

# Formation théorique Niveau IV



# Formation théorique Niveau IV / Sommaire

## Aujourd'hui ..

- Réglementation
- Physique appliquée à la plongée
- Système nerveux et plongée
- **Les accidents toxiques en plongée**
- Système circulatoire et plongée
- Système respiratoire et plongée
- Sphère ORL et plongée
- Eléments de calcul de tables
- Utilisation des tables de plongées
- Procédures particulières de décompression
- Ordinateur de plongée et planification
- Matériel de plongée – le détendeur
- Matériel de plongée – compresseur - bouteille
- Matériel de navigation, de sécurité et matelotage
- Orienter et conduire sa palanquée en sécurité
- Etre un guide de la mer connaissant le milieu



## Préambule

Comme nous l'avons vu précédemment, le système nerveux contrôle l'organisme de l'être humain.

Son rôle est de gérer le fragile équilibre du corps humain. Il s'adapte aux conditions d'évolution du plongeur qui doit en retour veiller à ce que rien ne perturbe ou ne détruise cet équilibre.

Les accidents toxiques ont pour origines la modification de la pression partielle des gaz que respire le plongeur.

# La narcose

## La narcose(\*)

La narcose aussi appelé « ivresse des profondeurs » est un phénomène, bien connu des plongeurs profonds, dû à l'excès d'azote et qui perturbe le fonctionnement du système nerveux central (SNC), provoque une déstabilisation du comportement et une perte plus ou moins importante de repères.

Les causes de la narcose sont encore mal connues, mais on admet communément qu'elles sont liées à la présence de gaz narcotiques inertes (**azote**, xénon, argon, krypton, hélium) dans le sang.

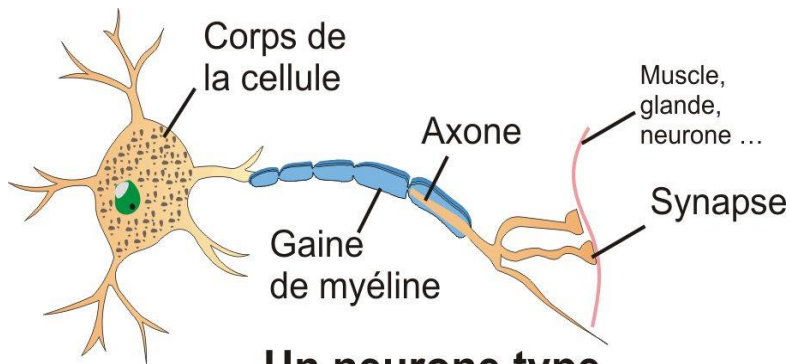
Les gaz à effets narcotiques sont biochimiquement inertes : ils n'interagissent pas en modifiant la chimie cellulaire.

**Ils auraient, à priori, un simple effet mécanique.**

(\*) du grec « narké » qui signifie sommeil

## La narcose à l'azote

Deux mécanismes sont suspectés, résultant tout deux en une modification de la perméabilité de la membrane cellulaire



**Un neurone type**

© Alain Foret, Illustr-Pack II

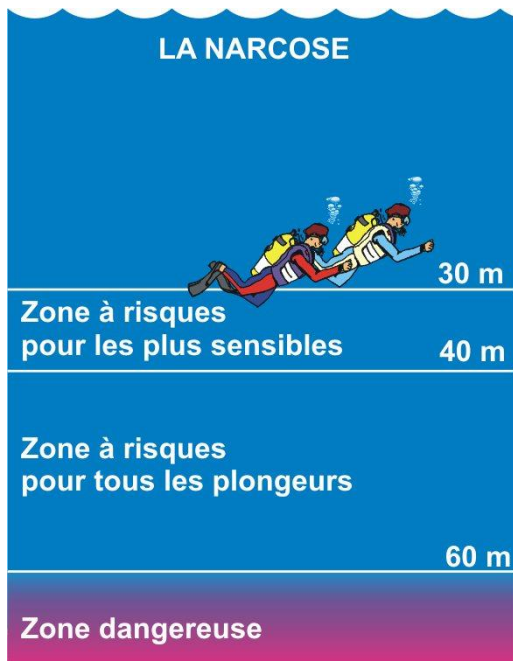
1- les gaz se diffuseraient dans la double couche de lipides formant la membrane cellulaire, et la distendraient.  
*(hypothèse lipidique)*

2- suspectée dans les années 60 : les gaz interagiraient directement sur les protéines de la membrane cellulaire  
*(hypothèse protéique)*

La narcose provoquerait un ralentissement des influx nerveux dans le SNC qui serait à l'origine d'une baisse des capacités de raisonnement et de concentration

## La narcose à l'azote

La plupart des narcoses surviennent lors de plongées profondes. Elles peuvent apparaître à partir de 30 mètres et deviennent systématiques à partir de 60 mètres.



© Alain Foret, Illustration-Pack II

La pression partielle d'azote ( $PpN_2$ ) augmente proportionnellement à la pression absolue (*loi de Dalton*).

Les expériences menées ont permis de déterminer que la  $PpN_2$  maximum admissible par l'être humain était de **5,6 bar**.

L'air en surface (1bar) comprend 80% d'azote, donc la loi de Dalton nous indique que la profondeur maximum est de :

$$5,6 \text{ b} / 0,80 = 7 \text{ bar soit } 60 \text{ mètres}$$

La  $PpN_2$  max et la  $PpO_2$  max sont fixées par le code du sport et définissent les limites de la plongée en France

## La narcose à l'azote

La narcose doit être distinguée du *syndrome nerveux des hautes pressions* qui provoque, à de grandes profondeurs (supérieure à 100 m), des troubles du comportement identiques malgré l'absence de gaz à effet narcotique.

Certains facteurs sont considérés comme aggravants et favorisants :



© Copyright Pierre Fouillet pour Passion-Plongée.com

- froid,
- consommation d'alcool,
- drogue,
- stress,
- fatigue,
- embonpoint,
- vitesse de descente,
- conditions de plongée,
- médicaments
- etc.



## Les effets de la narcose à l'azote

La nature est injuste, la sensibilité de chacun est différente et les troubles engendrés par la narcoses seront différents d'un individu à l'autre voir entre deux plongées.

Dés 30 mètres pour certains ou au delà pour d'autres. Mais à 60 mètres TOUT le monde en souffre.



En raison de son apparition progressive, la narcose est quasi impossible à détecter par le plongeur qui en est victime.

Le signe conventionnel n'est donc que très rarement utilisé.

**Bien qu'il ne soit pas possible d'empêcher les effets de la narcose, les plongées répétées à grandes profondeurs en atténuent et en retardent l'apparition.**

## Les effets de la narcose à l'azote

Parmi les effets de la narcose on peut citer :

- euphorie,
- angoisse,
- retournement sur soi,
- discours intérieur,
- troubles de la vision et notamment vision à *effet tunnel*
- disparition de la notion de durée,
- sensation de dialogue intérieur, de solitude,
- lecture répétée des instruments de plongée sans interprétation correcte
- retard de réaction, signes répétitifs.
- troubles de la mémoire, de l'attention, de la perception
- perte de repères
- etc.

## La narcose vue par le Guide de Palanquée

L'apparition de signes tels que :

- Non réponse répétée à un signes
- Réponse ou attitude incohérente
- non respect des consignes (profondeur, direction, objectif, etc.)
- agitation
- passivité

doit alerter le GP et le pousser à assister immédiatement le plongeur même si celui-ci refuse l'assistance.

**Le GP doit alors remonter immédiatement le plongeur de quelques mètres**

*en veillant à ne pas oublier les autres membres de la palanquée.*



## La narcose

Les effets de la narcose disparaissent rapidement dès que la  $PpN_2$  revient à une valeur acceptable.

**Dans tous le cas, la plongée doit être interrompue**  
en respectant la procédure de décompression.

La plupart du temps la narcose provoque une amnésie chez le plongeur qui ne se souviendra de rien après coup.

## Prévention de la narcose

La prévention de la narcose passe par le simple bon sens.

- Un entrainement régulier et une adaptation progressive à la profondeur limite l'apparition de la narcose.
- Limiter la vitesse de descente (30m/s) et descendre « tête en haut » si besoin.
- Limiter les efforts
- Avoir une bonne forme physique
- Savoir tenir compte des facteurs favorisants

## Prévention de la narcose par le GP

### Prévoir et anticiper

-Le dialogue et l'observation en surface peuvent fournir au GP des indications précieuses pour **prévoir un accident potentiel** dut à une narcose (ex: fatigue évidente + plongée profonde)

- la communication et l'observation régulière des membres de la palanquée, pendant la plongée, permettront au GP **d'anticiper une narcose grave** en réagissant aux premiers symptômes

# L'hyperoxie

## Ni trop ni trop peu

L'air que nous respirons est composé de 79 % d'Azote ( $N_2$ ) de 20.9% d'Oxygène ( $O_2$ ) et de 0.1% de gaz rare (*argon, krypton, xenon, néon*).

L'oxygène est indispensable à la vie mais doit être respiré dans de juste proportion faute de quoi il manque ou devient toxique pour l'organisme.

La pression partielle d'oxygène ( **$PpO_2$  maximum**) admise par le corps humain est de 1,6 bar, c'est la limite fixée par le code du sport.

**En deçà de 0,16 bar**, le SNC ne reçoit plus suffisamment d'oxygène pour fonctionner normalement.





## L'O<sub>2</sub> en plongée

L'air que nous respirons en surface est dit « **Normoxique** » tant que sa Pp est comprise **entre 0,17 bar et 0,5 bar.**

Lorsque la PpO<sub>2</sub> dépasse 0,5 bar l'oxygène devient progressivement nocif, on parle alors d'**hyperoxie.**

**Le code du sport fixe le seuil hyperoxique à 1,6 bar de PpO<sub>2</sub>,**  
ce qui représente une profondeur de **66 m**, (1,6 / 0,21= 7,6 bar Pabs)  
Pour une plongée à l'air

Ou

**Une profondeur maximum de 6 m pour une décompression à l'oxygène pur.**  
(pallier à l'O<sub>2</sub>)

## L'O<sub>2</sub> en plongée

L'effet nocif de l'oxygène provient des propriétés chimiques des radicaux libres (\*) de l'O<sub>2</sub>. Ces radicaux libres sont très réactifs et peuvent altérer nos cellules s'ils deviennent trop nombreux.

Il existe un mécanisme de régulation du taux de radicaux libres, mais ce mécanisme peut être dépassé lors d'une trop grande présence d'oxygène dans le sang.

Des troubles apparaissent lorsque le SNC est exposé à une PpO<sub>2</sub> supérieur à la normale.

Cet effet **neurotoxique** de l'oxygène est appelé « **Effet Paul BERT** » du nom du chercheur l'ayant mis en évidence.

**Du fait de la limite à 60 m imposée par la PpN<sub>2</sub> (azote) maximum,  
le plongée à l'air ne subit pas cet effet**



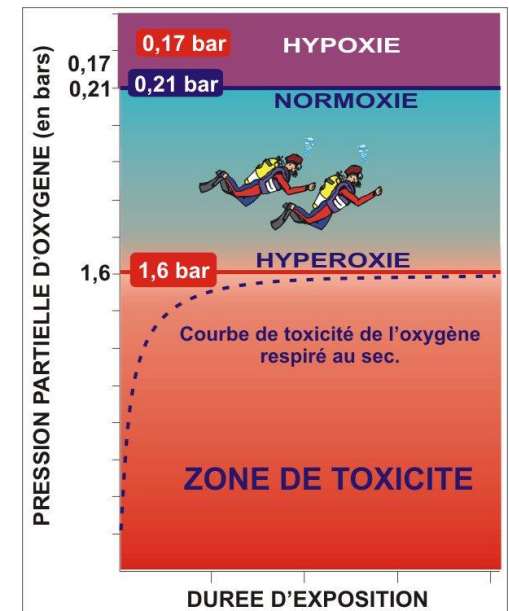
## Le risque hyperoxique en plongée

Il existe cependant deux cas dans lequel le risque hyperoxique est présent

- Le premier concerne la plongée aux mélanges tel le Nitrox
- Le second concerne la réalisation de pallier à O<sub>2</sub> pur.

La sensibilité de chaque individu est très différente et peut être conditionnée par un ou plusieurs facteurs favorisant (froid, chaud, stress, fatigue)

l'apparition de la crise hyperoxique peut survenir après une exposition de quelques minutes à une PpO<sub>2</sub> supérieure à 1,6 bar.



© Alain Foret, Illustra-Pack II

## La crise Hyperoxique (Effet Paul BERT)

Les signes avant coureurs peuvent être divers :

**Spasmes, nausée, anxiété, confusion, troubles de la vue, euphorie,**

ils constituent l'avant garde de la crise hyperoxique. A ce stade la crise est réversible rapidement en diminuant la  $PpO_2$ . Malheureusement **les signes annonciateurs sont rarement visibles** ou ne sont pas perçus par le plongeur.

Puis, la crise intervient et se déroule en générale en 3 Phases :

- Phase d'apnée tonique (30s à 2 mn)
- Phase convulsive ou clonique (2 à 3 mn)
- Phase résolutive (5 à 30 mn)

## La crise Hyperoxique (Effet Paul BERT)

### Phase d'apnée tonique (30s à 2 mn) :

Contractions musculaires généralisées, arrêt ventilatoire éventuel et/ou une perte de connaissance.

**Il ne faut pas remonter la victime à ce moment sous peine de l'exposer à une surpression pulmonaire due au blocage de la glotte**

## La crise Hyperoxique (Effet Paul BERT)

Phase convulsive ou clonique (2 à 3 mn) :

Convulsions similaires à une crise d'épilepsie, ventilation irrégulière.

**on peut alors remonter la victime en ayant une attention particulière sur son expiration**

(Risque de Surpression pulmonaire ou de noyade)

## La crise Hyperoxique (Effet Paul BERT)

### Phase résolutive (5 à 30 mn) :

relâchement musculaire progressif, reprise progressive de la conscience, signes de confusion, voir d'agitation.

Dans tous les cas il est nécessaire, en raison des **risques de SP**, d'attendre la phase Clonique pour débiter l'assistance et la remontée.

**Il est impératif de maintenir l'embout de l'assisté ou l'octopus en bouche pour prévenir tout risque de noyade lors de la reprise de conscience**

Afin d'anticiper l'apparition éventuels de réactions violentes, la prise utilisée doit assurer la sécurité de l'assisté et de l'assistant (prises arrière ou latérales)

## La crise Hyperoxique

L'effet **Lorrain SMITH** (*James Lorrain Smith, physiologue, 1862-1931*)

L'exposition prolongée ( > 2 heures) à une pression partielle d'oxygène supérieur à 0,5 bar peut provoquer une inflammation du surfactant (poumons) ou des alvéoles pulmonaires.

Cette phase peut être suivi d'un Œdème aigu du poumon entraînant des difficultés respiratoires importantes

Signes avant-coureurs:

**face rose, difficultés respiratoires, toux, brûlures pulmonaires.**



## Prévention de la crise Hyperoxique

- Dans le cadre de la plongée à l'air avec décompression à l'oxygène pur :

**Ne jamais réaliser de palier à l'O<sub>2</sub> à plus de 6 mètres**

En cas de plongée profonde nécessitant des paliers à 9 mètres, ou plus , ceux-ci doivent impérativement être réalisé en totalité à l'air

- Dans le cadre de la plongée aux mélanges (Nitrox, trimix, etc.)

**Vérifier la teneur en O<sub>2</sub> du mélange utilisé et ne jamais dépasser la profondeur autorisée par celui-ci (PpO<sub>2</sub> max : 1,6 b)**

Limiter les trop longues exposition à l'O<sub>2</sub> (*Effet Lorrain Smith*)

**Toujours plonger sur un fond** dont la profondeur est compatible avec le mélange utilisé.

## L' Hyperoxique et le Guide de Palanquée

En France la FFESSM propose une « qualification Nitrox », à partir du niveau I.

Les mélanges Nitrox sont identifier par deux chiffres : **32/68**, **36/64**, **40/60**, etc.

**Ces deux chiffres indiquent respectivement la PpO<sub>2</sub> et la PpN<sub>2</sub> du mélange utilisé.**

- Le GP peut, si il dispose de la qualification Nitrox confirmé, encadrer des « plongeurs Nitrox », alors que lui-même plonge à l'air,
- Le GP peut également plonger au Nitrox alors que les plongeurs utilisent de l'air, sous réserve qu'il puisse assurer la sécurité de la palanquée.

Dans tous les cas le GP doit être capable:

- vérifier la profondeur plancher autorisée par le mélange,
- déterminer le mélange à utiliser en fonction de la profondeur maximum prévue,
- calculer la profondeur équivalente « air »

## Calcul de la profondeur plancher

### Calcul de la profondeur plancher pour un mélange de type 36/44

PpO<sub>2</sub> du mélange = 36% soit 0,36 b, (PpN<sub>2</sub> = 44% soit 0,44 b)  
PpO<sub>2</sub> Max = 1,6 b

Donc :  $P_{abs} = P_{pO_2max} / P_{pO_2mélange}$

Soit :  $1,6 / 0,36 = 4,44 \text{ b}$

**Donc la profondeur plancher sera de 34 mètres**

## Vérification d'un mélange Nitrox

Calcul du mélange pour une profondeur de 40 m

A 40 mètres, la Pression absolue est de 5 bars

En divisant la Pp maximum d'O<sub>2</sub> par la Pabs on obtient la PpO<sub>2</sub> autorisée

Soit :

$$1,6 / 5 = 0,32 (PpO_2)$$

**Le mélange utilisé sera donc au maximum un 32/68**

## Calcul de la profondeur air équivalente

Pour différentes raison, (*ordinateur air par exemple*) il peut être nécessaire lors d'une plongée Nitrox de calculer la décompression en utilisant les tables de plongée air.

Dés lors que l'on parle de décompression ce n'est plus l'oxygène mais l'**azote** qui doit être pris en compte dans le calcul de la profondeur équivalente.

Dans le cas précédent nous avons utilisé un mélange **32/68** pour un profondeur plancher de **40 m**  
(Le chiffre 68 représente la PpN<sub>2</sub> de ce mélange).

A 40m (5bars) la PpN<sub>2</sub> est de : **5 x 0,68 = 3,4 bars**

Lors d'une plongée à l'air (**N<sub>2</sub>:79%**), à quelle profondeur trouverons nous 3,4 bars de PpN<sub>2</sub> ?:

Pabs air = **3,4 / 0,79 = 4,3 bar** soit **33 mètres**.

En terme de saturation une plongée à 40 m au Nitrox 32/68 est équivalent à une plongée à 33 mètres à l'air

# L'hypoxie



## L'hypoxie

L'oxygène est le carburant du corps, l'hypoxie intervient lorsque la quantité d'O<sub>2</sub> disponible n'est plus suffisant pour son fonctionnement normal.

Il faut distinguer hypoxie d'altitude (Hypoxie hypobare) provoquée par la raréfaction de l'air (mais ou les proportions d'O<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub> sont conservés), de l'Hypoxie Normobare qui peut intervenir en plongée.

Dés que l'apport en oxygène cesse (*apnée, panne d'air*) ou diminue (*apnée, PpO<sub>2</sub> < 0,16 bar*) le corps tente de trouver des solutions (*accélération de la ventilation par exemple*).

L'apport insuffisant en O<sub>2</sub> favorise l'essoufflement



## La syncope hypoxique

En deçà d'une certaine valeur, propre à chacun, le SNC déclenche un plan d'urgence dont l'objectif est de préserver les organes essentiels (cerveau et cœur).

La conséquence de ce mécanisme est la perte de connaissance brutale (*syncope*) sans signaux avant coureurs.

Le plongeur ne dispose d'aucun moyen d'action du fait de l'absence de symptôme.

**La prévention et le respect de la réglementation (\*) sont donc les seuls moyens d'éviter cet accident dont la finalité peut être la mort.**



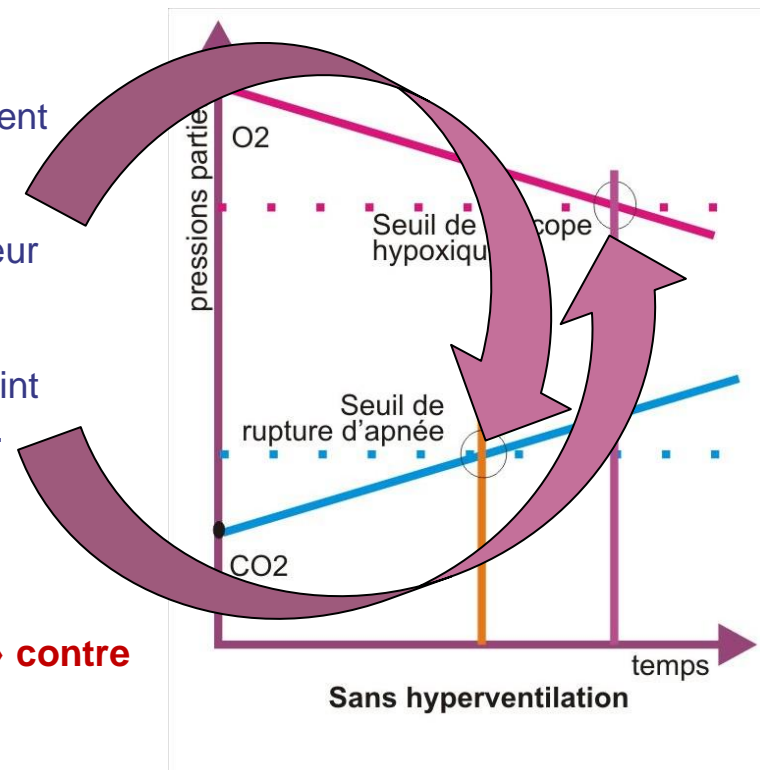
## Mécanisme de la syncope hypoxique en apnée

Lors d'une apnée « normale », après une simple inspiration forcée, le taux d'O<sub>2</sub> diminue régulièrement tandis que celui de CO<sub>2</sub> s'accroît.

Quand un certain taux de CO<sub>2</sub> est atteint le plongeur ressent le besoin d'arrêter son apnée.

Dans ces conditions, le taux de CO<sub>2</sub> limite est atteint AVANT que le taux d'O<sub>2</sub> soit dangereusement bas.

**Dans cette situation le plongeur est « protégé » contre la syncope anoxique**

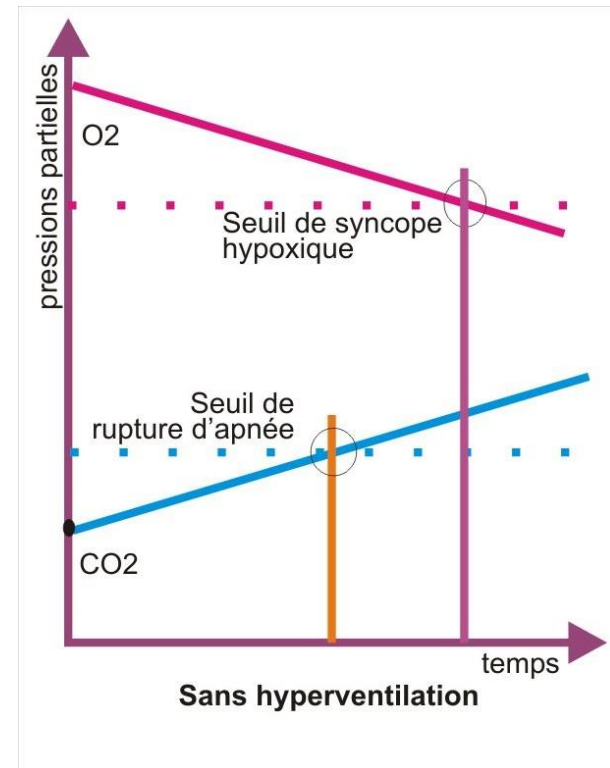


## Mécanisme de la syncope hypoxique en apnée



L'envie de respirer provient d'un **EXCES DE CO2** qui provoque une « soif d'air »,

**PAS d'un MANQUE d'oxygène !**

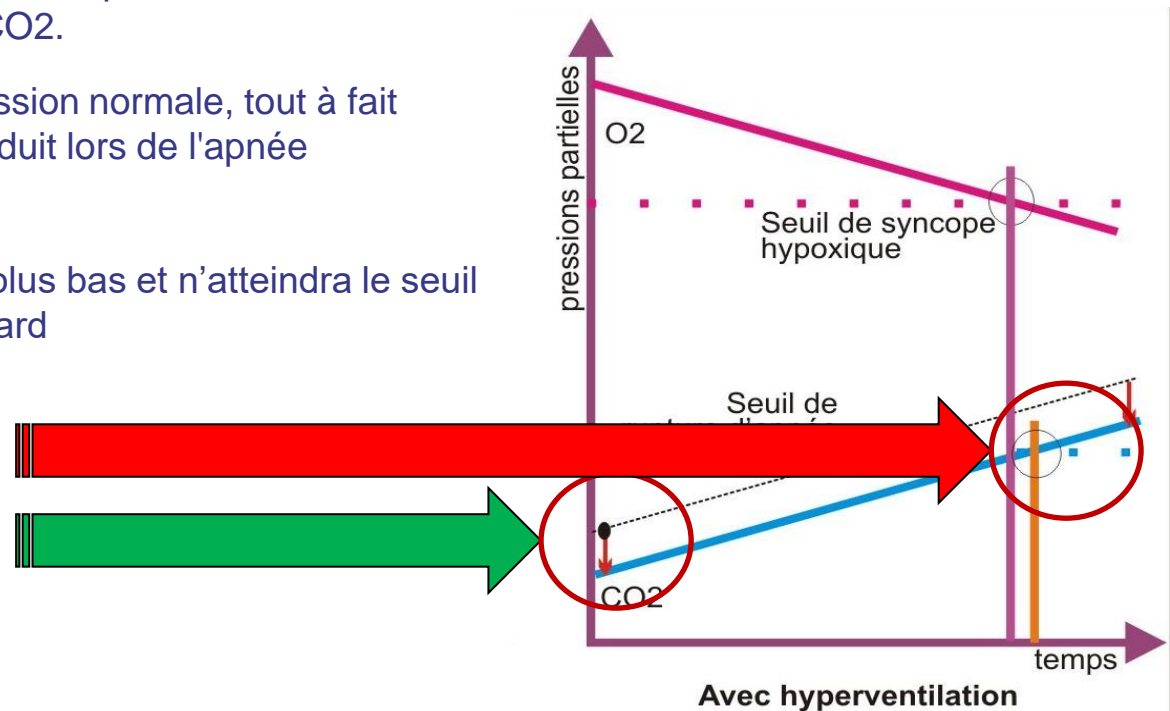


## Mécanisme de la syncope hypoxique en apnée

En pratiquant l'**hyperventilation** l'apnéiste **abaisse anormalement** son taux de CO<sub>2</sub>.

Le taux de CO<sub>2</sub> a une progression normale, tout à fait comparable à celle qui se produit lors de l'apnée sans hyper ventilation.

Par contre, comme il part de plus bas et n'atteindra le seuil de rupture d'apnée que plus tard



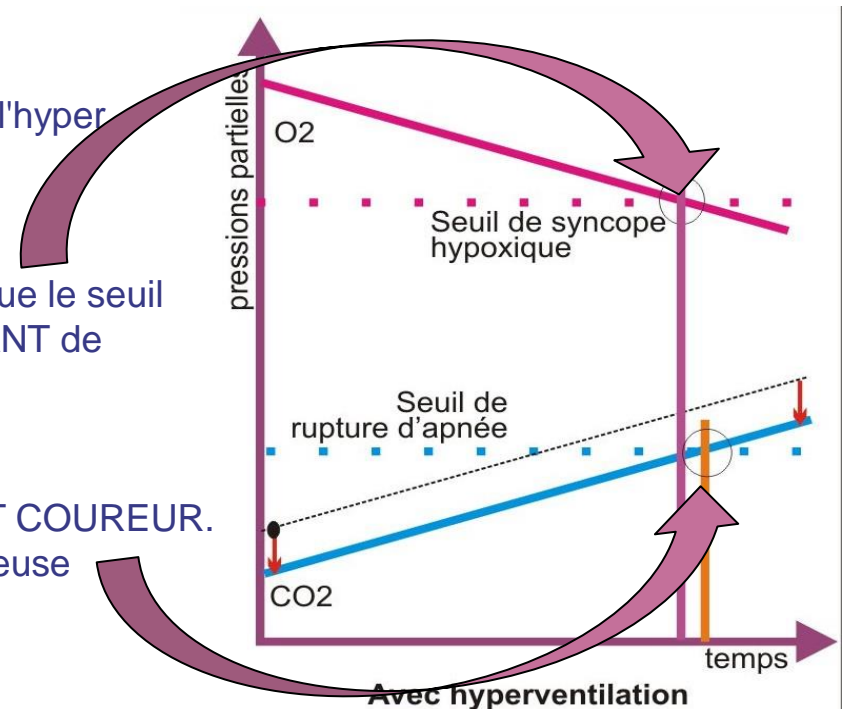
© Alain Foret, Illustration II

## Mécanisme de la syncope hypoxique en apnée

Mais au cours du temps d'apnée « gagnée » grâce à l'hyper ventilation, la consommation d'O<sub>2</sub> ne s'arrête pas.

Le taux d'O<sub>2</sub> diminue et dans ce cas, il est possible que le seuil minimum d'O<sub>2</sub> provoquant la syncope soit atteint AVANT de ressentir le besoin d'arrêter l'apnée.

Cette syncope survient SANS AUCUN SIGNE AVANT COUREUR.  
C'est ce qui la rend particulièrement dangereuse



© Alain Foret, Illustra-Pack II

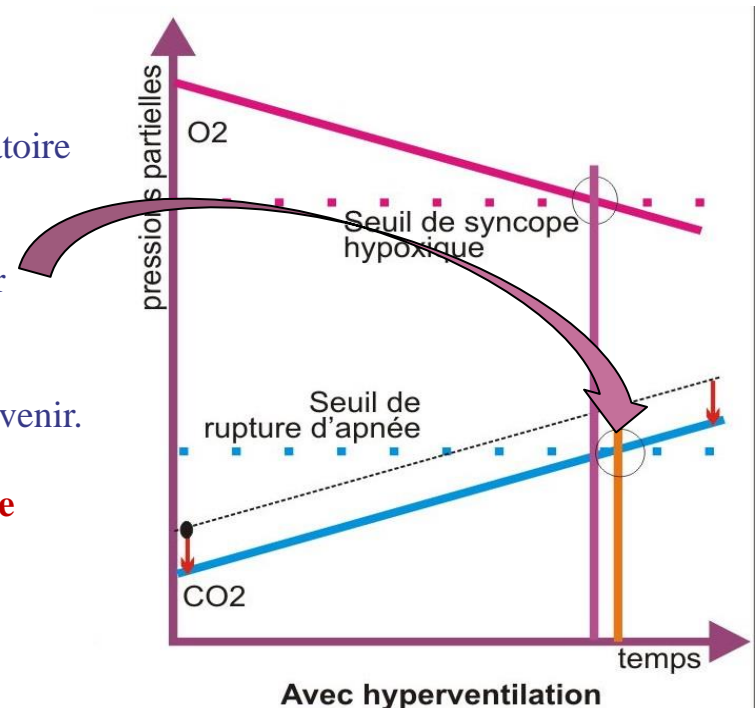
## Mécanisme de la syncope hypoxique en apnée

La syncope anoxique est normalement suivie d'une reprise inspiratoire spontanée quelques secondes après la perte de conscience .

En effet, pendant cette période, la Pp CO<sub>2</sub> continue à monter pour atteindre le seuil de reprise inspiratoire.

La syncope elle-même ne laisse pas de séquelles, ni même de souvenir.

**Ce mécanisme est la principale cause de noyade en apnée**



© Alain Foret, Illustr-Pack II

## Le Rendez vous syncopale des 7 mètres



## Le Rendez vous syncopale des 7 mètres

Cet accident survient à la remontée lors d'une apnée profonde.

Si la cause principale est l'anoxie, d'autres facteurs sont associés à l'origine de ce type de syncope:

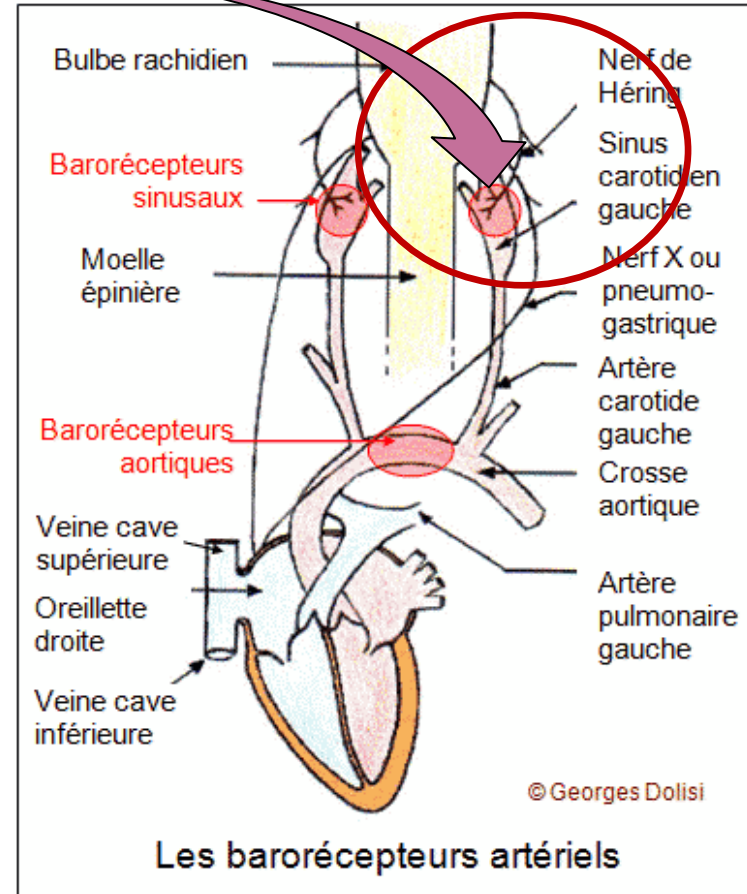
- l'hyperventilation et ses conséquences.
- la pression hydrostatique modifiée, à la descente, la Pp de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub>, entraînant une **impression de confort pouvant inciter à prolonger dangereusement l'apnée.**
- par contre la PpO<sub>2</sub> va chuter rapidement à la remontée
- la position du corps, tête en bas à la descente, puis en haut à la remontée, le regard tourné vers la surface, entraîne une **diminution de l'irrigation cérébrale.**
- la **stimulation du sinus carotidien(\*)** par les mouvements de la tête peut entraîner une **syncope vasovagale.**
- la **fatigue, le stress, le froid, l'hypoglycémie.**

## Le sinus carotidien

Le corps contient des « Barorécepteurs » qui sont en fait des capteurs de pression et de chaleur, ils informent le SNC.

Le corps contient également des Chémorécepteurs permettant le contrôle de la concentration sanguine en gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) et en dioxygène ( $\text{O}_2$ ).

Le **sinus carotidien** comporte ces deux organes qui sont en fait des terminaisons nerveuses du nerf de Héring (nerf sensitif)





## Prévention

La syncope anoxique intervient sans signes avant coureur, la prévention passe par une bonne hygiène de vie et le respect de la réglementation et des procédures prévues.



**Le bon sens et la sécurité impose là encore de ne jamais plongée seul, tant dans le cadre de plongées scaphandre que dans celui des plongées en apnée.**

## La plongée au recycleur



## La plongée au recycleur

Les recycleurs, comme leurs noms l'indiquent sont des dispositifs capables de recycler l'air expiré par le plongeur en « capturant » le gaz carbonique.

Ils conservent par ailleurs les gaz inertes ainsi que l'oxygène non consommé qui est complété par une quantité d'oxygène supplémentaire destinée à compenser l'oxygène consommé par le plongeur.

Le mélange ainsi obtenu est réinjecté dans le circuit de ventilation pour un nouveau cycle.



## Les recycleurs à circuit semi fermé

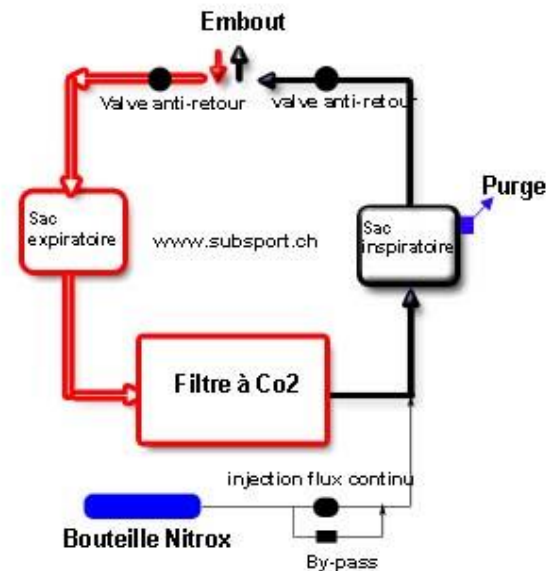
Il existe deux types de recycleurs :

Le premier dit « **recycleur à circuit semi fermé** » utilise un mélange préfabriqué (Nitrox le plus souvent) qui est injecté en continu dans le circuit de ventilation.

Le surplus de gaz est évacué par la purge (circuit semi fermé)

Le Gaz carbonique est « capturé » dans un filtre, en général fait de chaux sodée qui en réaction provoque de la chaleur et de l'humidité.

### SCR principe



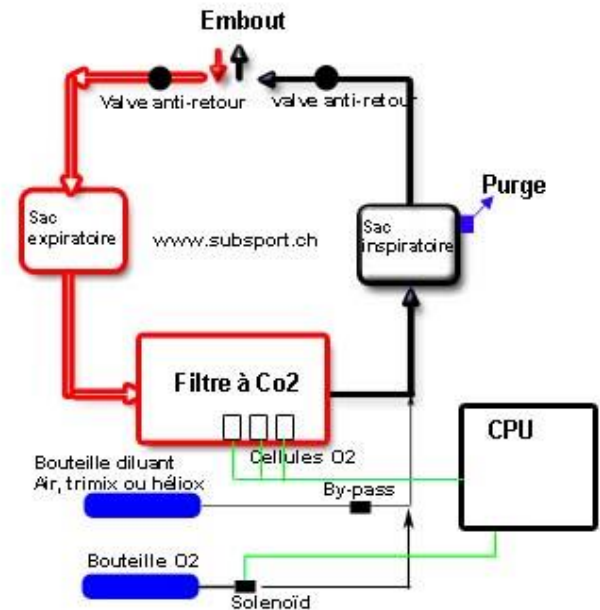
## Les recycleurs à circuit fermé

Le second dit « **recycleur à circuit fermé** » ( CCR) reprend le principe général des recycleurs à circuit semi fermé pour ce qui concerne le Co2 et le cycle de traitement.

**La similitude s'arrête cependant là.**

Le CCR utilise de l'O2 pur et un diluant (air, trimix, héliox) dont les quantités réinjecté sont calculées en temps réel par un ordinateur, qui analyse en permanence la composition de l'air expiré.

CCR principe



## Les recycleurs et le code du sport

La plongée aux recycleurs est accessible :

- A partir du niveau I dans le cas d'appareil de type « Recycleur à circuit semi fermé » Nitrox
- A partir du niveau III dans tous les autres cas.

Dans tous les cas l'appareil utilisé doit être muni d'un dispositif(\*) permettant au plongeur de vérifier que la PpO<sub>2</sub> du gaz respiré est bien comprise entre les limites maximum et minimum définies par le code du sport.



(\*) oxyjauge

# L'essoufflement



**L'essoufflement est également un accident toxique.**

**Pour des raisons pédagogiques son mécanisme sera détaillé lors de l'étude du système respiratoire.**



## La prochaine fois ...

- Réglementations
- Physique appliquée à la plongée
- Système nerveux et plongée
- Les accidents toxiques en plongée
- **Système circulatoire et plongée**
- Système respiratoire et plongée
- Sphère ORL et plongée
- Éléments de calcul de tables
- Utilisation des tables de plongées
- Procédures particulières de décompression
- Ordinateur de plongée et planification
- Matériel de plongée – le détendeur
- Matériel de plongée – compresseur - bouteille
- Matériel de navigation, de sécurité et matelotage
- Orienter et conduire sa palanquée en sécurité
- Etre un guide de la mer connaissant le milieu

## Des questions ?



Illustration : ILLUSTRATION PACK  
avec l'aimable autorisation de l'auteur A FORET