

Principes d'élaboration des procédures de plongée et exemples

Pr Jean-Eric BLATTEAU
Service de Médecine Hyperbare et d'Expertise Plongée
HIA Sainte-Anne Toulon



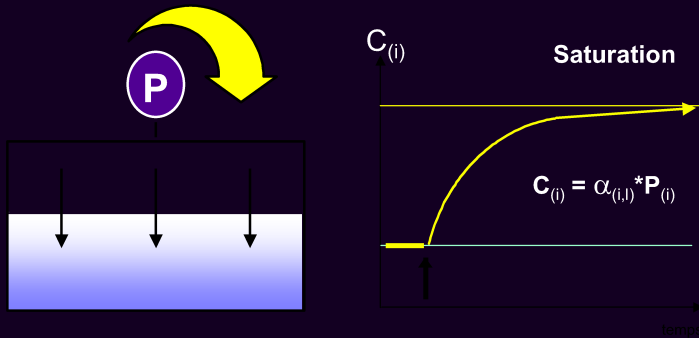
Paul Bert

La Pression Barométrique 1878

Désaturation en azote
et **formation de bulles**
à l'origine de l'accident de
décompression (ADD)

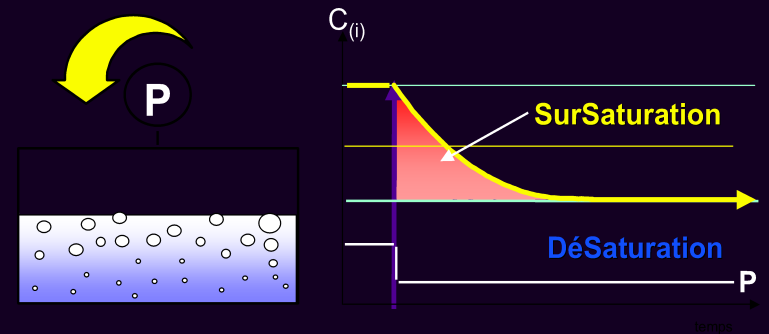
Saturation en azote

Saturation à la compression



Loi de Henry

Sursaturation à la décompression



Comment prévenir l'accident de décompression ?

Le Roy de Méricourt (1869)

« Considérations sur l'hygiène des pêcheurs d'éponges »

Annales d'hygiène publique et de médecine légale



Scaph. Rouquayrol-Denayrouze

Scaph. Siebe-Gorman



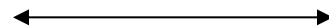
24 plongeurs :
- 7 paraplégiques
- 10 morts

« Méthode » de Le Roy de Méricourt et de la société Rouquayrol-Denayrouze

Durée max de la plongée : 2 heures

Profondeur max 30m

Remontée lente 1min/m

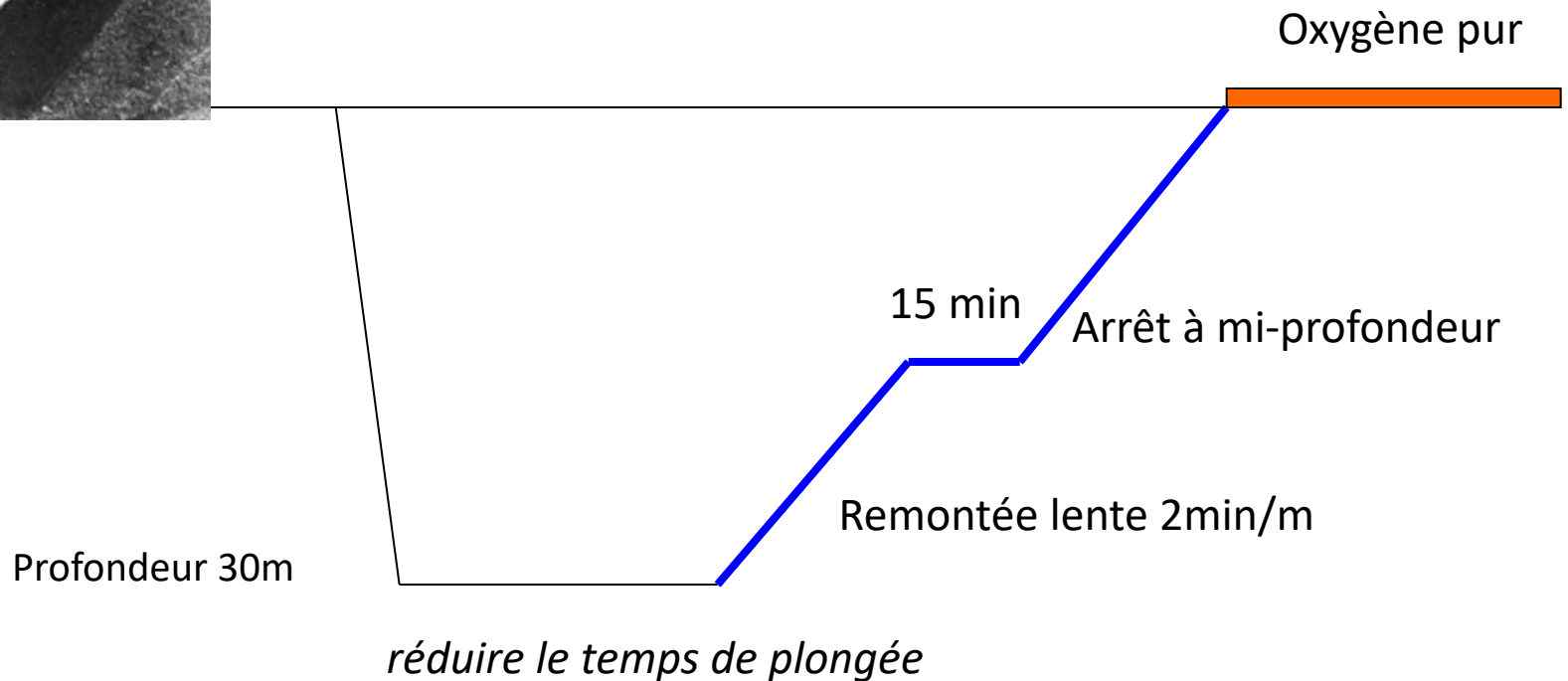


si profondeur supérieure :
*réduire le temps de plongée
progressivement par tranche de 5 m*



Paul Bert

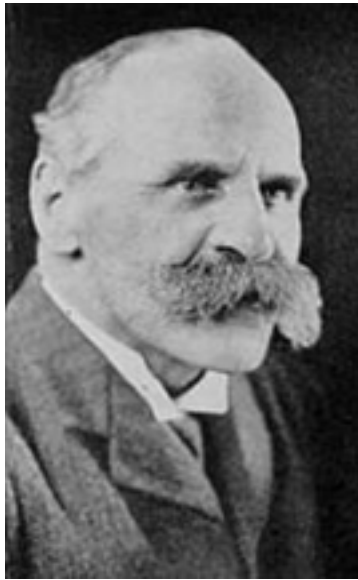
La Pression Barométrique 1878



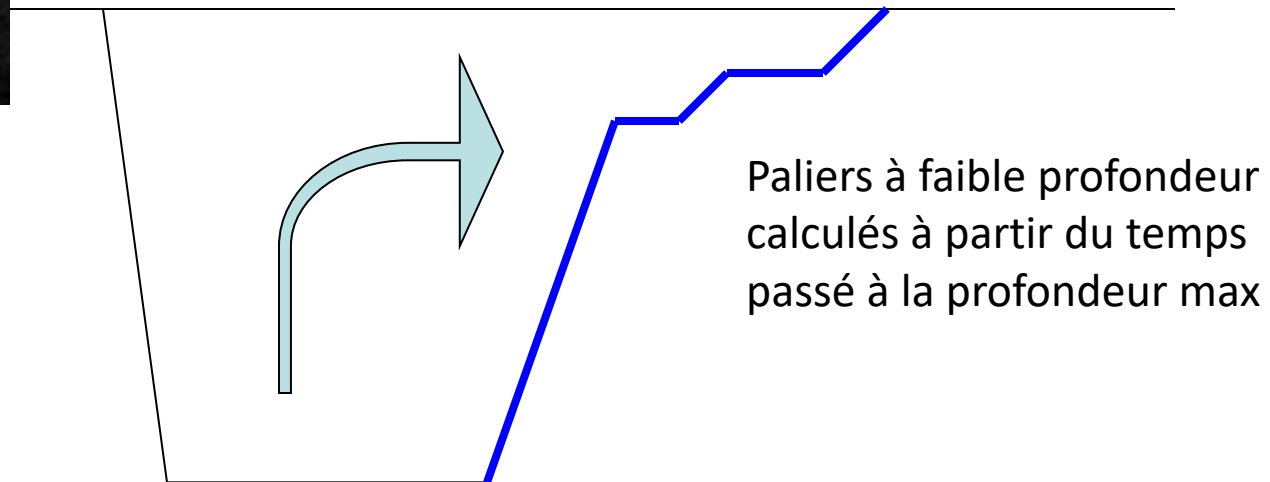
Notion de palier profond

Prise oxygène normobare à visée préventive (si profondeur élevée)

Recompression en cas de symptômes



« La révolution Haldanienne » 1908



AE Boycott, GCC Damant et JS Haldane.
The prevention of compressed-air illness.
The Journal of Hygiene, vol 8, 1908

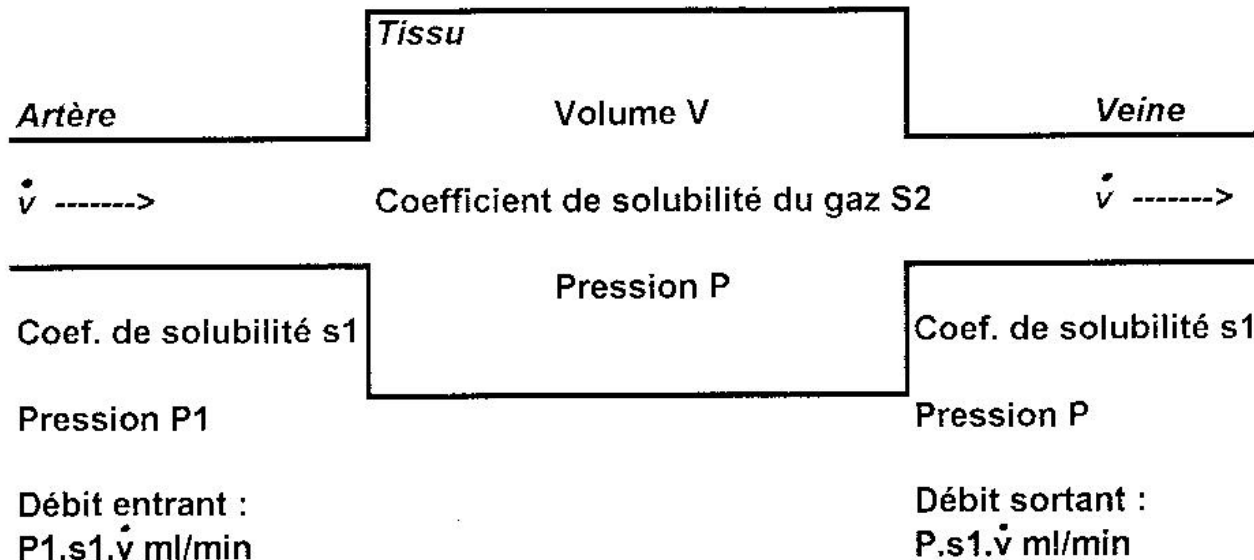
Démarche d'Haldane

- définition d'un **modèle d'échanges des gaz** dissous dans l'organisme, représenté par un ou des tissus :
- définition de **critères de remontée**
pour passer d'une P tissulaire donnée (P_t) à une pression hydrostatique (P_h) avec $P_h < P_t$ sans risque d'ADD.

Modèle d'échanges des gaz

- Tous les tissus de l'organisme sont équilibrés avec la pression ambiante,
- à la sortie des poumons, le sang artériel est équilibré avec la pression des gaz alvéolaires,
- le sang artériel distribue ainsi les gaz dissous (et notamment l'azote) à tous les tissus de l'organisme,
- dans les tissus, la pression des gaz dissous est uniforme,
- à la sortie du tissu, le sang veineux est équilibré avec la pression des gaz dissous dans le tissu.

A l'instant $t=0$,
la pression de
gaz dissous
dans le sang
artériel
change pour
une valeur P_1



S_1/S_2 est constant

• $\dot{v}/V$ représente le débit sanguin par
unité de volume soit le taux de perfusion

$s_1/s_2.\dot{v}/V = \text{constante} = K$

**Pour Haldane, la variation de
pression de gaz dissous dans
un tissu ne dépend que de son
taux de perfusion, qui reste
constant**

Quantité accumulée :

$$(P_1 - P).s_1.\dot{v} \text{ ml/min}$$

ou :

$$DP.s_2.V. Dt$$

donc :

$$DP/Dt = (P_1 - P).s_1/s_2.\dot{v}/V$$

et :

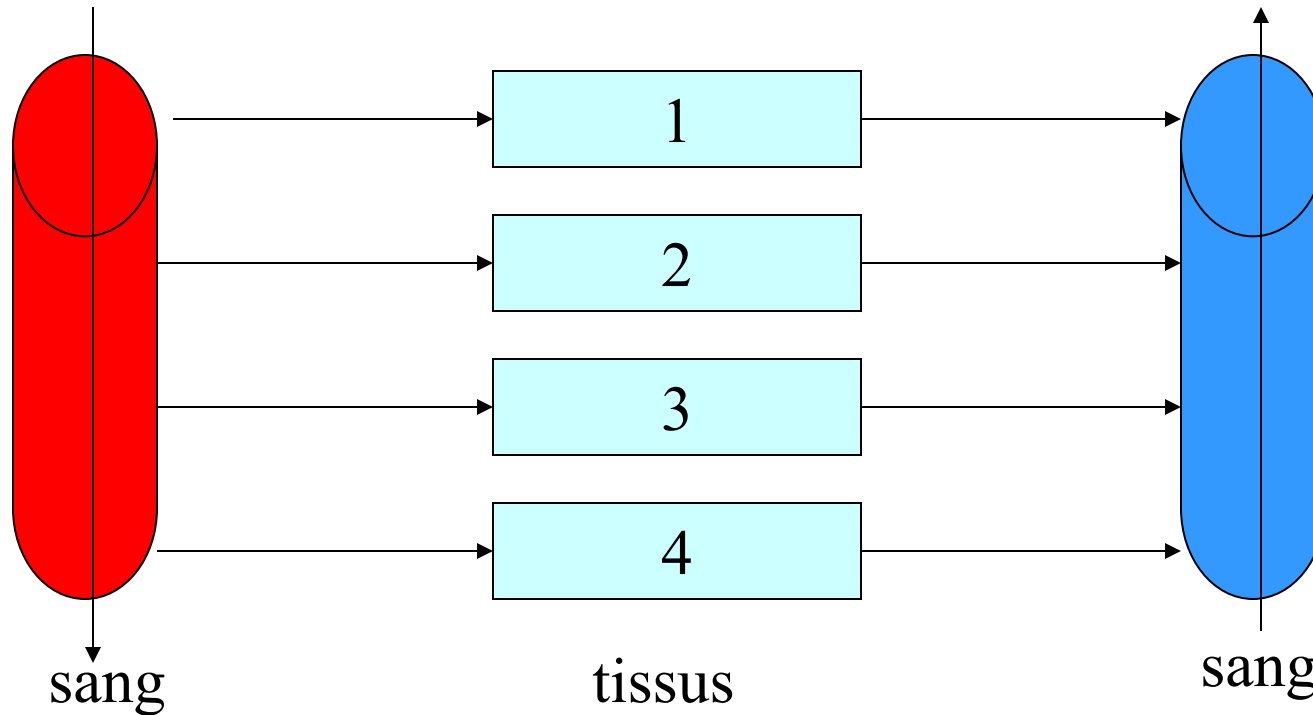
$$P = P_1.(1 - \exp(-Kt))$$

LE MODELE D'ECHANGES TISSULAIRES DE HALDANE

Modèle de perfusion limitante

Le tissu est défini par sa période T qui dépend directement du « taux de perfusion » avec une constante d'échanges gazeux K

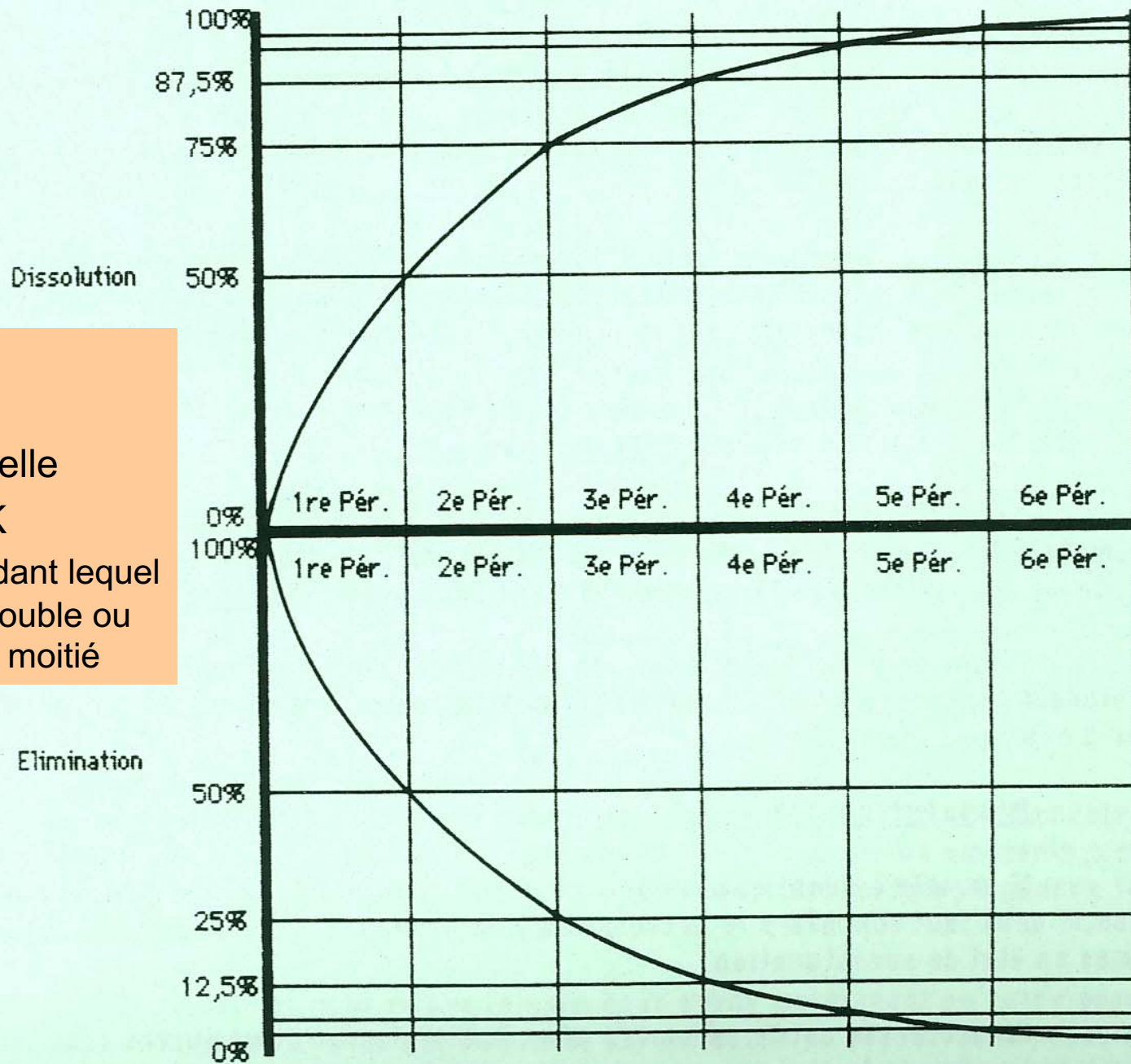
Haldane considère 5 tissus de périodes 5, 10, 20, 40 et 75 min



Période T
relation
exponentielle

$$T = \log 2 / K$$

temps pendant lequel
sa valeur double ou
diminue de moitié



Critères de remontée

- Haldane recherche la relation entre une pression P1 à laquelle séjourne un animal pendant un temps prolongé et la pression P2 où il peut être décomprimé sans faire d'ADD.
- Chèvres sous pression
 - à 2 ATA / 2h puis retour à 1 ATA:
peu ou pas de symptômes
 - 6 ATA à 3 ATA : RAS
 - 8 ATA à 4 ATA : RAS
- **Le facteur pathogène serait un rapport de pression
si $P1/P2 \leq 2/1$ on évite l'ADD**



Conclusions d'Haldane

- Pour décompresser, on peut donc diviser rapidement la pression absolue par 2,
- ensuite la vitesse de décompression doit être de plus en plus faible afin que la pression d'azote ne soit jamais, dans aucune partie du corps supérieure, au double de celle de l'air,
- Pour cela il sera nécessaire de réaliser des arrêts pendant la remontée : **notion de paliers de décompression.**

Calcul de la décompression

- **Notion de sursaturation critique**

pendant la décompression, les gaz dissous dans les tissus sont en état de sursaturation, pour éviter l'accident, il est nécessaire de ne pas dépasser un seuil critique de diminution de pression

$$P_t \leq P_h \cdot C_s$$

avec $C_s \leq 2$

P_h pression ambiante

P_t tension de gaz dissous

C_s Coefficient sursaturation

- **Calcul de la tension d'azote (N2) à l'instant t :**

$$P_t = P_0 + (P - P_0) \cdot (1 - e^{-kt})$$

écriture équivalente : $P_t = P_0 + (P - P_0) \cdot (1 - 0.5^{t/T})$

Utilisation de l'équation $P_t = P_0 + (P - P_0).(1 - 0.5^{t/T})$

- **Plongée à l'air à 50 m (6 ATA) / t=60 min (déconseillée !)**

$P_{(N_2)} = 0.8 \times 6 = 4.8$ ATA et $P_0 = 0.8 \times 1 = 0.8$ ATA

choix d'un « tissu directeur » :

par exemple $T = 40$ min; $t/T = 60/40 = 1.5$

donc $P_t = 0.8 + 4 \times 0.65 = 3.4$ ATA (à 50m/60min)

- **Peut-on remonter en surface directement ? *NON***

calcul de P_t / P_h ; $P_t / P_{\text{surface}} = 3.4 / 0.8 = 4.25$ *danger car $> C_s=2$!!*

- **Donc, il faut faire un palier : à quelle profondeur ?**

Essai de palier à 12 m : calcul de P_t / P_h

$P_t / P_{12m} = 3.4 / 1.76 = 1.93$ donc *OK car $< C_s = 2$*

- **Donc, le palier est possible : mais quelle durée de palier ?**

$P_t = 0.8 \times 2.2 = 1.76$, $P_0 = 3.4$ et $P = 0.8$ (surface)

Donc $t / T = 1.5$ d'où **t = 60 min**

Première table d'Haldane

vitesse de remontée 9m/min

Profondeur		Durée (min.)	Durée des paliers			Durée totale (min.)
(ft)	(m.)		9 m.	6 m.	3 m.	
66	20	15				2
		60		4	13	19
96	29	10		1	3	7
		30		5	11	18
132	40	10		3	7	13
		20	3	7	10	23
168	51	5		2	5	10
		10	3	5	5	18

Tableau I : Extrait de la table de Haldane (1908)

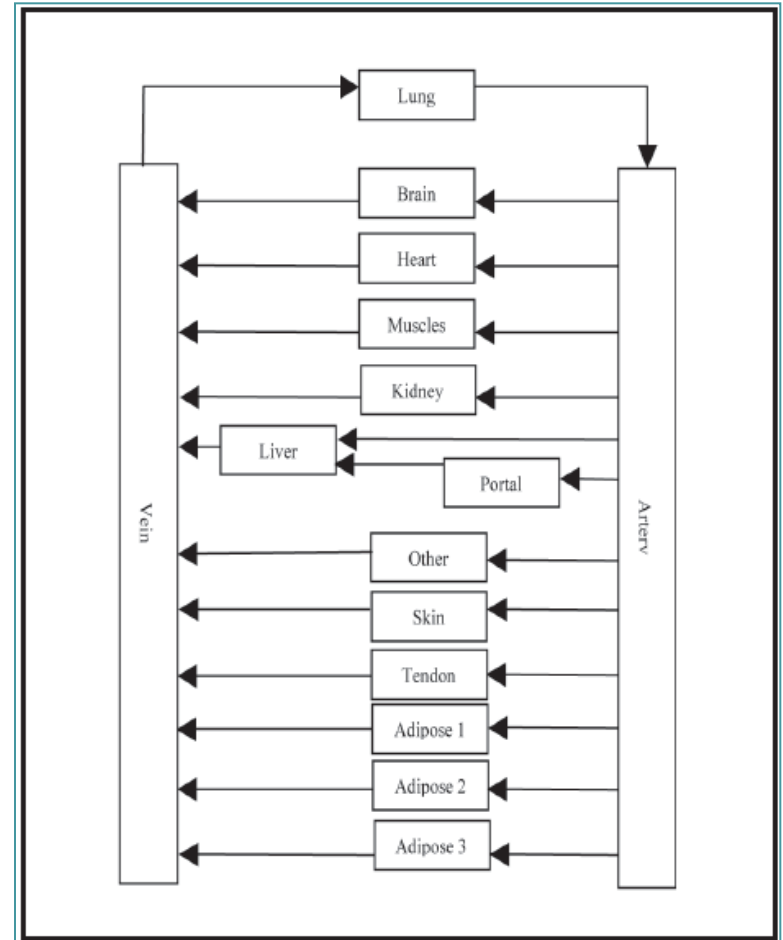
Méthode de calcul haldanienne

- La plus utilisée
- Facile à utiliser
- Facile à modifier
- Avantage historique
(utilisée et modifiée depuis plus d'un siècle)

Variations sur le thème

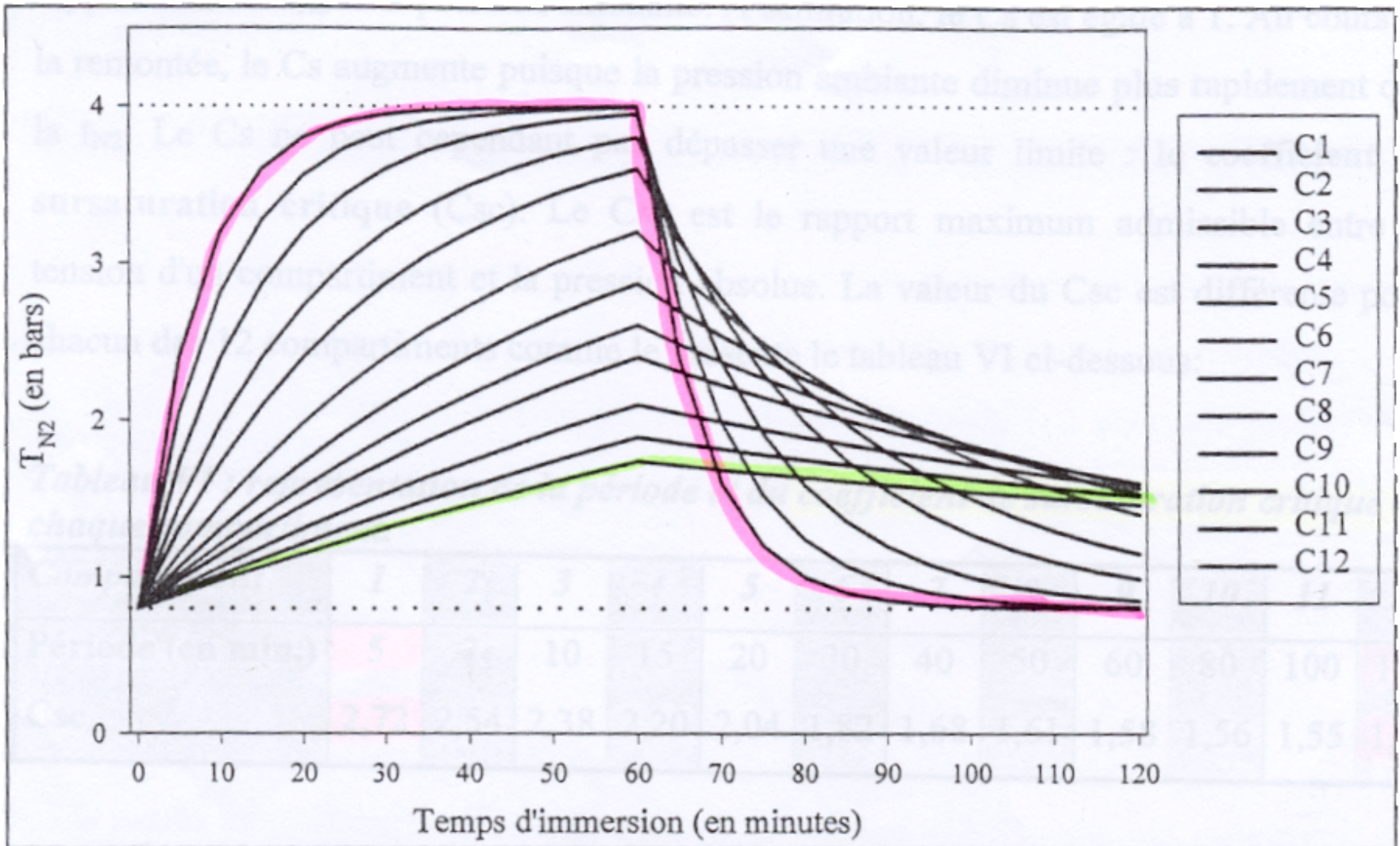
Tissus et périodes

- Approche physiologique :
Plus le tissu est vascularisé, plus le débit sanguin est important et donc la période plus courte. Mesures expérimentales de débits locaux (Jones 1951, GERS 1960)
moelle épinière T proche de 12.5 min
- Approche mathématique :
progression ex 5, 10, 20, 40, 80 min ... (US Navy, Workman 1957)
- Approche mixte (MN90)



tissus lents: captation de l'azote par le tissu grasseux

Courbe de saturation et désaturation
des 12 compartiments de la MN90 (plongée fictive 60 min/40 m)



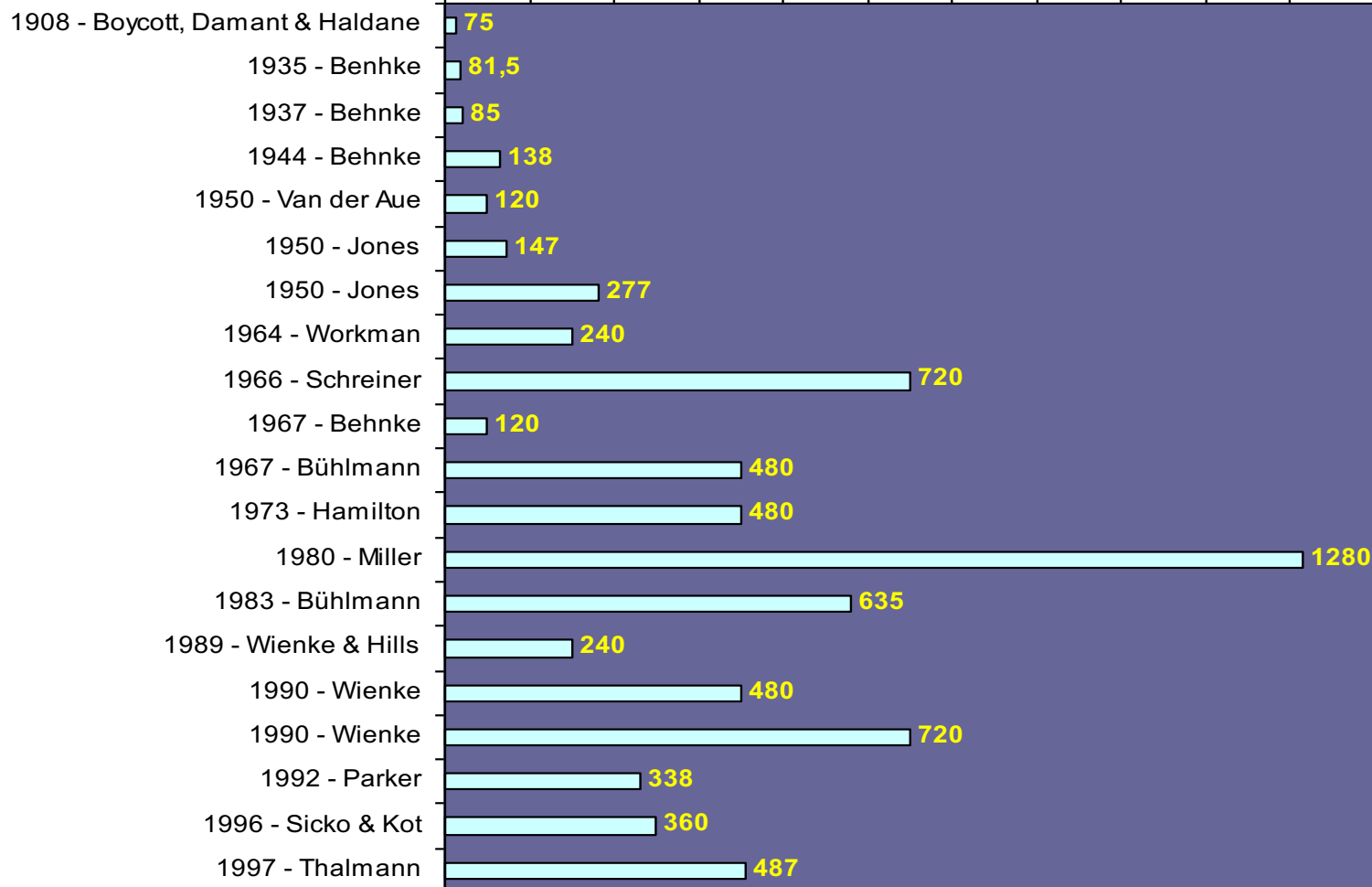
Cas particulier de la plongée à saturation

décompression linéaire lente, basée sur les tissus « lents »

Périodes du tissu le plus long pour la désaturation de l'azote

minutes

60 180 300 420 540 660 780 900 1020 1140 1260 1380



Variations sur le thème

critère de remontée $C_s = P_t/P_h$

- Par la suite C_s différents selon les tissus : C_s d'autant plus faible que période T du tissu est plus longue
- C_s variable selon la nature des gaz respirés
- C_s variable pour un tissu donné selon la tranche de profondeur

		TISSUS												VITESSES	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		10	11	12	de
Périodes		5	7	10	15	20	30	40	50	60	75	80	100	120	remontée (m/min.)
COEFFICIENTS DES TABLES	GERS 1959							2,3			2			2	15 et 5
	GERS 1960							2,3			2			2	20
	GERS 1965														
	Version 1		3,4				2,6			2,1				2	17
	Version 2		3,2				2,3			2				2	17
	N.M. 90	2,72	2,54	2,38	2,20	2,04	1,82	1,68	1,61	1,58		1,56	1,55	1,54	17

Variations sur le thème

critère de remontée de forme $P_t \leq A + B \cdot P_h$

- M-values de Workmann (US Navy 1965)
 - $M = M_0 + \alpha D$
 - D profondeur en pieds d'eau
 - M_0 pression max admissible à profondeur $D = 0$
 - M pression admissible à la profondeur D
 - M et α déterminés pour chaque tissu et chaque type de gaz respiré
- M-values de Bühlmann (1975)
 - Même raisonnement mais M exprimées en pression absolue
 - intérêt pour plongée en altitude
 - 12 à 16 paires de coeff A et B : ZHL12... ZHL16...

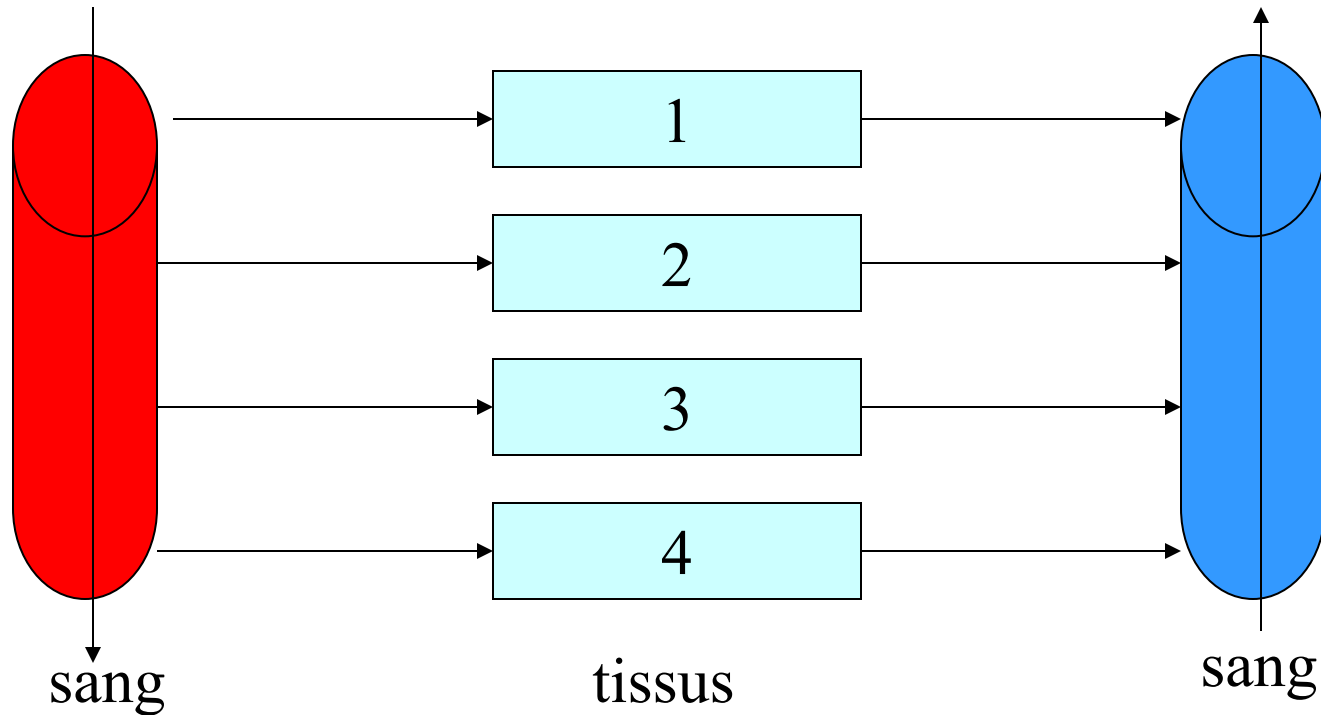
De nos jours, multiplication des modèles de décompression et de l'offre des « ordinateurs » de plongée



- Mais aucun ne garantit une décompression sans accident,
- en effet, la majorité des ADD (>80%) survient sans faute de procédure.

Modèles les plus répandus

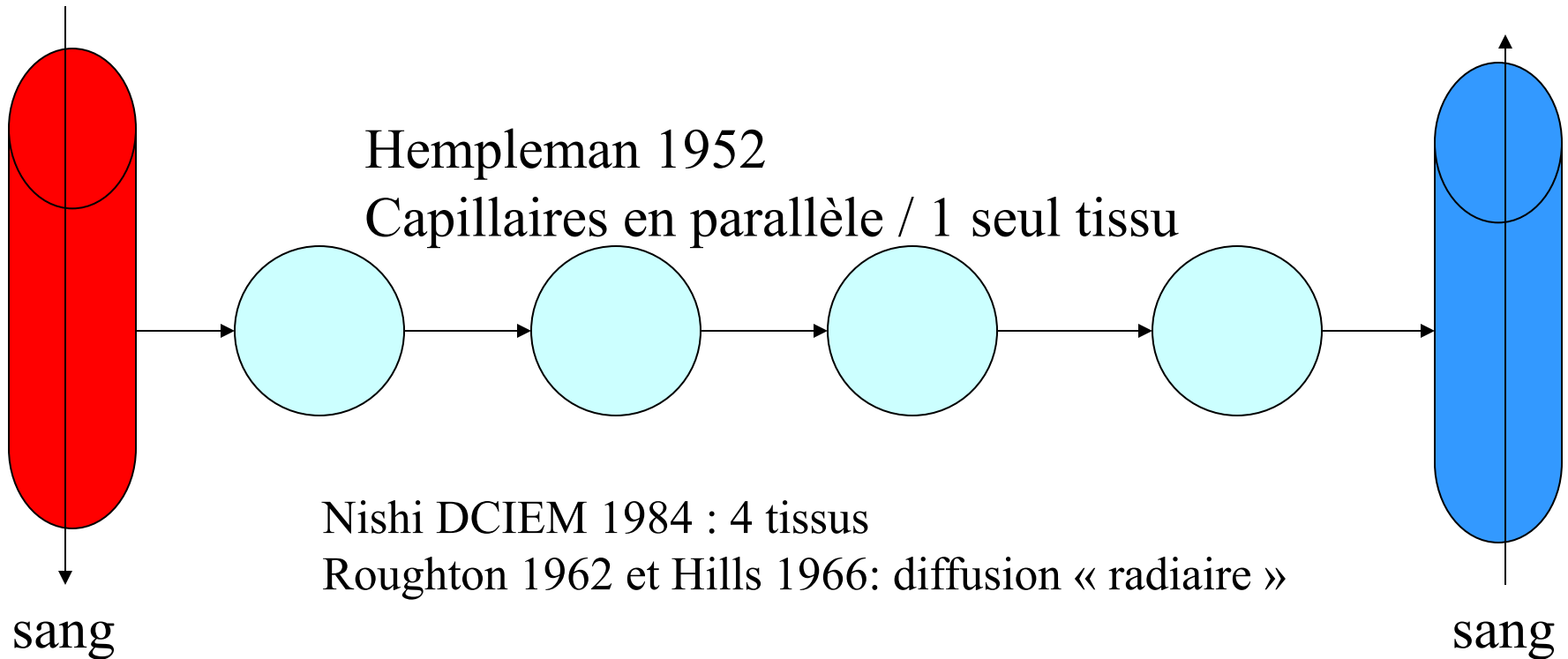
- Les modèles « néo-haldaniens » reposent sur le principe de perfusion
Variations sur le nombre de tissus



Modèles Buhlmann très répandus

Modèles basés sur la diffusion

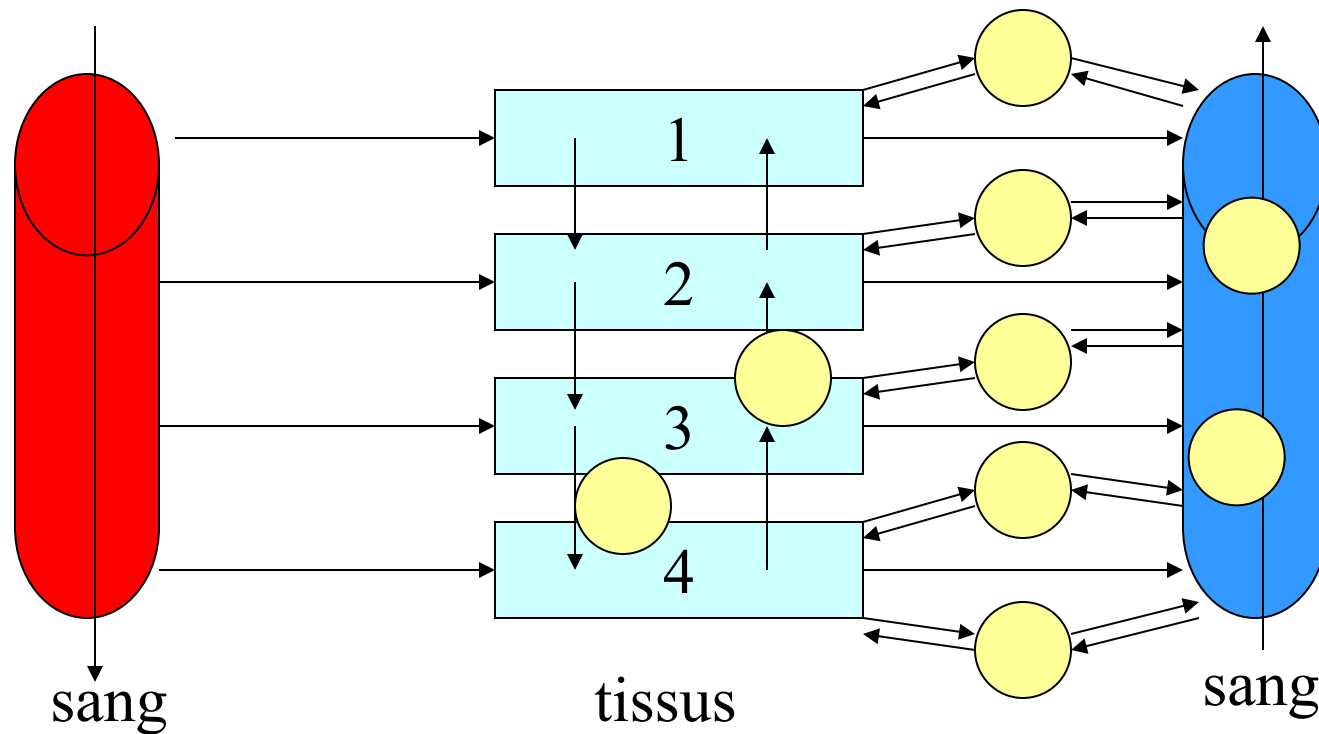
- Certains tissus ne peu ou pas irrigués (cartilage, cornée)
- Notion de coefficient de diffusion, de solubilité dans le tissu, de la surface et l'épaisseur de l'échangeur...
- Intérêt surtout pour la plongée à saturation (longue durée d'exposition)



Modèles « complexes »

diffusion + perfusion + formation des bulles

Multiplication des « modèles à bulles » : Hennessy, Hempleman, Van Liew Yount (VPM), Wienke (RGBM), etc...



Critère de remontée souvent utilisé

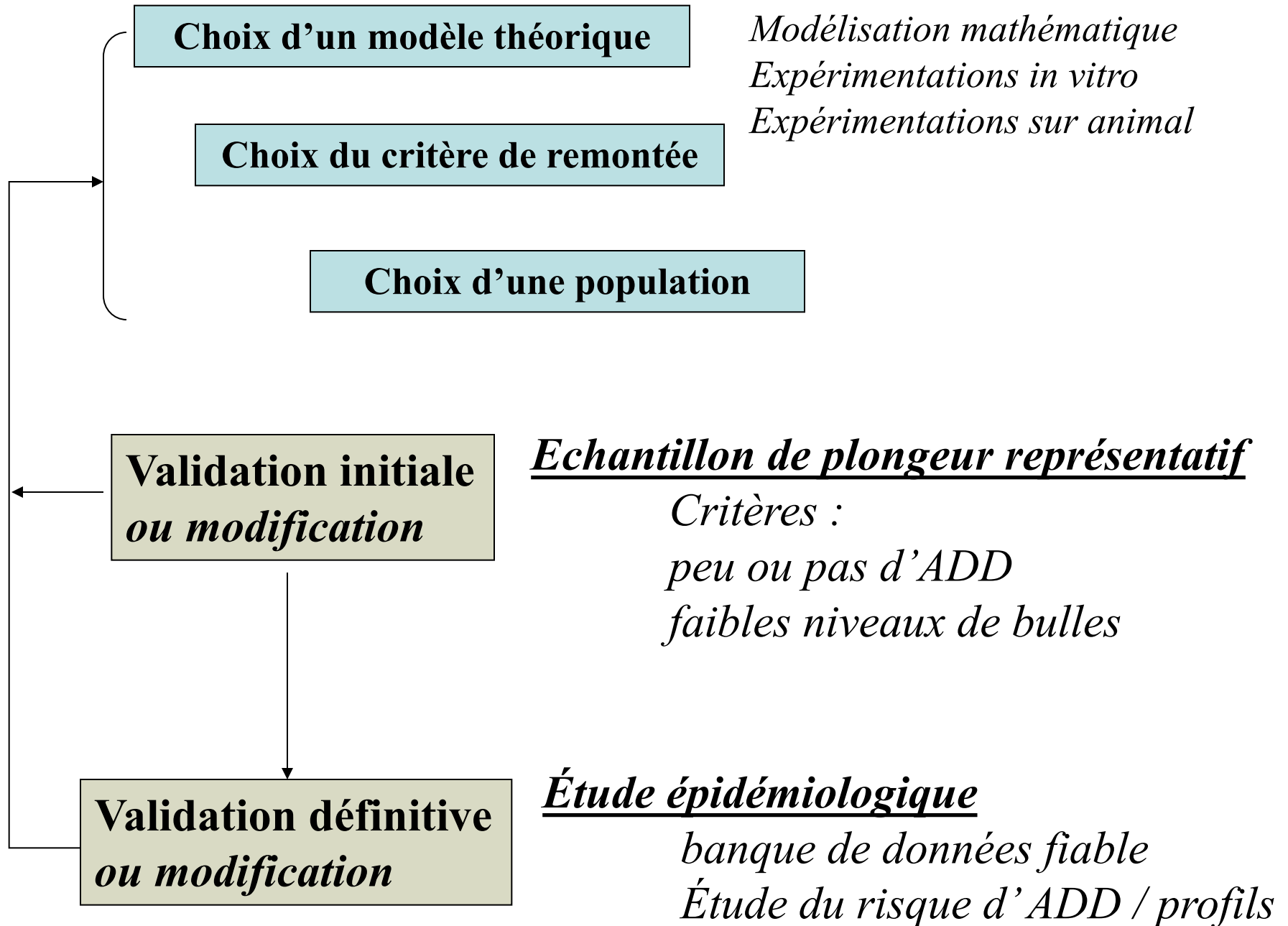
de la forme $P_t \leq A + B \cdot P_h$

- A et B à définir

Utilisé actuellement la plupart des procédures de décompression modernes qui prennent en compte le **phénomène bullaire** lors de la remontée

Hills (modèle thermodynamique), Hempleman et Hennessy (volume critique de bulles), Yount (VPM), Imbert (MT92)....

Elaboration et validation d'une procédure ?



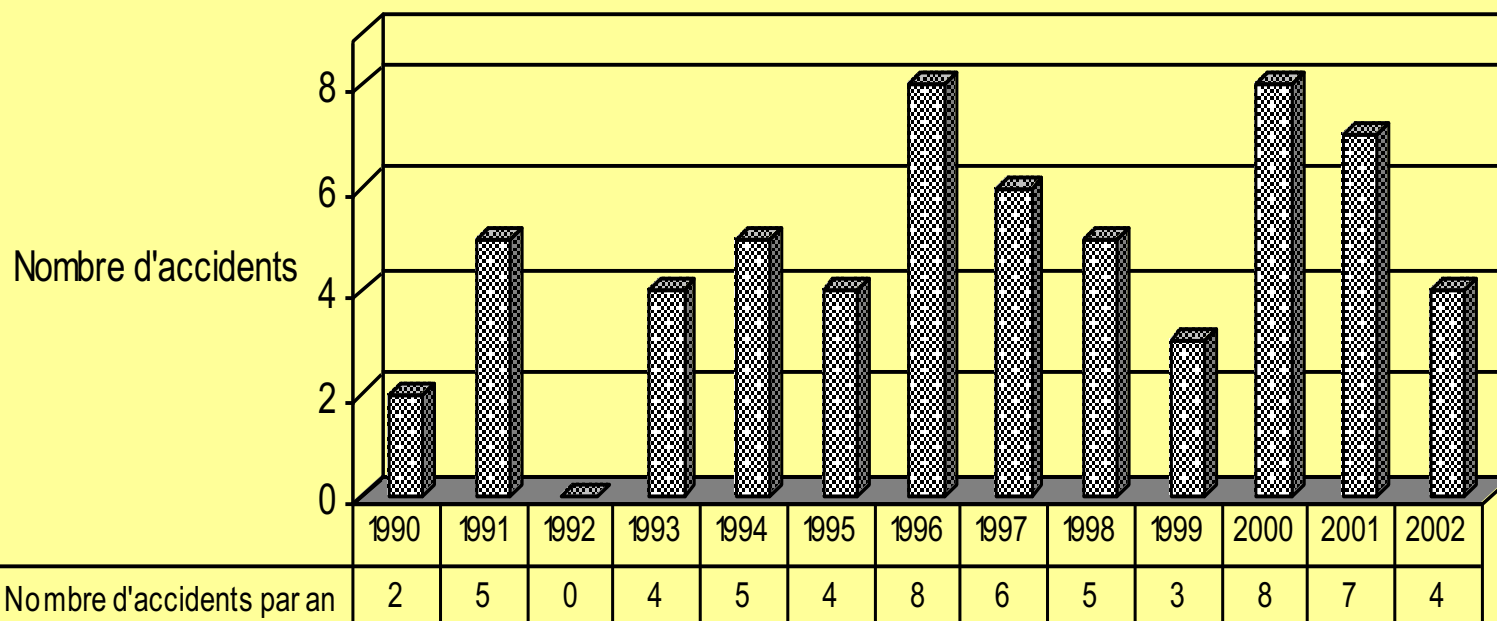
Population étudiée

Plongeurs de la Marine nationale

- Effectif de 1800 plongeurs :
 - 1600 plongeurs de bord :
 - plongées de 0 à 35 mètres
 - 200 plongeurs démineurs :
 - plongées à l'air de 0 à 60 mètres
- Nombre total de plongées par an :
 - 150 000 $\pm$ 10% (estimation)

Analyse épidémiologique

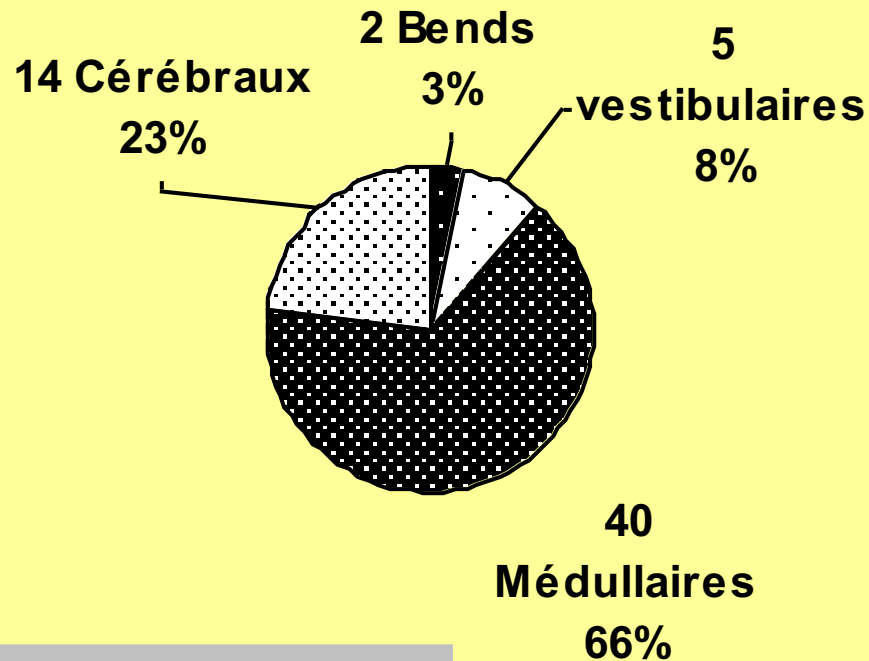
Nombre d'accidents par an



Années

Analyse clinique

Distribution par types d'accidents

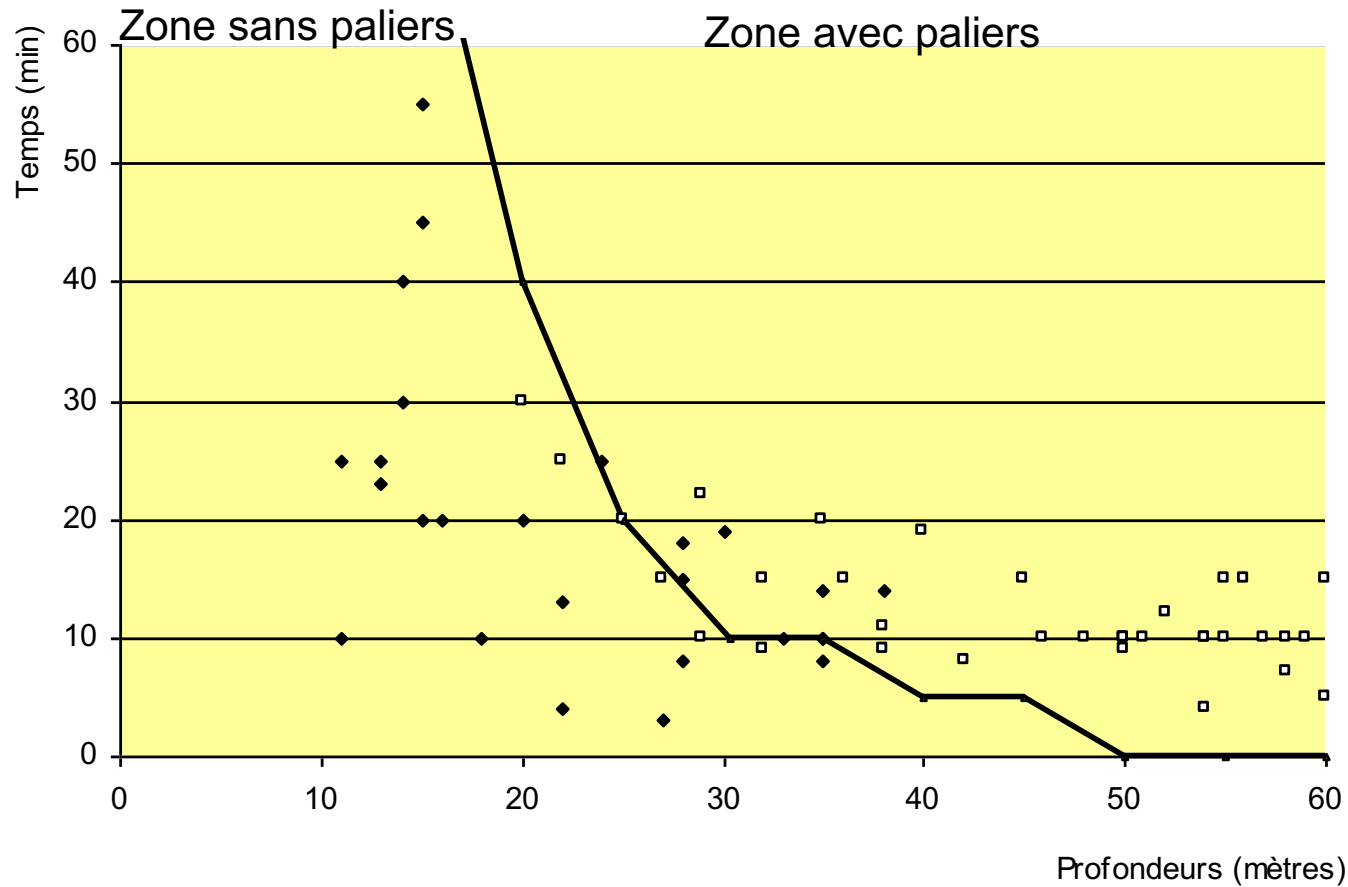


- 97% récupération après recompression
- Tables à 30 mètres le plus souvent
- OHB complémentaires dans 50% des cas

Facteurs favorisants

- Procédure : 100% d'accidents avec respect des tables.
- La température : autant d'accidents en Méditerranée qu'en Atlantique ou Manche. Les accidents outre-mer sont exceptionnels (4 au total).
- L'âge moyen est de 30 ans.
- La notion d'effort pendant la plongée : seulement 13% des cas.
- Les plongées précédentes : dans 60% des cas aucune plongée n'a été réalisée dans les 24 heures précédant l'accident.

Profils de plongée



Evaluation MN90 de 1990-2002 - conclusions

61 accidents de désaturation en 12 ans

Aucun décès, 2 accidents avec séquelles

accidents neurologiques sensitifs les plus fréquents

bonne récupération clinique

Taux d'incidence:

Peu d'ADD jusqu'à 40m

1 accident / 30 000 plongées

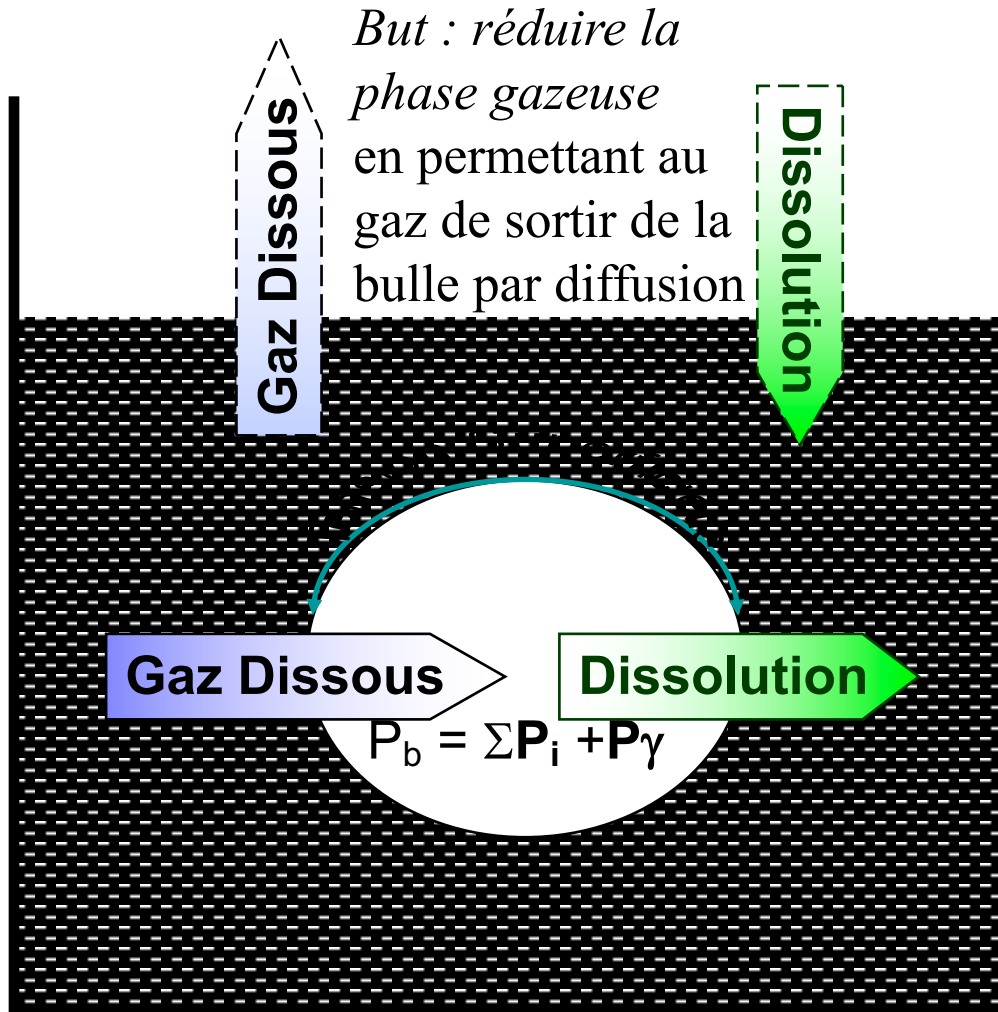
Profondeur > 40 m : **x10**

1 accident / 3000 plongées

Améliorer la décompression pour les plongées à l'air 40-60m ?

- Contrainte opérationnelle :
 - ne pas (trop) majorer le temps total de décompression
- Concepts connus :
 - Remontée lente (Bert)
 - Paliers près de la surface (Haldane)
- Concepts à tester :
 - Paliers profonds
 - Recompression pendant la décompression
 - Oxygène pendant la décompression

Concept de paliers profonds



Initialement proposé par P. Bert

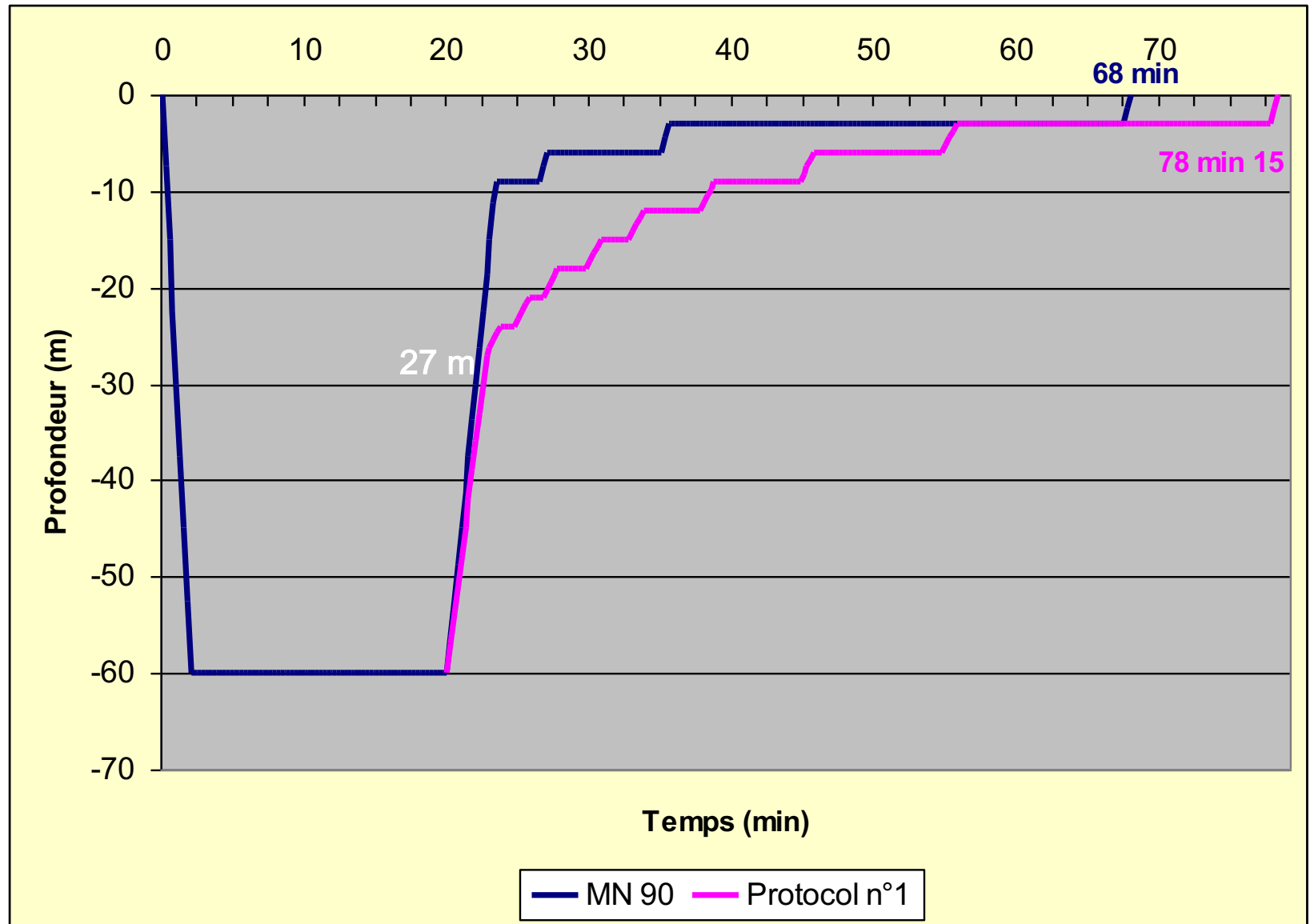
Modèle thermodynamique de Hills et le « volume critique de bulles » de Henessy et Hempleman

Théorie des micro-noyaux gazeux : Tables VPM de Yount et RGBM de Wienke

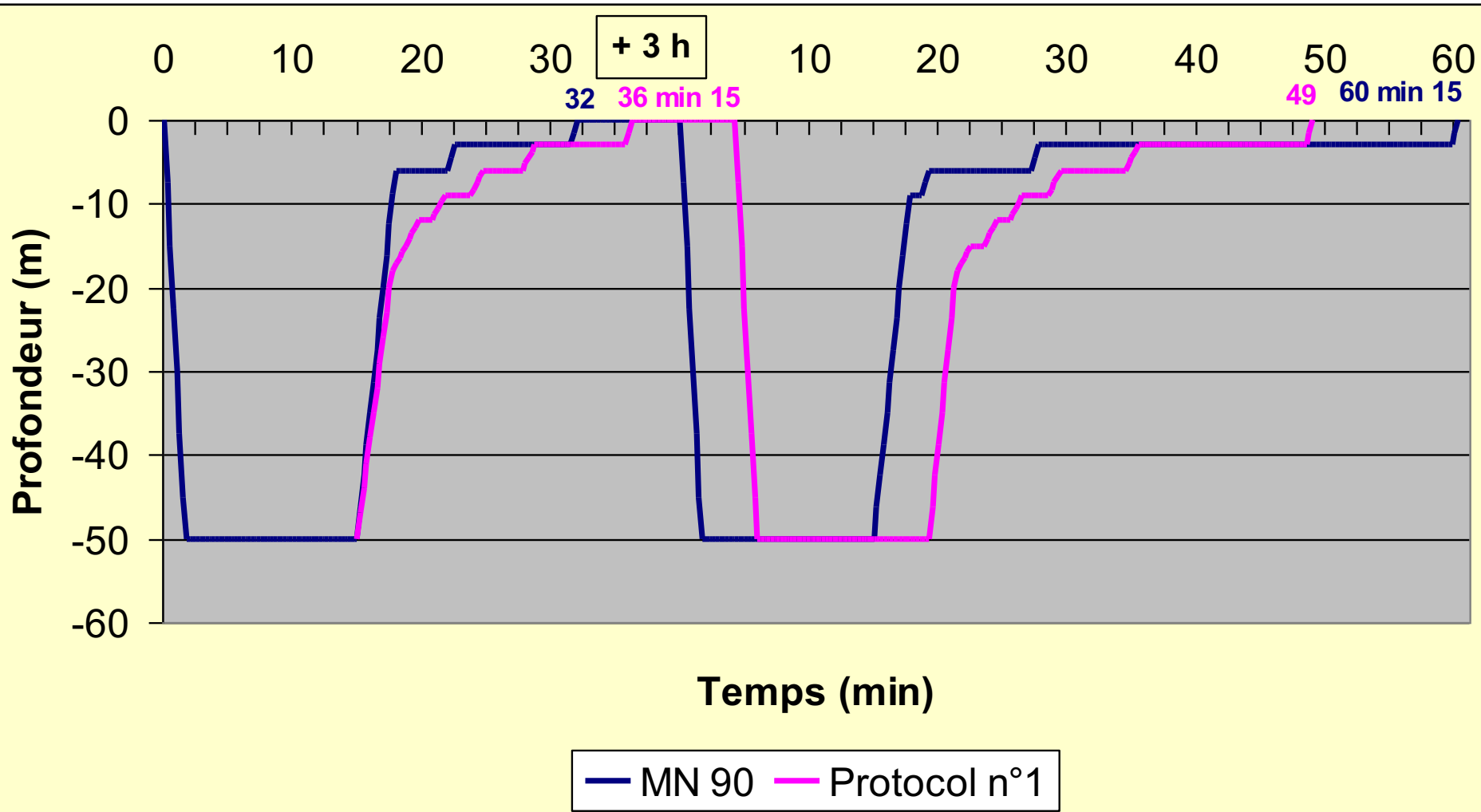
Calcul de la Table

- Choix d'une méthode de calcul simple : équation d'Haldane
- Elaboration d'un logiciel permettant de déterminer des tissus (avec périodes et C_s) et des vitesses de remontée différentes
- Paramètres choisis pour faire apparaître des paliers profonds empiriquement

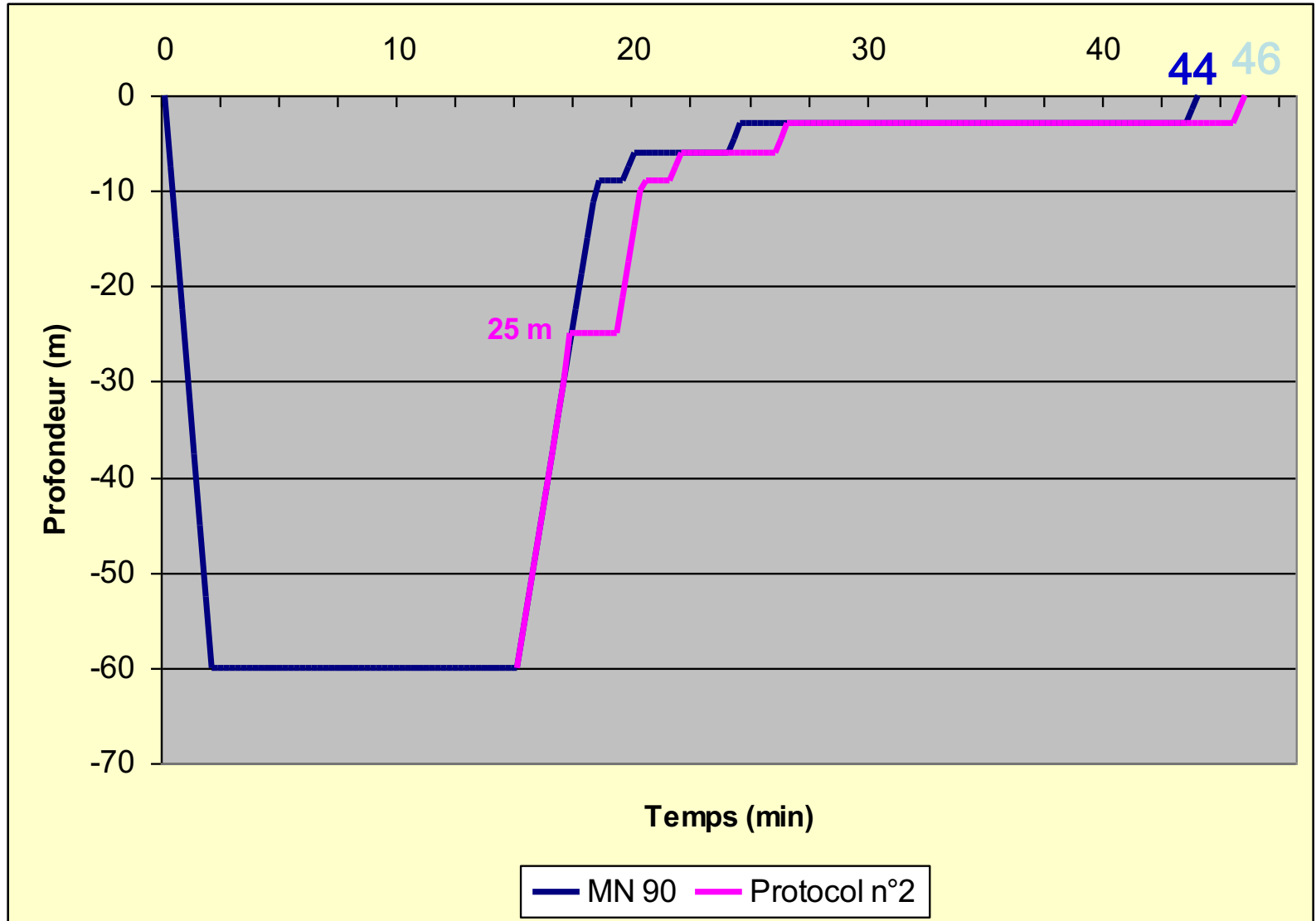
60 m / 20 min MN 90 & Protocole 1



2 x 50 m / 15 min MN 90 & Protocole 1



60 m /15 min MN 90 & Protocole 2



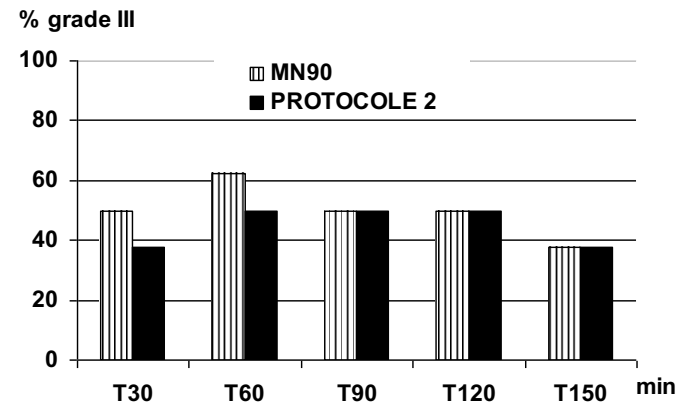
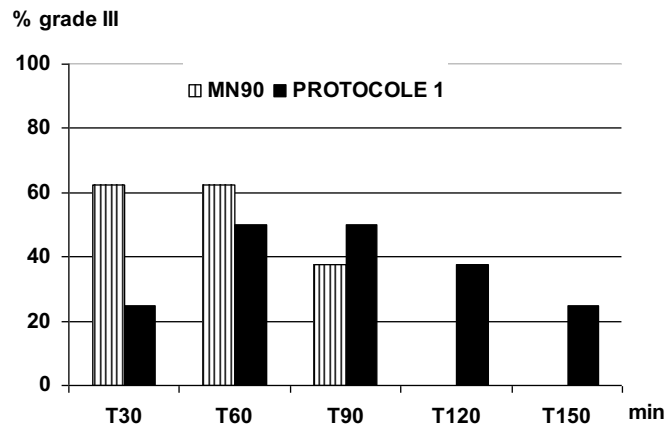
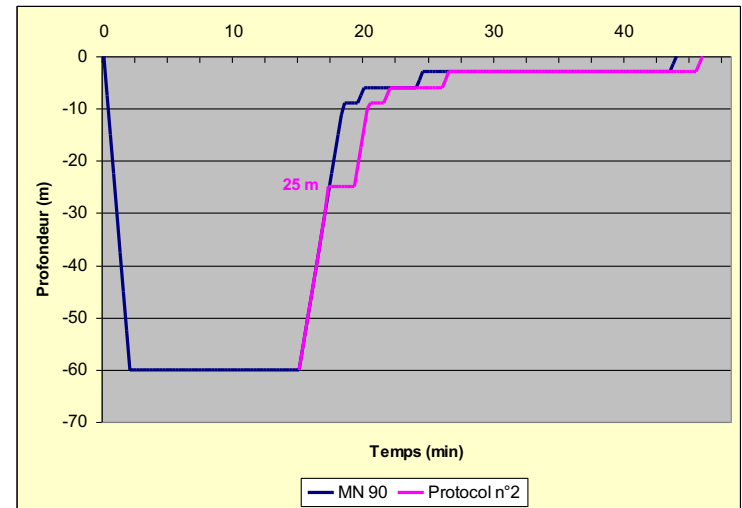
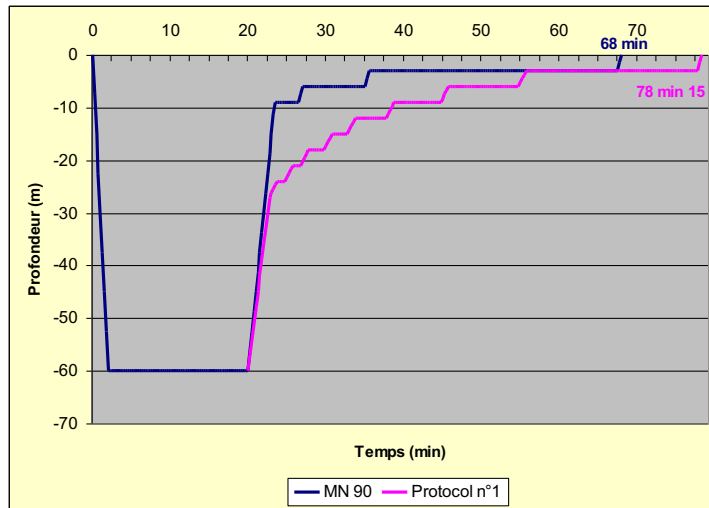


Détection de bulles par méthode Doppler



- Enregistrement précordial
- Début à la sortie du caisson
- Toutes les 30 minutes
- Détections prolongées si bullage prolongé :
pour les plongées successives
- Quantification du niveau de bulles et
comparaison

Résultats : mesures de bulles comparatives



1.5T GEMSIRM
Ex: 24634
Cor SE T1
Se: 6/7
Im: 5/9
Sag: L147.3

Accident de décompression osseux
Après plongée 60 m / 20 min
(paliers profonds)

HIA STE ANNE
040Y M 1358
Acc:
2003 Apr 03
08:15:55

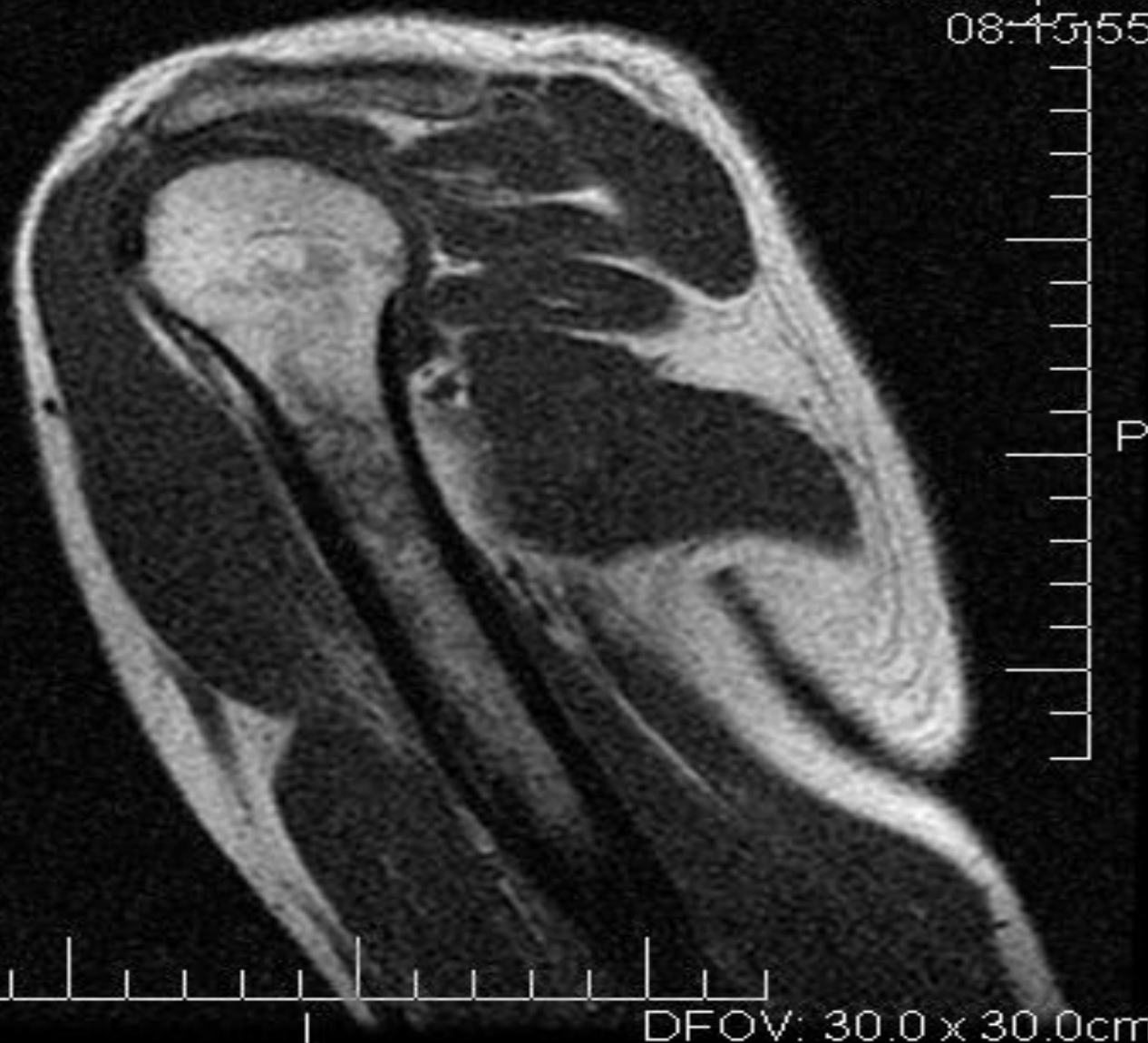
512 x 512

Mag: 1.0x

A

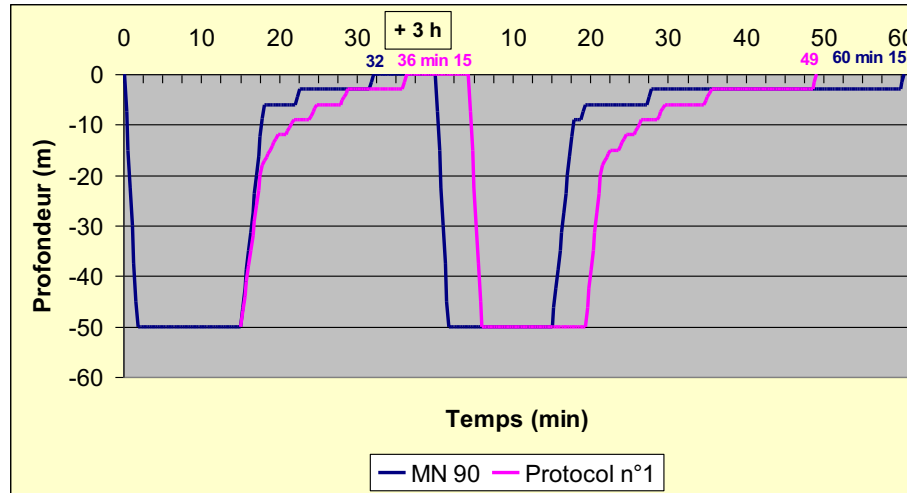
ET: 0
TR: 260.0
TE: 10.0

BODY
5.0thk/1.5sp
W:491 L:245



DFOV: 30.0 x 30.0cm

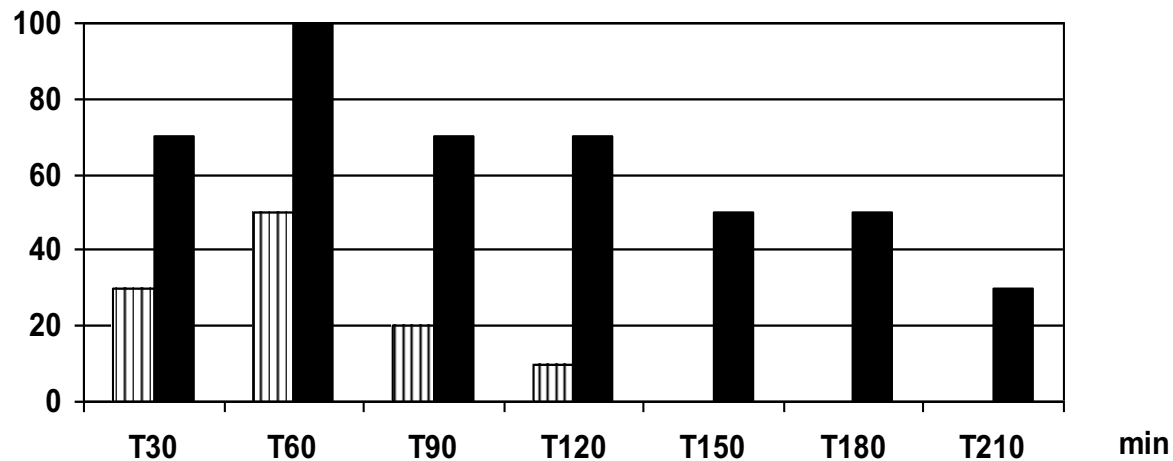
Comparaison des niveaux de bulles plongées successives 50 m / 15 min



%grade III

▨ MN90

■ PROTOCOLE 1



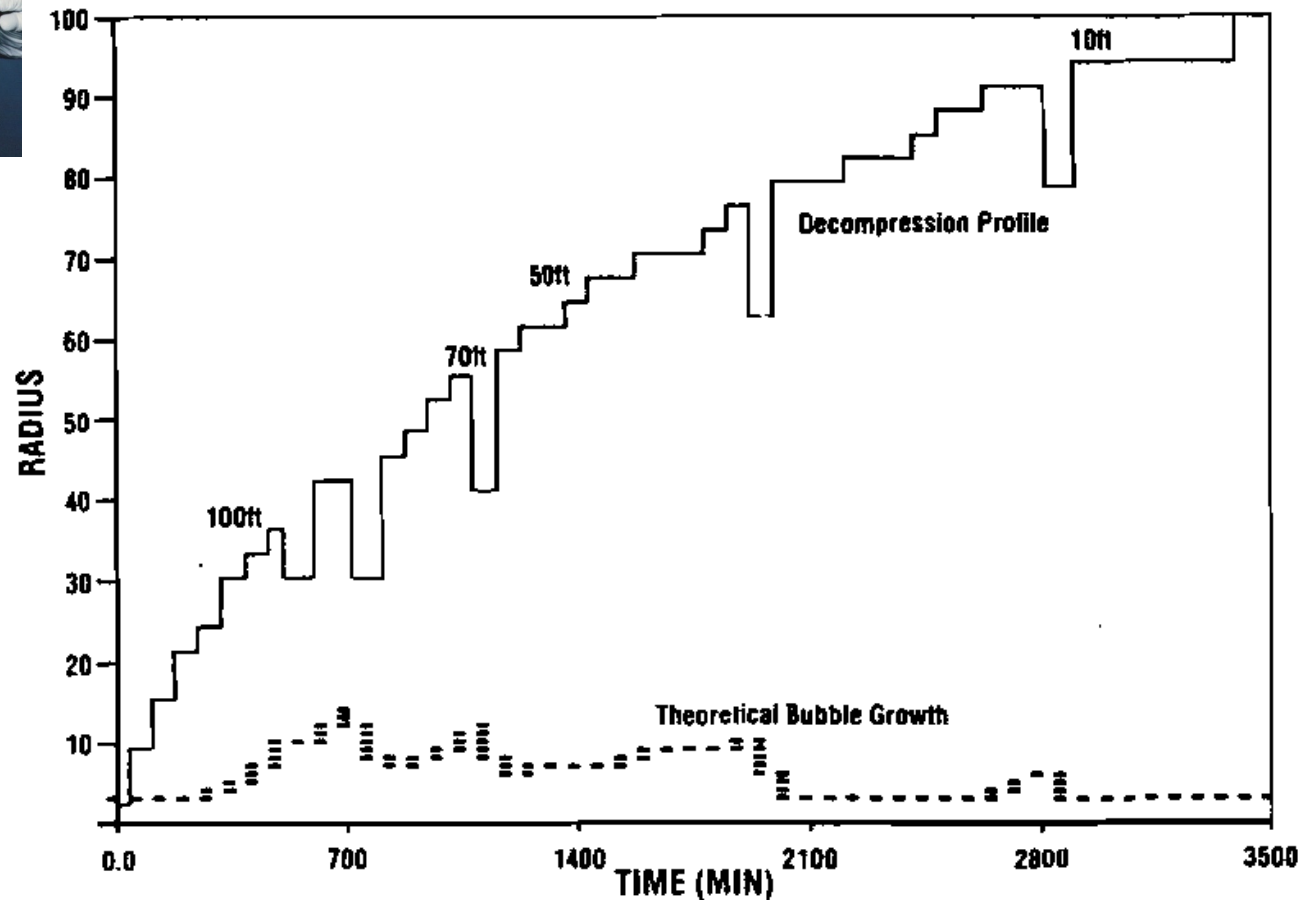
Paliers profonds - conclusions

- Échec: formation de bulles identique ou supérieure avec les paliers profonds + un cas d'ADD.
(Blatteau et al. Aviat Space Environ Med 2005)
- Plus d'accident de décompression avec les paliers profonds : étude US Navy (Doolette et Gerth)
- Une étude contradictoire : effet bénéfique d'un palier profond ? Mais réalisé sur des plongées successives et peu profondes à 25m (Marroni et al. 2006)



Gernhardt
1991

Concept de Recompressions intermittentes pendant la décompression



Etude Cephismer

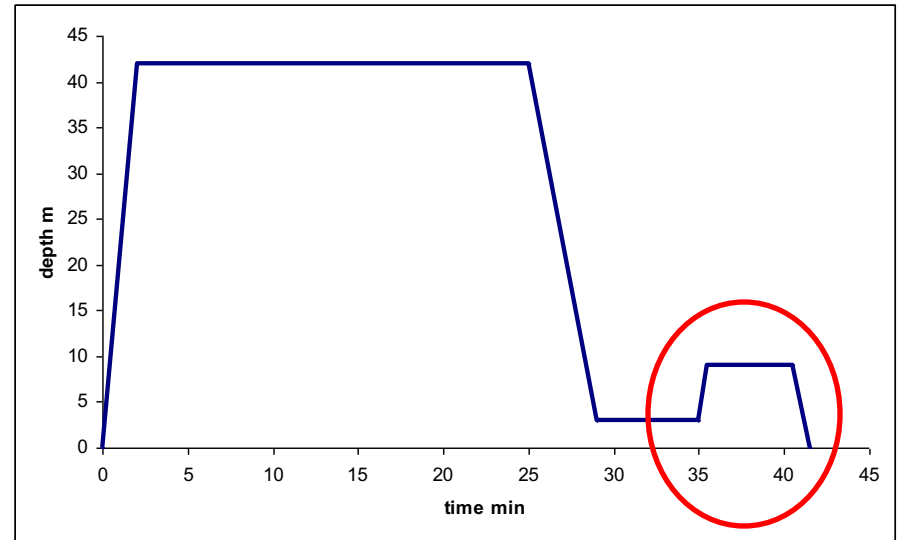
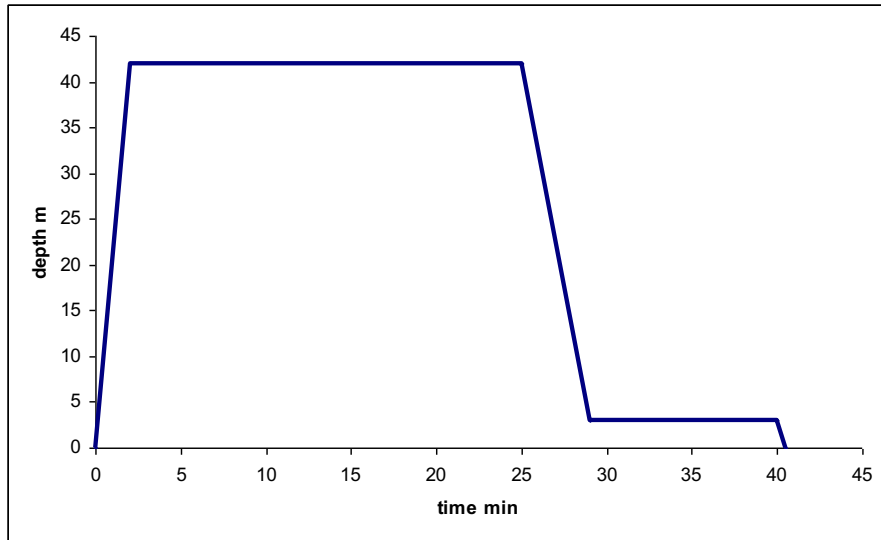
(Blatteau et al. Eur J Appl Physiol 2012)

- 2 modalités de décompression testées
- Méthode “recompression pendant la décompression” : retour à une profondeur supérieure à la fin du dernier palier
- Oxygène au palier en réduisant le temps de déco. : évaluation d’une réduction de 30% ou 50% du temps théorique de palier

“Effet pression”

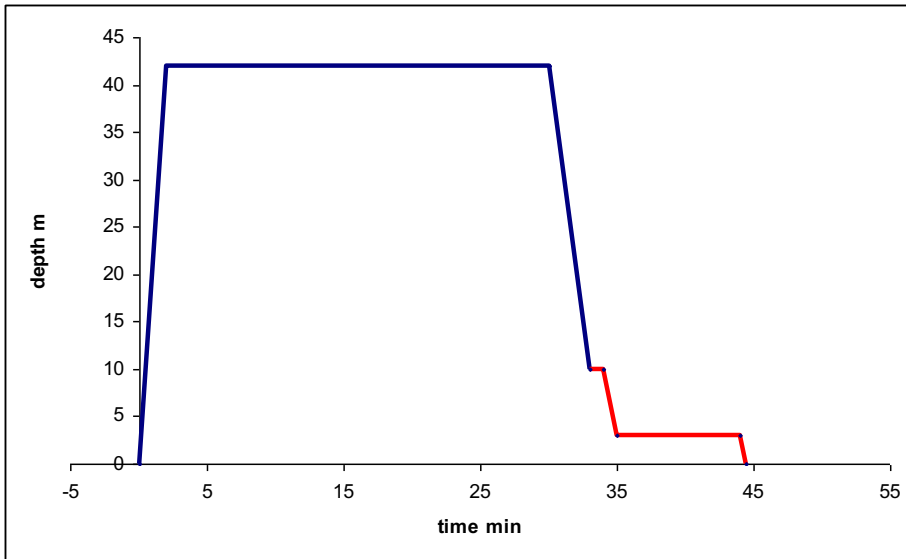
“Effet O2”

Effet pression

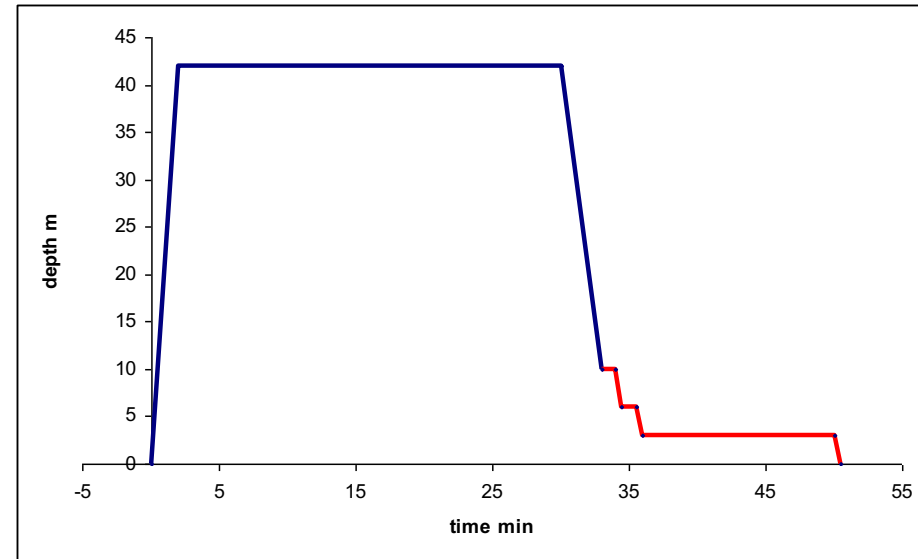


Effet oxygène

100% O₂ au palier (en rouge)



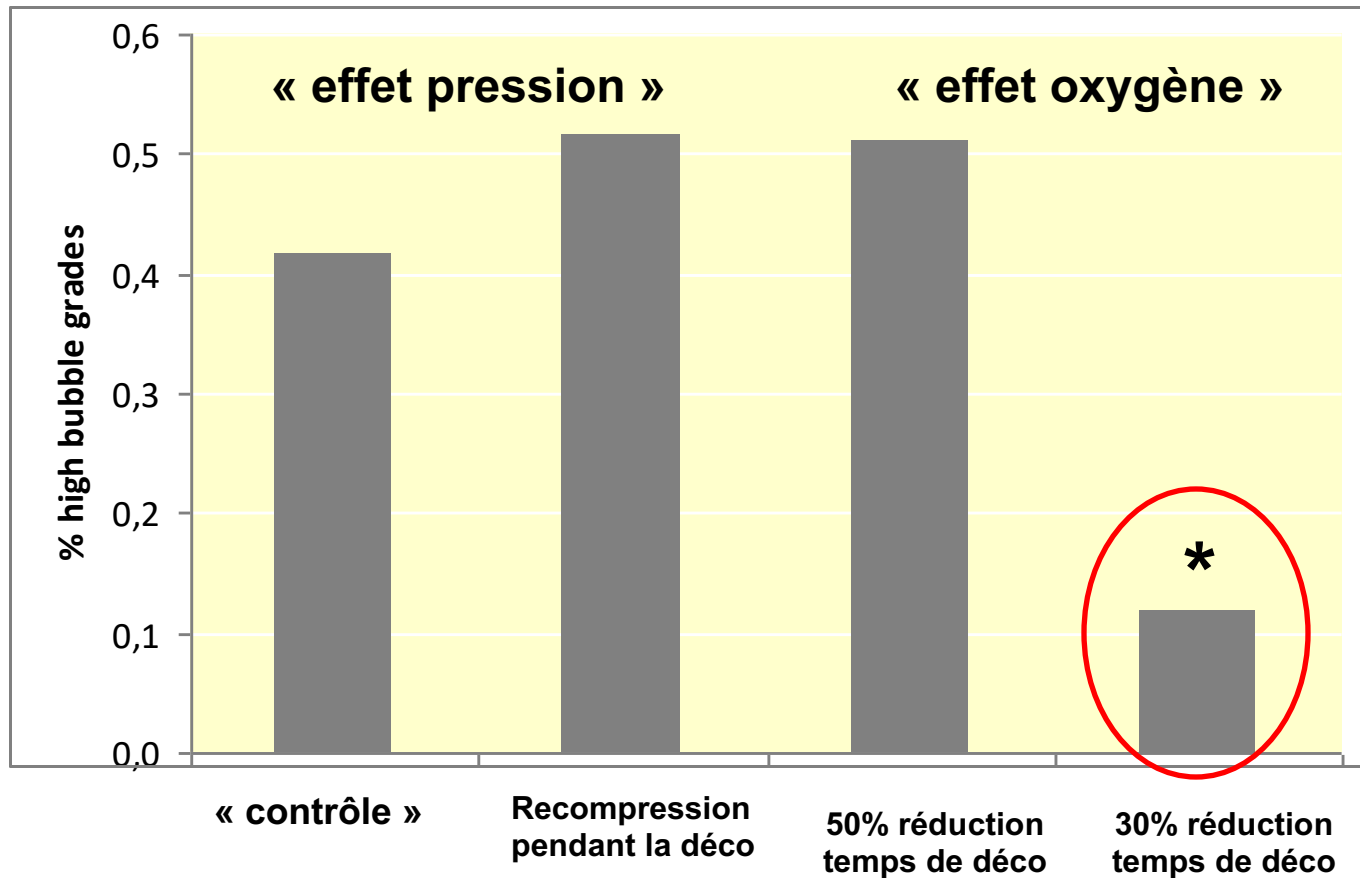
50% de réduction du temps de déco



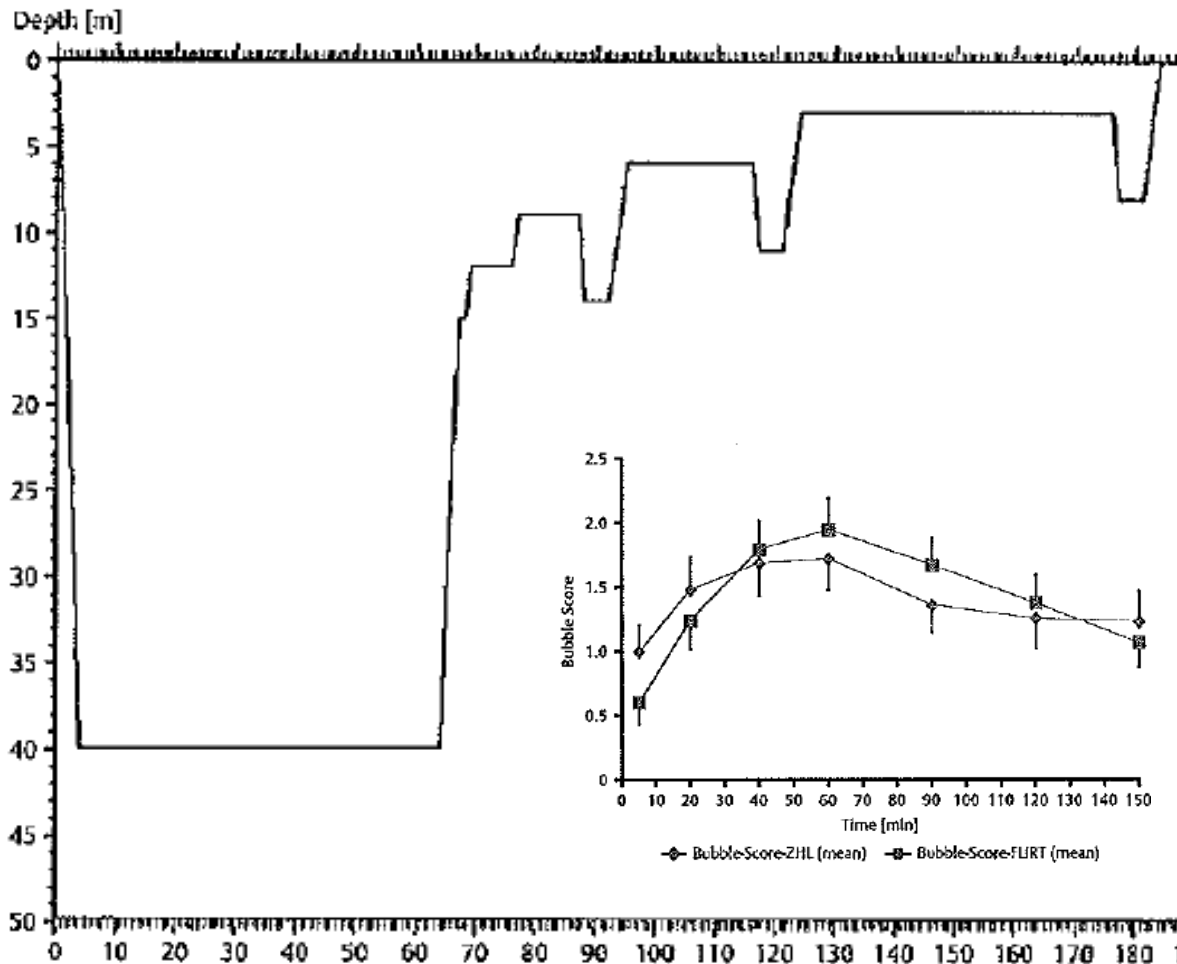
30% de réduction du temps de déco

Résultats

Comparaison des niveaux de bulles



Discussion - « effet pression »

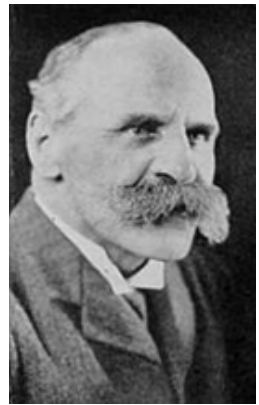


- Winckler et al 2012
« *Effects on FLIRT on bubble growth in man* »
- 29 sujets
- Contrôle (déco buehlmann-like) vs FLIRT (first line intermittent recompression technique)
- Pas de différence

Effet pression vs O2

- Recompression pendant la déco : peu efficace
- L'O2 100% au palier est efficace pour réduire la formation de bulles
- à condition de ne pas réduire le temps de décompression au-delà de 30%.
 - Cohérent avec l'usage de la table MN90 ou MT92

Conclusion



La méthode d'Haldane, remaniée au fil du temps est efficace pour les décompressions conventionnelles,

Evolutions actuelles vers des « modèles à bulles », et des décompressions « personnalisées » :

nécessité de disposer d'un outil de validation : d'une base de données et de mesure de bulles répétées...



Conclusion

L'optimisation de la « fenêtre oxygène » reste un des meilleurs moyens de prévention :

Plongée au nitrox

Nitrox/oxygène au palier



Prévention de l'ADD

Actions sur la plongée

Limiter la plongée profonde à l'air (<30m)

Limiter l'effort physique pendant la plongée

Limiter les plongées yo-yo et successives

Adapter l'organisme : notion « progressivité » à la profondeur

Plonger au mélange Nitrox

Privilégier des plongées ne nécessitant pas de paliers

Réaliser systématiquement des paliers de sécurité

Réaliser les paliers à l'oxygène ou au Nitrox

Prévention de l'ADD

Actions sur le plongeur

Visite médicale +++

ATCD médicaux-chirurgicaux

ATCD d'accident de plongée, FOP

Traitement en cours

Âge

Tabac

Alcool

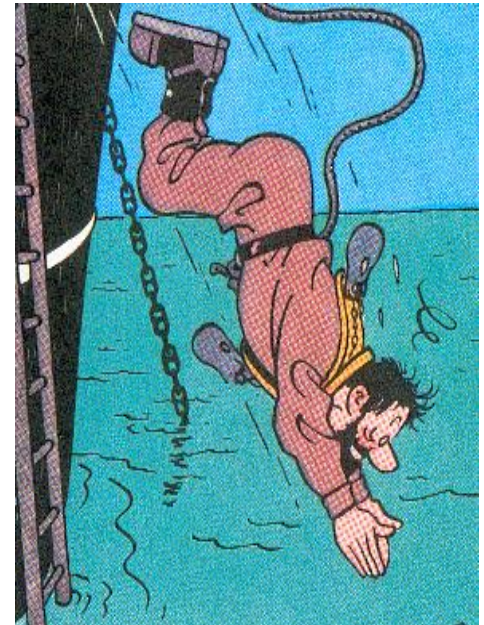
Stress émotionnel

Fatigue - Manque de sommeil

Surcharge pondérale

Mauvaise condition physique aérobie

Manque d'entraînement à la plongée



Prévention de l'ADD

« pré-conditionnement »

Exercice physique 45 min, 2 h et 1h avant plongée

- Ambiance thermique chaude favorable
- Hydratation ad libitum

Plongées saturantes répétées

- 30 min de préoxygénation avant plongée
- Matelas vibrant
- Hydratation entre les plongées
- Privilégier séquence « O₂-air » si stock O₂ limité