



## **Décompression et plongée** **Nouvelles informations issues d'une thèse de Doctorat**

UNIVERSITÉ DE LA MÉDITERRANÉE  
FACULTE DE MÉDECINE DE MARSEILLE

**Vers une modélisation biophysique de la décompression**

**T H È S E**

Présentée et publiquement soutenue devant  
**LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE MARSEILLE**

Le 22 Novembre 2010  
Julien HUGON  
Né le 10 avril 1973

Pour obtenir le grade de DOCTEUR de L'UNIVERSITÉ de la MÉDITERRANÉE

SPÉCIALITÉ : **Sciences de l'Environnement**

- **Les différents modèles de décompression**
- **Proposition d'un nouveau modèle**

## Rappel du principe : saturation et désaturation

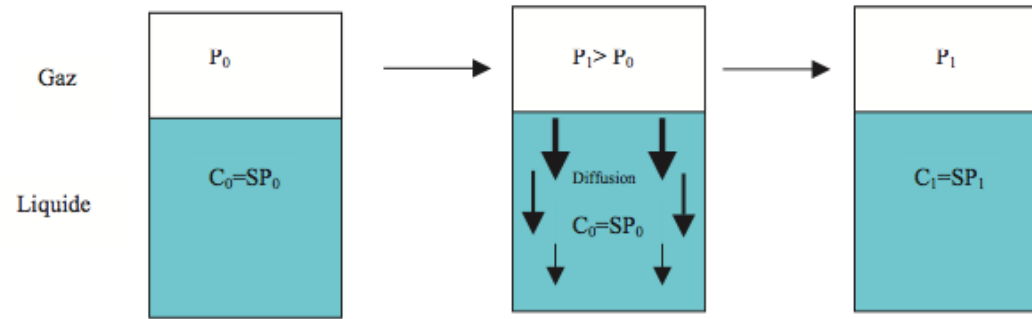


Figure 1 – Phénomène de saturation d'un liquide par un gaz, par diffusion à travers l'interface liquide/gaz

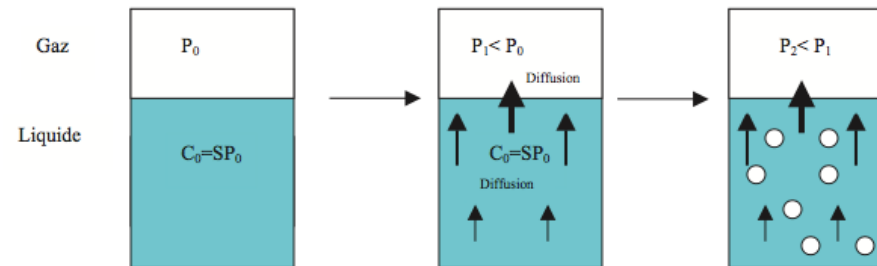


Figure 2 – Phénomène de désaturation d'un liquide avec formation potentielle de bulles à la suite d'une décompression

**Le gaz concerné est l'azote (78 % de l'air) :  
l'oxygène est « consommé » par les cellules, le CO<sub>2</sub> est éliminé au niveau des poumons**

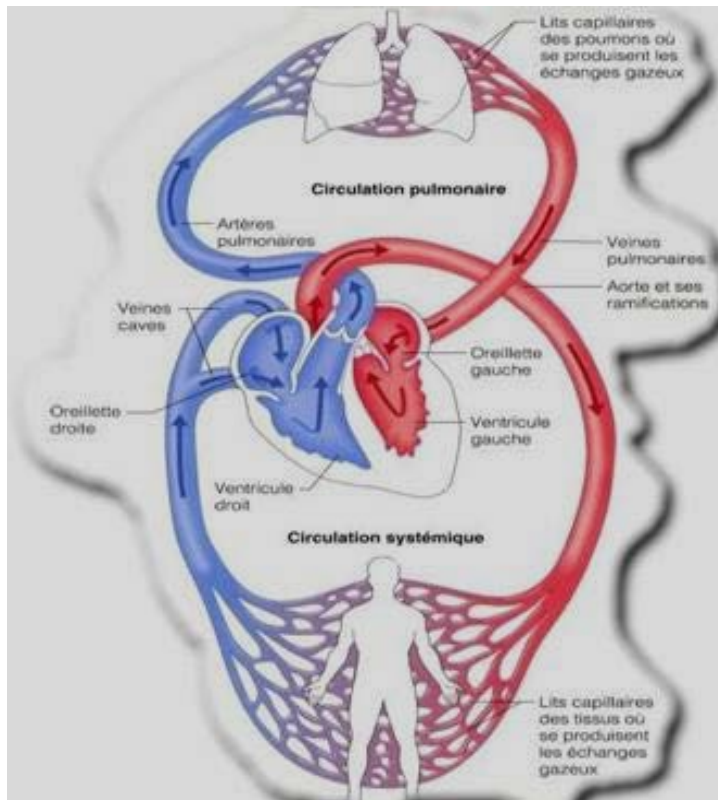
# Rappel de physiologie respiratoire pulmonaire et tissulaire

## Composition de l'air :

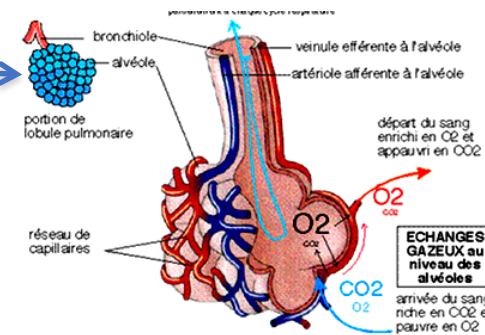
- Azote : 78%- non métabolisé par l'organisme
- O<sub>2</sub>, Dioxygène : 21% - métabolisé par l'organisme
- gaz rares (argon, néon) ; 1% ;
- CO<sub>2</sub> : 0,04%
- H<sub>2</sub>O : 0,46%

## Air alvéolaire :

- Azote : 75%
- O<sub>2</sub> : 13,7%
- CO<sub>2</sub> : 5,2%
- H<sub>2</sub>O : 6,2%

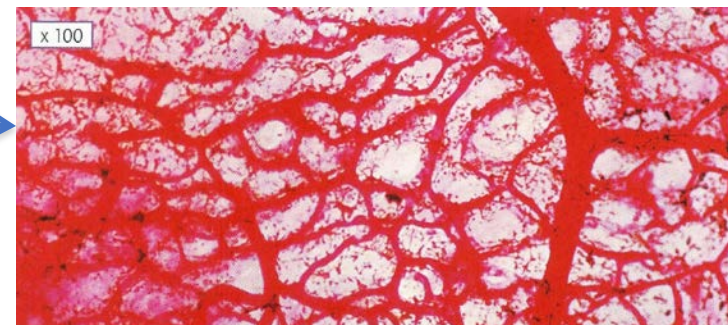


Circulation générale



## **Échanges gazeux pulmonaire (alvéolaire)**

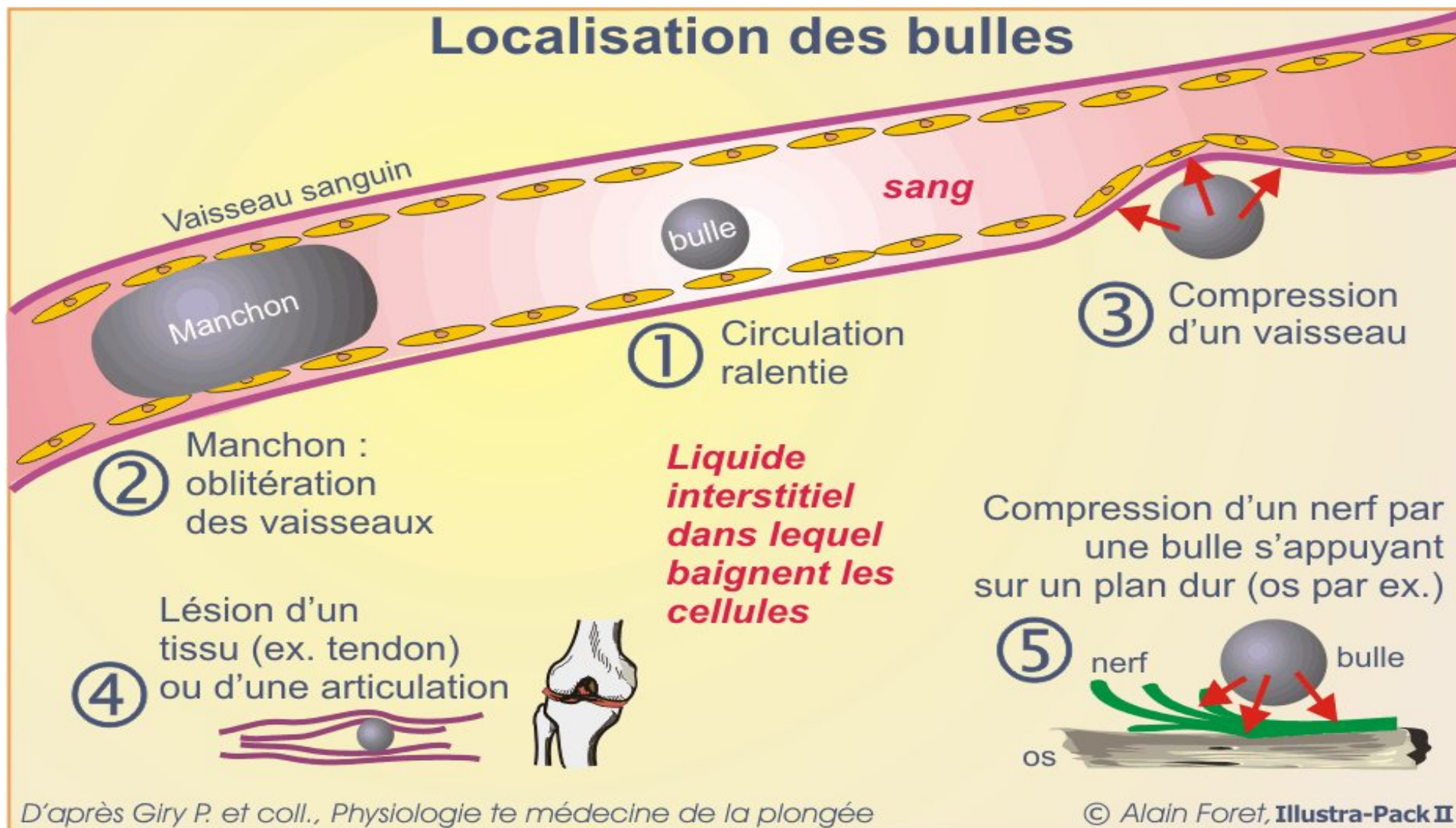
- Charge du sang en O<sub>2</sub>- décharge en CO<sub>2</sub>



## **Echanges gazeux tissulaires : réseaux de capillaires**

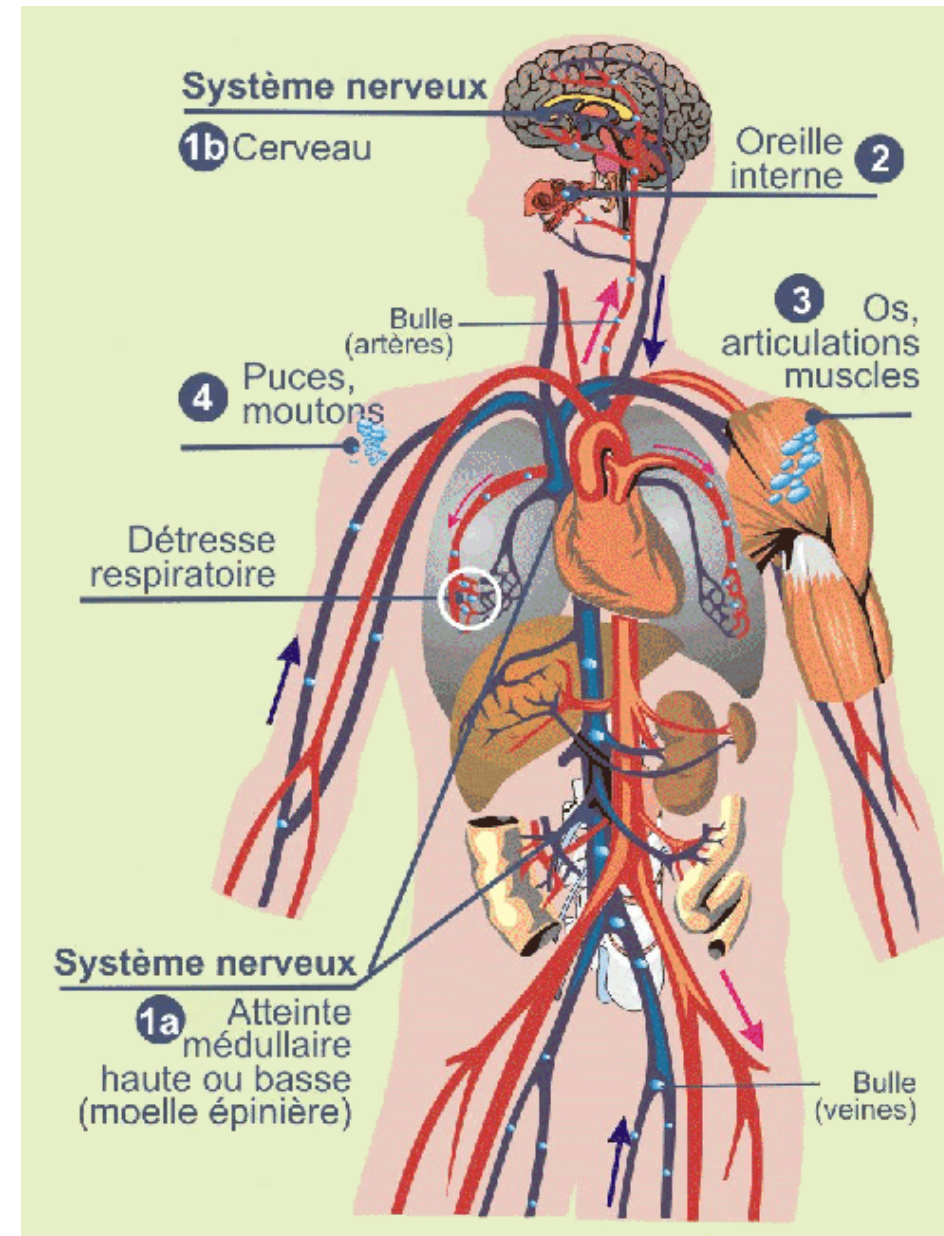
- « décharge » en O<sub>2</sub> de l'hémoglobine
- « charge » en CO<sub>2</sub>

# Localisation des bulles



## Les Accidents de décompression (ADD)

- **Type I (« bénins »)**
  - Asthénie (fatigue) intense
  - Cutanés (30% des ADD)
  - Ostéo-articulaires et musculaires (bends)
- **Type II (« graves »)**
  - Vestibulaires (30% des ADD)
  - Neurologiques : médullaires (30% des ADD) et cérébraux
  - Cardio-respiratoires (chokes)

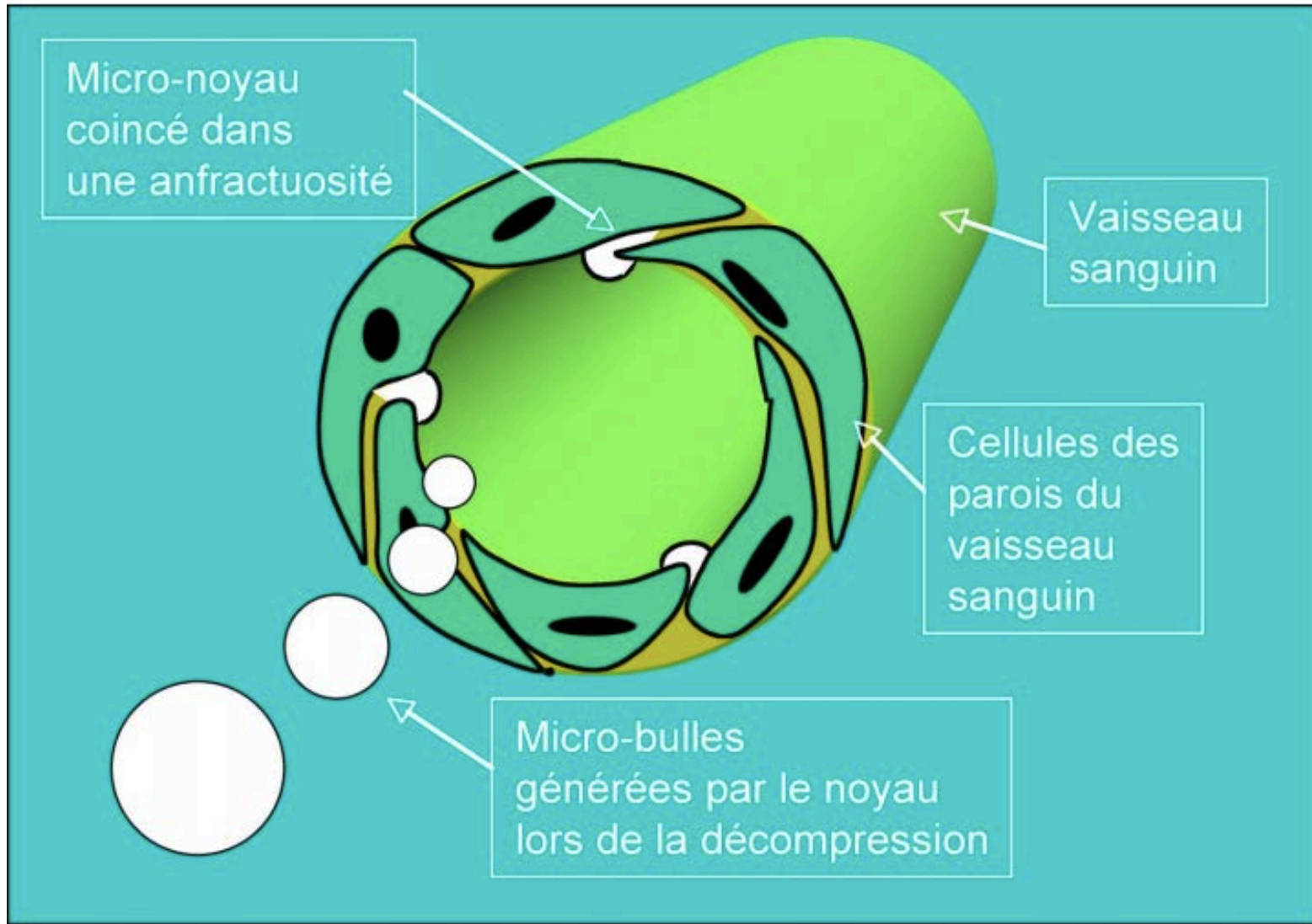


« Naissance » des bulles au contact des « noyaux gazeux »

Image en microscopie électronique d'un vaisseau sanguin





**Les noyaux gazeux** (les « amorces » des bulles) : constitués, en majorité, de  $\text{CO}_2$ , très petits diamètres (quelques  $\mu\text{m}$ )  
Anfractuosités de la surface des vaisseaux, cavitation (fibres musculaires), formation de bulles dans les articulations.



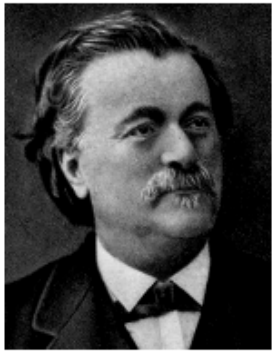
les microbulles se forment à partir de ces noyaux et grossissent par fusion (ou coalescence)

## Notion de tissus et de « compartiments »

Les différents tissus, qui constituent les organes du corps, n'ont pas les mêmes capacités à stocker l'azote :  
On distingue :

- **Les « tissus rapides »** : ils se « saturent » très vite, en quelques minutes  
ils se « chargent » rapidement en N<sub>2</sub>, et ils se désaturent également rapidement,  
 ils sont très irrigués par le système sanguin :
  - Le cœur, le cerveau, le foie ..
- **Les tissus « lents »** : ils se « saturent » et se déchargent en plusieurs heures  
 ils sont moins irrigués par le système sanguin :
  - Le tissu adipeux, les tendons, les ligaments, les os.
- De fait, on peut classer les différents tissus entre ces deux tissus « extrêmes »





Paul Bert ) 1879

Publication de

“La pression barométrique“

## Dés la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, début des études sur la décompression



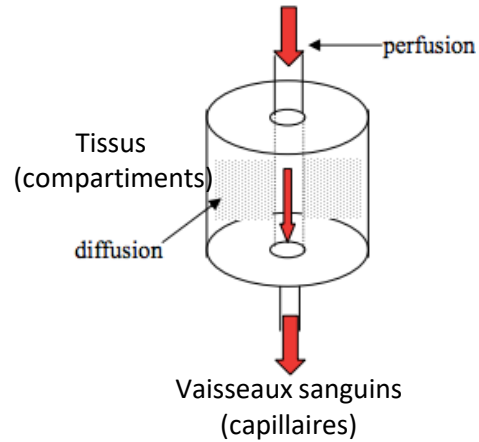
Casque de  
« pied lourd »

**Pour éviter (autant que faire se peut !!) les accidents de décompression :**

→ **Nécessité d'élaborer des protocoles de décompression**

- D'abord à des fins militaires : les plongeurs de bord, les plongeurs démineurs
- Et pour les travailleurs « hyperbares » (ponts, travaux plus profonds, travaux « off shore »)

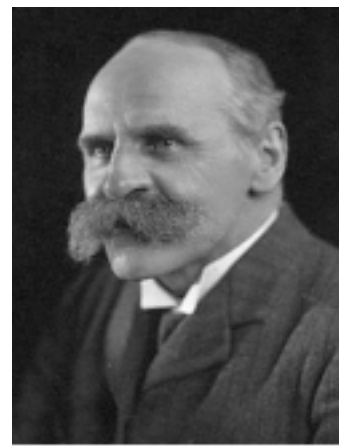
## Les modèles de décompression :



Le premier modèle proposé : Travaux de Haldane, (début du 20ème siècle), physiologiste anglais, à la demande de la Royal Navy.

**Le modèle haldanien (perfusion)** repose sur **4 hypothèses principales** à la suite de ses expérimentations sur les chèvres (il en a tué beaucoup!!) :

- 1 - L'équilibre des pressions au niveau alvéolaire est instantané (perfusion)
- 2 - L'équilibre des pressions au niveau des tissus est également instantané
- 3 - Le corps humain est représenté par **5 régions anatomiques fictives**, appelées compartiments caractérisés par leurs "périodes" (c'est le temps nécessaire pour atteindre la demi-saturation).
- 4 - **La charge et la décharge sont symétriques**, c'est à dire que la phase d'élimination de l'azote est strictement l'inverse de la phase d'absorption



**C'était déjà un grand progrès par rapport aux approches plutôt empiriques de l'époque même si plusieurs hypothèses se sont avérées fausses ou trop simplistes**

## Le modèle haldanien :

- ° Les échanges gazeux **à la décompression** suivent la même loi qu'à **l'augmentation de pression**: le rôle des bulles dans la modification des échanges hémato-tissulaires est négligé
- ° Une **décompression « normale »** ne s'accompagne pas de bulles : l'accident survient quand les bulles apparaissent.
- ° Les bulles apparaissent dans un compartiment lorsque le rapport entre la pression des gaz dissous et la pression hydrostatique ambiante atteint une valeur **"critique »**, la **pression maximale « tolérable »** par ce compartiment.

**Les tables de la Marine nationale  
Les « MN90 » adoptées par la FFESSM**

Les tables MN90 s'appuient sur le modèle de Haldane elles prennent en compte **12 compartiments**

Ces compartiments sont théoriques et ont des période différentes :  
5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 et 120 min.

Les tables ont été élaborées à partir d'une population de plongeurs de référence de la marine nationale ayant les caractéristiques suivantes :

- poids moyen 74 kg plus ou moins 8 kg,
- taille moyenne 175,9 cm plus ou moins 5,7 cm,
- âge moyen 32,3 ans plus ou moins 6,1 ans.

Tissus pris en compte avec leur coefficient de sursaturation critique

	TISSUS											
PERIODES (min)	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120
COEFFICIENT	2,72	2,54	2,38	2,20	2,04	1,82	1,68	1,61	1,58	1,56	1,55	1,54

Coefficient ou seuil critique (Tension tissus/ Pression amb) : au dessus de ce coef, risque d'apparition de bulles  
Le compartiment le plus « lent » a le coefficient le plus faible, c'est donc « le plus sensible »

**Les tables MT92 (ministère du travail )**  
**Modèle haldanien (proches des tables MN90)**

- Tables adoptées par la Comex et répondant aux besoins des travailleurs hyperbares

**7 – Tableau n°2 : Table air/standard simplifiée « m initable air »**

Prof.	Temps maximum au fond en minutes (intervalle avant plongée : 12 heures)													
	165	170	180	195	210	240	-	-	-	-	-	-	-	-
12 m	165	170	180	195	210	240	-	-	-	-	-	-	-	-
15 m	80	90	100	110	115	130	-	-	-	-	-	-	-	-
18 m	50	55	60	70	75	80	-	-	-	-	-	-	-	-
21 m	35	40	45	50	55	60	-	-	-	75	-	-	-	-
24 m	25	30	35	40	45	50	-	-	55	60	-	-	-	-
27 m	20	25	30	33	35	-	-	40	45	48	-	55	-	-
30 m	15	20	25	28	30	-	-	35	38	42	-	47	55	-
33 m	12	15	20	23	-	-	25	30	32	37	-	40	47	-
36 m	10	15	17	20	-	-	22	25	27	32	-	34	40	43
39 m	8	10	15	17	-	-	20	22	24	-	27	30	35	38
42 m	7	10	13	14	-	-	18	20	-	-	24	27	30	33
45 m	6	10	12	13	-	-	15	18	-	-	22	25	28	30
48 m	5	8	10	12	-	-	15	-	-	-	20	23	26	28
51 m	5	7	8	-	-	-	12	-	-	-	18	21	24	25
54 m	-	5	7	-	-	-	10	-	-	-	16	19	-	23
57 m	-	5	6	-	-	-	10	-	-	-	14	17	-	21
60 m	-	-	5	-	-	-	8	-	-	-	12	-	-	18
Paliers	Remontée au premier palier à 12m/min (3 m toutes les 15 secondes)													
12 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
9 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3	5	5
6 m	-	-	-	-	-	-	3	3	3	3	5	7	10	12
3 m	-	3	5	7	10	15	7	12	15	20	15	20	25	25

**Vitesse descente : 30m max ; remontée 9 à 15m/min**

## Les autres modèles

- **Le modèle de Workman**, 1965. Il prend en compte pour chaque compartiment des seuils de sursaturation critique en fonction de la profondeur : tables pour les plongées longues et profondes.

- **Le modèle de Bühlmann (US NAVY)**, 1983, améliorant le modèle de Workman : prise en compte de la pression absolue et la composition de l'air alvéolaire. Ce modèle est utilisé dans les algorithmes de nombreux ordinateurs : **l'Aladin de Uvatec**

- **Le modèle RGBM** ( Reduced Gradient Bubble Model ) 1991, de Bruce Wienke. modèle non haldanien. Peu d'infos (commercialisé), mais. Prise en compte de 9 compartiments

- Dans plusieurs ordinateurs de plongée : **Suunto, Mares, Cressi**

..



**L'Aladin de Uvatec  
distribué par Beuchat**



**Le Vyper de SUUNTO**

## Des ordinateurs de plongée et leur modèle de calcul

Marques	Modèles
<b>ATOMIC</b>	Atomic RGBM
<b>CRESSI</b>	RGBM
<b>HOLLIS</b>	BÜHLMANN ZH-L16C
<b>LIQUIVISION</b>	BÜHLMANN ZH-L16C
<b>MARES</b>	RGBM Mares-Wienke
<b>OCEANIC</b>	Au choix BÜHLMANN PZ+ ou US-Navy DSAT
<b>OSTC</b>	BÜHLMANN ZH-L16C
<b>PETREL</b>	BÜHLMANN ZH-L16C
<b>SCUBAPRO</b>	BÜHLMANN ZH-L8 ADT MB
<b>SUUNTO</b>	Suunto Fused RGBM

## Proposition d'un nouveau modèle « biophysique »

C'est l'objet de la thèse de J. Hugon

Présentée en 2010

Faculté de Médecine de Marseille

Directeur de thèse : Dir. Recherche CNRS Marseille

Co-directeur de thèse : le directeur scientifique de la COMEX

### Les points que se propose d'aborder et d'améliorer l'auteur:

- Les « compartiments » des modèles précédents n'ont aucune réalité anatomique
- **Seuils « critiques » de saturation** (les coefficients) sont (relativement) « empiriques »
- Les échanges gazeux entre les « tissus » et au sein même des tissus sont loin de la réalité
- Problèmes non résolus avec les modèles existants : les plongées “ profondes-courtes ”

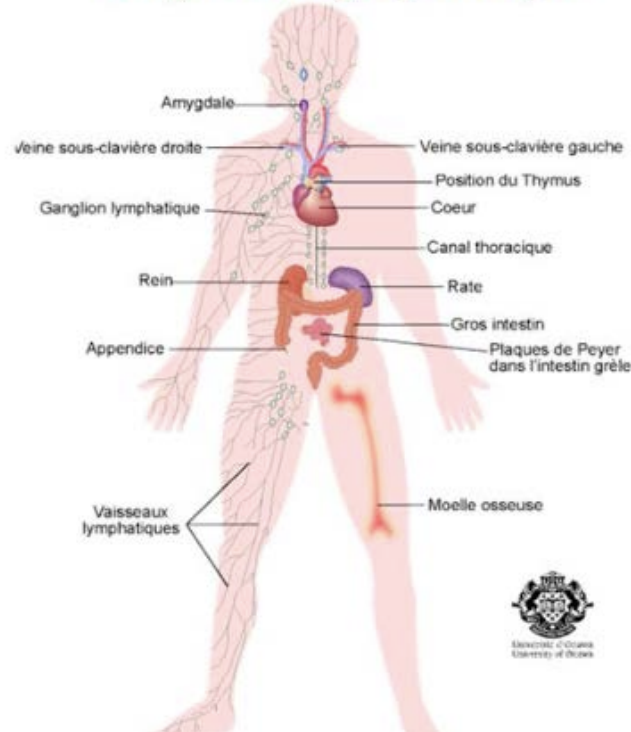


## Les éléments nouveaux abordés dans ce travail

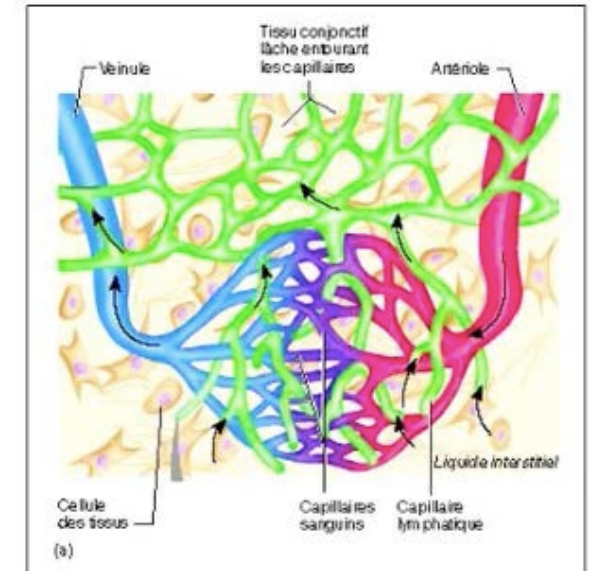
### 1- Prise en compte du système lymphatique qui « double » le système sanguin

Irrigue tout le corps, lieu d'échange avec le sang bien que le volume de la lymphe soit moindre

### Le système lymphatique



**Le système lymphatique :**  
Un compartiment important qui joue également un rôle dans les échanges gazeux



## 2- Une analyse plus précise des propriétés des différents tissus

- En fonction de ce qui est connu pour chacun d'eux avec des moyens d'investigation nouveaux

## 3- L'importance de la "fenêtre Oxygène"

C'est la différence entre la somme des tensions oxygène et CO2 du côté artériel et du côté veineux

**Fenêtre oxygène =  $(TO_2+TCO_2)_{\text{artériel}} - (TO_2+TCO_2)_{\text{veineux}}$**

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)**

Ce type de « déco à l'oxygène » est expérimenté dans ce travail

## Méthode d'étude :

- **83 plongées** effectuées par l'auteur à **différentes profondeurs (18 à 42m)** en **combi humide** (chaque point est répété au moins 3 fois)
- Analyse des « bulles générées » par mesure à l'aide d'un **appareillage Doppler** après chaque plongée à des **temps différents** après les plongées



Figure 49 – Système Doppler utilisé pour la détection de bulles au niveau précordial

**Le Détecteur de Bulles Doppler a pour but de mettre en évidence l'apparition de bulles dans le sang au niveau du cœur droit, endroit où conflue la totalité de la circulation veineuse de retour.**

- **Plongées « carrées »** et remontée aux paliers selon **la table MT92**  
Analyse à la sortie des « bulles » générées **par l'appareillage Doppler.**

- **Application du code « Spencer »** pour « apprécier » le niveau de génération des bulles mesurées par l'appareillage Doppler :

**Code Spencer**

Grade 0	Absence totale de signaux de bulles
Grade 1	Quelques signaux de bulles espacés, mais la majorité des cycles cardiaques en est dépourvue
Grade 2	Signaux de bulles isolés ou en groupe dans moins de la moitié des cycles cardiaques
Grade 3	Pratiquement tous les cycles cardiaques contiennent des signaux de bulles mais ces derniers ne couvrent pas les bruits normaux du cœur
Grade 4	Flux continu de signaux de bulles couvrant les bruits normaux du cœur

**Tableau 17 – Cotation des signaux bulles détectés au niveau précordial selon le code Spencer**

**- Quand respiration de mélange suroxygéné, la PO2 ne dépasse jamais 1,5 bar « au fond »**

## RESULTATS ET PROPOSITIONS DE NOUVEAUX MODELES Issus de ces expérimentations

Deux modèles sont proposés dans cette étude. Ils concernent les principaux types d'ADD :

- Le modèle « articulaire » : cas des accidents articulaires (relativement bénins, réversibles)
- Le modèle « neurologique » : cas des accidents neurologiques (plus graves) avec deux sous-modèles

# 1- Le modèle articulaire

ADD essentiellement au niveau des genoux et des épaules.

Si pas de recompression les douleurs augmentent dans les heures qui suivent la déco, jusqu'à un pic, puis s'estompent

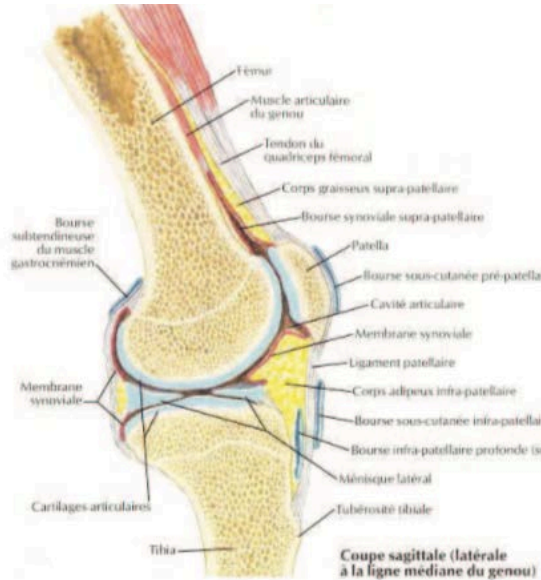


Figure 30 – Coupe sagittale du genou

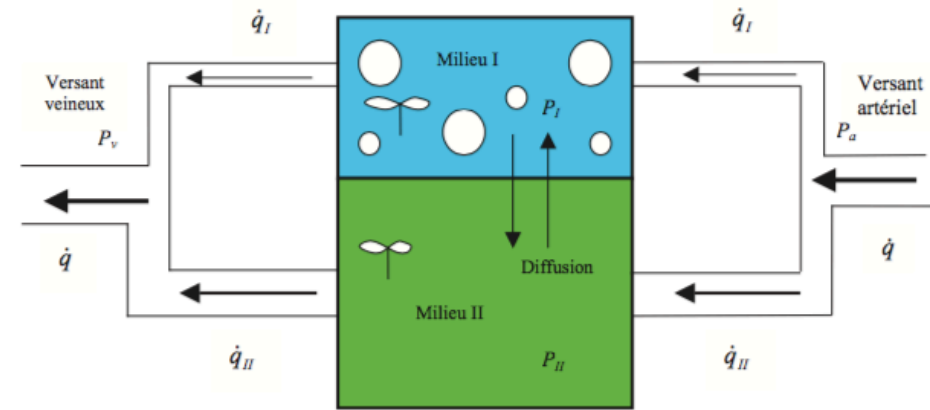


Figure 29 – Schéma de principe du modèle articulaire : mise en évidence d'une zone articulaire cible décomposée en deux milieux échangeant du gaz inerte entre eux par diffusion et avec le sang par perfusion

Il est considéré deux milieux échangeant avec le sang par **perfusion** et entre eux **par diffusion**.

Le milieu II « alimentant » le milieu I en bulles. Ces deux milieux ayant des propriétés différentes.

**Le modèle mathématique n'est pas détaillé**

## Principales conclusions

La réduction des risques de ce type d'ADD demande **des temps de décompression longs** ou des périodes de **décompression à l'oxygène pur** lors des paliers proches de la surface longs également, **notamment lors des plongées profondes**

## Les 2 modèles neurologiques

Dans le premier modèle, l'ADD provient des **bulles circulantes dans le sang**.

Deux tissus essentiellement sont à l'origine de ces microbulles :

- **les muscles** (par cavitation)
- **les tissus adipeux** (à fortes affinité pour l'azote).
- Les bulles passent dans la circulation veineuse et sont (ou pas) « filtrées » par les poumons

Si il y a passage du filtre pulmonaire ou si shunt (**FOP ou voie lymphatique**) apparition de bulles dans le versant artériel

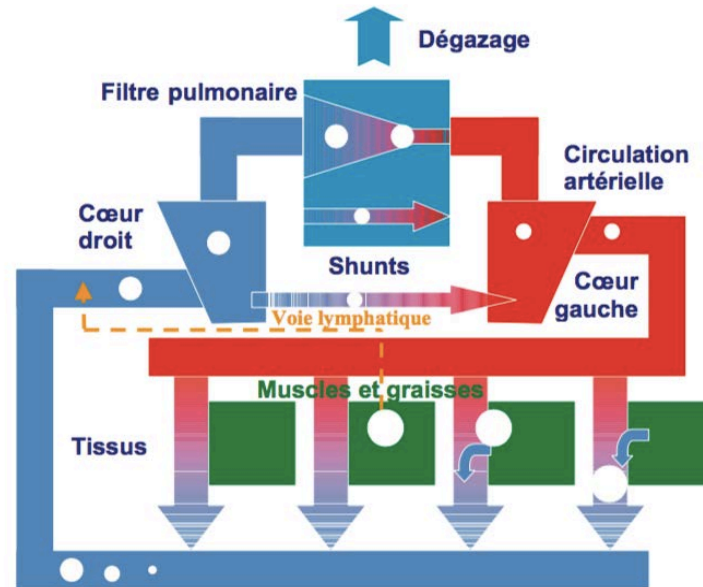


Figure 43 – Schéma de principe du modèle neurologique décrivant les événements précurseurs conduisant potentiellement à un accident de décompression

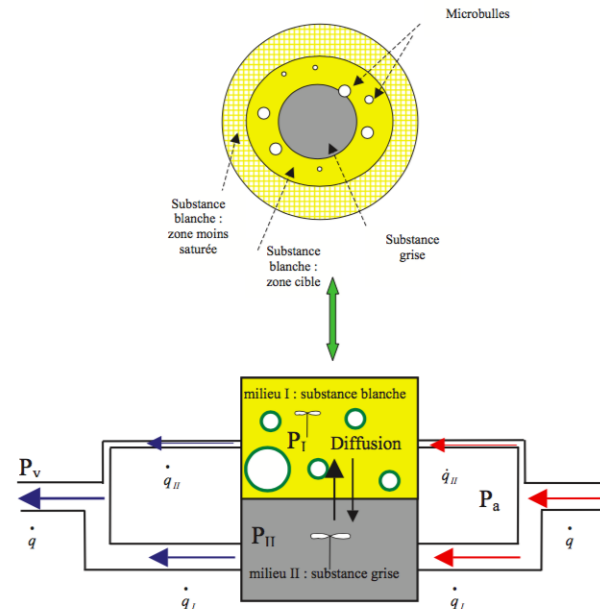
Le modèle considère **plusieurs « compartiments »** dans les **tissus musculaire et adipeux**



## Modèle 2 :

Un deuxième modèle neurologique est proposé avec plusieurs compartiments dans le système nerveux qui peuvent **directement générer des bulles** dans ce tissu :

- La « **substance blanche** » qui constitue les membranes, (l'enveloppe), des neurones et qui est de nature lipidique (réservoir à N<sub>2</sub> et lent) avec **deux zones différentes**
- La « **substance grise** » qui est composée des neurones eux-mêmes (compartiment rapide)



## Le modèle mathématique est donc complexe :

Il comprend une série d'équations pour rendre compte des « comportements » des microbulles dans ces différents compartiments !!

$$\frac{dR_r}{dt} = \frac{\mathfrak{RT} \left[ \begin{array}{l} D_{I_{N_2}} S_{I_{N_2}} (P_{I_{N_2}} - P_{b_{r-1,N_2}}) \left( \frac{1}{R_r} + \sqrt{\frac{k_{I_{N_2}}}{D_{I_{N_2}}}} \right) + \\ D_{I_{He}} S_{I_{He}} (P_{I_{He}} - P_{b_{r-1,He}}) \left( \frac{1}{R_r} + \sqrt{\frac{k_{I_{He}}}{D_{I_{He}}}} \right) \end{array} \right] - \frac{R_r}{3} \frac{dP_{amb}}{dt}}{P_{amb} + \frac{4\gamma}{3R_r} + \Pi - P_{H_2O}}$$

$$\frac{dP_{b_{r-1,N_2}}}{dt} = \frac{3}{R_r} \left[ \mathfrak{RT} D_{I_{N_2}} S_{I_{N_2}} (P_{I_{N_2}} - P_{b_{r-1,N_2}}) \left( \frac{1}{R_r} + \sqrt{\frac{k_{I_{N_2}}}{D_{I_{N_2}}}} \right) - P_{b_{r-1,N_2}} \frac{dR_r}{dt} \right]$$

**Je vous rassure, j'ai moi aussi du mal à suivre !!**

Mais il est plus complexe et plus complet que le modèle initial (simple perfusion) de Haldane et il rend mieux compte de la réalité biologique !!!

## L'écoute Doppler a permis de constater des éléments intéressants :

- **Pic de bulles** (grade Spencer 3 ou 4) observé entre **20 à 30 min** après le retour surface
- Quand plongée à l'air il y a parfois apparition de pic après 2 heures (implication tissus lent (graisse))
- Quand **décompression à l'oxygène pur**, le pic de bulles est plus précoce et sa durée plus faible
- Effet modéré de la vitesse de remontée
- Quand **exercice au fond** (palmage) : l'intensité du pic et sa durée sont plus importantes
- Quand **effort post-plongée** : le pic est plus précoce et sa durée plus importante

# Les modèles proposés dans le cas des ADD neurologiques

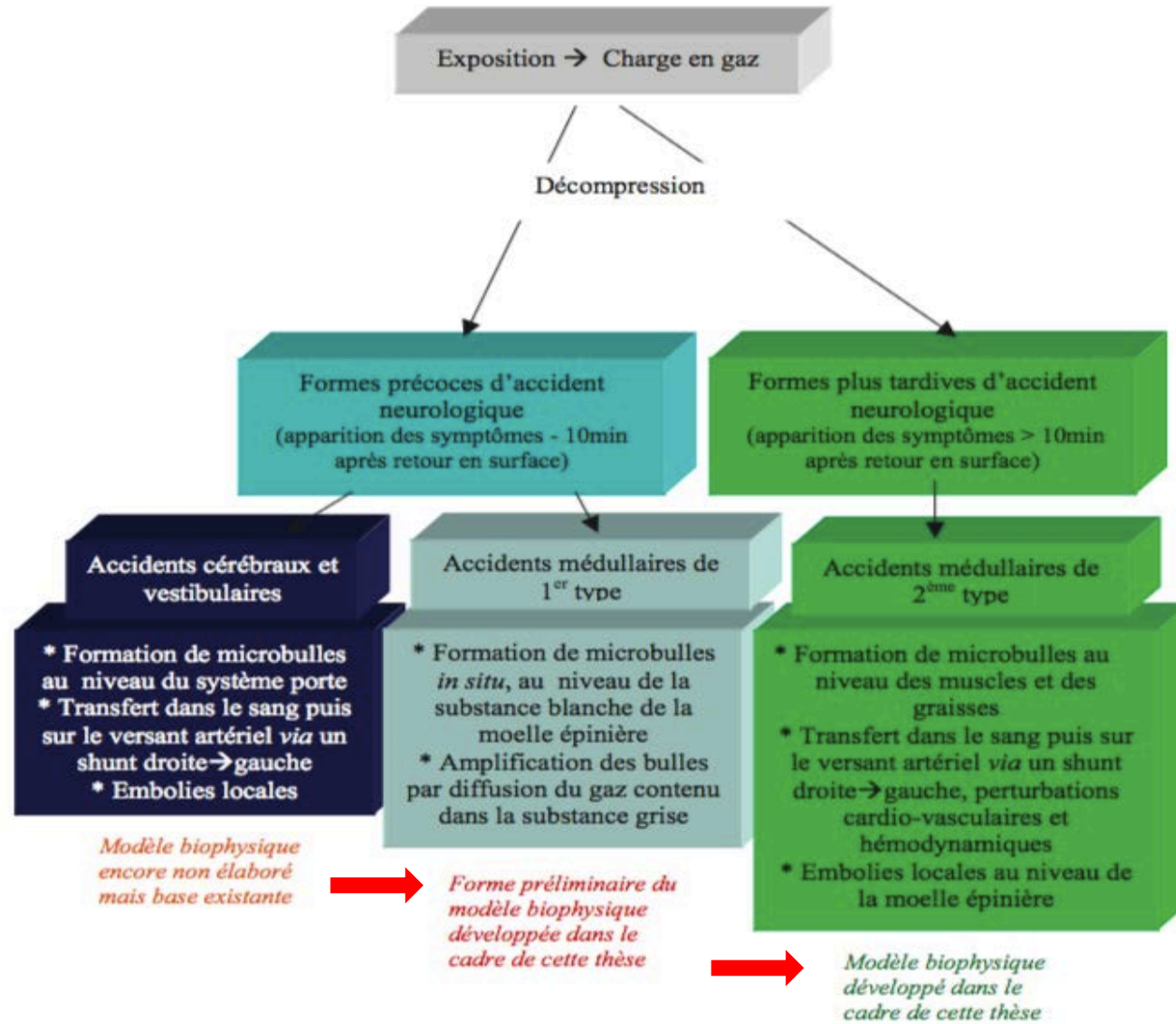


Figure 67 – Mécanismes proposés pour les différentes formes d'accidents neurologiques & modèles biophysiques associés

**Conclusions de ces travaux**  
***Il faut cependant rester prudent***

Les résultats et les enseignements qui peuvent en découler sont **encore à valider par des travaux complémentaires.**

Mais il apparaît que :

**- pour prévenir les accidents articulaires :**

- Diminution des risques par des **durées de décompression importantes**  
(plus importantes que les tables MN90 ?)

- **Décompression prolongée à l'oxygène pur** efficace (notamment aux paliers proches de la surface )

**- Pour prévenir les accidents neurologiques :**

- L'introduction de paliers profonds ne diminue pas le risque

- La décompression à l'oxygène pur aux paliers s'avère très efficace

- Des remontées directes en surface s'avèrent très dangereuses

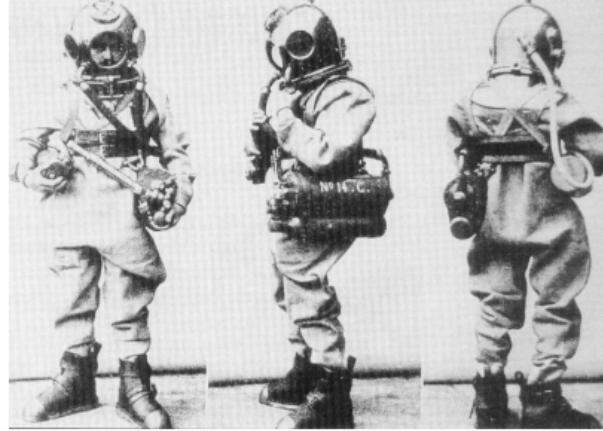
**Enfin une notion nouvelle importante :**  
**Nécessité d'une « personnalisation » plus importante des protocoles de plongée**  
**Notion de « groupe de plongeurs » ?**  
**(Certains ordinateurs récents le proposent)**

**A terme ce type de travaux pourrait améliorer les protocoles de décompression  
y compris pour des activités comme les nôtres car les modèles sont plus élaborés  
que la base des tables MN90**

## Documents de référence

- **Vers une modélisation biophysique de la décompression.**Thèse de Doctotrat. J. Hugon. Univ. Marseille, 2010
- **The prevention of compressed-air illness .** Boycott, AE, Damant, GCC, et Haldane, JS, Journal of Hygien, Volume 8, (1908), pp 342-443).
- **Les modèles de décompression « Approfondissement théorie MF2 ».** E. Bernier 2018
- **Utilisation des tables MT92.** E. Bernier, V. Houchard, A. Foret, et J.O., 2009
- **Accidents de décompression Niveau 4.** B. Robert , 2008
- **Histoire de bulles, nouveauté en matière de décompression.** B. Schittly, (med. Fed), colloque FFESSM, 2015
- **Histoire de la plongée.** Mauro Zürcher 2002

# Club Arverne de Plongée



Merci pour votre attention !!

