

La décompression

Sortir vite, mais en forme...

...et mon ordi, il sert à quoi ?



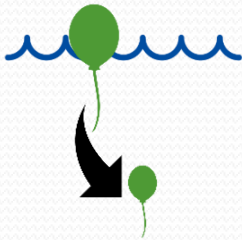
La réalité

Principes physiques

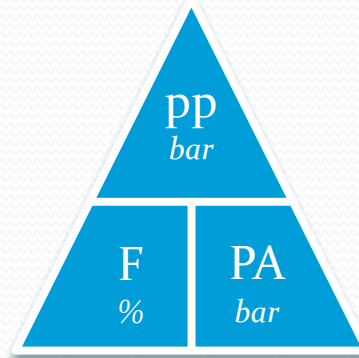
Le corps humain

Naissance et vie d'une bulle

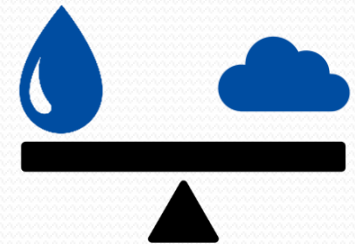
Les principes physiques



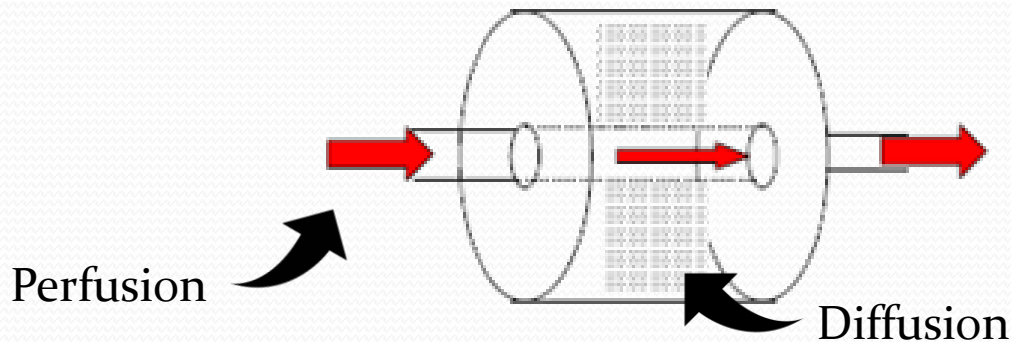
Variations volumes/pression
Boyle-Mariotte



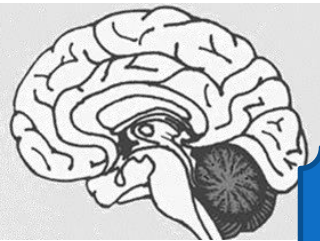
Pressions partielles
Dalton



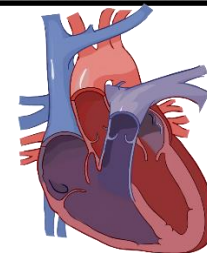
Dissolution des gaz
Henry



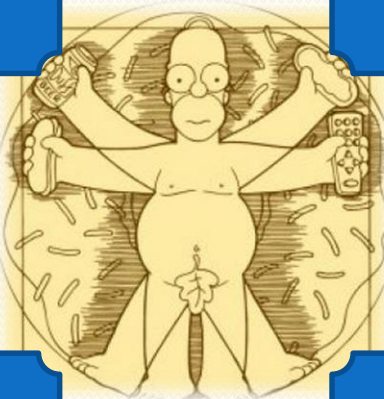
Le corps humain



Nerveux



Circulatoire



Auditif



Ventilatoire

$O_2 = 20,95\%$
 $CO_2 = 0,04\%$
 $N_2 = 78,09\%$

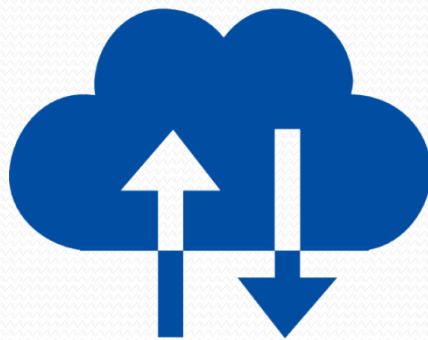
Les échanges gazeux

Gradient de circulation
pulmonaire

Efforts

Epaisseur de la MAC
Surface de contact

Caractéristique personnelle



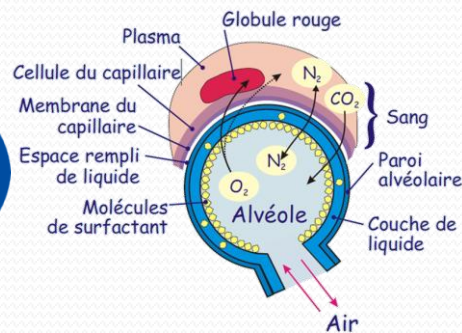
Echange gazeux

Vitesse de diffusion des
gaz

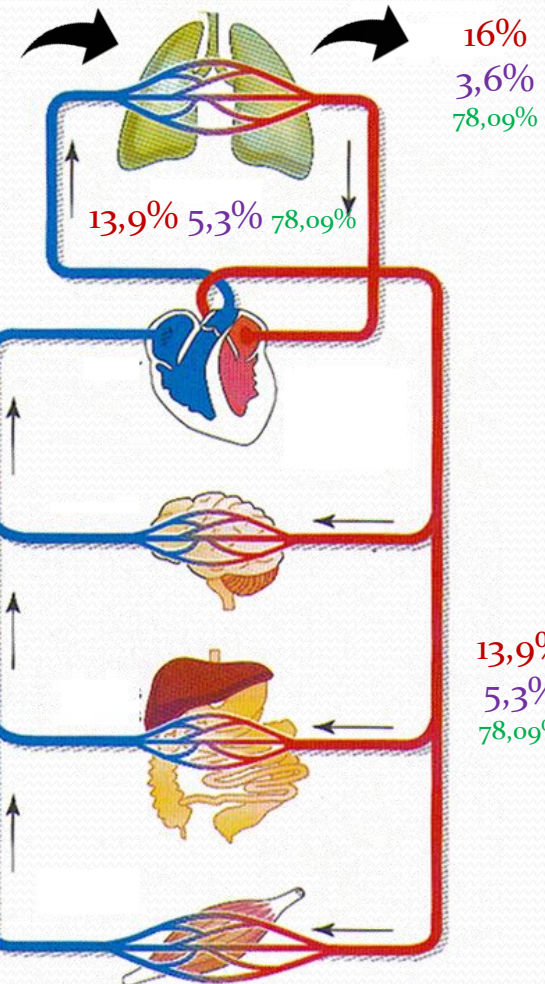
Endogène

Gradient de pression des
gaz

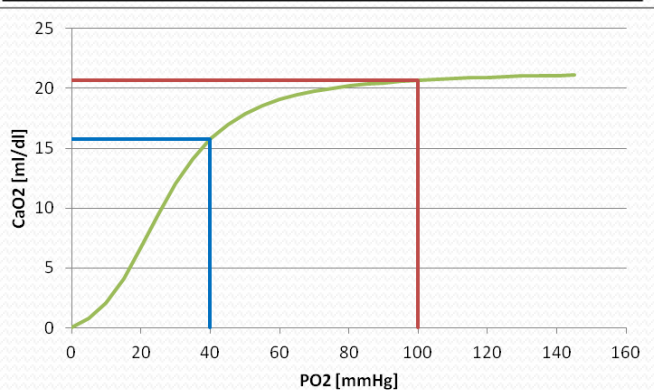
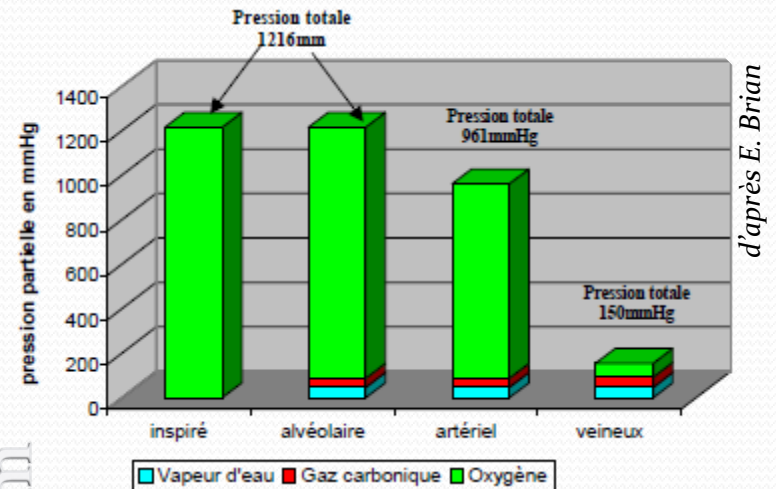
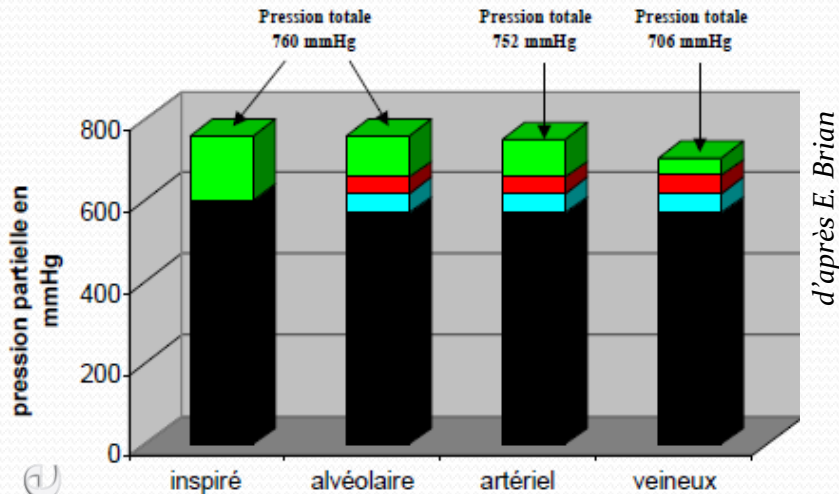
Profondeur, temps de plongée



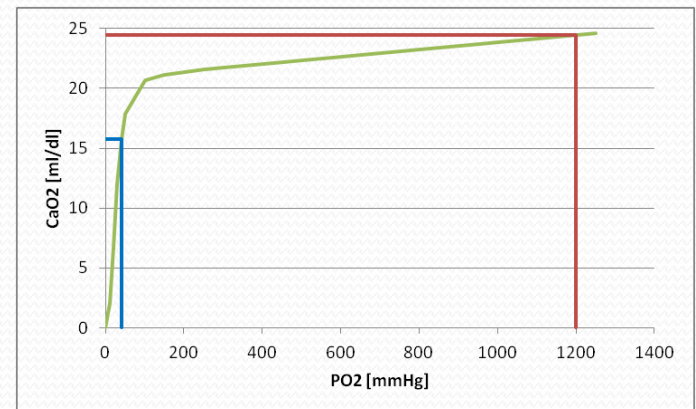
20,95%
0,04%
78,09%



Fenêtre oxygène

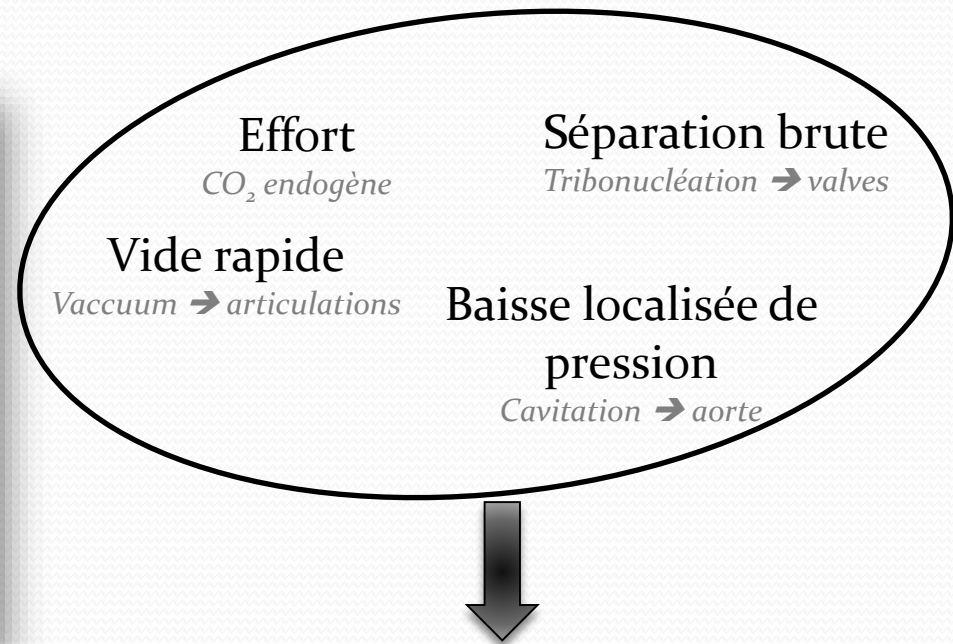
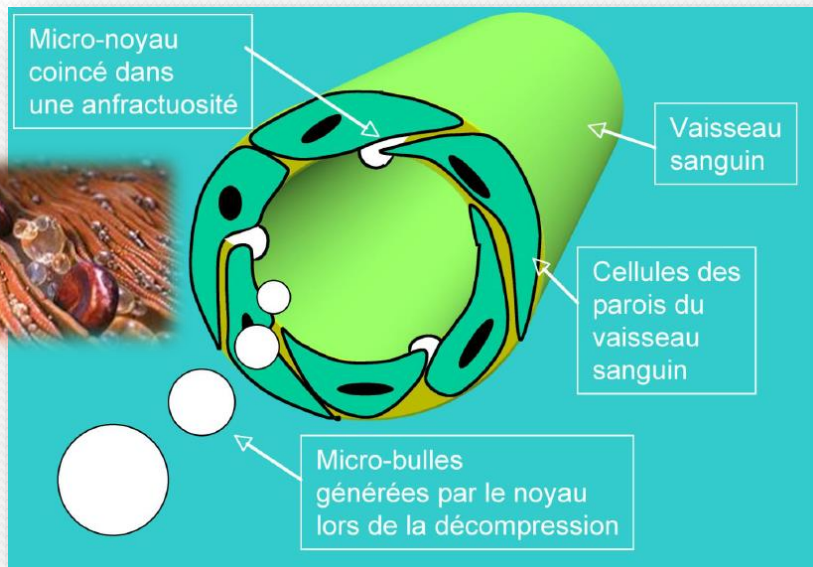


Oxygène à 6m



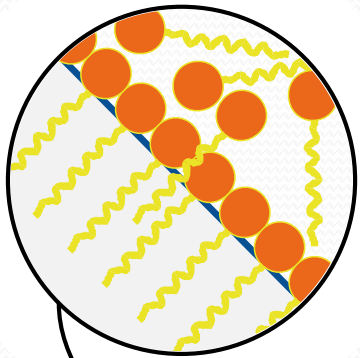
Amorces de bulles

Tout part d'un micro-noyau fait de CO_2

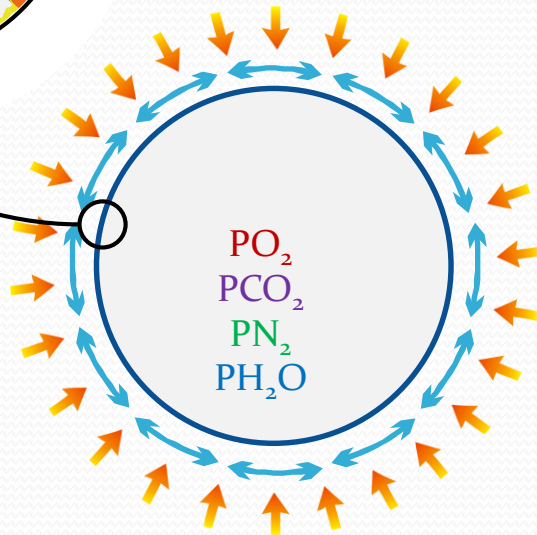


Taille mini pour faire une micro bulle: $0.005\mu\text{m}$

Vie et survie d'une bulle



Pression de la bulle
+
Répulsion surfactant &
chimiques + électrique
≈
Pression du milieu
+
Tension de surface



Stabilisée par

Agrégation
Plaquettes

Surfactant
Grand pour petites bulles

Croissance par

Transfert de gaz
Effort (CO₂ plus que N₂)

Baisse de pression
Remontée

Coalescence
Amplifié par le mouvement

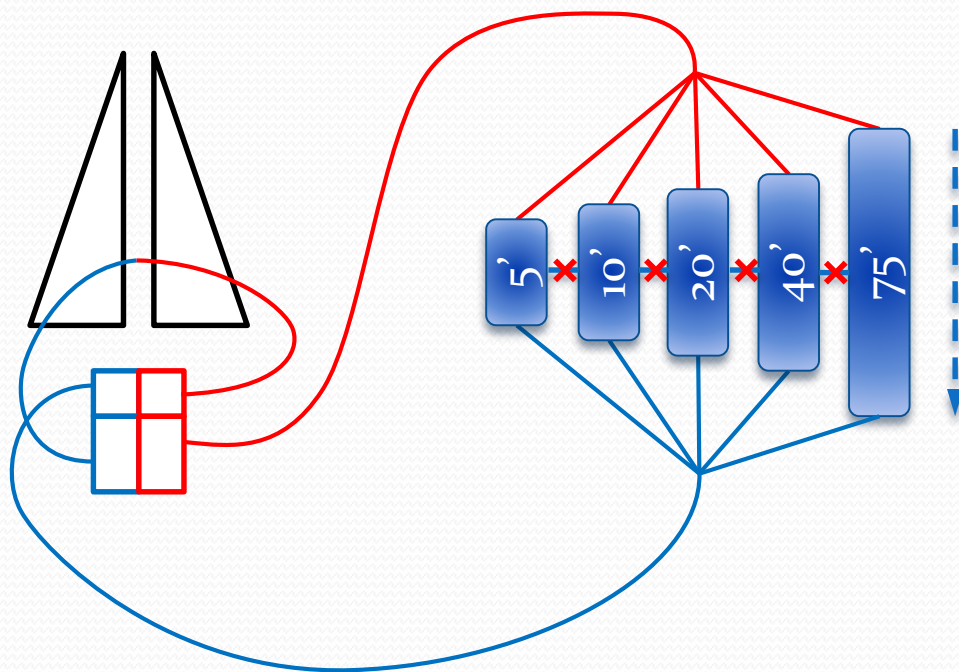
Travail à faire sur nucléation et stabilisation

Les modèles

Les Haldaniens

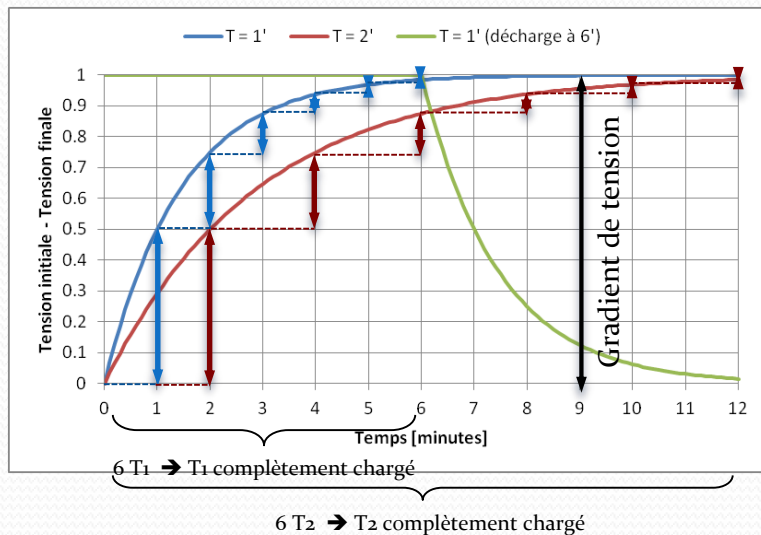
Les bullesques

Le modèle Haldanien (1908)



- Le corps est composé de tissus différents modélisés en compartiments.
- Modèle à perfusion (équilibre instantané)
- Tension $\Leftrightarrow$ Pression d'un gaz dans un liquide
- Notion de seuil de saturation critique:
 - En dessous du seuil $\Rightarrow$ pas de bulle
 - Au seuil $\Rightarrow$ Faire un palier
 - Au dessus du seuil $\Rightarrow$ Bulles pathogènes

Le modèle Haldanien (1908)



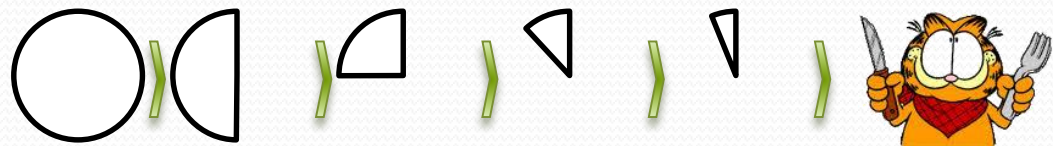
- Chaque compartiment se charge et se décharge à sa vitesse propre
- Charges et décharges sont asymétriques

Altitude

Mélanges

Successives

La décompression, c'est comme une bonne pizza (ou une bonne bière)



La suite d'Haldane

- Hempleman (1958) :
 - Intégration de la diffusion

$$QN_2 = P\sqrt{t}$$

Problèmes articulaires



- Workman (1965) :
 - Création des M-Values

Tabelle 26. Die Koeffizienten ZH-L16 für N₂

Kompartiment Nr.	t _{1/2} N ₂ [min]	ZH-L16A „theoretisch“		ZH-L16B Tabelle	ZH-L16C Computer
		b	a	a	a
1	4,0	0,5050	1,2599	1,2599	1,2599
1b	5,0	0,5578	1,1696	1,1696	1,1696
2	8,0	0,6514	1,0000	1,0000	1,0000
3	12,5	0,7222	0,8618	0,8618	0,8618
4	18,5	0,7825	0,7562	0,7562	0,7562
5	27,0	0,8126	0,6667	0,6667	0,6200
6	38,3	0,8434	0,5933	0,5600	0,5043
7	54,3	0,8693	0,5282	0,4947	0,4410
8	77,0	0,8910	0,4701	0,4500	0,4000
9	109,0	0,9092	0,4187	0,4187	0,3750
10	146,0	0,9222	0,3798	0,3798	0,3500
11	187,0	0,9319	0,3497	0,3497	0,3295
12	239,0	0,9403	0,3223	0,3223	0,3065
13	305,0	0,9477	0,2971	0,2850	0,2835
14	390,0	0,9544	0,2737	0,2737	0,2610
15	498,0	0,9602	0,2523	0,2523	0,2480
16	635,0	0,9653	0,2327	0,2327	0,2327

Modélisation numérique



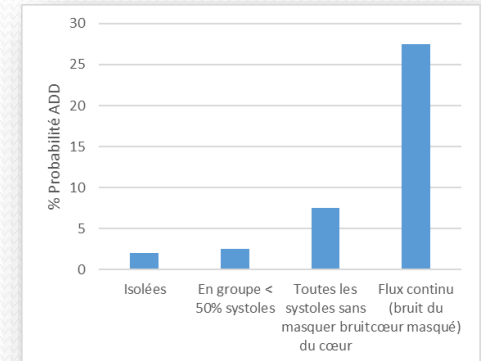
- Bühlmann (1980) :
 - Intégration du gaz alvéolaire (vapeur d'eau) et de L'Hélium (plus diffusif et moins soluble)

Altitude & mélanges



Le développement des bulles

- Spencer (1970) :
 - Mise en évidence des bulles circulantes
 - Utilisation du Doppler
- Yount (1977) :
 - Fusion de perfusion et diffusion
 - Créé le modèle VPM
- Wienke (1991) :
 - Créé le modèle RGBM (Reduced Gradient Bubble Model)



© Livet



© Le Pechon

VPM – Principes généraux

Noyaux gazeux :

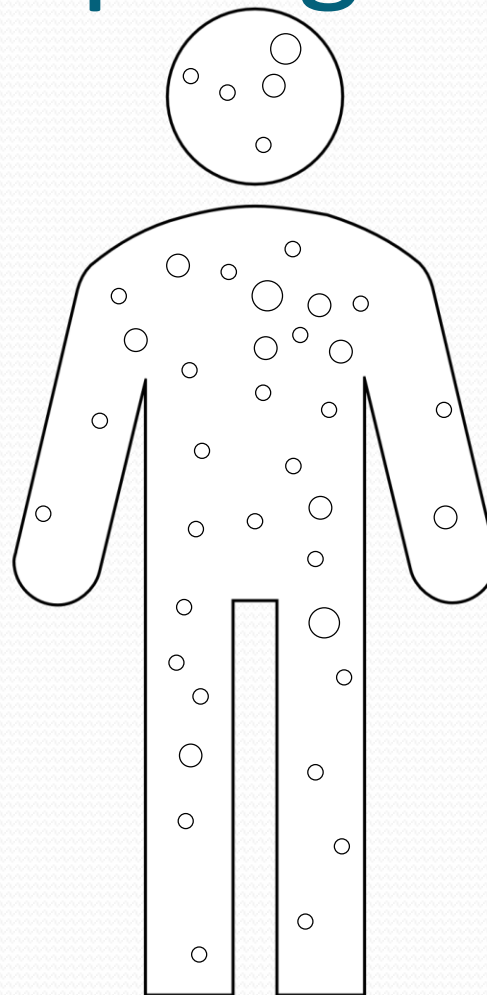
- Nombre fixe
- Beaucoup de petits, quelques gros

Croissance des bulles :

- Variations pression
- Perméabilité variable (micro bulles imperméables)

Accident si :

- Rayon d'une bulle trop gros
- Volume total des bulles trop important



Le modèle donne :

- Paliers profonds (avec ou sans hélium)
- Raccourcissement des paliers proches de la surface

Facteurs d'influence :

- Gaz utilisé (diffusivité différente)
- Importance de la planification (O₂)
- Vitesse de compression (à la descente)

Limitations :

- Volume et nombre initial des bulles
- Quantité admissible et rayon critique
- Noyaux créés négligés

RGBM, Wienke (1991)

Perfusion & diffusion

*Forçage de la diffusion dans
tissus de 1 à 720' et fenêtre
oxygène*

Micro-noyaux

*Toujours perméables et
stabilisées par des surfactants*

Bulles

*Distribution
exponentielle et évolution*

Doppler

Embolie gaz veineux

Prévention

*Génération de micro-
noyaux*

Surface élimine le gaz dissout

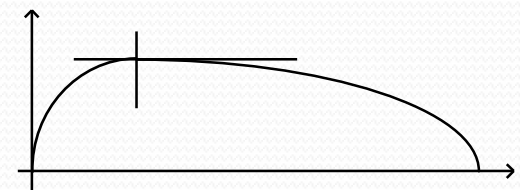
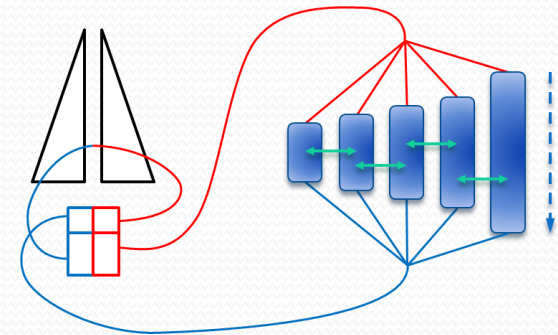
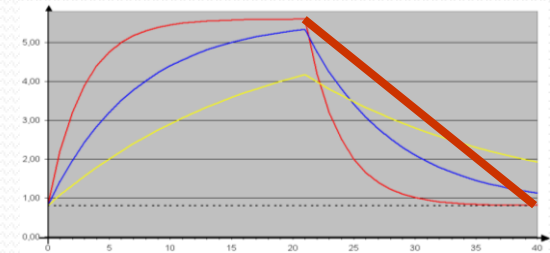
Profondeur élimine les bulles

Multi-plongées

*Prise en compte des
intervalles de surface*

Les autres modèles ?

- Thalmann (1984) : désaturation linéaire
- DCIEM (1986): échanges entre compartiments
- Méliet (1992) : retard à saturer et lent à désaturer



Analyse des modèles

Les points non résolus

Explication des accidents

Bonne pratiques

Les points non résolus

La charge / décharge

Perfusion (flux sanguin) *Diffusion (taux dans les tissus)*

Les tissus

Composition *Localisation (bends?)*



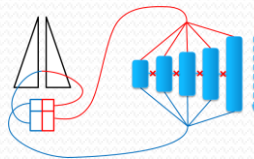
Les bulles

Génèse *Croissance*

La limite

Saturation du gaz dissous *Volume global*
Flux sanguin
Nombre de bulles *Taux de croissance des bulles*

Comparatif des piliers des modèles

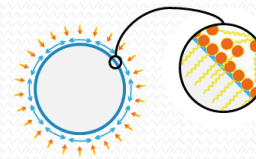


Analyse gaz libre/dissout

Compartiments définis par leur
période de sat./désat.

Sursaturation tolérable

Gradient de pression maximisé



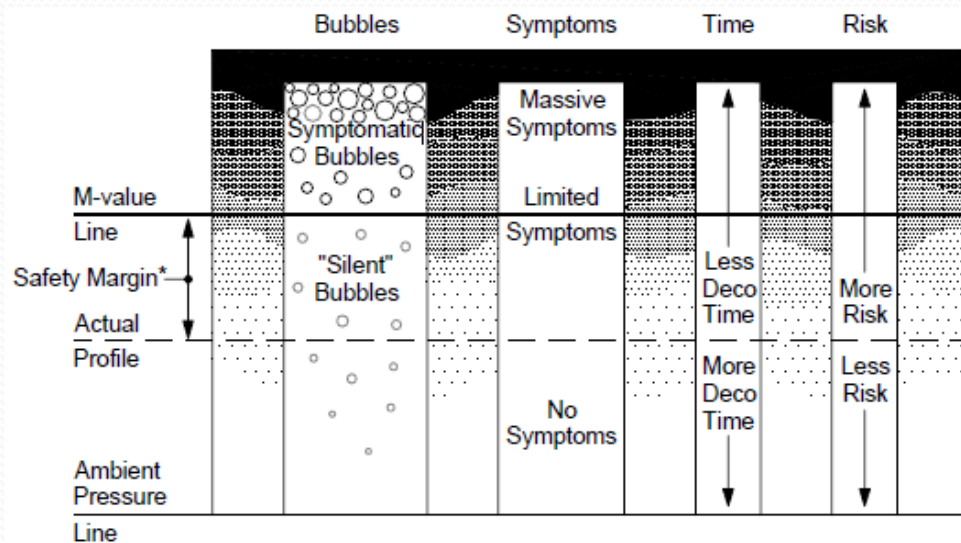
Analyse bulles

Compartiments définis par leur
période de sat./désat.

Volume tolérable

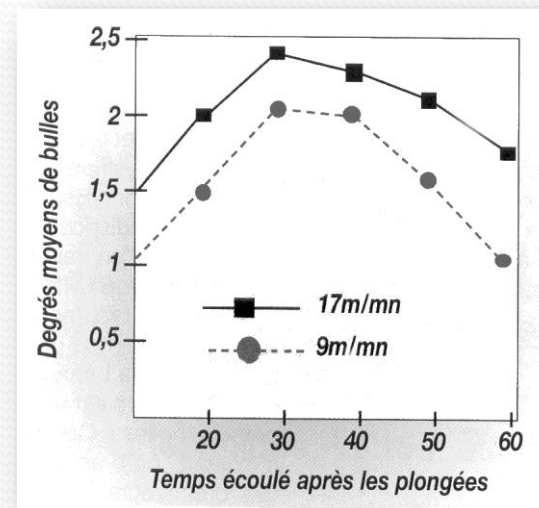
Taille de bulle gérée

Note importante



* varies according to individual disposition, physical condition, acceptable risk, etc.

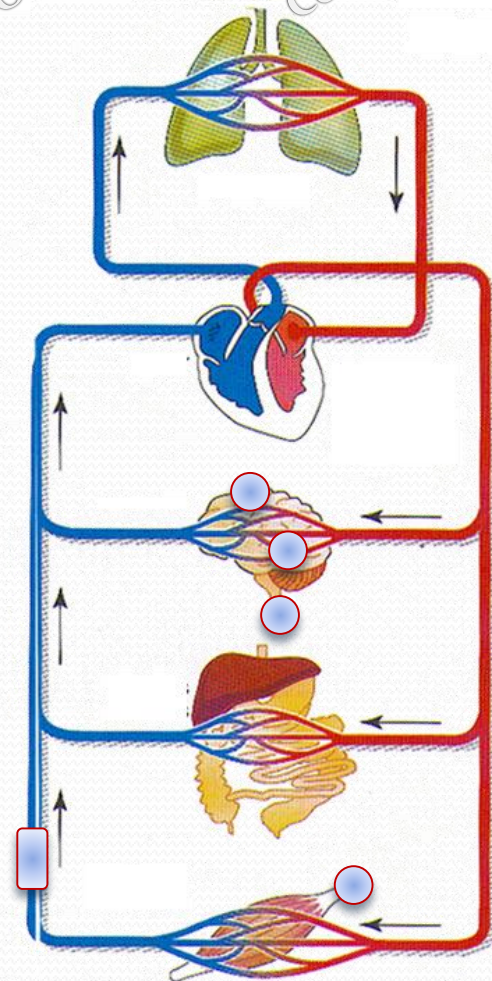
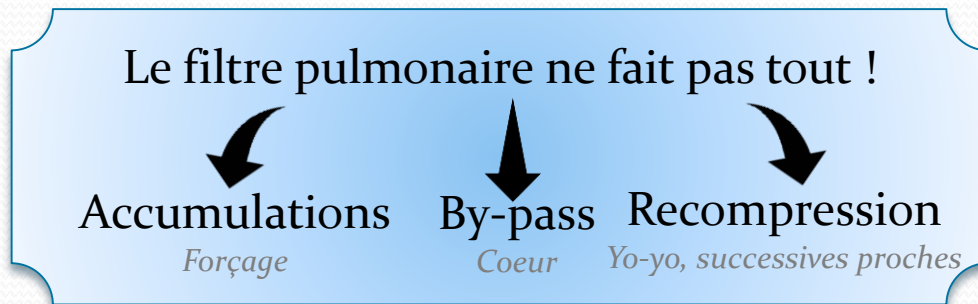
Vous allez faire des bulles



...après la plongée

Les principes expliqués

- Où se coince la bulle?
 - Articulations
 - Système veineux
 - Cerveau
 - Oreille
 - Colonne vertébrale



Les bonnes pratiques



Plongée de réadaptation

Effet pendant 7 à 10 jours



Adaptation du corps à la présence de micro-bulles



Hydratation

Contre l'effet du froid et de l'immersion



Améliore la décharge



Pre-oxygénation
Exercice avant la plongée
Repos avant la plongée

Effet avéré, mais...



Complexe à mettre en œuvre

Ou alors mangez du chocolat

Jouons avec les modèles

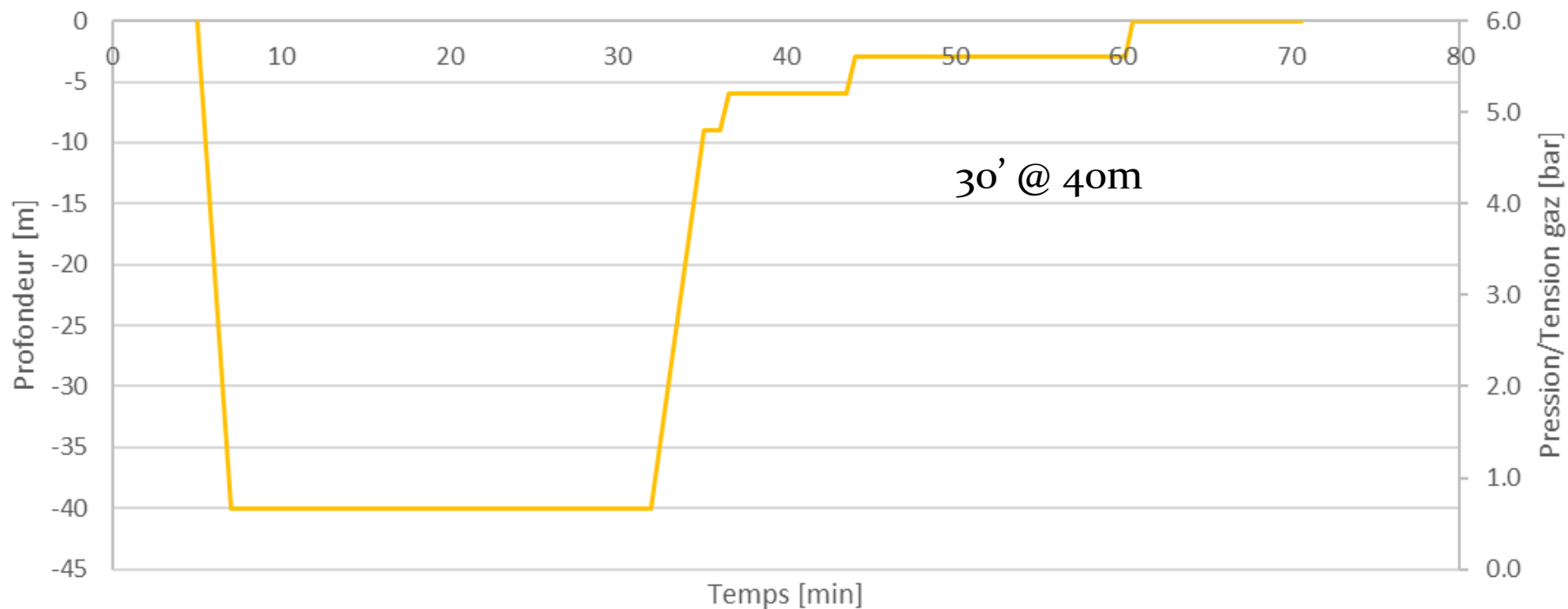
Profils de saturation

Plongée successive

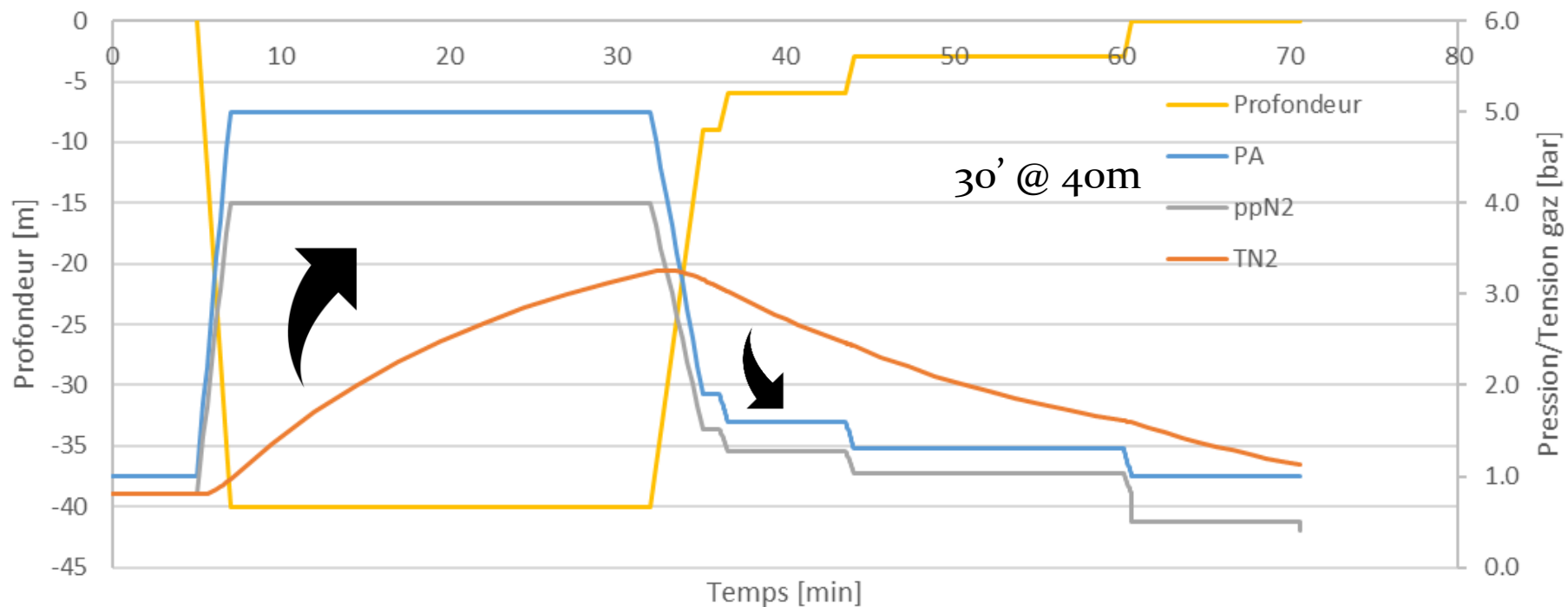
Plongée aux mélanges

Cas d'étude = 25' @ 40m

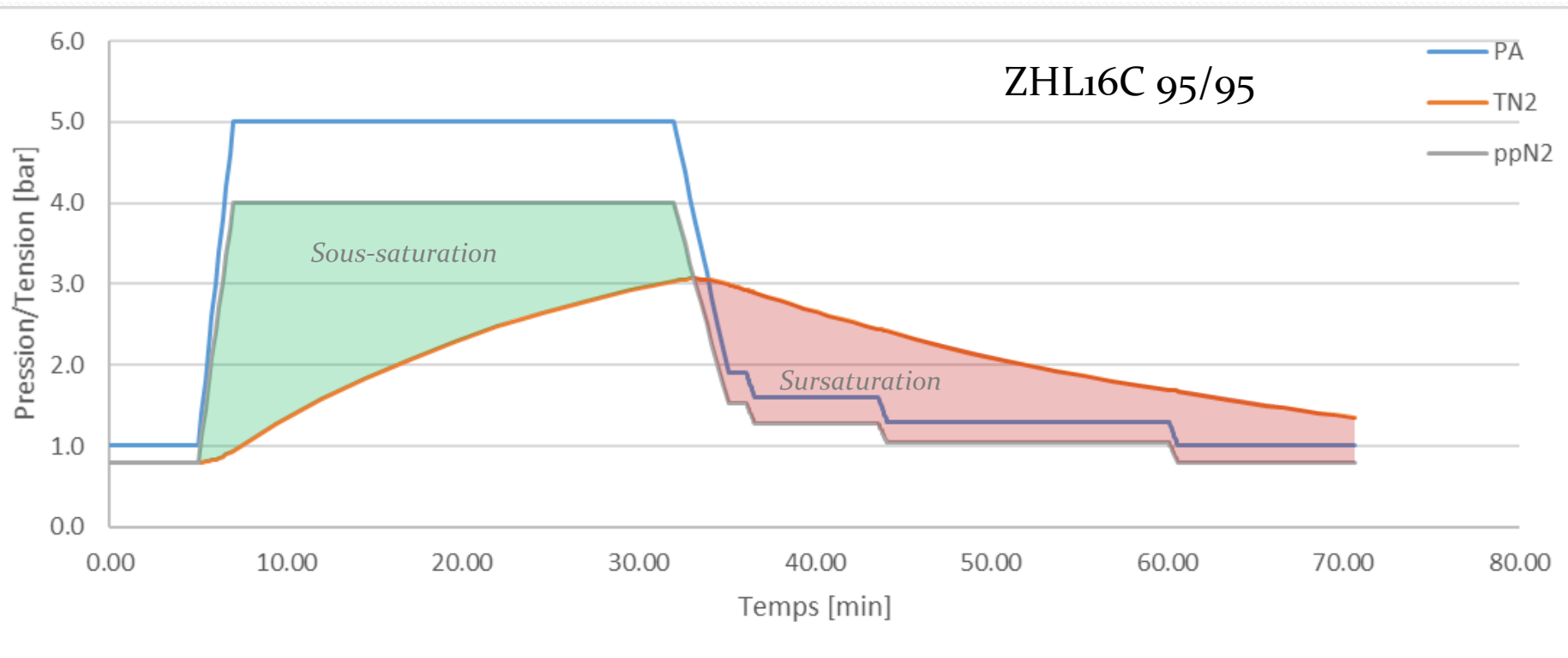
Analyse d'une courbe



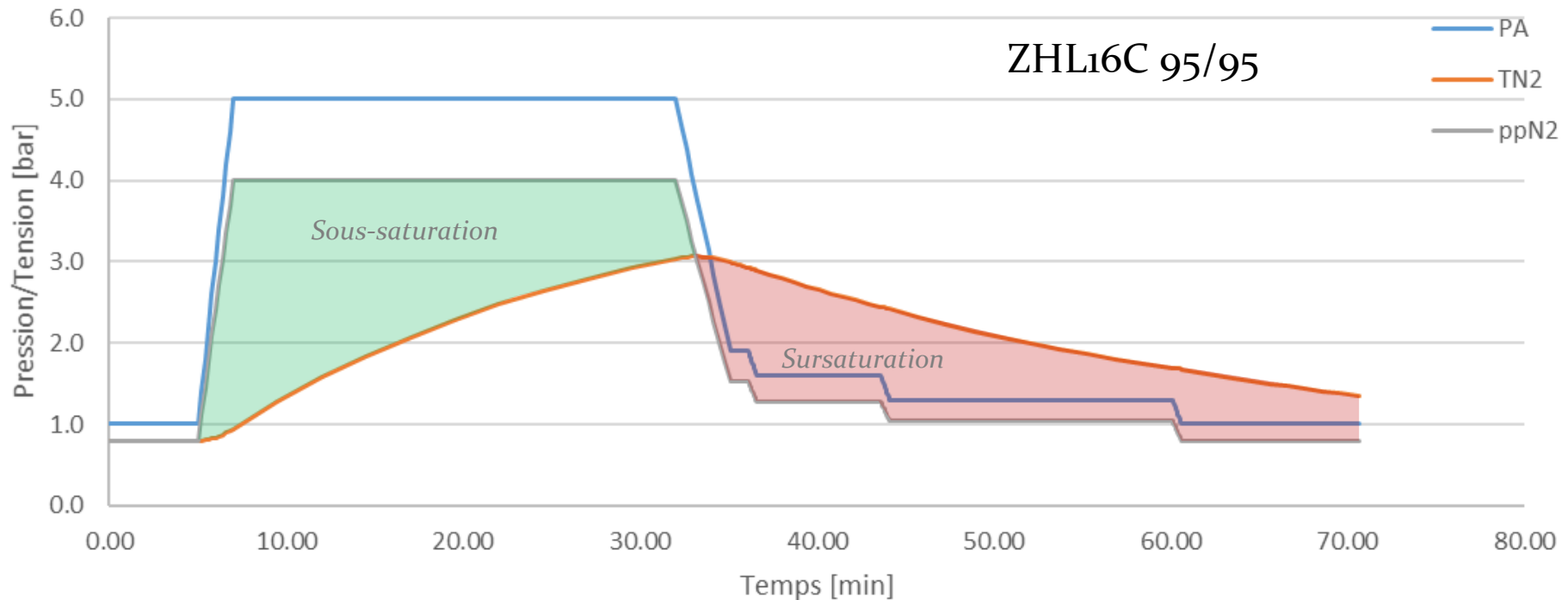
Analyse d'une courbe



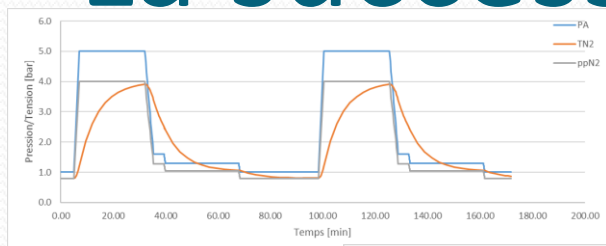
Analyse d'une courbe



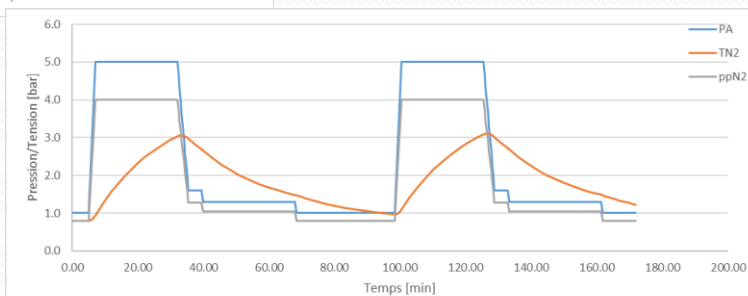
Analyse d'une courbe



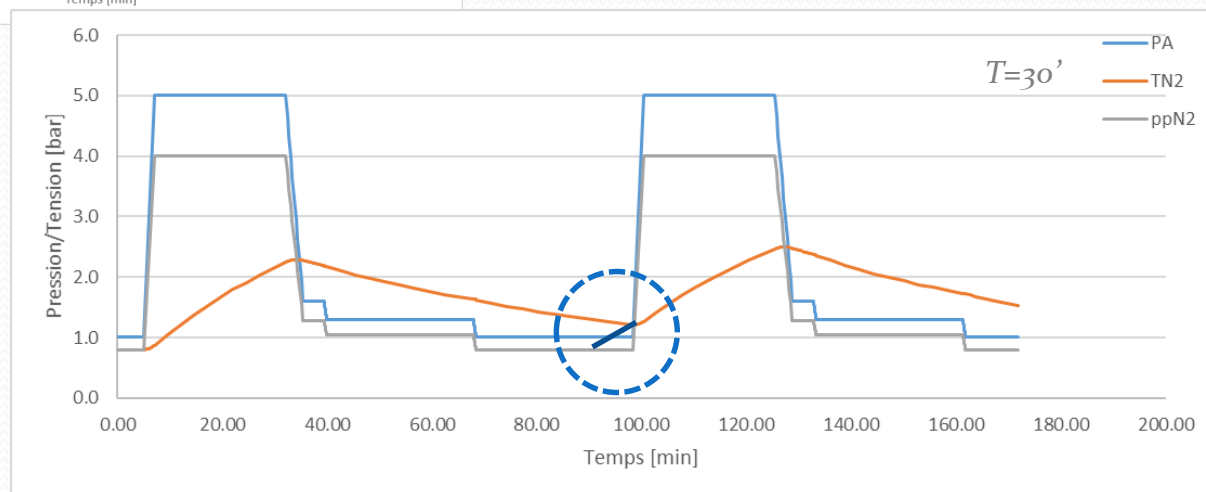
La successive



$T=5'$



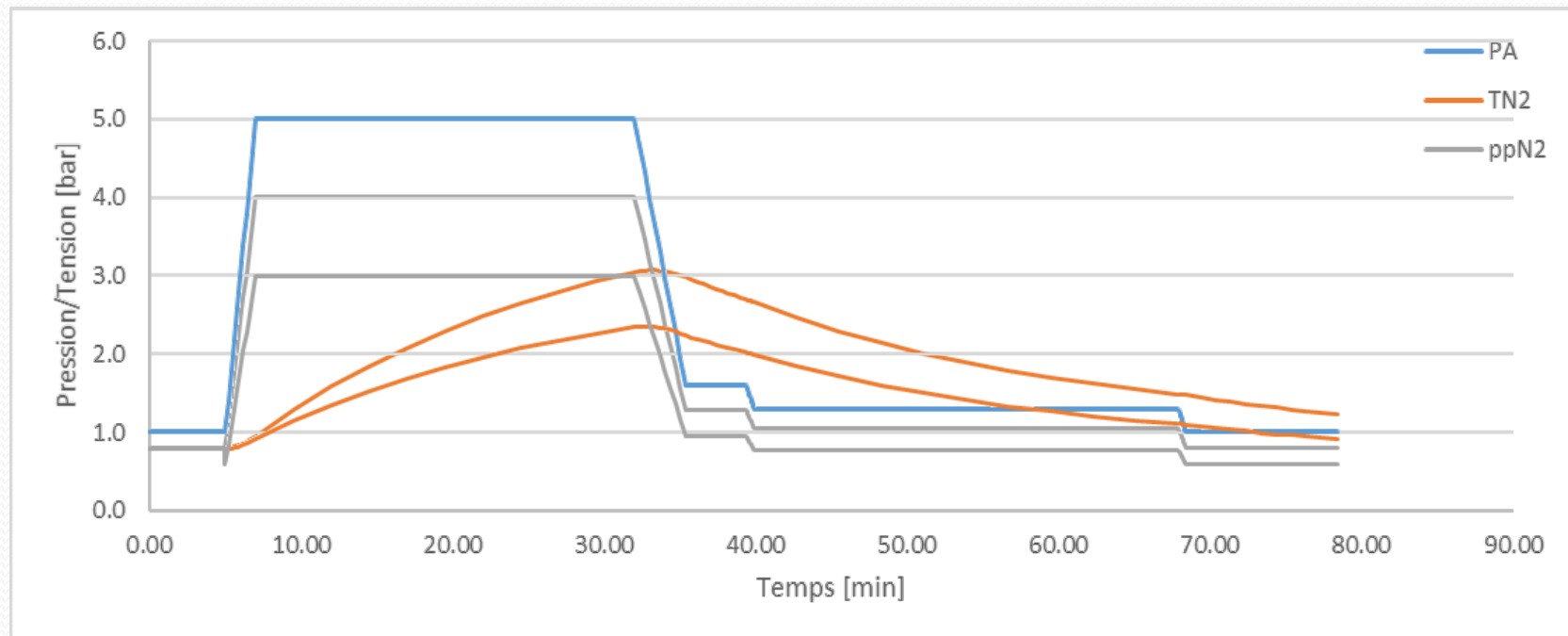
$T=15'$



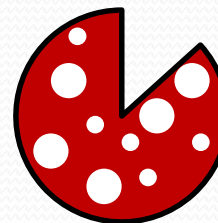
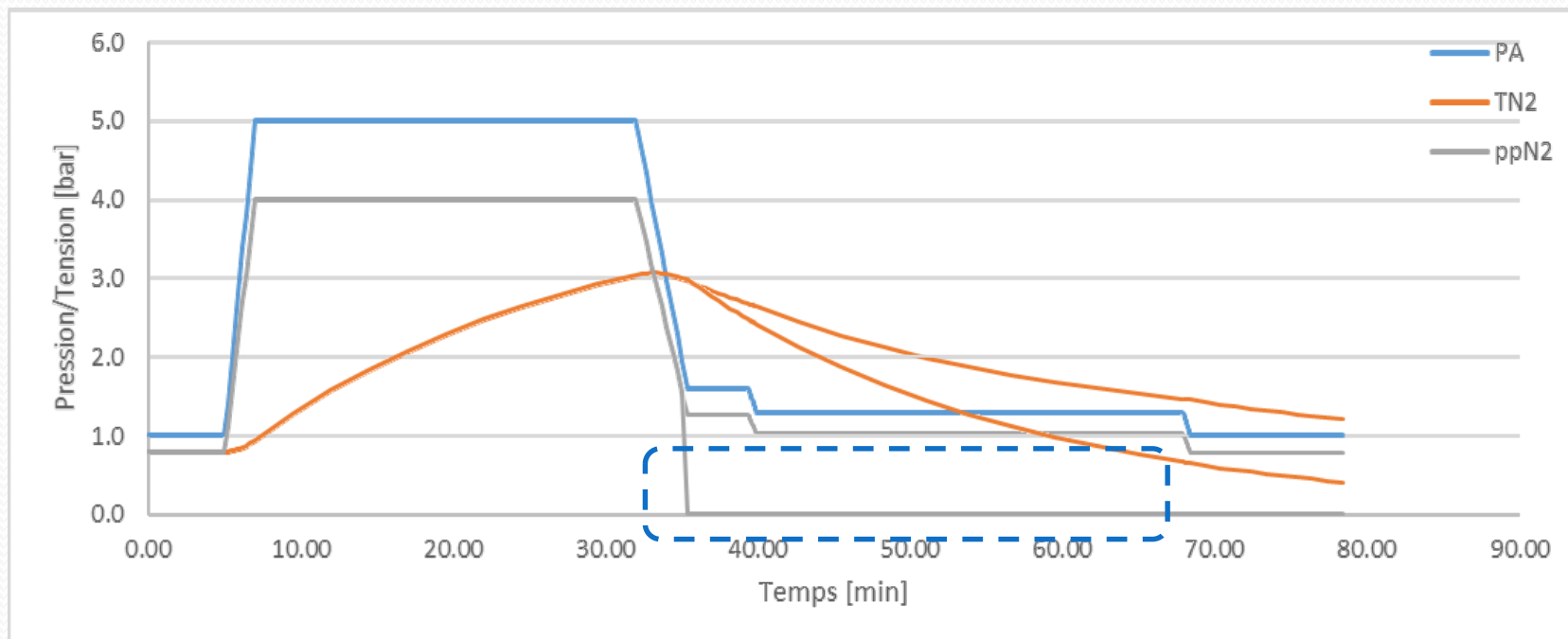
$T=30'$

Temps pour revenir à la même tension d'azote: la majoration

Le Nitrox

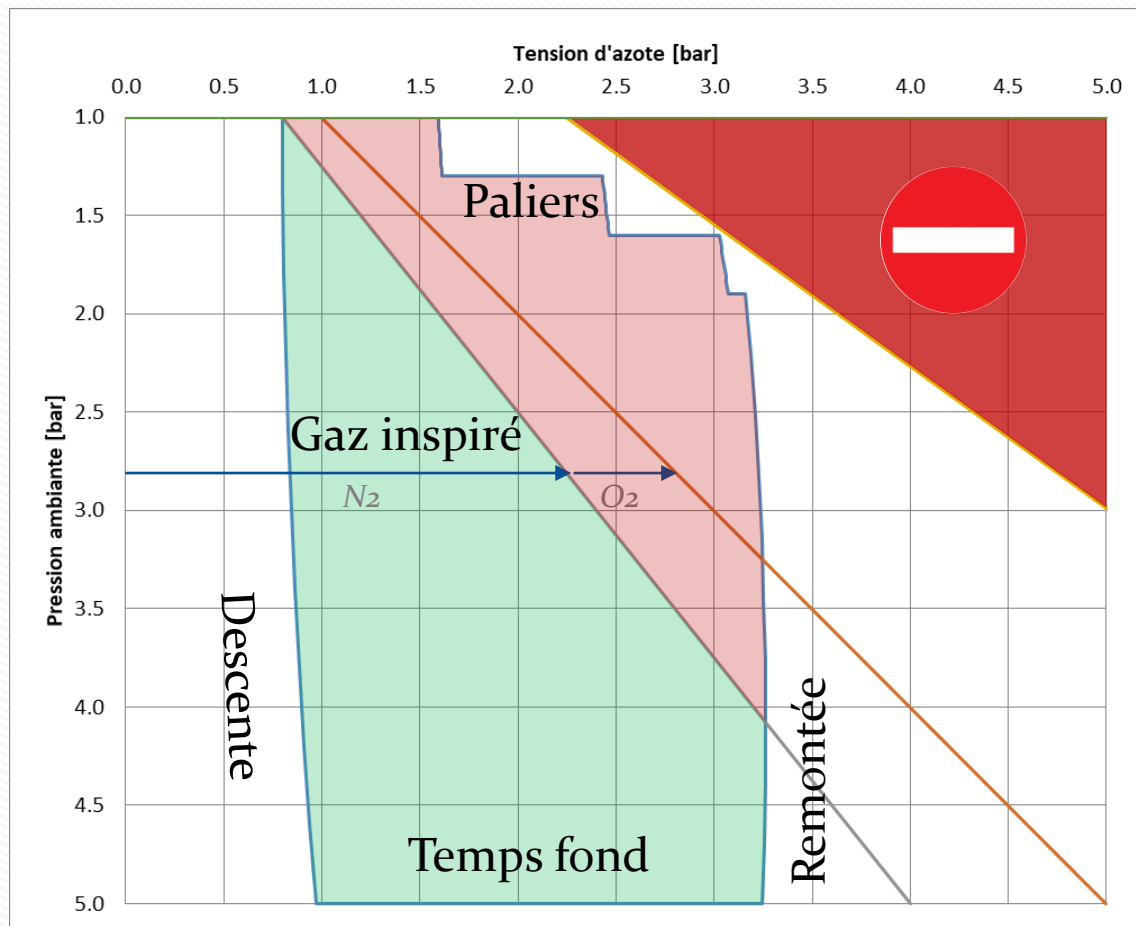


La déco O_2

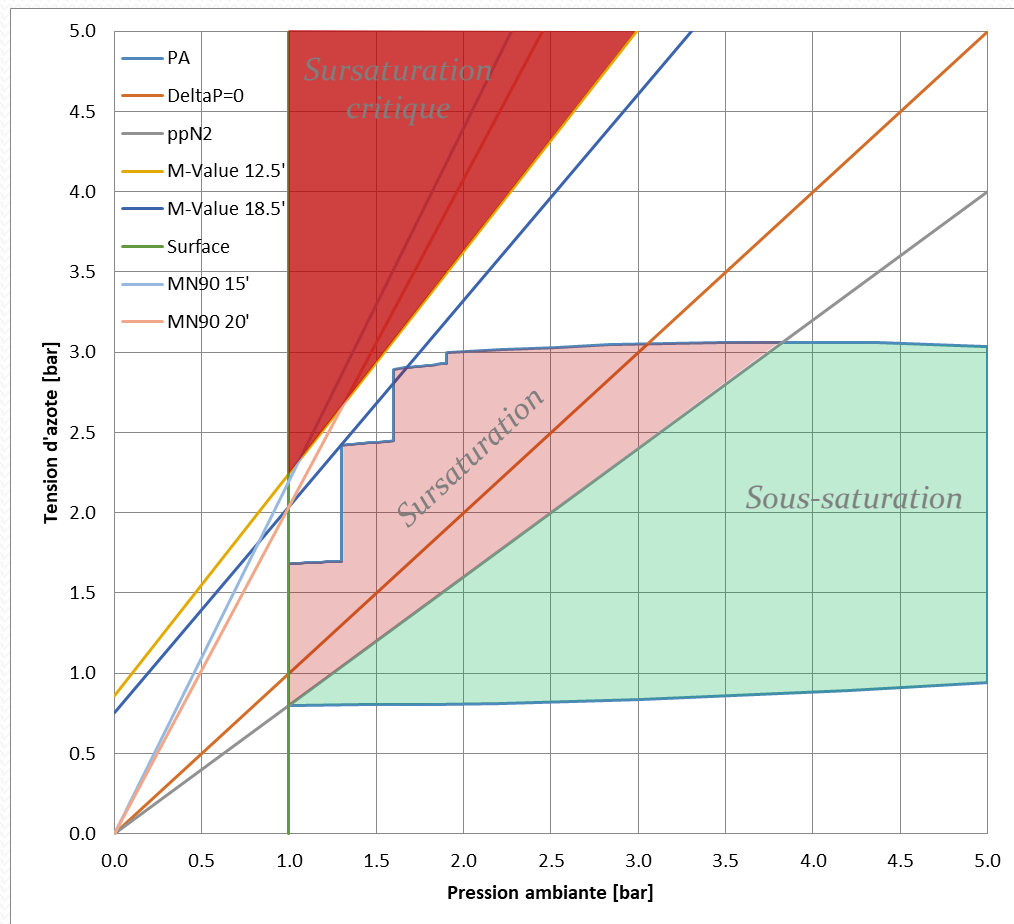


Voyons ça autrement

Analyse de l'évolution de la tension d'azote au cours d'une plongée



Les M-Values

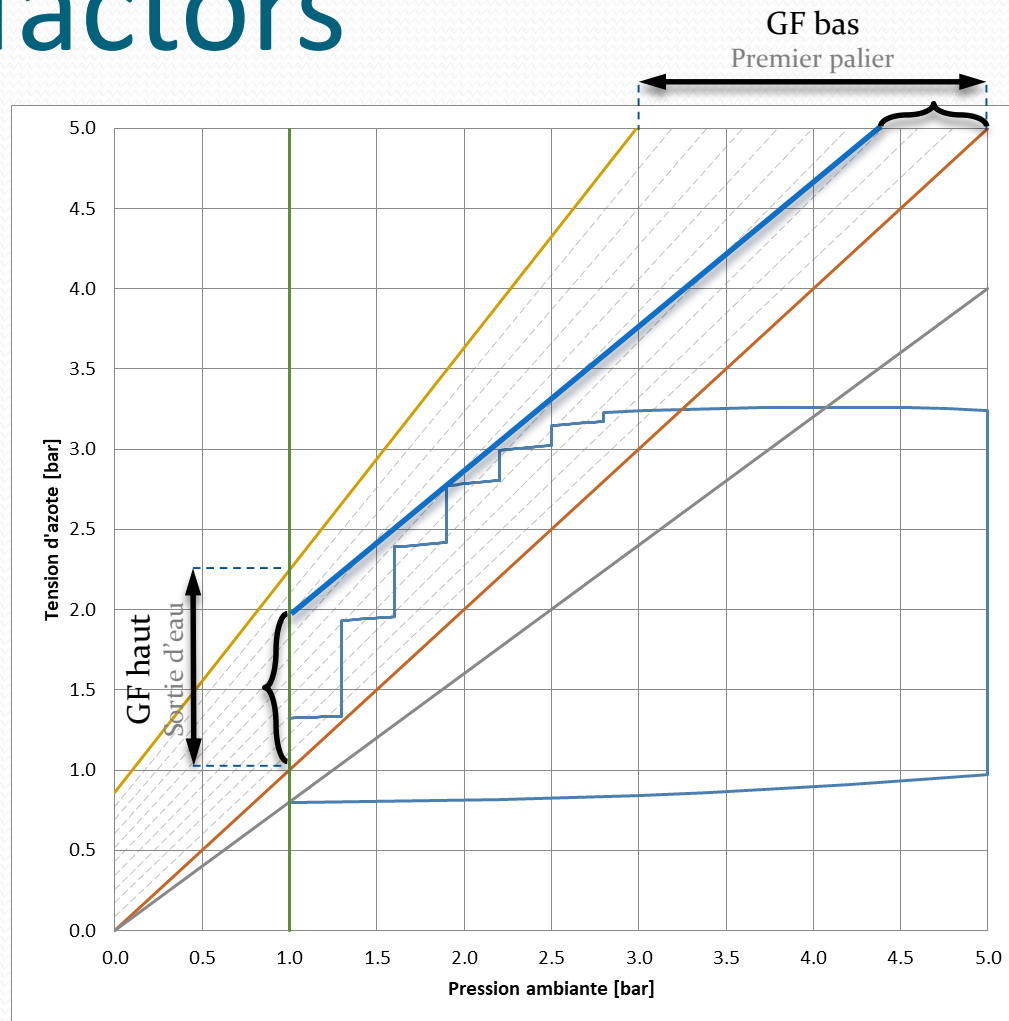


Les gradient factors

Optimisation de la déco
suivant les besoins

Conservatisme	GF Bas	GF Haut
1	90	95
2	75	95
3	90	90
4	75	90
5	75	85

GF recommandés au Nitrox par AP Diving



Les ordinateurs

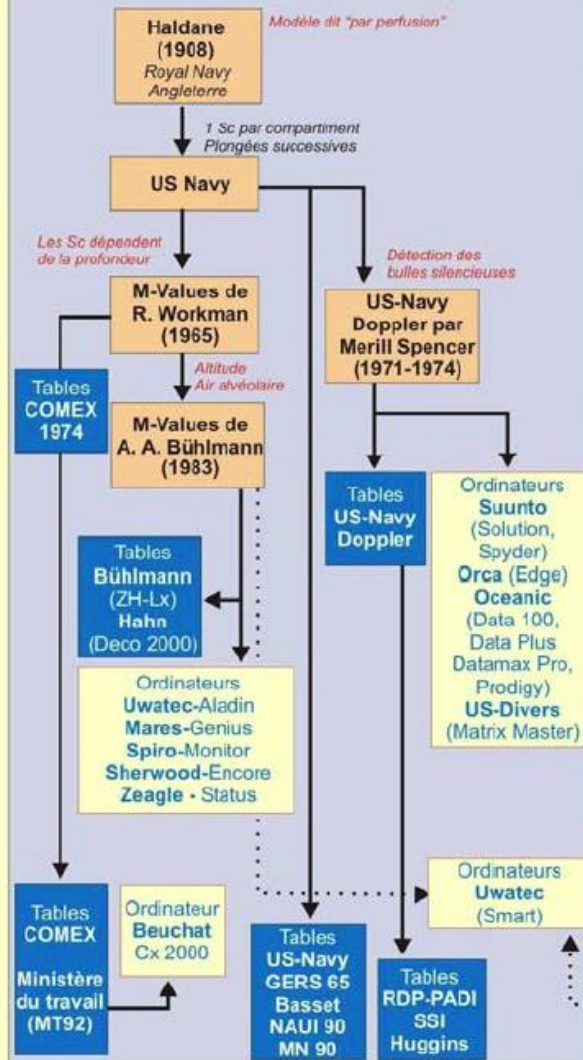
Une boîte noire ?

Comparatifs

Comment les gérer

LES MODELES DE DECOMPRESSION

MODELES HALDANIENS ET DERIVES



AUTRES MODELES

Hempleman (dès les années 1950)
et Hennessy (années 1970)
Disparition de la notion de compartiment

Modèle par diffusion (Slab model)

Tableaux BS-AC 88 (Grande Bretagne)

Kidd, Stubb, puis Nishi au sein du DCIEM.

Compartiments en série

Tableaux DCIEM (Canada)

VPM (Yount, Hoffman)
RGBM (B.R. Wienko, années 1990)
Prise en compte de l'azote gazeux.

Noyaux gazeux (gaz nuclei) micro-bulles

Ordinateurs Suunto (Stinger, Cobra, Mosquito, Vytec, Vyper)

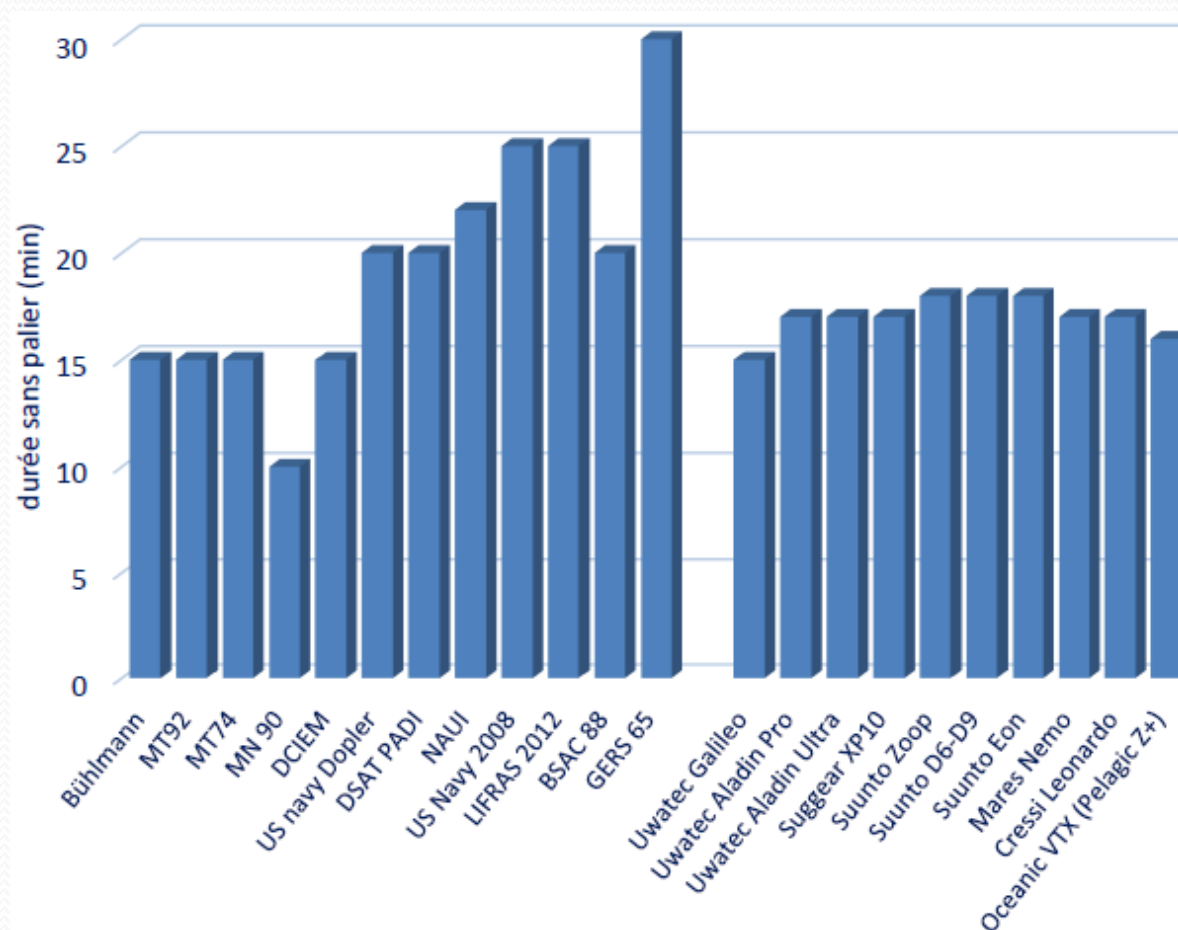
Logiciels Abyss

Modèle Bühlmann modifié ZH-L8 ADT MB

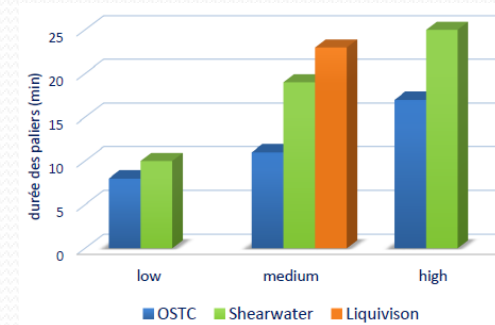
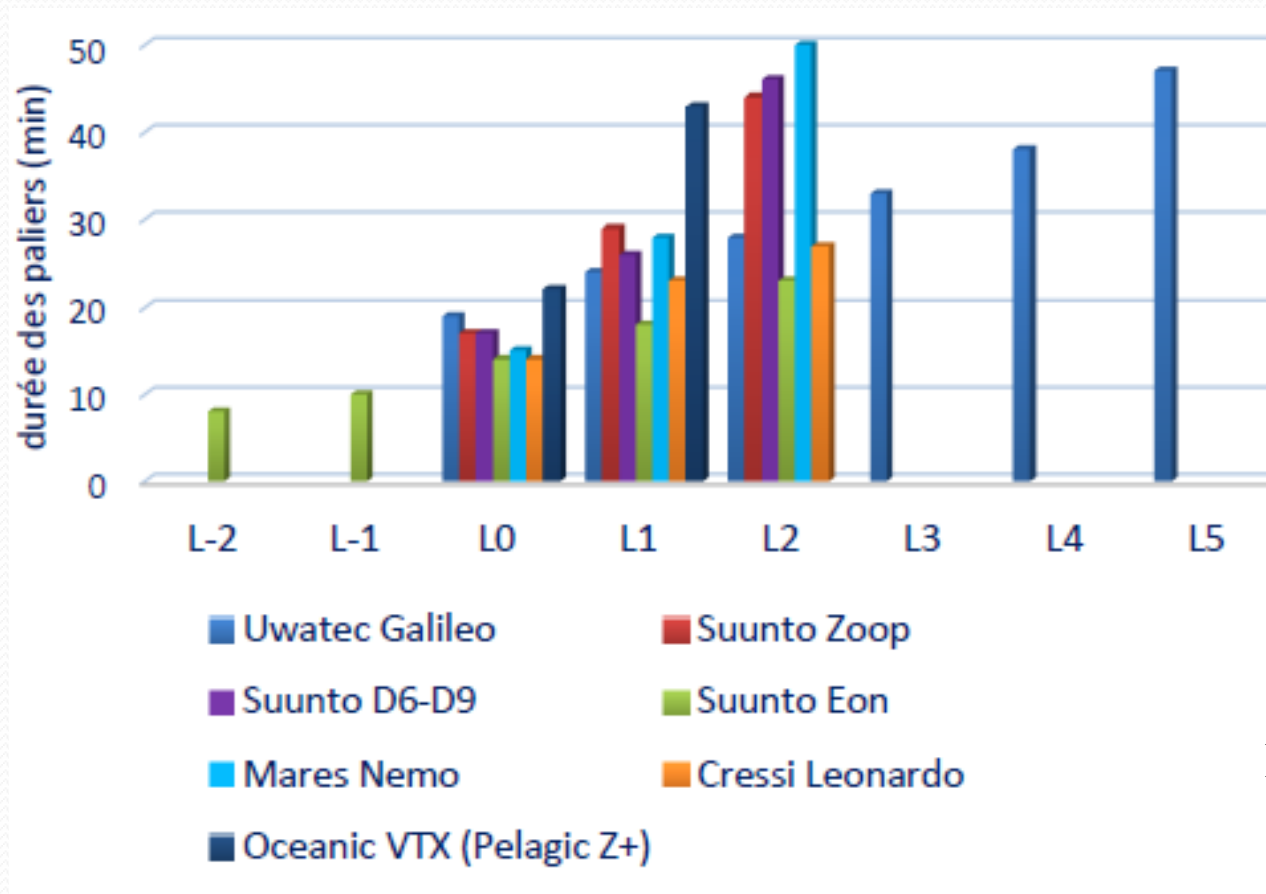
© Alain Foret, Illustra-Pack II

	Algorithme	Conserv.	Palier profond	Palier de sécurité	Vit. remonté e m/min	Modes	# gaz	% O2	Blocage viol déco
CRESSI									
Léonardo	RGBM 9C/2,5-480	SF0-SF2	1'-2' SI DECO	3'-6 et 3m	10	air/nitrox/prof.	1	21à 50%	48h
Giotto	RGBM 9C/2,5-480	SF0-SF2	1'-2' SI DECO	3'-6 et 3m	10	air/nitrox/prof.	2	1G50% 1G100%	48h
Newton	RGBM 9C/2,5-480	SF0-SF2	1'-2' SI DECO	3'-6 et 3m	10	air/nitrox/prof.	2	1G50% 1G100%	48h
MARES									
Puck Pro	RGBM 10C/2,5-480	1à 3	oui	3'-6 et 2,5m	10	air/nitrox/prof.	2	21à 100%	24h
Wide	RGBM 10C/2,5-480	1à 3	oui	3'-6 et 2,5m	10	air/nitrox/prof.	3	1G50% 2G100%	24h
Icon	RGBM 10C/2,5-480	1à 3	oui	3'-6 et 2,5m	10	air/nitrox/prof.	3	1G50% 2G100%	24h
Smart	RGBM 10C/2,5-480	1à 3	oui	3'-6 et 2,5m	10	plon/prof/apnée	2	21à 100%	24h
Matrix	RGBM 10C/2,5-480	1à 3	oui	3'-6 et 2,5m	10	air/nitrox/prof.	3	1G50% 2G100%	24h
SUUNTO									
Zoop	RGBM 9C/2,5-480	P0 à P2	non	3' à 3m	10	air/nitrox	1	21à 50%	48h
Vyper	RGBM 9C/2,5-480	P0 à P2	oui	3' à 3m	10	air/nitrox/prof.	1	21à 50%	48h
Vyper Air	RGBM 9C/2,5-480	P0 à P2	oui	3' à 3m	10	air/nitrox/prof.	2	21à 100%	48h
Eon Steel	RGBM 15C/1-720	P-2 à P2	oui	3' à 3m	10	tout + recycleur	8	21à 100%	48h
Cobra	RGBM 9C/2,5-480	P0 à P2	oui	3' à 3m	10	air/nitrox/prof.	2	21à 100%	48h
D4i	RGBM 9C/2,5-480	P0 à P2	oui	3' à 3m	10	plon/prof/apnée	1	21à 50%	48h
D6i	RGBM 9C/2,5-480	P0 à P2	oui	3' à 3m	10	plon/prof/apnée	3	21à 100%	48h
D9tx	RGBM 9C/2,5-480	P0 à P2	oui	3' à 3m	10	air/ean/tri/prof.	8	21à 100%	48h
DX	RGBM 15C/1-720	P-2 à P2	oui	3' à 3m	10	tout + recycleur	8	21à 100%	48h
SCUBAPRO									
XP10	Bühlmann ZH-L8 ADT	non	non	volontaire	entre 20 et 7	air/nitrox/prof.	1	21à 50%	24h
XP3G	Bühlmann ZH-L8 ADT MB PMG	5-L0 à L5	oui	1' à 5'	entre 20 et 7	air/nitrox/prof.	3	21à 100%	24h
Square	Bühlmann ZH-L8 ADT MB PMG	5-L0 à L5	oui	1' à 5'	entre 20 et 7	plon/prof/apnée	2	21à 100%	24h
Luna	Bühlmann ZH-L8 ADT MB PMG	5-L0 à L5	oui	1' à 5'	entre 20 et 7	plon/prof/apnée	3	21à 100%	24h
Sol	Bühlmann ZH-L8 ADT MB PMG	5-L0 à L5	oui	1' à 5'	entre 20 et 7	plon/prof/apnée	3	21à 100%	24h
Chromis	Bühlmann ZH-L8 ADT MB	5-L0 à L5	oui	1' à 5'	entre 20 et 7	plon/prof/apn/nat	1	21à 100%	24h
Nantis	Bühlmann ZH-L8 ADT MB	5-L0 à L5	oui	1' à 5'	entre 20 et 7	tout + recycleur	3	21à 100%	24h
Meridian	Bühlmann ZH-L8 ADT MB	5-L0 à L5	oui	1' à 5'	entre 20 et 7	plon/prof/apnée	2	21à 100%	24h
OCEANIC									
Veo 1.0	dual pelagic	non	oui	3' à 3m	18 à 9	air/nitrox	1	21à 50%	24h
Veo 2.0	dual pelagic	2 niveaux	oui	3' ou 5' de 3 à 6	18 à 9	plon/prof/apnée	1	21à 50%	24h
Veo 3.0	dual pelagic	2 niveaux	oui	3' ou 5' de 3 à 6	18 à 9	plon/prof/apnée	2	21à 100%	24h
Géo 2	dual pelagic	2 niveaux	oui	3' ou 5' de 3 à 6	18 à 9	plon/prof/apnée	2	21à 100%	24h
OC1 (montre)	dual pelagic	2 niveaux	oui	3' ou 5' de 3 à 6	18 à 9	plon/prof/apnée	4	21à 100%	24h
Atom 3	dual pelagic	2 niveaux	oui	3' ou 5' de 3 à 6	18 à 9	plon/prof/apnée	3	21à 100%	24h
Data Mask	dual pelagic	2 niveaux	oui	3' ou 5' de 3 à 6	18 à 9	plon/prof/apnée	1	21à 50%	24h
VTX	dual pelagic	2 niveaux	oui	3' ou 5' de 3 à 6	18 à 9	plon/prof/apnée	4	21à 100%	24h
VT 4.1	dual pelagic	2 niveaux	oui	3' ou 5' de 3 à 6	18 à 9	plon/prof/apnée	4	21à 100%	24h
PRO+3	dual pelagic	2 niveaux	oui	3' ou 5' de 3 à 6	18 à 9	air/nitrox/prof.	3	21à 100%	24h
BEUCHAT									
Voyager 2G	pelagic	oui	oui	3' à 4,5m	18 à 9	plon/prof/apnée	2	21à 100%	24h
HW - OSTC									
OSTC 3	Bühlmann ZH-L16 - 5/640	oui	x	oui	libre	recycleurs/apnée	5	21à 100%	signalée
OSTC Sport	Bühlmann ZH-L16 - 5/640	oui	x	oui	libre	circuit ouvert	3	1G50% 2G100%	signalée
LIVISION									
KAON	Bühlmann ZH-L16 - 5/640	3 niveaux	x	oui	au choix	loisir/tek/prof	3	1G50% 2G100%	signalée
LYNX	Bühlmann ZH-L16 - 5/640	3 niveaux	x	oui	au choix	loisir/tek/prof	3	1G50% 2G100%	signalée
XEO	Bühlmann ZH-L16 - 5/640	réglable	x	oui	au choix	trimix/ccr	10	21à 100%	signalée
SHERWATER									
PETREL 2	Bühlmann ZH-L16 - 2,5/720	oui	oui	oui	10	recycleur	5	21à 100%	x

Courbe de sécu @ 30m

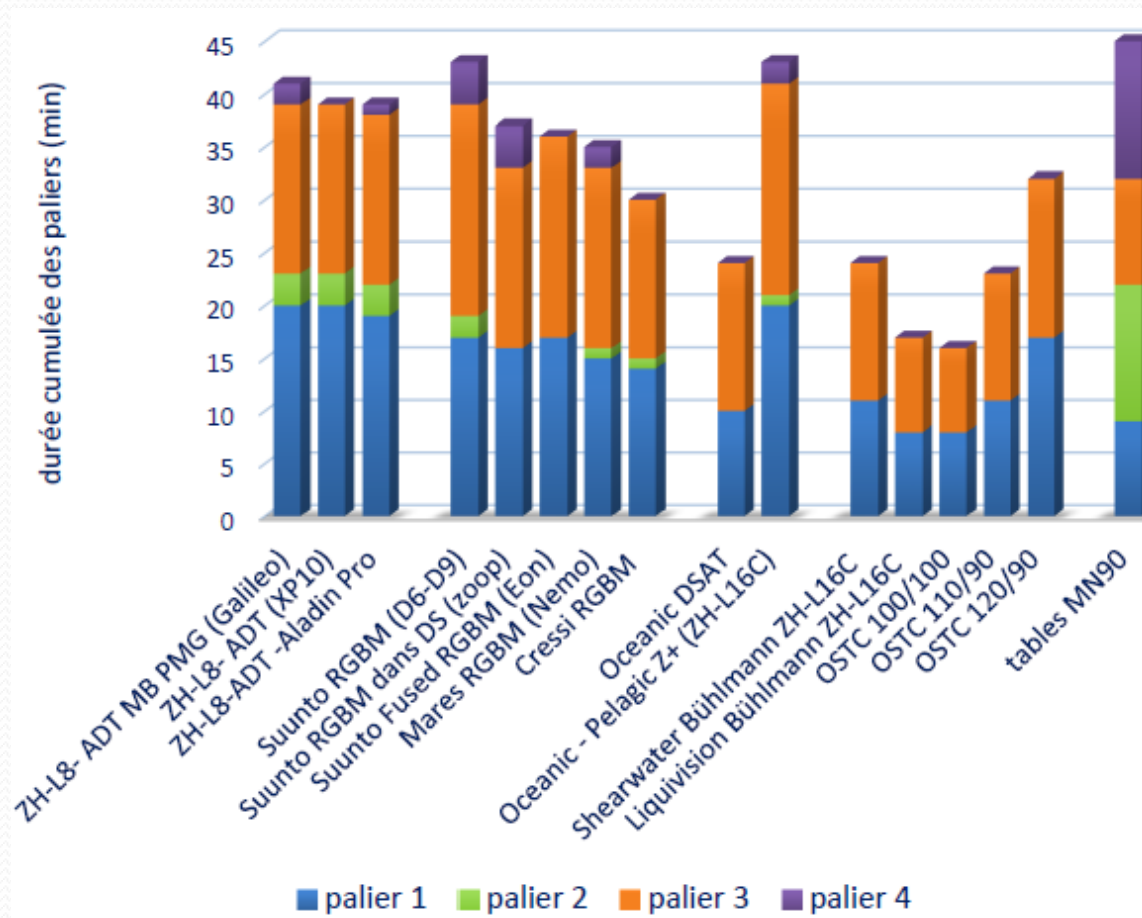


Conservatisme



Plongée de 30' @ 30m

Analyse sur 4 plongées



Comment gérer ?



Remontée rapide

5' à m...ndeur



Pas de mix de moyen
de désaturation



Panne d'ordinateur

Appareil de réserve

Redondance de la déco

Compter sur la palanquée

Planification



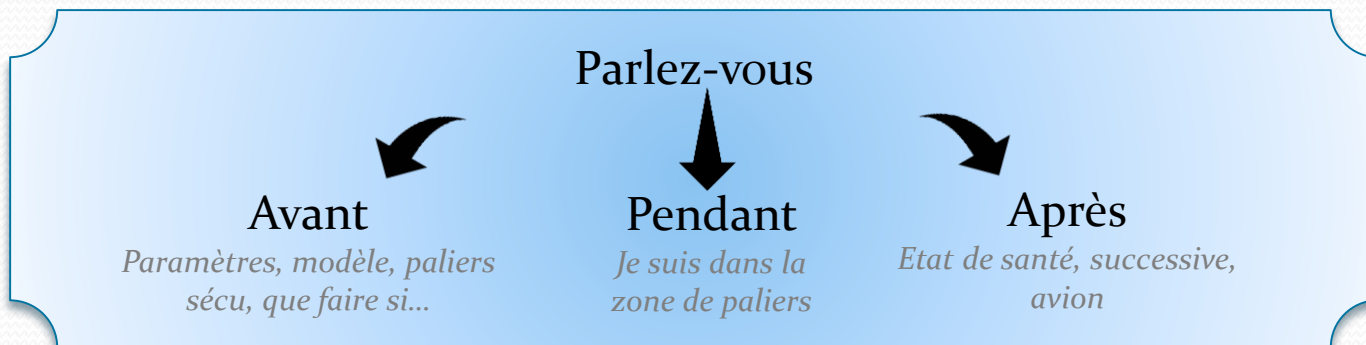
Communication

Connaissance du matériel

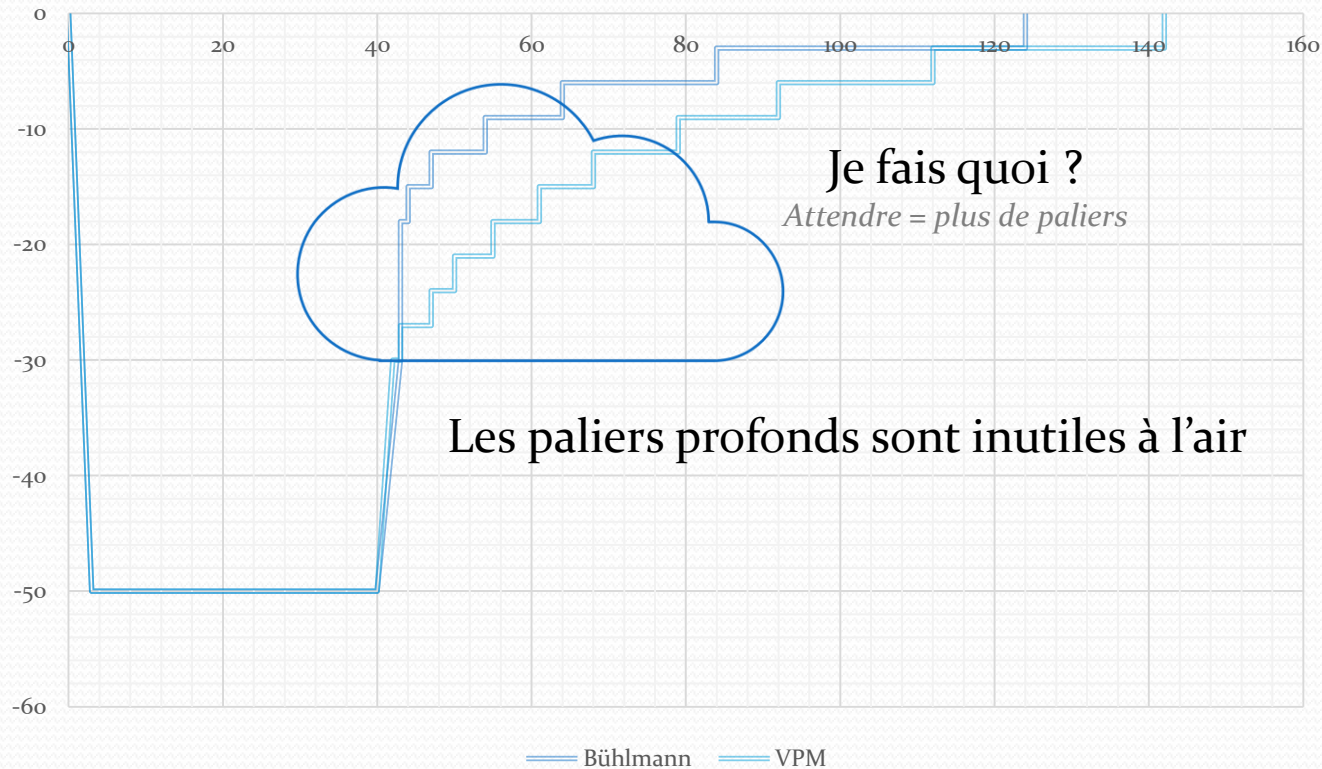
Quelques points



Y'en a-t-il vraiment besoin ?

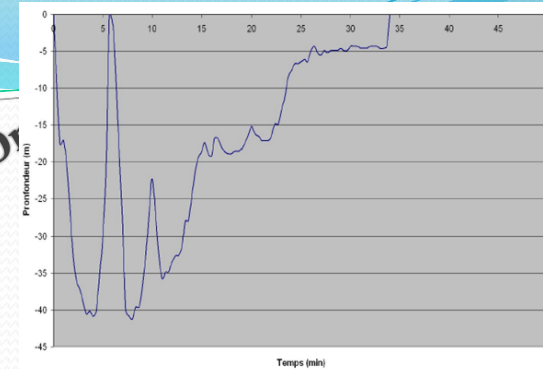


Quelques points



Données : Mv-Plan (Bühlmann) + V-Planner (VPM)

Comparaison sous l'eau



Temps [min]	Profondeur [m]	Ordi #1	Ordi #2	Ordi #3
8	42	1' @ 3m		5' @ 3m
10	22	3' @ 3m		1' @ 6m (DTR=9')
13	30	1' @ 6m (DTR=9')		5' @ 6m (DTR=9')
21	18	5' @ 3m (DTR=7')		2' @ 6m (DTR=7')
24	6	6' @ 3m (DTR=7')		1' @ 6m (DTR=7')
26	5	4' @ 3m	7' @ 3m	8' @ 3m
Fin de plongée	-	30'	32'	34'

Conclusion générale

Considérations générale



VOUS

**Vous êtes votre baromètre pour savoir
si votre déco vous va**

Comprenez votre modèles et ses limitations, écoutez vous



Adaptabilité

Le modèle répond à VOS besoins

Plongée plus dure ou complexe, âge qui évolue

Changez de modèle, adaptez le conservatisme

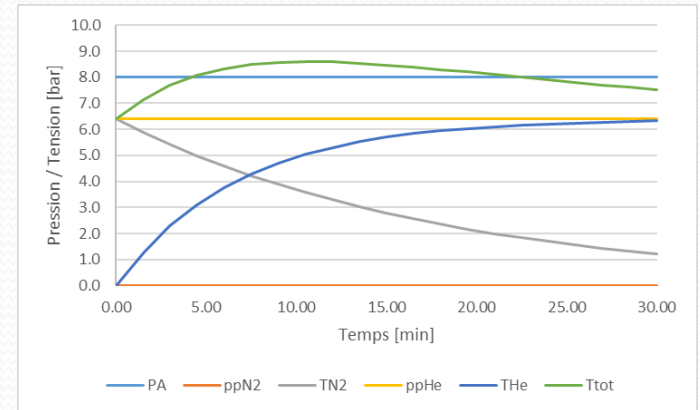
Merci



Petit Phoenix

Contre-diffusion isobare

- Les 2 mots sont importants
- Cas 1 :
 - He diffuse plus vite que N₂
 -  passage entre mélanges $\neq$
(relais vers gaz fond ou fond vers déco)
- Cas 2 (plongée longue) :
 - Gaz dans l'étanche ou oreille moyenne
 - Respiration d'un gaz lourd





Contre-diffusion isobare

- Préconisations:

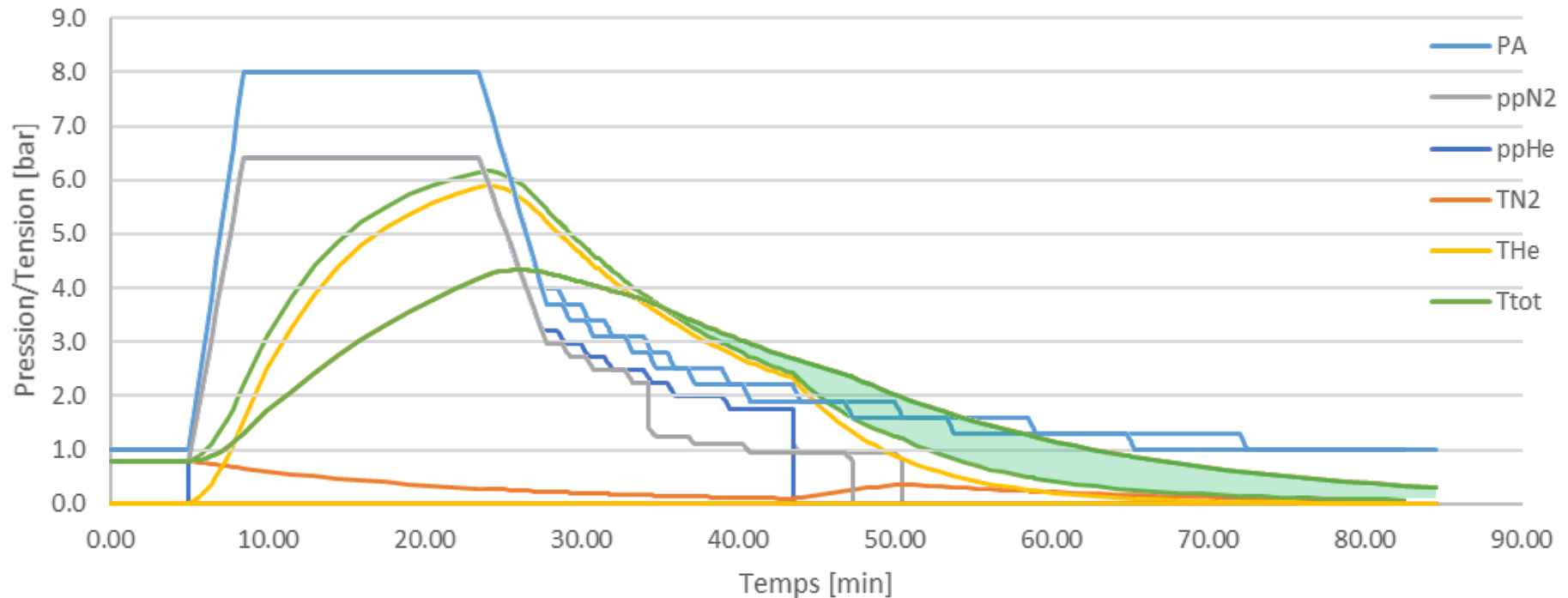
- Passer d'un gaz léger vers un gaz lourd
- Gaz lourd dans l'étanche
- V-Planner : $\Delta p_{N_2} < 0.5\text{bar}$
- Autre limite en plongée tek : 0.8bar

- Oui mais l'hélium rallonge la déco !

- Pas de CDI avec l'O₂ ! ➔ Passer sur O₂ au plus vite.

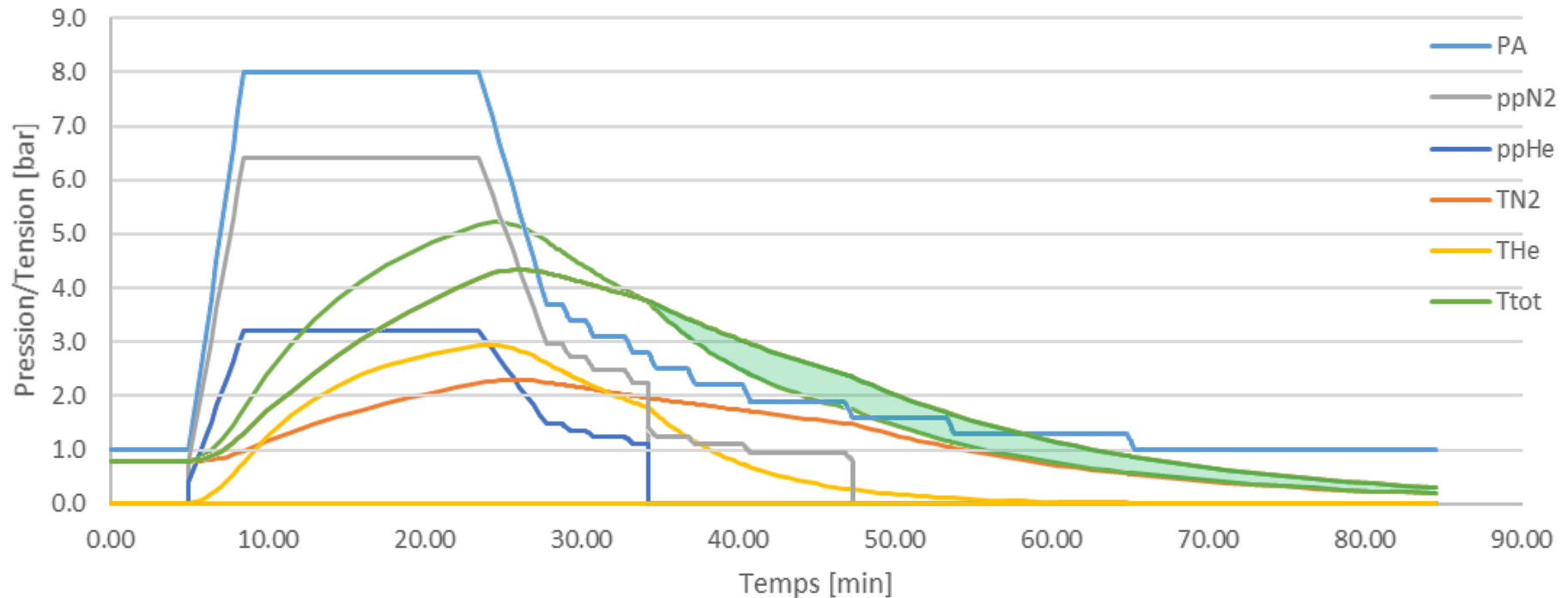


Contre-diffusion isobare

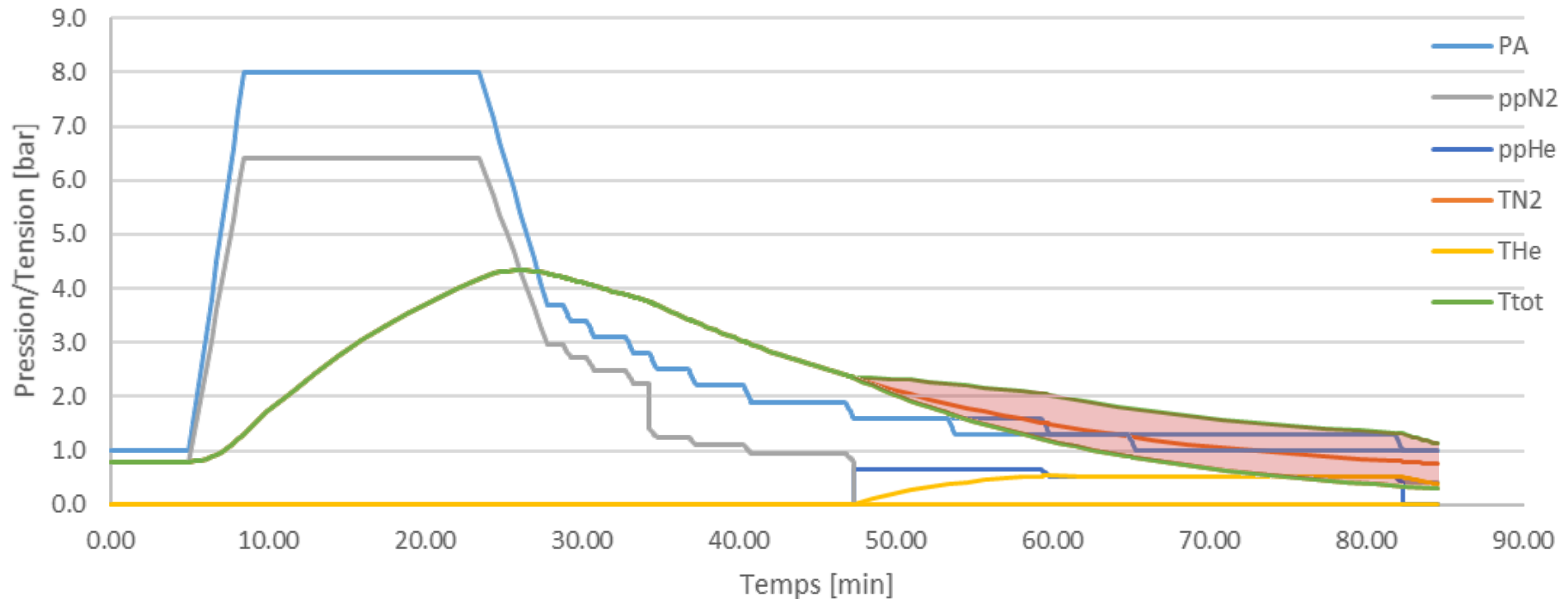


15' @ 70m
20/80 fond vs. air

Contre-diffusion isobare



Contre-diffusion isobare



15' @ 70m
air fond puis 20/40 vs. air

Contre-diffusion isobare

Conséquences des changements de gaz sur l'apparition des bulles

Changement de gaz		Rapport de Tension maximum	Apparition de bulles
1 ^{er} gaz	2 nd gaz		
Hélium	Azote	0,861	Non
Hydrogène	Azote	0,890	Non
Argon	Azote	1,015	Non
Néon	Hydrogène	0,939	Non
Néon	Hélium	0,978	Non
Azote	Hydrogène	1,076	Très peu
Hydrogène	Hélium	1,080	Très peu
Azote	Hélium	1,139	Oui
Azote	Néon	1,160	Oui
Argon	Hélium	1,123	Oui

RGBM

