

Plongée Loisir



Maîtrise de la pression

Sophie REMY – Dive Master PADI 963826 - CMAS 3*

Récréasciences-CCSTI du Limousin

E2Phy « Physique et sport » - 26 août 2008 - Dijon



Plongée Loisir

- ▲ Plongée sous-marine
- ▲ Plongée « **Loisir** »
 - ▲ Profondeur < 40 ... 60 m
 - ▲ % O₂ < 40 %

~ 15 millions dans le monde
Dont ~280 000 en France
FFESSM, ANMP, PADI...

- ▲ Technique
 - ▲ Autonomie : « **Scuba** »
 - ▲ Sécurité
- ▲ Loisir et professionnel
 - ▲ Apprentissage
 - ▲ Pratique

RIGUEUR

Equipement

Comportement





Scuba



▲ Self-Contained Underwater Breathing Apparatus

▲ Terme développé pendant la deuxième guerre mondiale par
Christian Lambertsen

❖ Référence au système autonome de respiration sous-marine mis au point
Par Emile Gagnan et Jacques-Yves Cousteau

- ▲ *Systèmes de détendeurs « classiques »*
- ▲ *Systèmes « Recycleurs »*



▲ A distinguer :

- ▲ Systèmes pour lesquels l'air est fourni depuis la surface (scaphandrier)
- ▲ Plongée sans système respiratoire extérieur (apnée)



Scaphandre autonome

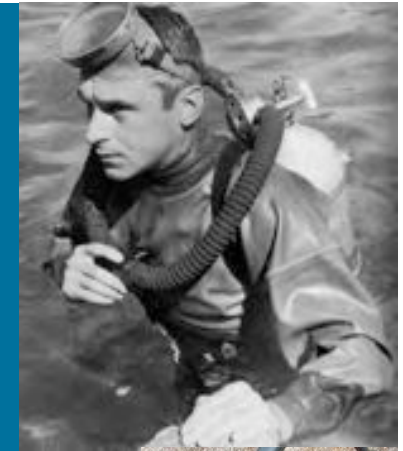
Emile Gagnan (Air Liquide, 1943)

▲ Bouteille

- ▲ AIR comprimé : ~ 200 bar → ~ 20-50 bar
- ▲ Contenance ~ 2 m³ : ~ 12 L x 200 bar = 2,4 m³ x 1 bar

▲ Détendeur

- ▲ Adapter P bouteille à P respirée = P_{ext}
- ▲ Détente en 2 étapes *1955 : Jean Bronnec et Raymond Gauthier*
 - ▲ Haute pression = P bouteille (~100 bar) → Moyenne pression (~10 bar)
 - ▲ Moyenne pression (~10 bar) → Basse pression (~qq bar)
- ▲ Autres systèmes : recycleurs...



Premier étage

Inflateur

Manomètre



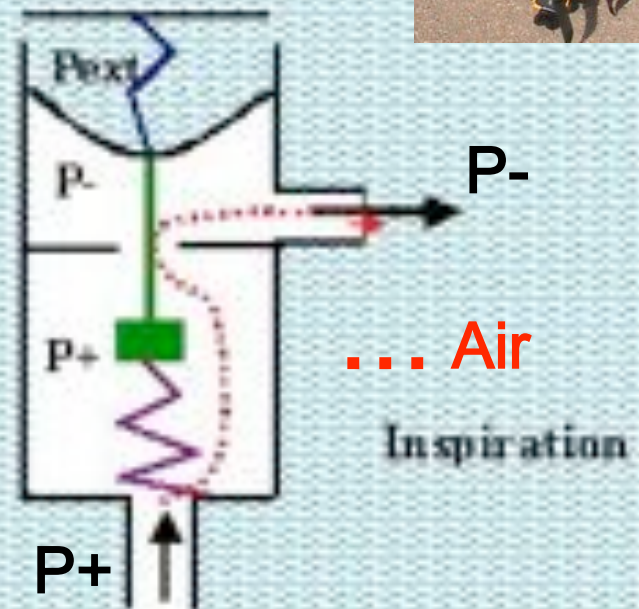
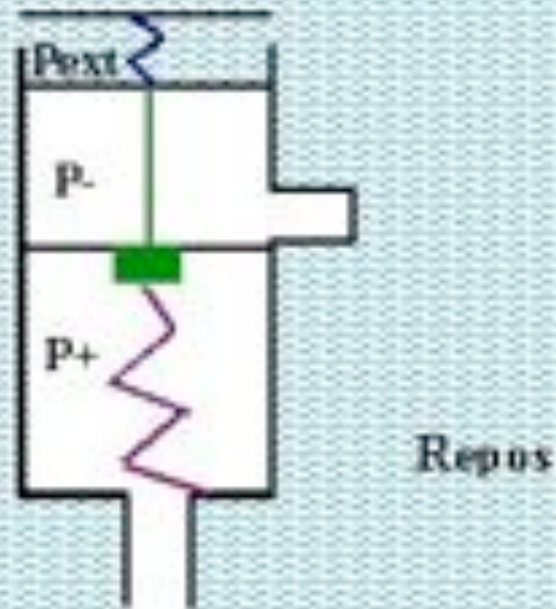
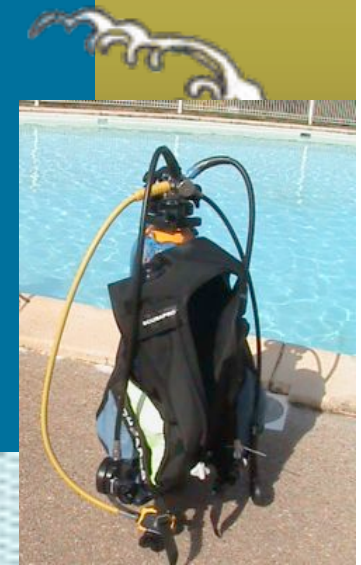
Deuxième étage

Détendeur, Octopus



Principe du détendeur

▶ Détendeur « à la demande »



Détente ⇒ Refroidissement



Equipement...

+

Parachute

Sifflet, miroir

Lampe

Gants

Couteau

...

Combinaison Protections

Masque et tuba

Gilet stabilisateur « BCD »

Détendeur

Octopus

Bouteille

Détendeur

Inflateur

Console
Manomètre

Palmes

Plombs

Ordinateur

Compass

Chronomètre, Profondimètre

Algorithme de décompression



Sécurité

▲ Milieu « Sous-Marin »

▲ Non naturel

▲ *Respiration*

▲ *Mobilité*

▲ *Vision*

▲ *Audition*

▲ *Aspects thermiques* **Froid**

Evolution, « Aquaticité », **PRESSION**

Perceptions modifiées **Indice n, Propagation**

▲ Conséquences physiologiques de la

PRESSION

▲ *Blessures*

▲ *Toxicité*

▲ *Dissolution des gaz respirés*



La Pression

▲ Avantages → TECHNIQUES

▲ Respiration

▲ *Principe du détendeur*

▲ Mobilité

▲ *Maîtrise de la troisième dimension*

▲ *Flottabilité ⇔ Poussée d'Archimède*

▲ Inconvénients → DANGERS

▲ Effets physiques sur l'organisme

▲ Physiologie

▲ *Consommation d'air*

▲ *Risques*

▲ *Barotraumatismes*

▲ *Toxicités des gaz*

▲ *ADD*

MAITRISE



Lois physiques associées

▲ Gradient de Pression

- ▲ Hydrostatique $\sim 1 \text{ bar} / 10 \text{ m}$
- ▲ Archimède

Flottabilité

Levage

▲ Isotherme : $T \approx \text{Cte}$

- ▲ Loi de Boyle-Mariotte : $PV = nRT = \text{cte}$
- ▲ Compressibilité isotherme

Barotraumatismes

Consommation d'air

▲ Mélanges gazeux

- ▲ Loi de Dalton

Plongée aux mélanges

Toxicité des gaz

▲ Dissolution

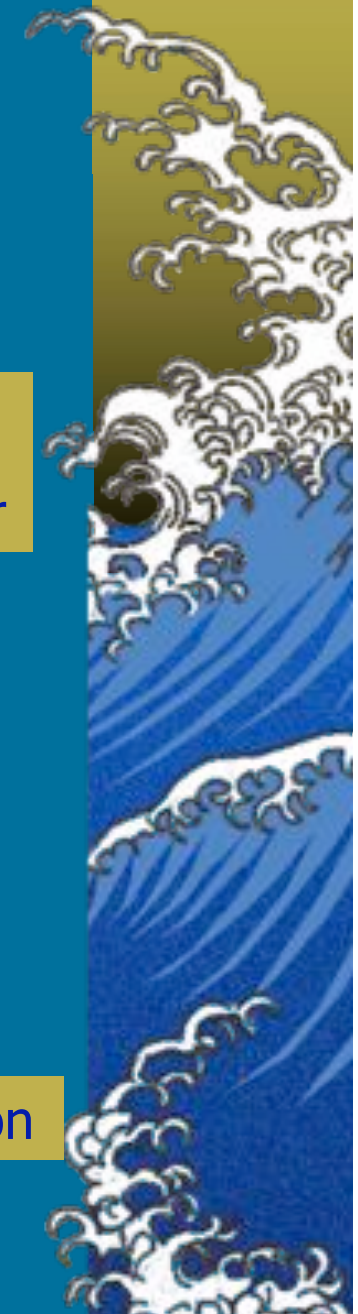
- ▲ Loi de Henry

Saturation

▲ Cinétique d'ordre 1

- ▲ Charge et décharge exponentielle

Sursaturation et Décompression



Hydrostatique

▲ Gradient de Pression dans l'eau $\mu_{\text{eau}} = \text{Cte}$

▲ $P \nearrow$ quand $h \nearrow$

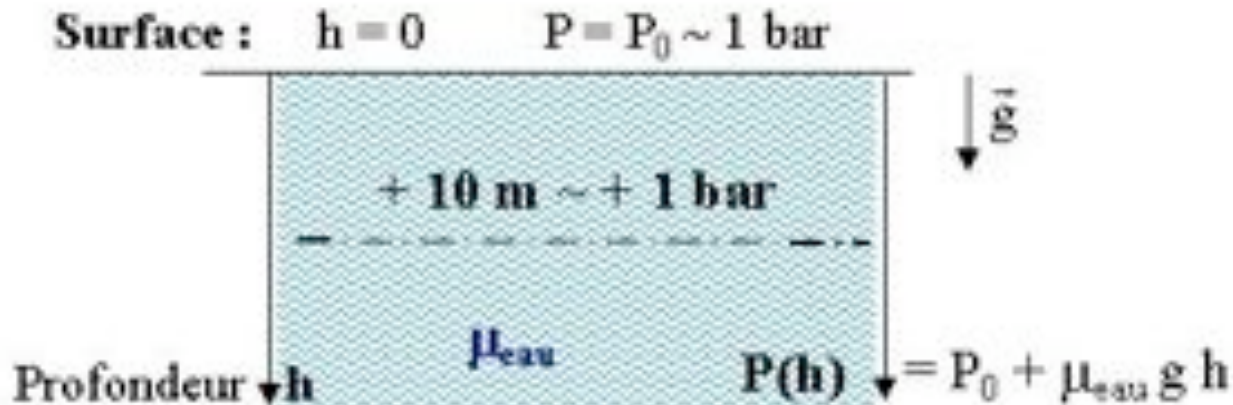
+ 10 m \Rightarrow + 1 bar

Pression absolue

Pression hydrostatique

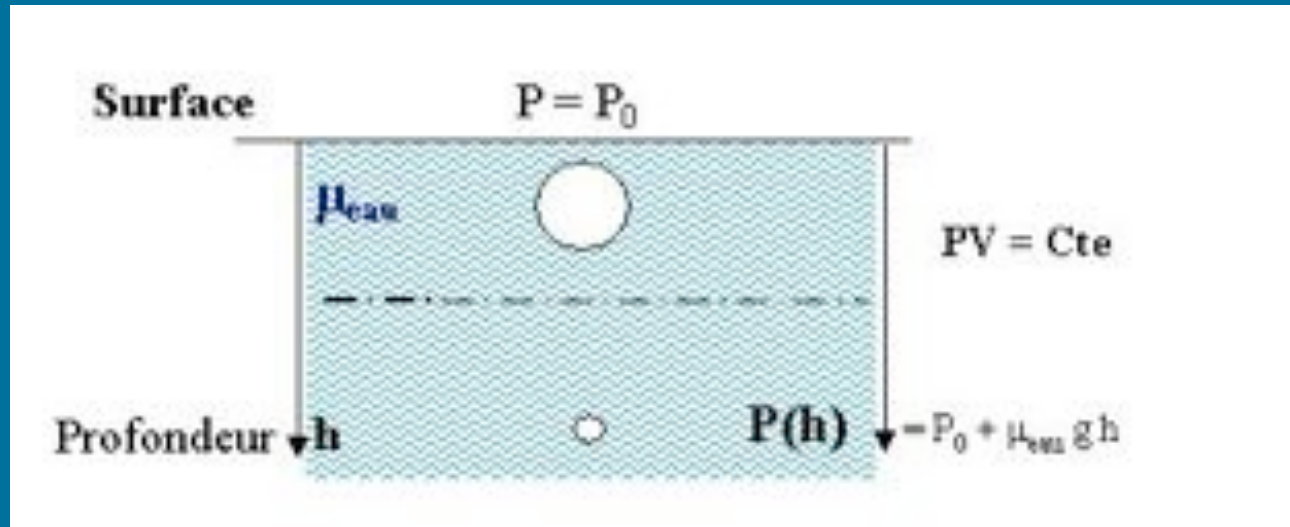
▲ $h = 10 \text{ m}$; $P = 2 \text{ bar}$ ← **X 2!**

▲ $h = 40 \text{ m}$; $P = 5 \text{ bar}$



Milieu ~ Isotherme

▲ Loi de Boyle-Mariotte



▲ Volumes des espaces aériens

▲ Gilet

▲ Corps humain



Flottabilité

Poussée d'Archimède

▲ « Flotter » : Poids compensé par Poussée

▲ Corps humain « nu » Flotte \approx

▲ Corps humain « équipé »

▲ Avec combinaison Flotte $\nearrow \nearrow$

▲ Avec équipement

▲ Bouteille + équipements + Palmes Flotte ?

▲ Plombs Flotte \searrow

Equilibre à la profondeur h (P_{ext})



Adaptation du volume



Flotte \sim



Flottabilité...

Rôle du gilet stabilisateur « BCD » *Buoyancy Control Device*

↔ Adaptation du volume à h → Flotte ~

▲ Maîtrise de la troisième dimension

- ▲ Stabilisation à la profondeur h
- ▲ Gestion du volume d'air dans la BCD
 - ▲ « *Flotter* » = *maintenir V*
 - ▲ *Exercice du « poumon ballast »*



▲ Remontée d'objets

- ▲ $h \searrow P \searrow V \nearrow$ Boyle-Mariotte $\Leftrightarrow \pi \nearrow$ remonte... **Danger à la remontée**
- ▲ *Usage du « parachute »*

Dégonfler le gilet !



Compressibilité du corps humain

▲ Corps = 70% de liquide

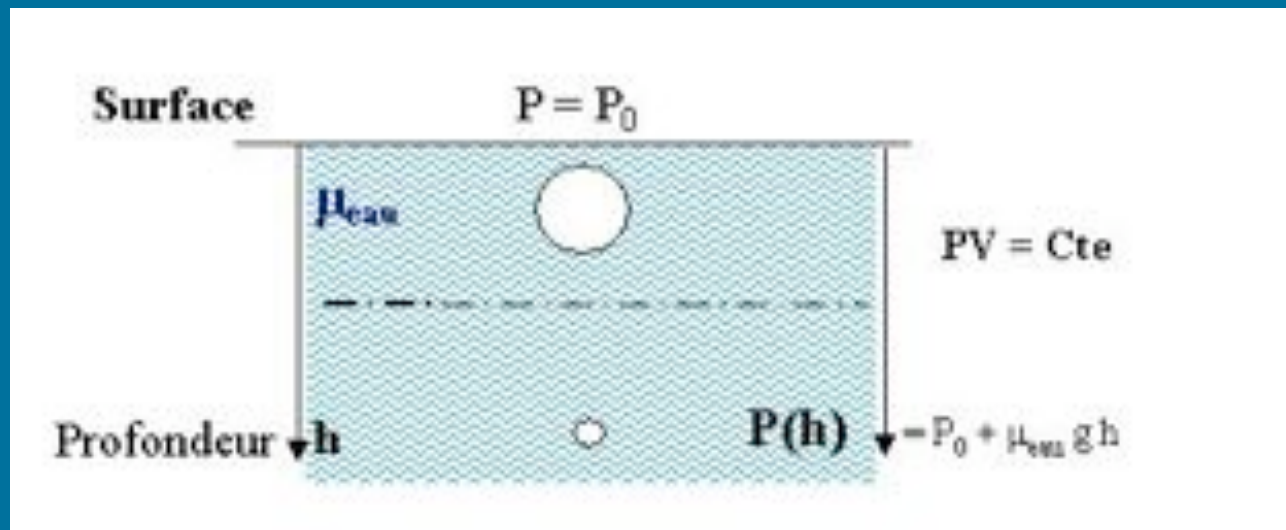
▲ Espaces « aériens »

▲ *Sphère ORL*

▲ *Poumons* 4-6 L

▲ *Alvéoles* : *Interface d'échange air-sang* 100 m²

▲ *Abdomen*



Respiration

▲ Pression extérieure

▲ Compression de la cage thoracique

- ▲ *Equilibre de l'air intérieur avec P_{ext}*
- ▲ *Respiration à P_{ext}*

▲ Consommation **Autonomie**

- ▲ Profondeur ↗ consommation d'air
- ▲ Bouteille $2 \text{ m}^3 \sim 12 \text{ L} \times 200 \text{ bar} = 2,4 \text{ m}^3 \times 1 \text{ bar}$
- ▲ Air respiré à pression P_{ext} , pour le même V poumons
 - ▲ $0 \text{ m} \leftrightarrow 1 \text{ bar} : 20 \text{ L/mn} \Rightarrow 120 \text{ mn}$
 - ▲ $10 \text{ m} \leftrightarrow 2 \text{ bar} : 40 \text{ L/mn} \Rightarrow 60 \text{ mn}$
 - ▲ $20 \text{ m} \leftrightarrow 3 \text{ bar} : 60 \text{ L/mn} \Rightarrow 40 \text{ mn}$
 - ▲ $40 \text{ m} \leftrightarrow 5 \text{ bar} : 100 \text{ L/min} \Rightarrow 24 \text{ mn}$

$P \rightarrow kP$, kn moles respirées, donc « consommées »...

Mais pas forcément utilisées...



Barotraumatismes

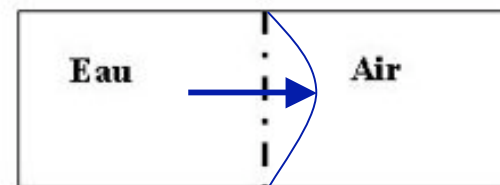
Accidents « mécaniques »

▲ Espaces aériens

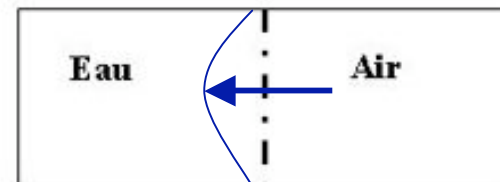
- ▲ *Sphère ORL*
- ▲ *Poumons*

▲ Traumatismes physiologiques dus à la
Différence des pressions interne (Gaz) et externe (Liquide)

▲ A la descente



▲ A la remontée



Equilibrage des pressions



Barotraumatismes...

⤴ A la descente

- ⤴ Oreilles *Valsalva, Bécance Tubaire Volontaire BTV*
- ⤴ Placage de masque *Souffler*



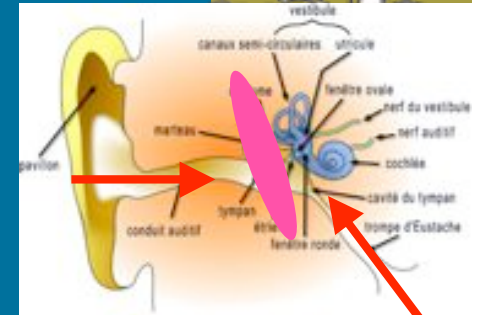
Equilibrage des pressions internes et externes

⤴ A la remontée

- ⤴ Poumons *Surpression pulmonaire*
- ⤴ Oreilles
- ⤴ Sinus, dents



⇒ Souffler !



Toxicité des gaz

Accidents « bio-chimiques »

- ▲ Air : 21 % O₂ + 79 % N₂ (CO₂ ~ 0,03%)
- ▲ Profondeur $h \rightarrow P_{\text{ext}} \nearrow \Rightarrow P_{\text{partielles}} \nearrow$
- ▲ Limites de toxicité des gaz respirés
 - ▲ Azote
 - ▲ *Et autres gaz inertes dissous...*
 - ▲ *Narcose : $P_{N_2} \sim 3-4 \text{ bar}$ $h \sim 30-40 \text{ m}$*
 - ▲ Oxygène **Hyperoxie**
 - ▲ *Effet Paul Bert : $P_{O_2} \sim 1,7 \text{ bar}$ $h \sim 70 \text{ m}$*
 - ▲ CO₂ **Hypercapnie**
 - ▲ *A partir de 2%*
 - ▲ *Conséquence d'essoufflement*
 - ▲ CO
 - ▲ *Ligand*



Décompression

Accidents « bio-physiques »

- ▶ Accidents de décompression « ADD »
- ▶ Détente pendant la remontée des gaz dissous pendant la plongée
- ▶ **Gaz inertes**, non métabolisés par l'organisme :
N₂ principalement

Concentration de gaz dissous dans un liquide α
à la P partielle exercée par le gaz sur le liquide

- ▶ Tension d'N₂
 - ▶ Quantité d'azote dissous dans le sang
exprimée en « Pression »
 - ▶ A l'équilibre (saturation) $T_{N_2} = P$ partielle N₂



Saturation

- ▲ Dissolution des gaz inertes
- ▲ Loi Exponentielle \Leftrightarrow Cinétique d'ordre 1
 - ▲ Période ou Demi-vie = τ
 - ▲ Chaque τ définit un « compartiment »

▲ Descente

Saturation

- ▲ Tous les gaz se dissolvent dans le sang via les poumons
 - ▲ jusqu'à saturation

▲ Descente « Charge »

- ▲ $T_f(h)$: « tension » max à la profondeur h
Saturation : = P partielle d' N_2 à h

Exponentielle de « charge »



Charge h, τ

▲ T_0 : Tension à la surface ($h=0$) $T_0 = \%N_2 \times P_0 = 0,8 \text{ bar}$

▲ $T_f(h)$: Tension finale à la profondeur h
Saturation

$$= P_{\text{partielle } N_2} \text{ à } h = \% N_2 \times P_{\text{ext}} = 0,8 \times P_{\text{ext}}$$



Q_f Q/Q_f

Q : Quantité dissoute à t



Décharge

- ▶ On remonte : $h \searrow P_{\text{ext}} \searrow \Rightarrow TN_2 \searrow$
- ▶ Remontée : « Décharge »
 - ▶ Exponentielle de « décharge »
- ▶ Elimination
 - ▶ Les gaz dissous repassent à l'état gazeux
 - ▶ *Détente*
 - ▶ Par l'interface pulmonaire
 - ▶ *Micro-bulles*
- ▶ **MAIS** $TN_2 \searrow$ **moins vite** (*cinétique*) que $P_{\text{ext}} \searrow$
 - ▶ $P_{\text{ext}} \searrow$ à la vitesse de la remontée ~ 12-15 m/min



Décharge...

▲ $h \uparrow : TN_2 > P_{\text{ext}} = \text{« Sursaturation »}$

⇒ Coeff de (sur)saturation CS :



← Qui est ce qu'elle est !

← A la profondeur où on est remonté...

▲ SI $CS > \text{Seuil « CSc »}$:

La *tension à l'intérieur* est trop élevée / à la *pression à l'extérieur* pour que le gaz reste dissous

⇒ **Bulles de dégazage** dans le liquide corporel + Mariotte

⇒ **Altération**

▲ *Bulles stationnaires* ↗ : Traumatismes mécaniques

▲ Cutanées : *Démangeaisons, rougeurs*

▲ Ostéo-articulaires : *Douleurs vives*

▲ *Bulles circulatoires* : Blocage de la circulation, Anoxie, nécrose

▲ Neurologiques : *système nerveux et cerveau*

▲ Médullaire : *lésions moelle épinière*

▲ Cardio-pulmonaire : *cœur, poumons*

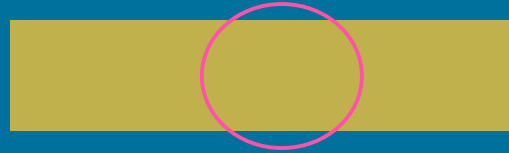
▲ Oreille interne : *Vertiges*

▲ **Danger ADD !!!**



Risque d'ADD...

▲ Risque si :



▲ Coefficient de sursaturation critique : **CSc**

Valeur limite du rapport entre

TN_2 (intérieur) et P_{ext} (extérieur)

pour qu'il n'y ait pas de dégazage.



▲ **CSc** Dépend du « compartiment » (comme τ)

▲ Tension limite en surface

▲ Valeur déterminée \mp expérimentalement (~ 2)



Compartiments

- ▶ τ \leftrightarrow « Tissus » ou « Compartiments »
- ▶ Ensemble de parties organiques ayant un comportement analogue face à la saturation
 - ▶ Même τ
 - ▶ Même CSc
- ▶ Influence de
 - ▶ L'irrigation
 - ▶ Surface d'échange
 - ▶ Texture...



Modèles

= *Nombres de compartiments avec τ et CSc*

- ▶ Haldane originel : 5 compartiments
- ▶ Algorithmes d'ordinateurs, Ecoles
- ▶ Modèle MN 90 :
 - ▶ 12 compartiments τ , CSc (+2...)



Sécurité

- ▶ En début de remontée (*t* passé à *h*)

TOUS les compartiments ont : $CS < CS_c$ à *h*

avec $T_f(h) = 0,8 P_{ext}(h)$: saturation \Rightarrow CS au fond (*h*) = 0,8

- ▶ Mais pour un retour « direct » à la surface :

Tension
en début de
remontée

?

Dépend de *h*, *t* et τ

- ▶ D'où \exists limite de durée *t* à la profondeur *h*

afin que : $T_{N_2} < CS_c$; $\forall \tau$

- ▶ Cela peut être le temps maximal autorisé

▶ \Rightarrow *Courbe de sécurité*



Décompression Exemples...

▶ Même durée t , mais profondeurs $h \neq$

▶ On compare les Tensions limites en surface = CSc
et les tensions en début de remontée



Décompression

Courbe de sécurité

▲ Durée max passée à la profondeur h
Pour pouvoir remonter à la surface sans aucun problème

Durée (min)



Profondeur (m)

P surface = 1 bar



Décompression

Exemples...

Même h

Durées \neq



Exemple...

▲ Plongée à 20 m de différentes durées

▲ 20 min et 40 min : **OK**

▲ 60 min et 90 min : **PB !**

▲ 40 min ~ limite;

▲ Compartiments courtes périodes ~ **saturés**

Tension à saturation à h

$$T_f(h) = 0,8 P_{ext}(h)$$



Protocole de « décompression »

- ▲ Si durée au fond $>$ à durée max (courbe de sécurité)

Tension en début de remontée $>$

Tension limite en surface = « CSc »

▲ \Rightarrow **Problème !** Bulles \Rightarrow Accidents

- ▲ D'où **PALIER** (H,T) \Leftrightarrow « Attendre que $TN_2 \searrow$ »

en se stabilisant à une profondeur adéquate

- ▲ **H** : Telle que pour ce compartiment : $TN_2 = P(H) \text{ CSc}$

- ▲ **T** : Pour que $TN_2 \searrow$ assez pour atteindre le pallier suivant de profondeur H' ($< H$)

- ▲ Etc...



Principe des « Paliers »

Construction d'une table de décompression

▲ « Décompression » ⇒ Palier (H profondeur, T durée)

▲ A respecter dès qu'un compartiment

« Compartiment directeur »

est tel que : $TN_2 = CSc$ Sursaturation critique à H

▲ Différents protocoles

▲ Paliers de décompression : 12, 9, 6 et 3 m (MN90)

▲ Paliers de sécurité : 3 min à 5 m (PADI)

▲ 12h pour une désaturation complète 24h

▲ *Périodes des compartiments longs*



Accident De Décompression...

▲ Manifestations jusqu'à 6h après la sortie

- ▲ Différentes selon « tissus »
 - ▲ *Grandes périodes* : Ostéo-articulaires
 - ▲ *Faibles périodes* : Neurologiques
 - ▲

▲ Accident ⇒ « Maladie » de décompression...

▲ Premiers secours

- ▲ *Oxygène pur*
- ▲ *Hydratation*
- ▲ *Aspirine (?)*
- ▲ **Evacuation vers un centre hyperbare !**

▲ Précautions Respecter le protocole de décompression

▲ **Contrôler la vitesse de remontée** ≲ « Petites bulles autour de soi »

▲ Plonger en **FORME**

- ▲ Alimentation, Suivi médical...
- ▲ ≠ Froid, Fatigue excessive, Etat d'ivresse...



Limiter la saturation ?

- ▶ Rester moins longtemps à la profondeur h
- ▶ Limiter sa profondeur pour une même durée t
- ▶ Diminuer le % de N_2
 - ➔ Utilisation d'un **mélange enrichi en O_2**
 - ▶ « Nitrox »
 - ▶ *Mélanges jusqu'à 40 % d' O_2*



Plongée aux mélanges

enrichis à l'oxygène

- ▲ Limiter la saturation en azote



- ▲ Désaturation plus rapide
- ▲ Temps au fond possible plus long *
- ▲ Moins de « paliers » (*et moins longs*)

- ▲ Inconvénients \Rightarrow **DANGERS** biochimiques

- ▲ Pression partielle en O_2 + élevée
 - ▲ **Toxicité de l'oxygène** *Hyperoxie* Effet Paul Bert
 - ▲ 21% : $h \sim 70 \text{ m}$
 - ▲ 32% $h \sim 40 \text{ m} !!!$
 - ▲ 40% $h \sim 30 \text{ m} \dots\dots\dots$

- ▲ Aspects physiologiques

▲ ***Pas forcément plus profond !!!***

Autres mélanges (+ He) :

➡ Plongée « TEK »



Comparaison de protocoles

- ▶ Saturation moins importante
- ▶ Confort, sécurité
- ▶ *Protocole des plongées Successives*
- ▶ *Montée en altitude ou vol en avion*

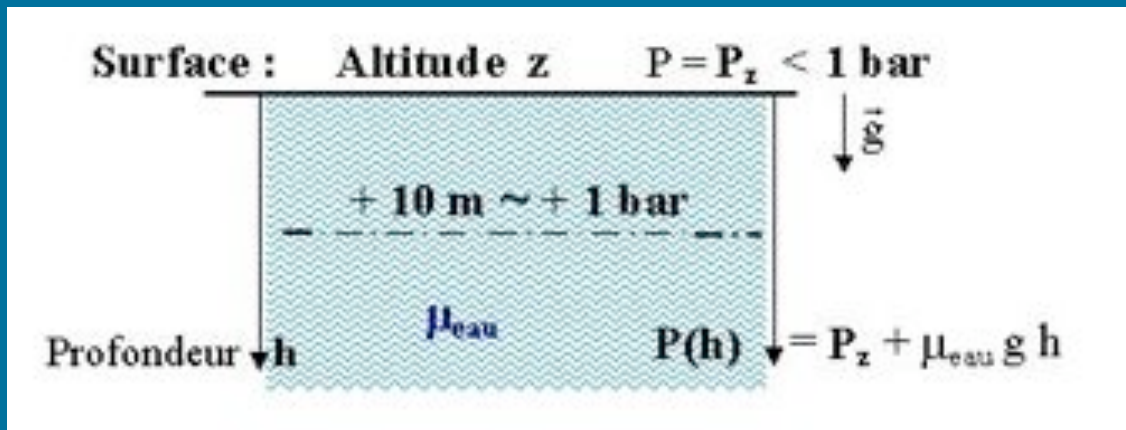


Plongée en altitude

▲ Protocole standard :

- ▲ Altitude surface < 300 m
- ▲ $P_{\text{surface}} \sim 1 \text{ bar}$

▲ Surface Altitude z , $P_{\text{surface}} < 1 \text{ bar}$



▲ *Même pression hydrostatique* \Rightarrow *Translation*



Plongée en altitude

▲ Tension d'azote



▲ Tension Limite en surface

▲ Modification de la tension limite en surface !



Tension limite en surface ↘ ↔ Saturation plus rapide !

▲ Problèmes si montée en altitude après plongée !



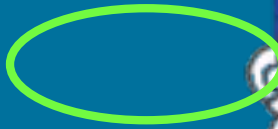
Sursaturation en altitude

▲ *Exemple* : $P_{\text{surface}} = 0,8 \text{ bar} \approx 1500\text{m} - 2000 \text{ m}$



Altitude

Décompression en altitude...



Utiliser du Nitrox !

Profondeurs équivalentes

- ▲ Pour calculs à partir de tables (cf. préparation de brevets...)

« $P_{\text{surface}} = 1 \text{ bar}; \% \text{ O}_2 = 0,21$ »

- ▲ Plongée aux mélanges h équivalente

- ▲ *Profondeur équivalente : h_{eq} / on conserve « $P / \% \text{ N}_2$ »*

- ▲ *Procédure paliers avec h_{eq}*

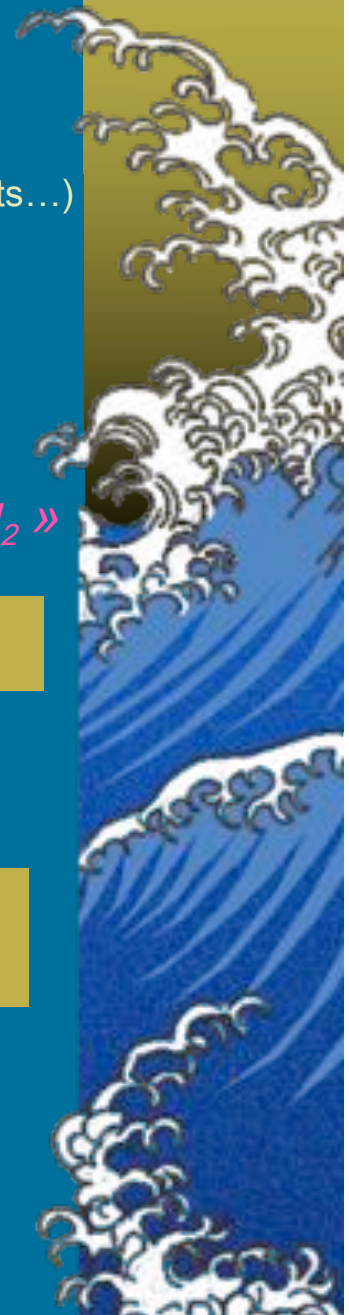
- ▲ Plongée en altitude h fictive

- ▲ *Profondeur fictive : h_{fic} / on conserve « $P(h)/P_{surf}$ »*

- ▲ *Paliers et vitesse de remontée à réadapter...*

➔ Utilisation de « l'ordinateur » !

Mais savoir utiliser les tables...



Milieu non naturel...

- ▲ Milieu « Sous-Marin »

- ▲ Effets de la pression

- ▲ Aspects thermiques

- ▲ Perceptions modifiées

- ▲ *Vision*

- ▲ *Audition*

} Indice n, Propagation



Aspects Thermiques

- ▶ Thermalisation du corps
 - ▶ 32°C au lieu de 26°
- ▶ Conduction thermique de l'eau
 - ▶ 25 X
- ▶ Refroidissement dû à la détente
 - ▶ Gaz respiré



Combinaison
Alimentation



Vision

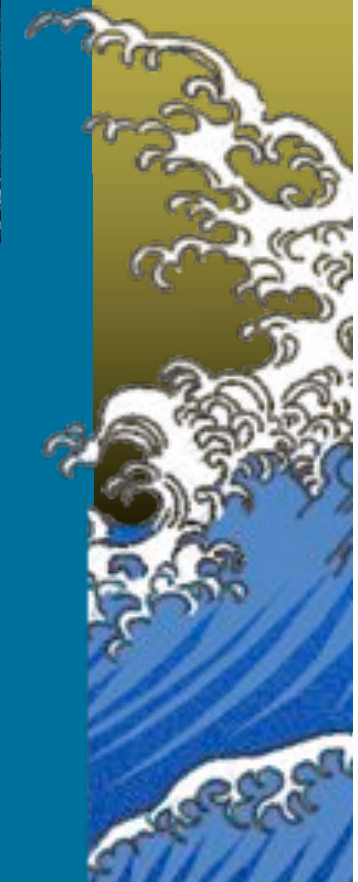
▲ Indice optique de l'eau $n \approx 1,3$

▲ Réfraction

- ▲ Réflexion totale $\alpha \approx 50^\circ$
- ▲ Hauteur du Soleil **Orientation**

▲ Modification du chemin optique

- ▲ Vision floue
- ▲ \Rightarrow Port d'un masque : **œil dans l'air**
 - ▲ Champ de vision
 - ▲ Grossissement
 - ▲ Evaluation des distances **Plus gros, plus près**



▲ Absorption H₂O + particules

- ▲ Luminosité
- ▲ Altération des couleurs
- ▲ Visibilité

Lumière transmise

- 10 m : 14 %
- 40 m : 1,5 %

Absorption des couleurs

- 5 m : Rouge
- 20 m : Jaune
- 40 m : vert
- 60 m : Monochrome



Audition

- ▶ n Indice acoustique de l'eau < air
 - ▶ Lois de Descartes « à l'envers »
 - ▶ *Réflexion totale dans l'air*
- ▶ Milieu plus dense et moins compressible
 - ▶ Vitesse du son ≈ 5 x plus grande : $v = 1500$ m/s
 - ▶ *Problèmes d'orientation*
 - ▶ *Double bang...*



Joies de la plongée

⬆ Dangers ?

- ⬆ Risques Prévisibles

⬆ Précautions

- ⬆ Apprentissage
- ⬆ Prudence et vigilance
 - ⬆ *Matériel*
 - ⬆ *Froid*
 - ⬆ *Souffler*
 - ⬆ *Respect des protocoles*
 - ⬆ *Vitesse de remontée*
 - ⬆ *Paliers*
- ⬆ Réglementation locale

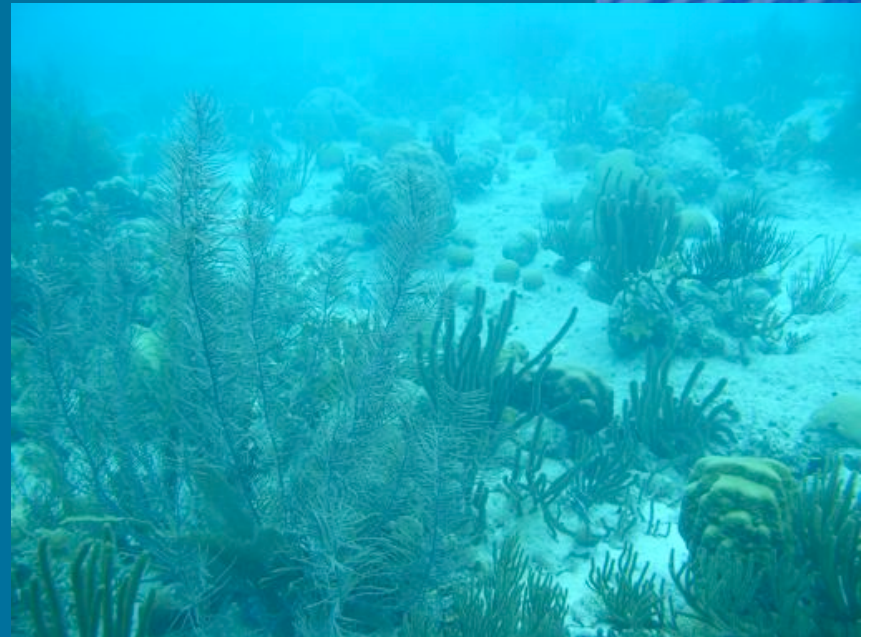
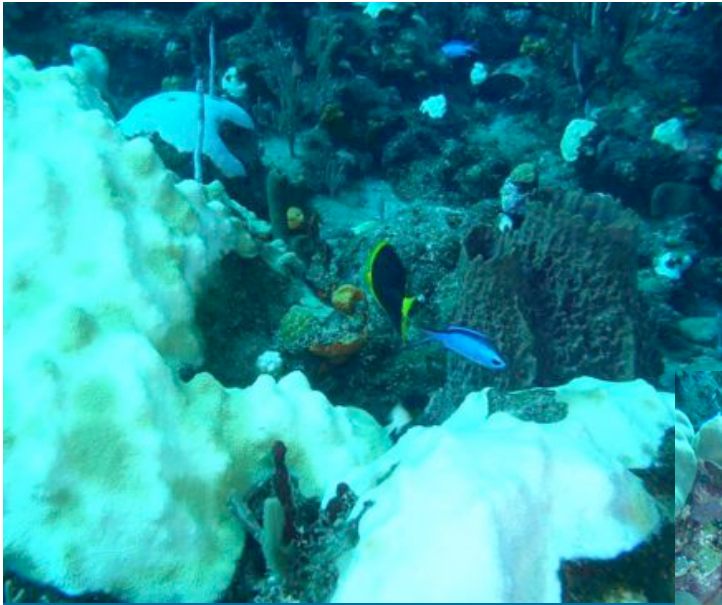


⬆ Merveilles du Grand bleu !

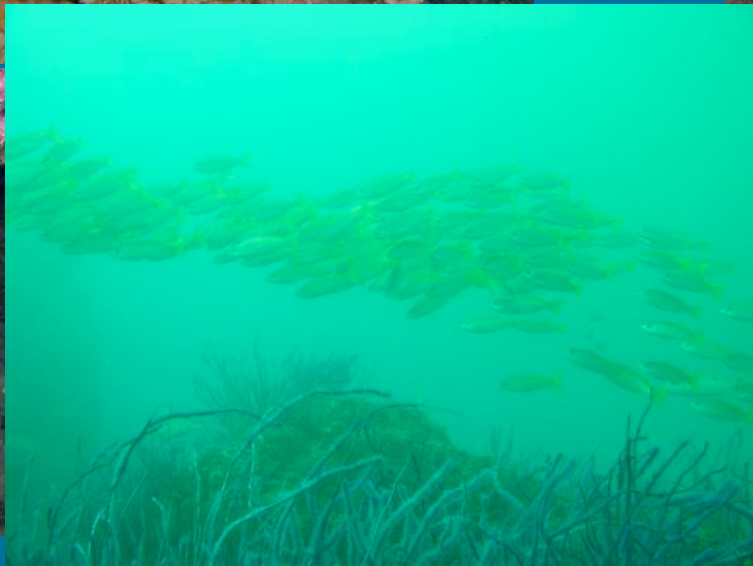
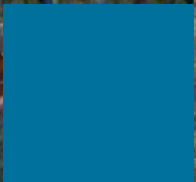
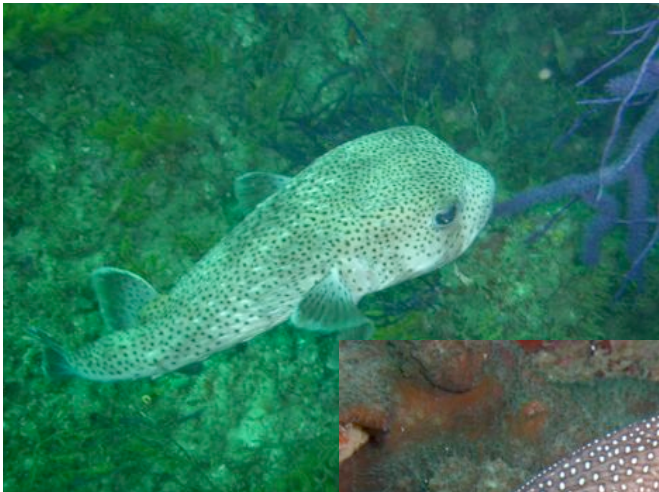


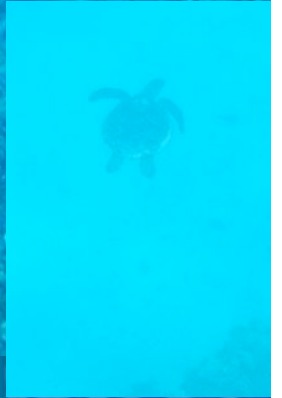
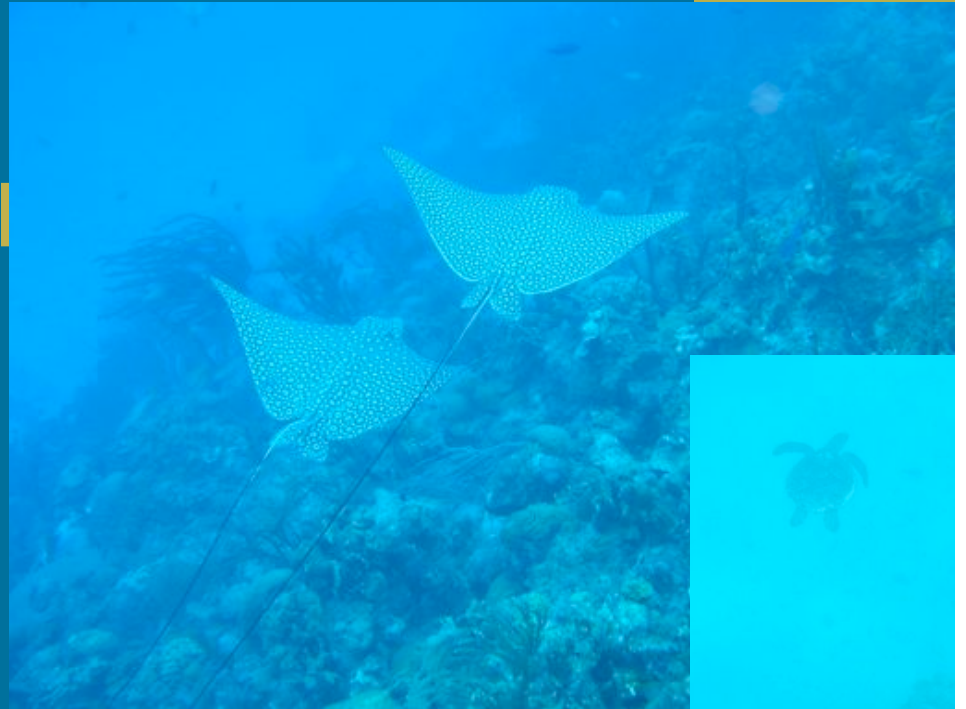


ora



Diversit





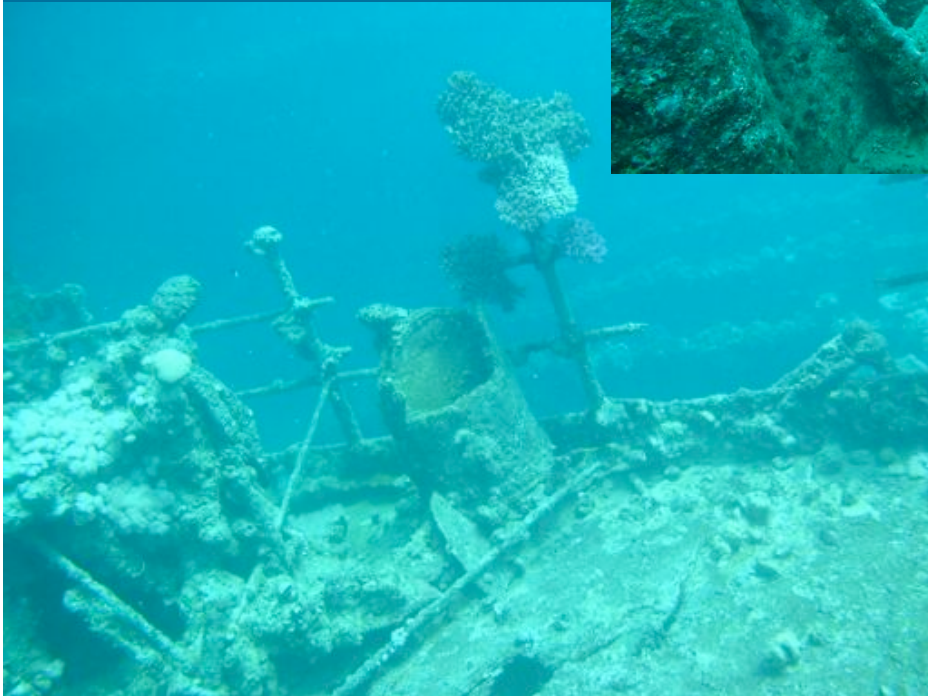


re

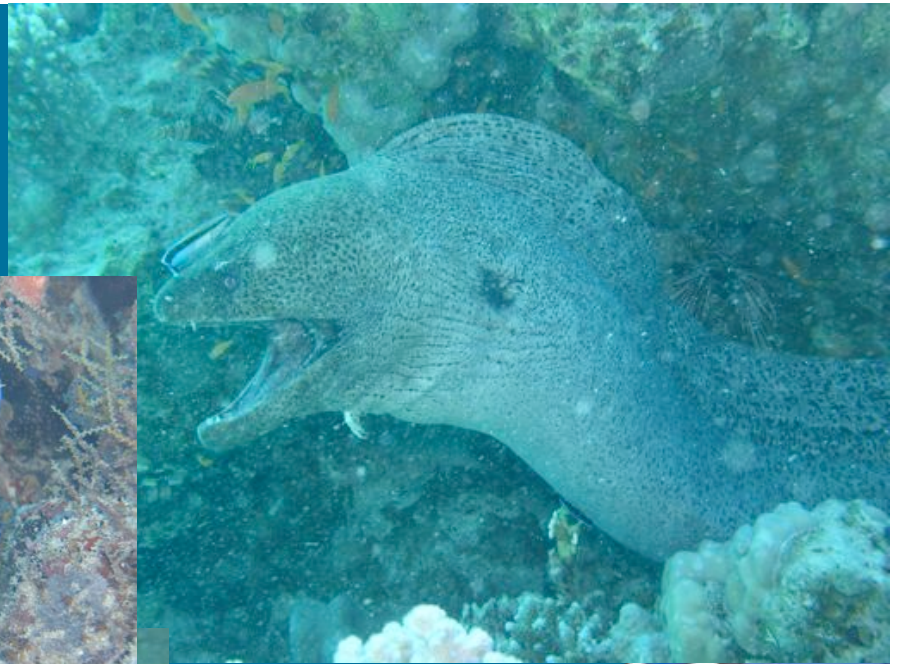




ig



érie





Remerciements

▲ Crédits photographiques :



Laurence LEBOUTET

PADI DM 959837

▲ Algorithme de calcul « ORDIMN90 » :

Hervé SUQUET

CMAS Monitor 2* - FSGT MF1- 97106

Site Internet : <http://avhs.free.fr/plongee/>



A vos palmes !

