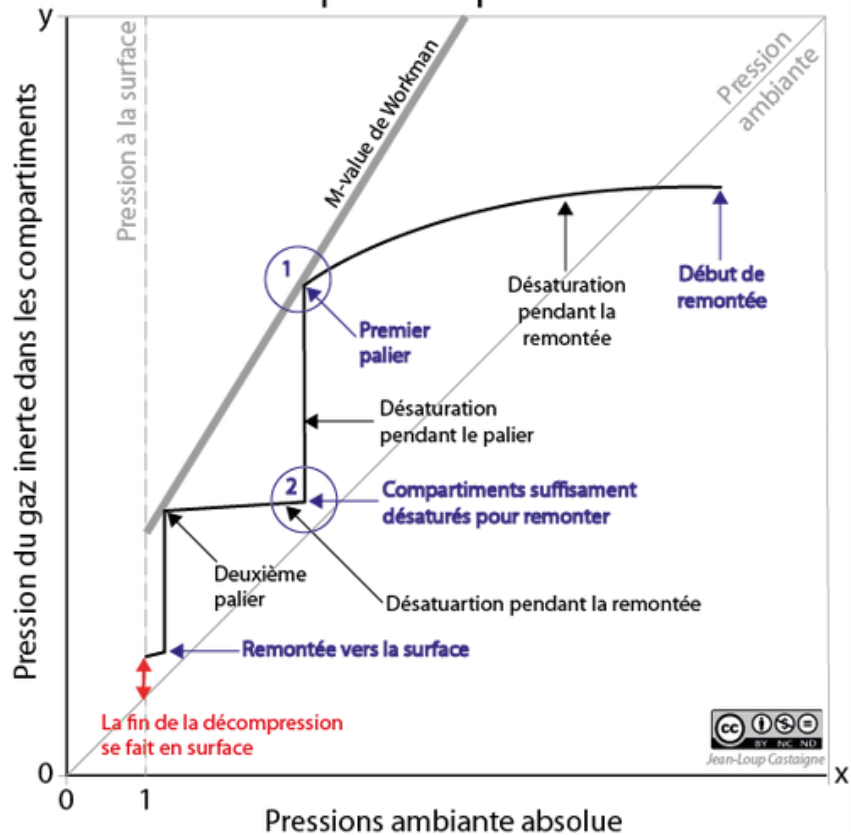
- **Les facteurs de gradient:**

- L'utilisateur choisit le pourcentage de sursaturation qu'il s'autorise au fond (GF Low) et en surface (Gf high).
- Il s'agit d'un pourcentage par rapport à la droite des M-Values.
- Plus on diminue la valeur du Gf low, plus on diminue la sursaturation qu'on s'autorise dans la zone profonde, ce qui aura pour conséquence de provoquer prématurément l'apparition de palier, ce qu'on appelle « forcer des paliers profonds ». Plus on diminue la valeur du Gf high, plus on diminue la sursaturation qu'on s'autorise en sortant de l'eau, ce qui aura pour conséquence d'allonger les paliers proches de la surface.



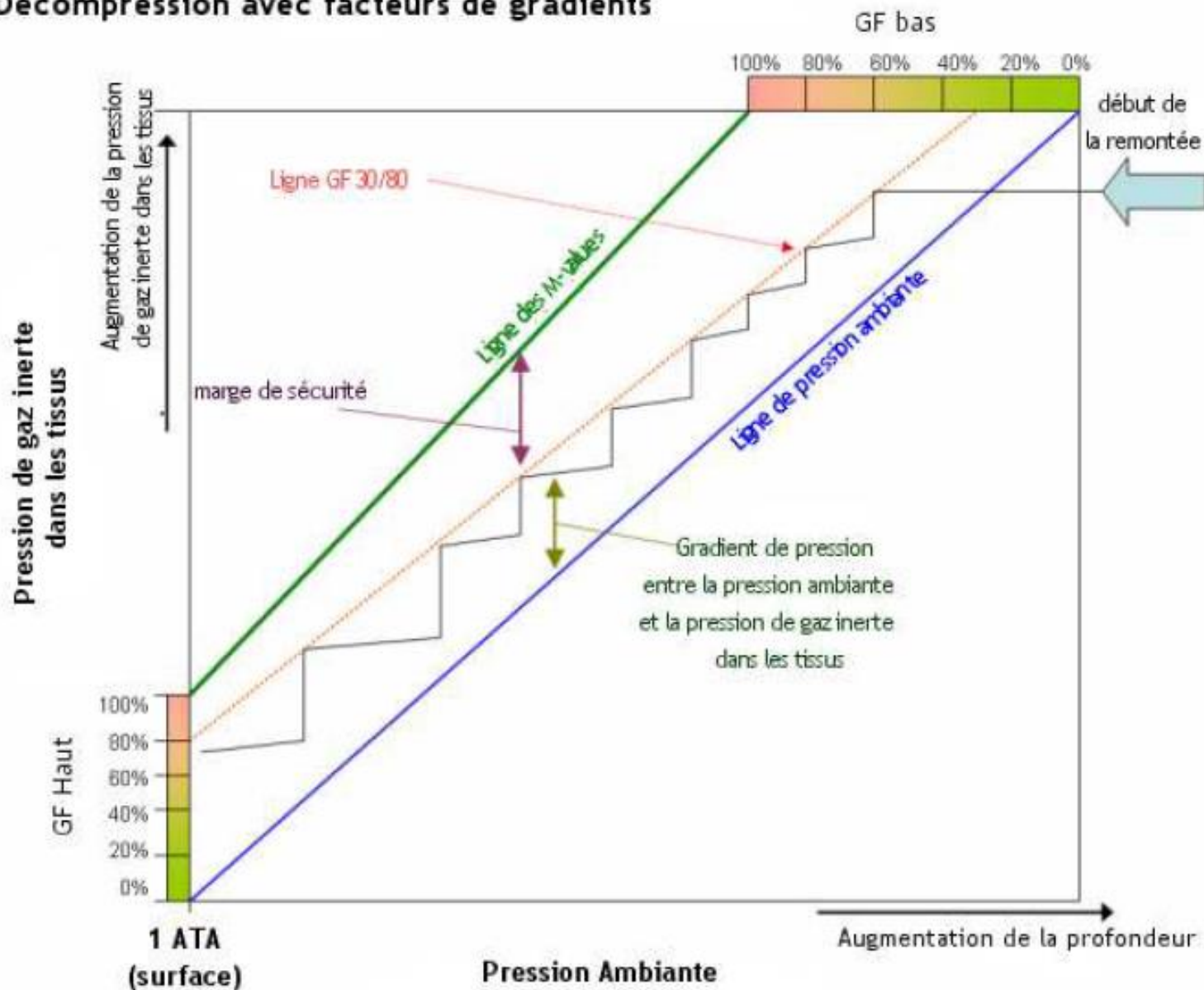
MODÈLE DE DÉCOMPRESSION

Graphe des pressions



Adapté de Baker, E.C. (1998). Clearing up the confusion about "Deep Stops", Immersed, Vol. 3, No. 4, Winter.

Décompression avec facteurs de gradients



MODÈLE DE DÉCOMPRESSION

- **Le modèle VPM**

- Varying Permeability Model (ou Modèle à Perméabilité Variable)
- Il s'agit d'un modèle totalement différent du modèle Haldanien. Le modèle ne s'appuie pas sur un calcul des ratios de sursaturation mais sur une taille maximum admise de bulles.
- Tous les humains possèdent un capital de micronoyaux.
 - Beaucoup de petits et quelques gros.
- Au cours de l'immersion, les bulles vont grossir et se rétracter en fonction des valeurs de gaz dissous et de la pression ambiante.
- les expériences ont montré que l'organisme est capable de supporter un certain nombre de bulles indéfiniment ou dans un temps donné un nombre plus important.
- **le modèle VPM va chercher à calculer le nombre maximum de bulles saines que l'organisme peut tolérer .**



MODÈLE DE DÉCOMPRESSION

- **Le modèle RGBM**
 - Développé par WIENKE début des années 1990.
 - Ce modèle étant un modèle commercial, il y a peu de documentation.
 - Lorsque l'on compare un modèle RGBM et un modèle BUHLMANN, on constate que les premiers paliers commencent bien avant pour RGBM et sont supérieurs en temps. Cependant pour les plongées très longues, ce rapport pourrait s'inverser.
- **RGBM et SUUNTO**
 - Suunto indique que tous ses ordinateurs s'appuient sur un modèle RGBM.
- On peut dire en fait que le modèle RGBM/Suunto est une variante asymétrique du modèle de Haldane. La décharge prend plus de temps que la charge, la courbe n'est donc pas symétrique.
- Il s'agit d'un modèle Haldanien à 9 compartiments.
- Le modèle est adaptatif en fonction de différents éléments:
 - remontée rapide
 - Profil inversé
 - Altitude, successive etc..
- le modèle adapte les M-VALUE



SYNTHÈSE

realisation actuelle	modèle	particularité
SUUNTO	haldanien : spencer / 9 compartiments / périodes asymétrique	limitation des facteurs de risques avec un « conservatisme RGBM »
MARES	n'est pas dans le domaine public	limitation des facteurs de risques avec un « conservatisme RGBM »
UWATEC	haldanien : Bulhmann à 8 compartiments	ADT : adaptatif en fonction des parametres de risque
tables MN90	haldanien	12 compartiments, seuil = ratio tension/Pamb
océanic	Spencer à 12 compartiments	plongée altitude

BEUCHAT
 Bühlmann ZHL-16C
 12 compartiments
 Périodes : 2,5 à 480 min

CRESSI
 Bühlmann ZL-L12
 12 compartiments
 Périodes : 5 à 640 min

MARES
 Mares-Wienke RGBM
 //
 //

SUUNTO
 Suunto RGBM
 9 compartiments
 Périodes : 2,5 à 480 min

UWATEC
 Bühlmann ZH-L8 ADT
 8 compartiments
 Périodes : 5 à 640mn



DES QUESTIONS ?



VIDÉO...

- [\(1\) Etats de saturation – YouTube](#)
- [\(1\) Gradients Factor pour Les Nuls – YouTube](#)

l'état de saturation
les GF

