

L'ENGAGEMENT EN PLONGEE LOISIR

Suite de la série préalable à la compréhension des “Gradients factors” dont je parlerais dans le prochain article et qui fait suite à “La fenêtre oxygène, parlons de l'engagement en plongée loisir

Nous commençons une série de fiches informatives sur les réglages adaptatifs du conservatisme des décompressimètres de plongée. Ce premier chapitre est une introduction aux modifications possibles que vous pouvez réaliser sur vos décompressimètres afin d'optimiser vos désaturations en fonction de votre âge, poids, condition physique, fatigue et état de santé, entraînement physique etc....

En effet tous les décompressimètres modernes offrent la possibilité d'optimiser sa désaturation, encor faut-il en comprendre le principe et savoir utiliser les options.

Comme vous le savez sans doute, des données nouvelles sont apparues récemment sur le risque en plongée qui remettent en avant des données anciennes, certaines oubliées ou négligées.

Deux données “nouvelles” (pas tant que cela en fait sont apparues :

1/ Les bulles préexistent à la plongée. C'est une notion faussement nouvelle puisque évoquée des 1940 par Harvey.

2/ Elles sont localisées à des points très spéciaux de notre organisme, dans les vaisseaux en des points bien spécifiques.

1- Les bulles préexistent à notre immersion et à notre saturation en azote !

Leur origine n'est pas univoque et trois théories sont évoquées :

1-a/ En effet des éléments constituant le surfactant alvéolaire (agent « tensioactif » qui tapisse l'intérieur des alvéoles : l'aide à garder les alvéoles ouvertes) le dipalmitoylphosphatidylcholine est un produit de dégradation du surfactant alvéolaire qui passe dans la circulation sanguine et se fixe dans les vaisseaux sur l'endothélium vasculaire. Cette molécule a une particularité commune à tous les phospholipides : son caractère hydrophobe.

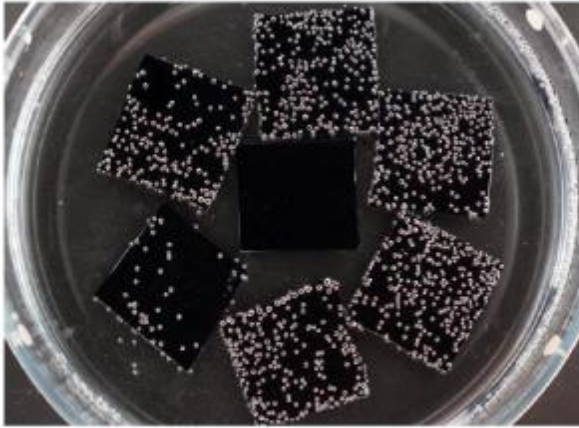


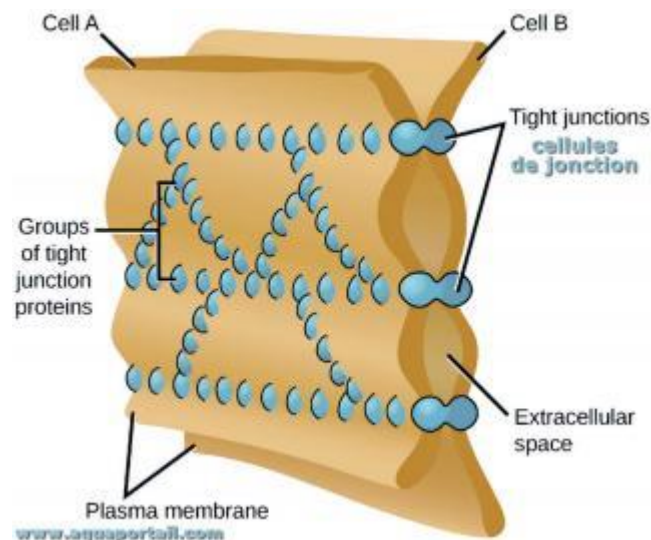
Fig. 1. Six hydrophobic UW-I-wafers on the periphery and one hydrophilic UW-I-wafer in the center, photographed 2.5 h after decompression from 300 kPa (20 msw).

Arieli & Marmur. *Respir Physiol Neurobiol* 185(3): 647-652, 2013.

Manque de pot la formation des bulles est plus importante sur les surfaces hydrophobes

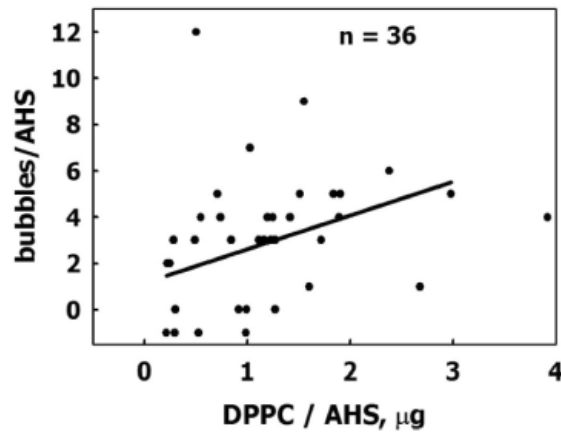
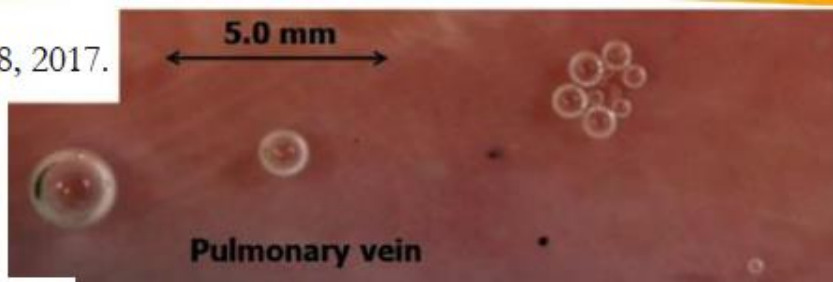
1-b/ Des noyaux gazeux se situent dans la circulation sanguine, dans les crevasses hydrophobes (Harvey) : les tight junction des cellules constituant l'endothélium vasculaire (l'endothélium est constitué des cellules tapissant la paroi des vaisseaux)

Ces tight junctions sont des jonctions en forme de ceinture qui entourent la cellule. Elles assurent une étanchéité totale des tissus et jouent un rôle dans la formation en 3D des organes.



Bien évidemment les deux théories (crevasses hydrophobes et dipalmitoylphosphatidylcholine ne se contredisent pas : ce peuvent être les mêmes sites.

Arieli R. Front Physiol 8, 2017.

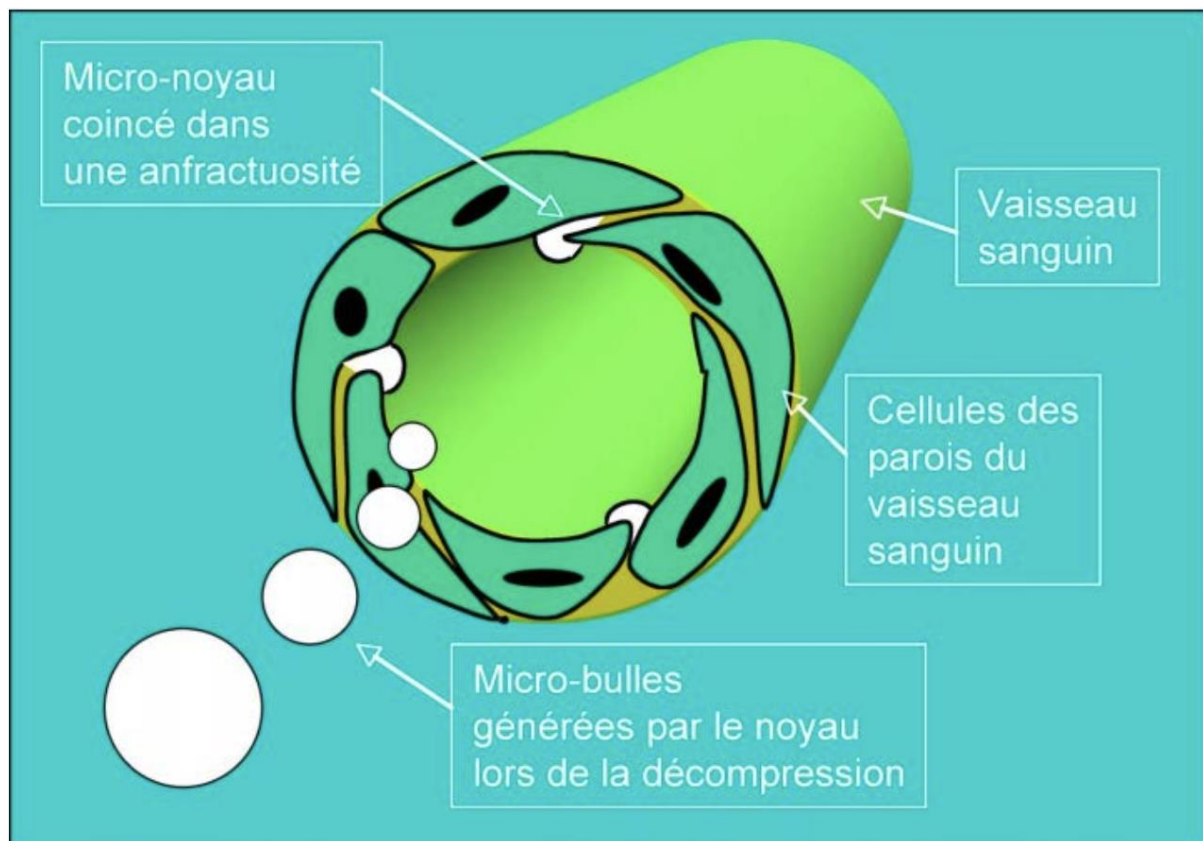


Arieli et al. J Appl Physiol 121(3): 811- 815, 2016.

DPPC = concentration en dipalmitoylphosphatidylcholine



1-c/ La théorie de la NASA : ces microbulles seraient en perpétuel renouvellement et liée aux mouvements musculo-squelettiques responsables de micro-tribonucléations et donc d'une disparition (par l'effet de la fenêtre oxygène) et d'un renouvellement permanent de ces noyaux gazeux avec in fine un état d'équilibre. Ce serait la quantité de bulle présente à cet état d'équilibre qui expliquerait la différence entre sujets "bulleurs" et "non bulleurs".



EN RESUME :

Des bulles préexistent à la plongée, elles proviennent de leur attrait pour une molécule hydrophobe provenant de la dégradation du surfactant pulmonaire déposé sur les parois vasculaires et sont concentrées au niveau des jonctions cellulaires de cet endothélium.

Il suffit donc de plonger, de saturer en azote puis de désaturer, l'azote repassant de la phase dissoute à la phase gazeuse vient enrichir ces bulles préexistantes et les faire grossir leur permettant de se détacher de la paroi vasculaire et d'être larguées dans la circulation sanguine pouvant provoquer si trop abondantes pour être éliminées par le filtre pulmonaire un accident de désaturation.

On comprend donc bien que ces bulles préexistantes représentent un danger pour le plongeur !

Autre nouveauté : le phénomène d'acclimatation !

Celui-ci est bien nouveau ! Les bulles se décrochant de la paroi vasculaire entraîneraient avec elles des sites hydrophobes de dipalmitoylphosphatidylcholine et rendraient ainsi la paroi vasculaire moins "accrocheuse" de bulles au cours des plongées successives, raison supplémentaire pour débuter un séjour par des plongées à faibles profondeurs.

Mais d'où proviennent ces bulles me demanderez-vous ???

Et bien de la fenêtre oxygène dont je vous ai précédemment parlé Pour rappel cette fenêtre oxygène C'est la différence entre la somme des tensions oxygène et CO2 du côté artériel et du côté veineux

$$\text{Fenêtre oxygène} = (\text{TO}_2 + \text{TCO}_2) \text{ artériel} - (\text{TO}_2 + \text{TCO}_2) \text{ veineux}$$

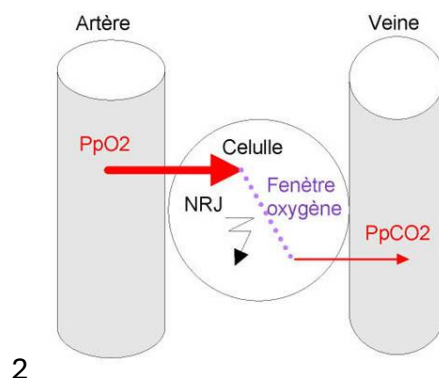
Plus elle est grande plus elle facilite la désaturation et augmente la résorption des microbulles (D'où l'intérêt de la déco à l'oxygène et le geste de « mettre » sous O2 quand on soupçonne un ADD)

Schématiquement : $\text{O}_2 \rightarrow \text{Carbone (NRJ)} + \text{CO}_2$

Hors

1- lors de cette réaction tout l'O2 ne se retrouve pas sous forme de Co2

2- le co2 est un gaz 20 fois plus soluble que l'O



Il en découle un écart de 60 mbar entre PpO2 artériel et PpCo2 veineux c'est ce qu'on appelle la fenêtre oxygène, ou pression partielle vacante ou sous-saturation inhérente. Cette "fenêtre oxygène", gradient artificiel (non lié à la pression ambiante) qu'elle crée permet de réduire/éliminer les bulles en formation ou formées et stabilise les bulles au niveau vasculaire.

Mais en vieillissant le métabolisme diminue et la fenêtre O2 diminue ce qui déstabilise les microbulles et favorise leur "décrochage de la paroi vasculaire", à l'inverse les plongeurs entraînés ont une fenêtre O2 plus large et une meilleure stabilité des bulles les exposant moins à un largage de bulle. Ceci explique entre autres les différences constatées entre les plongeurs les plus âgés et les plus jeunes et les plongeurs les plus entraînés par rapport aux moins entraînés.

C'est cette fenêtre O2 qui nous protège des accidents de décompression quand on part du niveau de la mer pour se rendre sur le Mont Blanc en hélicoptère. C'est un mécanisme d'adaptation physiologique à l'altitude, mais pour le plongeur elle conditionne aussi la taille des bulles.

Plusieurs constatations corroborent cette hypothèse de microbulles préexistantes et notamment que le fait de sauter sur place avant la plongée permet d'éliminer des microbulles préexistantes et diminue la production de bulles après saturation en plongée. Ne soyez pas étonnés de me voir sautiller avant la plongée....).

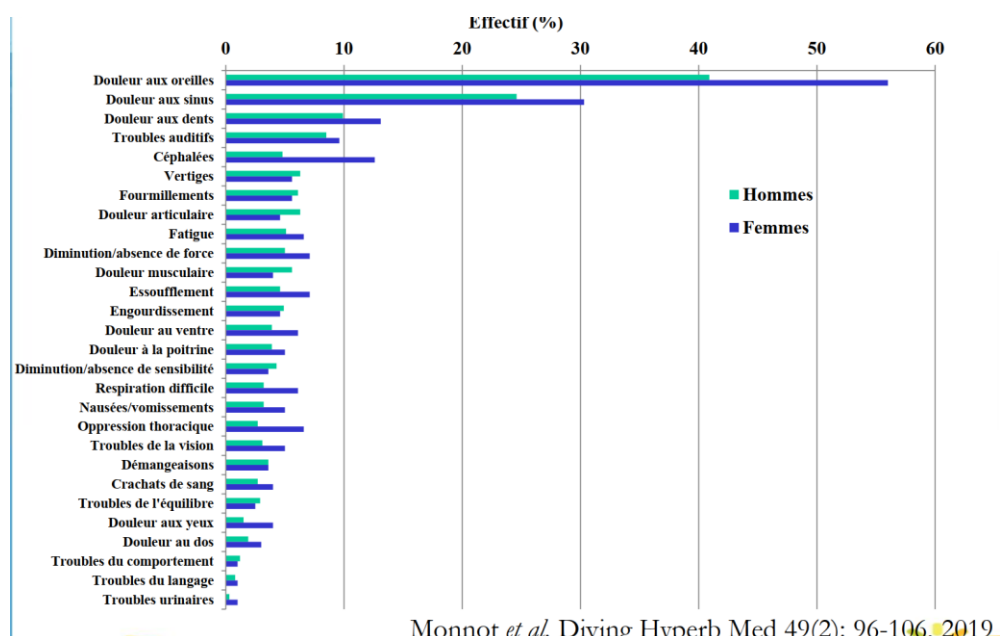
De même au palier la mobilisation des bulles des parois vasculaires musculaires par un exercice modéré aux paliers permet d'éliminer un maximum de bulles. Il est donc conseiller de palmer aux paliers plutôt que de rester suspendus comme des grosses vaches au bout en grappe, gênant ainsi la désaturation des autres plongeurs.

Vivre c'est risquer,

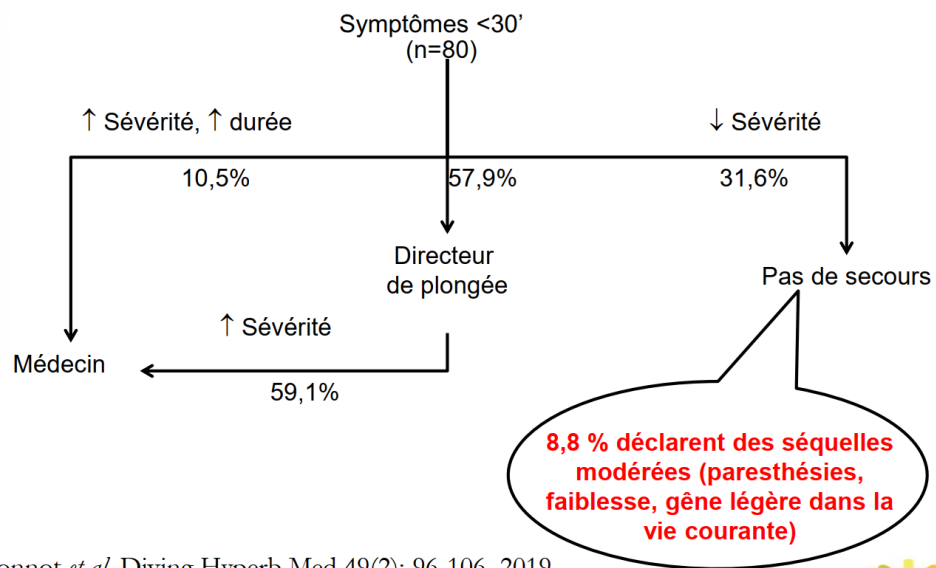
Pratiquer un sport c'est encore plus risquer l'accident voire le décès ! On vient donc de le comprendre plonger c'est accepter un risque comme toute activité humaine.

Reste à définir le niveau de risque que l'on accepte de courir. ! Je refuse le parachutisme, le parapente, en plus je suis sujet au vertige, mais j'accepte de plonger mais pas à n'importe quel risque" et c'est ici qu'intervient la notion **d'engagement**.

Et les risque en plongée sont multiples :



Parfois sous-estimés ou négligés.



onnot *et al.* *Diving Hyperb Med* 49(2): 96-106. 2019

Le plus dangereux et connu est l'accident de désaturation

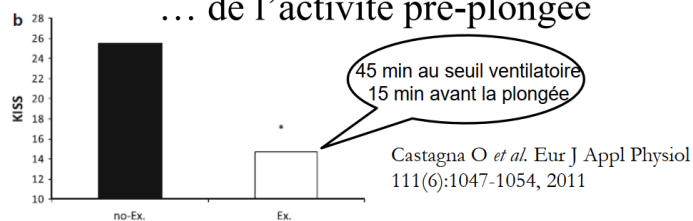
	Risque	Référence
Plongeurs suisses	≈ 0.025 %	Torti et al. <i>Eur heart J</i> 25(12): 1014-1020; 2004
Marine française	≈ 0.029 %	
Dive master, Dive instructors	≈ 0.149 %	Hagberg & Ornhagen, <i>Undersea Hyperb Med</i> 30(2):93-102; 2003
DAN	≈ 0.15 %	Ranapurwala et al., <i>Diving Hyperb Med</i> 44(2):79-85; 2014
Plongeurs scientifiques	≈ 0.003 %	Dardeau et al. <i>Diving Hyperb Med</i> 42(4):195-200; 2012

Noter la surexposition des plongeurs guide ou enseignant...

La formation des bulles est multifactorielle et difficilement anticipable :

1/ Et la formation de bulles dépend de l'activité pré plongée :

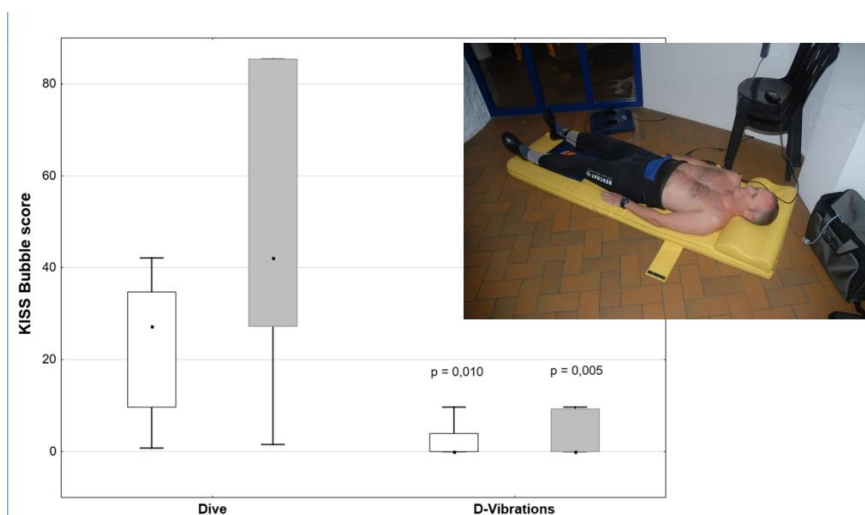
La formation de bulles dépend de l'activité pré-plongée



Allocation	Body weight (g)	Scan grade	Survival (min)
Exercise (48 h prior to diving)	315 ± 6	4 (3-5)	35 (26-60) _§
Sedentary	310 ± 9	5 (—)	12 (4-20)
Exercise (20 h prior to diving)	316 ± 9	0.5 (0-2) _§ *	> 60 (—) _§ *
Sedentary	313 ± 8	5.0 (4-5)	13 (2-47)
Exercise (10 h prior to diving)	314 ± 9	5 (—)	11 (3-15)
Sedentary	318 ± 12	5 (—)	14 (2-31)
Exercise (5 h prior to diving)	309 ± 8	4 (2-5)	20 (10-60)
Sedentary	312 ± 6	5 (3-5)	23 (17-60)
Exercise (30 min prior to diving)	315 ± 8	5 (—)	11 (3-23)
Sedentary	317 ± 9	5 (—)	8 (2-17)

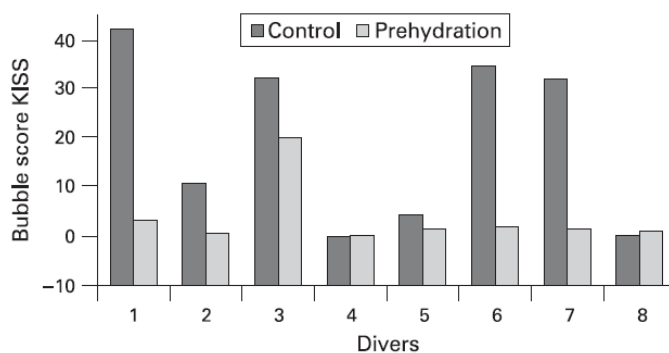
Wisloff U *et al.* J Physiol 555(3):825-829, 2004

Rôle de l'activité physique avant la plongée 'mes sautilllements suffisent – ils ?)



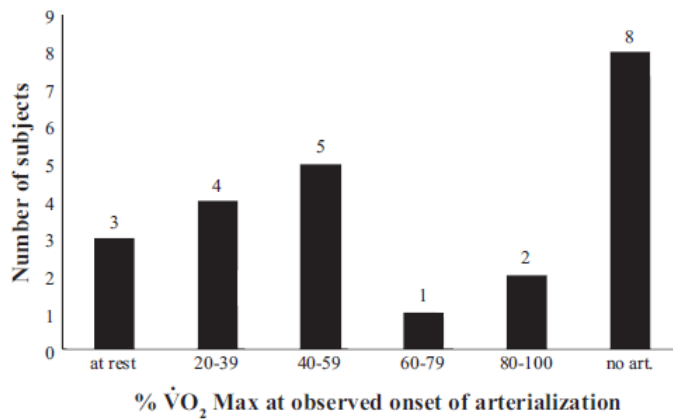
Lambrechts *et al.* Eur J Appl Physiol 117(2):335-344, 2017 D'où l'idée de la

planche vibratoire....



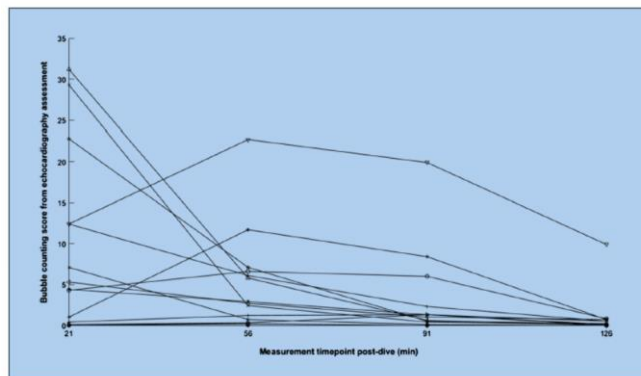
Rôle de l'hydratation pré-plongée ? On vous dit de boire [Wang *et al.* Diving Hyperb Med]

2/ La formation de bulles dépend aussi de l'activité post plongée :



Madden *et al.* J Appl Physiol 115(5):716-722, 2013

3/ Mais la formation de bulle dépend aussi beaucoup de facteurs individuels (individus bulleurs et non bulleurs) pour des raisons inconnues



Papadopoulou *et al.* Eur J Physiol 118 (6):1255-1264, 2018

4/ Beaucoup plus agaçant la production de bulles dépend aussi du sexe : Les femmes bullent moins que les hommes (statistiquement quand elles acceptent de boire et de éventuellement pisser dans leur combinaison !)

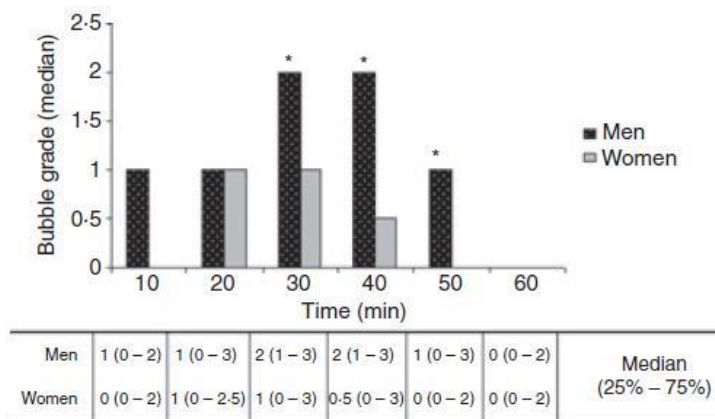
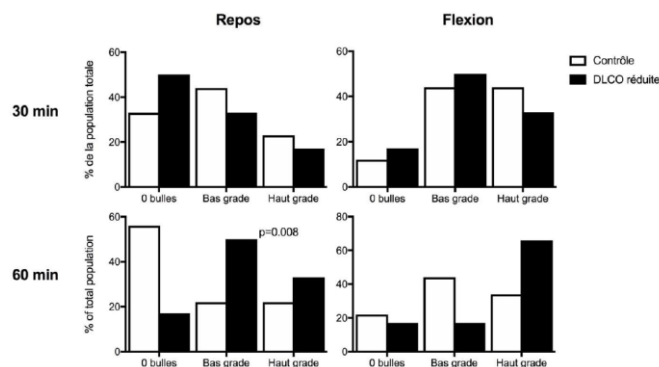


Figure 1 Median bubble grades detected after the dive in men and women. Bubble grade was higher in men 30, 40 and 50 min after the dive.

Boussuges et al. Clin Physiol Funct Imaging 29(6):400-405, 2009

5/ La formation de bulles dépend aussi de la fonction pulmonaire :



Loddé B. Thèse de 2018

L'engagement caractérise la sévérité de la plongée

-Défini par Hempleman dans les années 1950

-Repris par Bernard Gardette (directeur scientifique COMEX) en 2010 et publié sous "théorie générale unifiée de la décompression"

[https://www.dropbox.com/scl/fi/qn9sbttpuli49tkbjc6gx/THEORIE_GENERALE_UNIFIEE_D_E_LA_DECOMPRESSION.pdf?rlkey=trlyfc6s0ikzexllj77ibbtxt&dl=0]

Le calcul en est simple : $ADD (\%) = cte (P\sqrt{t})^4$ Ou $\log ADD (\%) = 4 \log P\sqrt{t} + \log Cte$

$$Profondeur * \sqrt{Temps fond}$$

(P = Profondeur de la plongée en mètres et t = temps au fond en minutes)

On aboutit à une valeur notée **E** qu'il suffit de reporter sur un tableau pour lire le risque estimé d'accident de désaturation

PLONGEE « LOISIRS »

AZOTE			RISQUE ADD	
P _v t (m.min)	Plongées	T. Déco.	Moyen	Maxi (x 30)
120	15 m / 65 min 20 m / 35 min 30 m / 15 min 40 m / 10 min	3 min (air)	0,01 % (1 / 10.000)	0,3 % (1 / 300)
150	20 m / 55 min 30 m / 25 min 40 m / 15 min 50 m / 10 min	10 min (air)	0,03 % (1 / 3.000)	1 % (1 / 100)

PLONGEE « SPORTIVE »

AZOTE			HELIUM			RISQUE ADD	
P _v t (m.min)	Plongées	T. Déco	P _v t (m.min)	Plongées	T. Déco	Moyen	Maxi (x 30)
200	20 m / 100 min 30 m / 45 min 40 m / 25 min 50 m / 15 min 60 m / 10 min	20 min (air) 10 min (O ₂)	250	50 m / 25 min 60 m / 17 min 70 m / 12 min 80 m / 10 min	30 min (O ₂)	0,1 % (1 / 1.000)	3 % (1 / 30)
240	30 m / 65 min 40 m / 35 min 50 m / 25 min 60 m / 15 min	40 min (air) 20 min (O ₂)	300	50 m / 35 min 60 m / 25 min 70 m / 20 min 80 m / 15 min 90 m / 10 min	60 min (O ₂) (1 h 00)	0,2 % (1 / 500)	6 % (1/15)
270	30 m / 80 min 40 m / 45 min 50 m / 30 min 60 m / 20 min	60 min (air) 30 min (O ₂)	350	60 m / 35 min 70 m / 25 min 80 m / 20 min 90 m / 15 min 100 m / 12 min 110 m / 10 min	90 m (O ₂) (1 h 30)	0,3 % (1 / 300)	10 % (1 / 10)

PLONGEE « TEK »

HELIUM			RISQUE ADD	
P _v t (m.min)	Plongées	T. Déco	Moyen	Maxi (x 30)
400	80 m / 25 min 90 m / 20 min 100 m / 15 min 110 m / 13 min 120 m / 10 min	120 min (O ₂) (2 h 00)	0,6 % (1 / 150)	20 % (1 / 5)
450	80 m / 30 min 90 m / 25 min 100 m / 20 min 110 m / 17 min 120 m / 15 min	180 min (O ₂) (3 h 00)	1 % (1 / 100)	30 % (1 / 3)

Exemple:

Une plongée a l'air de 10mn a 50m c'est $E = 50m \times 2.23$ (racine de 50) = 111

Une plongée a l'air de 65mn a 15m c'est $E = 15m \times 2.23$ (racine de 65) = 120

Engagement	Exemples de profils	Risque moyen ADD
120 - Air	20m - 35' 30m - 15' 40m - 10' 50m - 5'	1 / 10 000

L'engagement E est équivalent entre ces deux plongées et même légèrement supérieur dans la plongée la plus profonde et de 1/10000 plongées soit un risque moyen d'ADD de 0.01%

Il augmente nettement en plongée sportive ou l'on constate pour une plongée a 50m pendant 15 mn un engagement $E = 200$ avec un temps de décompression de 20mn a l'air (10mn a l'O2) mais avec un risque d'accident de 1/1000 plongées soit 0.1% soit un risque d'ADD multiplié par 10

Engagement	Exemples de profils	Risque moyen ADD
120 - Air	20m - 35' 30m - 15' 40m - 10' 50m - 5'	1 / 10 000
150 - Air	30m - 25' 40m - 15' 50m - 10' 60m - 5'	3 / 10 000
200 - Air	30m - 45' 40m - 25' 50m - 15' 60m - 10'	1 / 1 000
240 - Air	40m - 35' 50m - 25' 60m - 15'	2 / 1 000
270 - Air	40m - 45' 50m - 30' 60m - 20'	3 / 1 000
450 - Trimix	80m - 30' 100m - 20' 120m - 15'	1 / 100

Ce calcul d'engagement, nouveau est important car il responsabilise les plongeurs chevronnés et autonomes en leur donnant une véritable autonomie car quand on dépend d'un ordinateur sans faire fonctionner son cerveau, on n'est pas vraiment autonome.

A ceci près que, nous l'avons vu tous les plongeurs ne sont pas de "bulleurs" équivalents entre les faibles "bulleurs" B1, les moyens "bulleurs" B2 et les "grands bulleur" B3 car le calcul fait apparaître une $(ADD (\%) = \text{constate } (P\sqrt{t}))$ constante va dépendre de/des :

- la nature du gaz « inerte », azote (N_2) ou hélium (He)
- la pression partielle d'oxygène (PO_2) respirée au fond et au cours de la décompression
- conditions de plongée (au sec ou dans l'eau), avec plus ou moins d'effort
- l'intervalle entre les plongées (successives)
- l'altitude
- la masse corporelle

On peut considérer divers niveaux de risque d'ADD acceptable :

- $P\sqrt{t} = 150$ (N_2), 3/10.000 ADD et 15 % B3

constitue la limite de la plongée « loisirs » à l'air : 1 h 00 à 20 m, 25 min à 30 m et 15 min à 40 m.

- $P\sqrt{t} = 270$ (N_2), 3/1.000 ADD et 40 % B3,

constitue la limite de la plongée « sportive » à l'air : 45 min à 40 m, 30 min à 50 m et 20 min à 60 m.

- $P\sqrt{t} = 450$ (He), 1/100 ADD et 60 % B3,

constitue la limite de la plongée « TEK » : 30 min à 80 m, 20 min à 100 m et 15 min à 120 m.

1/ => Le plongeur, à partir de ces données peut choisir en toute connaissance son niveau de risque.

2/ => Il pourra aussi maintenir ce risque à la valeur choisie en acceptant

- une majoration du temps de décompression

Ou en respirant

- De l'oxygène pendant sa désaturation
- De l'Helium (Trimix) qui diminue son risque d'accident de désaturation de moitié

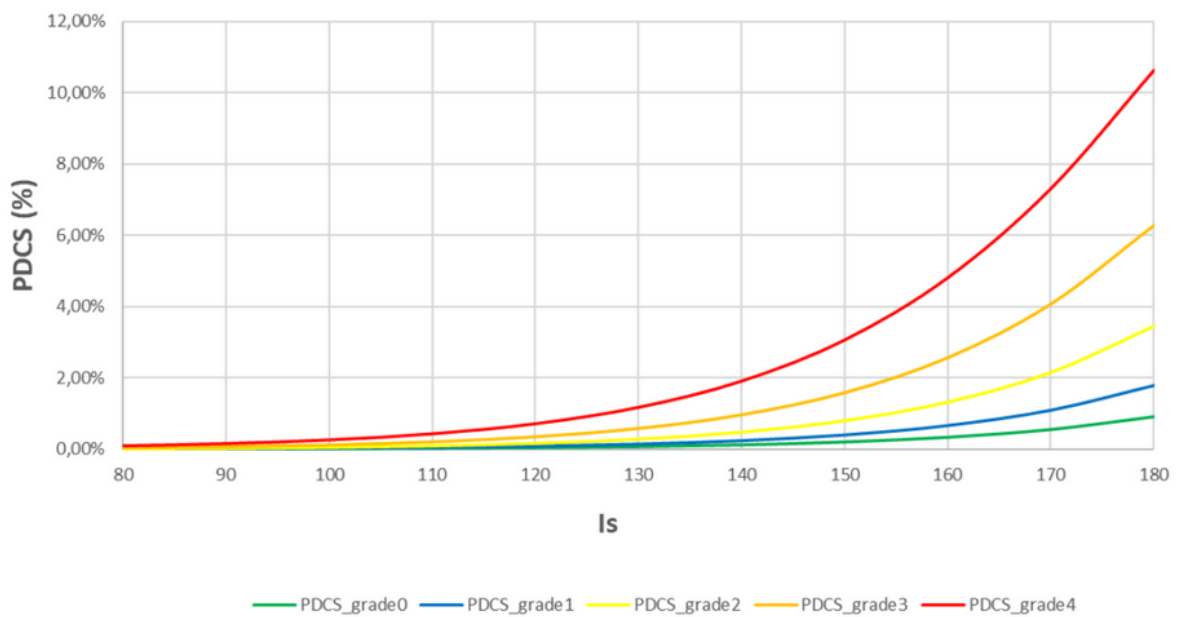
3/ => Il pourra aussi adapter sa désaturation en modifiant de façon intelligente ses paramètres de son décompressimètre par exemple en modifiant et adaptant ses Gradients factors (GF) ce qui sera l'objet du prochain article.

Un dernier facteur est essentiel à considérer dans l'engagement : La vitesse de remontée.

Une Thèse de Daniel Carturian a mis en évidence le rôle de la vitesse de remontée dans le risque d'ADD :

Alors que Haldane préconisait une vitesse de remontée de 9m/mn, des dérives ont eu lieu ultérieurement élevant la possibilité de vitesse de remontée de 15m/mn

L'étude a porté sur 55 plongeurs amateurs masculins dont l'émission de bulles circulantes a été contrôlée après plongée. La méthode classique de détection au doppler continu a été comparée à celle qui associe l'échocardiographie bi-dimensionnelle et le doppler pulse. L'influence sur le dégagement de bulles de la vitesse de remontée et de plusieurs facteurs individuels : l'âge, l'aptitude aérobie (vo 2 max), et les indices de surcharge pondérale que sont le poids, le pourcentage de masse grasse, l'indice de masse corporelle et la surface corporelle ont été étudiés. Les plongeurs ont effectué deux fois la même plongée, en remontant dans un cas à 9m/min, dans l'autre cas à 17m/min. Les différents tests statistiques ont montré que la remontée à 9m/min générerait moins de bulles circulantes que la remontée à 17m/min., et que les effets de l'âge et du vo 2 max étaient prépondérants sur les facteurs de surcharge pondérale. L'effet des facteurs individuels a été renforcé lorsque la remontée était effectuée à 17m/min ($p < 0,05$). Ces résultats confirment les données de la littérature et permettent de conclure qu'une vitesse de remontée lente à 10m/mn offre une meilleure sécurité qu'une vitesse rapide > 15 m/mn, et que les tables de décompression à l'usage des plongeurs sportifs devraient tenir compte des facteurs individuels de susceptibilité, âge et entraînement physique plus que surpoids, à la formation de bulles et aux ADD. Haldane avait raison...



En plongée, le **PDCS (%)** signifie **Pourcentage de Désaturation des Compartiments Saturés**.

C'est un indicateur utilisé dans certaines **tables de plongée** (notamment les **tables MN90**) pour suivre la charge en azote de ton organisme.

- **En clair**

- PDCS = 100 % → compartiments totalement saturés en azote (au niveau maxi autorisé)
- PDCS < 100 % → désaturation en cours
- Plus le PDCS est élevé, plus tu es chargé en azote

🕒 - **À quoi ça sert ?**

Le PDCS sert à :

- calculer les plongées successives
- déterminer les majorations (temps ou profondeur)
- vérifier les intervalles de surface
- rester dans les limites de sécurité (éviter l'accident de décompression)

- **Exemple simple**

- Après une plongée, tu sors avec **PDCS = 80 %**
- Après **1h de surface**, tu redescends à **40 %**
- Tu peux alors planifier une nouvelle plongée avec moins de contraintes

- ? **À retenir**

- Le PDCS ne se devine pas → il se lit dans les tables
- Il ne remplace pas un ordinateur de plongée, mais reste fondamental en formation
- Un PDCS élevé = **prudence accrue**
=> **Un bon plongeur comprend le PDCS,**
=> **un plongeur efficace utilise un ordinateur,**
=> **un plongeur sûr maîtrise les deux.**

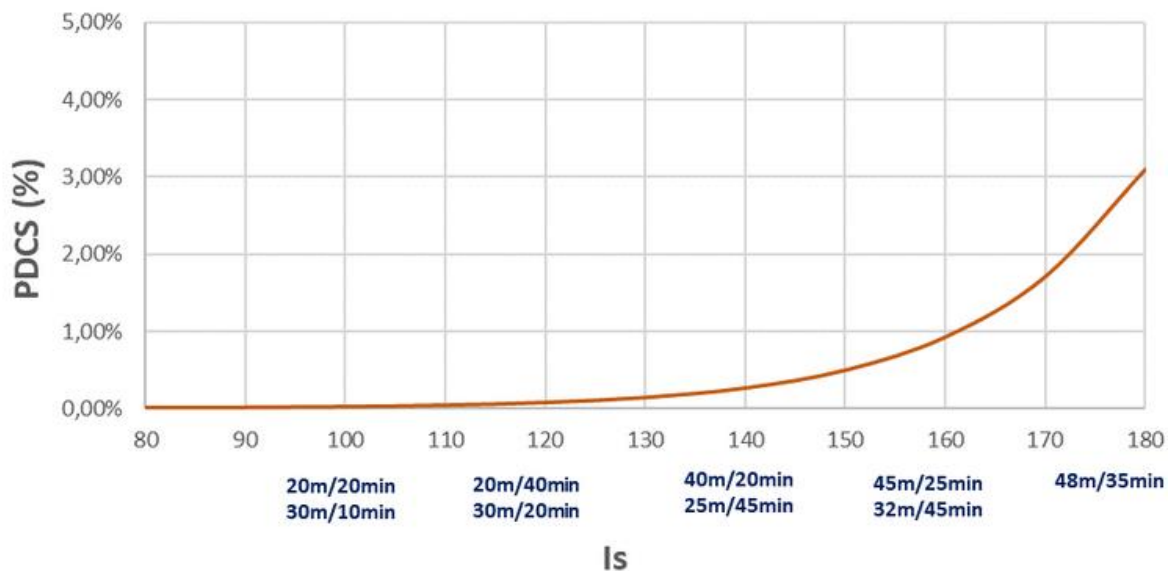
Les tables (PDCS/MN90) représentent :

- un **cadre unique**
- volontairement **pire cas**
- alors que les ordinateurs proposent **des cadres multiples**

Ce graphique montre que la décompression dépend autant du réglage et du modèle que du profil de plongée lui-même.

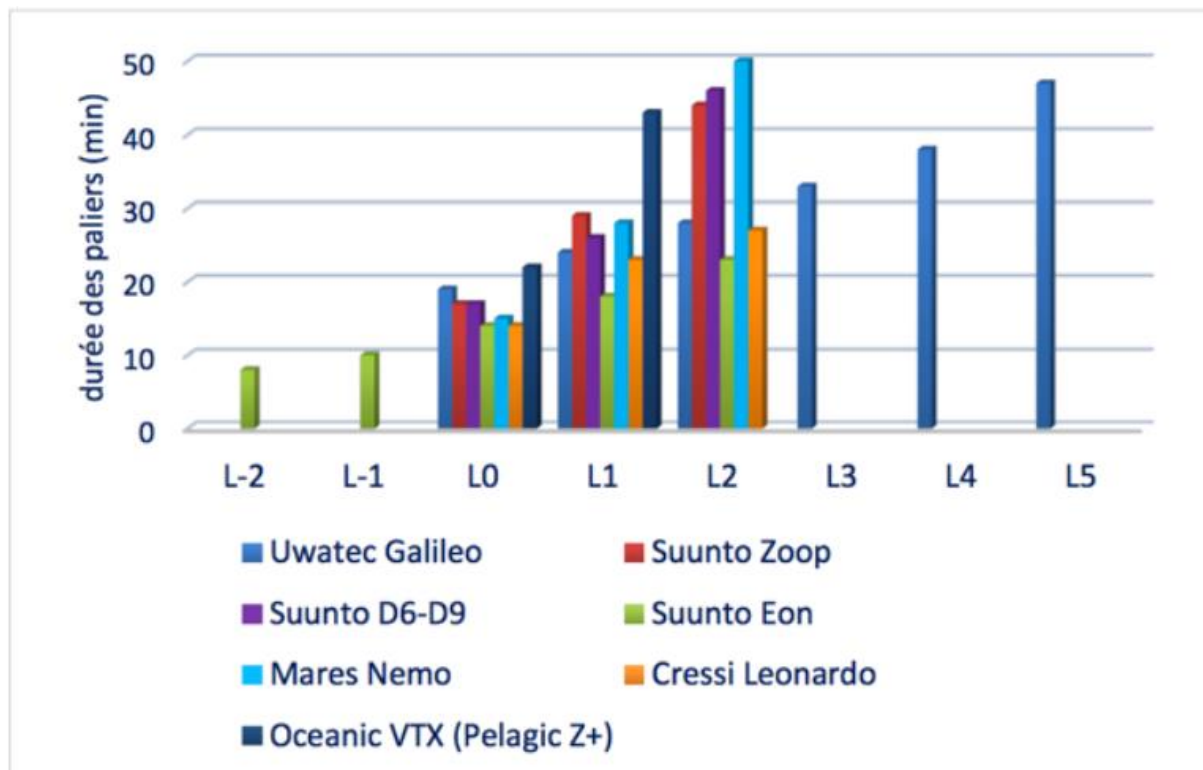
👉 Bon plongeur =

- comprend **pourquoi** son ordi impose des paliers
- sait **adapter son réglage**
- et **ne compare jamais brutalement deux ordinateurs différents**



Comparaison entre différents ordinateurs

Le choix et le réglage de l'ordinateur fait partie de l'engagement au risque anticipé



Interprétation de ce graphique en barres

Axes

- Axe vertical : *durée totale des paliers (en minutes)*
- Axe horizontal : *niveau de conservatisme*
 - L-2 / L-1 → très permissif
 - L0 → réglage "standard"
 - L1 à L5 → de plus en plus conservateur
 - Chaque couleur = **un modèle d'ordinateur différent.**
 - **Pour un même profil de plongée, les ordinateurs peuvent imposer des durées de paliers très différentes, parfois du simple au double.**

Ce n'est pas une erreur, c'est :

- Un choix de modèle mathématique
- Un choix de réglage de conservatisme
- Une philosophie constructeur

Analyse par tendances

- ◇ 1. Plus le conservatisme augmente, plus les paliers explosent

C'est très net :

- entre **L0 et L2**, on gagne facilement **+10 à +20 min de paliers**
- au-delà (L3 → L5), certains ordinateurs deviennent **extrêmement pénalisants**

Le réglage de conservatisme a parfois plus d'impact que la marque elle-même.

- ◇ 2. Tous les ordinateurs ne réagissent pas pareil

Exemples visibles sur le graphe :

- **Uwatec Galileo (bleu)**
 - 👉 très permissif aux niveaux bas,
 - 👉 mais devient **le plus pénalisant** aux niveaux élevés (L3–L5).
- **Suunto (Zoop / D6-D9 / Eon)**
 - 👉 globalement **plus conservateurs dès L0**,
 - 👉 montée plus “progressive” des paliers.
- **Mares / Cressi / Oceanic**
 - 👉 souvent **intermédiaires**,
 - 👉 cohérents avec une plongée loisir “classique”.

- ◇ 3. Aux niveaux négatifs théoriques(L-2 / L-1)

On voit que :

- Certains ordinateurs **suppriment presque les paliers**
- D'autres gardent quand même une pénalité

🔍 Ce que ça prouve (et que les tables illustrent mal)

- Un ordinateur **n'est pas une vérité absolue**
- Deux plongeurs au même profil peuvent :
 - sortir ensemble
 - avoir **10 à 20 min d'écart de paliers**
 - sans qu'aucun ne soit “faux”