



ULB Sport Section Plongée
CASE

La Physique appliquée à la plongée

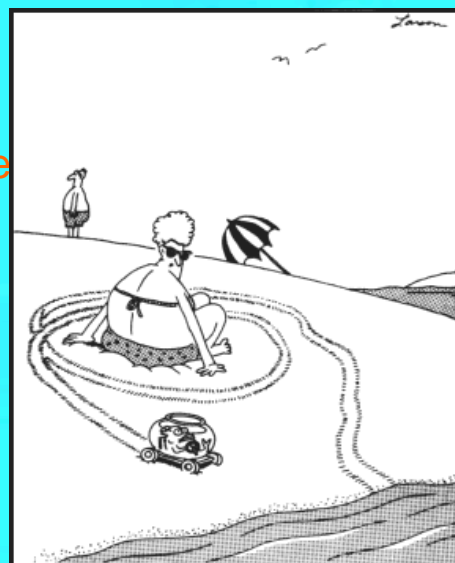
Nicolas Darquenne



ULB Sport Section Plongée
CASE

La Physique appliquée à la plongée

1. Introduction
2. La pression
3. Loi d'Archimède
4. La densité
5. Loi de Boyle et Mariotte
6. Loi de Gay Lussac
7. Loi de Charles
8. Loi de Dalton
9. Loi de Henri
10. L'énergie lumineuse
11. L'énergie sonore
12. L'énergie thermique





1. Introduction

1.1 La composition de l'air

A la louche :

- 79 % N₂
- 21 % O₂

Azote:	78,084 %
Argon:	0,934 %
Oxygène:	20,946%
Gaz Carbonique:	0,033 %

Néon	} = 0,003 %
Hélium	
Krypton	
Hydrogène	
Xénon	
Radon	
Oxyde de carbone	



1. Introduction (suite)

1.2 La respiration

Respiration:

	Inspiration	Expiration
Oxygène	21%	17%
Azote	79%	79%
Gaz carbonique	0%	4%



1. Introduction (suite)

1.3 La nature de l'eau... de mer

Contenance en minéraux

- r Eau de pluie : 0,033 g/l
- r Eau de mer : 35 g/l dont
 - NaCl : 77,8 %
 - MgCl₂ : 10,9 %
 - Sulfates : 10,8%
 - Carbonates : 0,5 %

Poids de l'eau

- r Air : 0,013 N/l
- r Eau pure : 9,81 N/l soit 770 fois plus que l'air
- r Eau de mer est approximativement 2,5 à 3,3 % plus lourde que l'eau douce

Incompressibilité

- r A 500 atm l'eau ne se comprime que de 1/47,000,000 de son volume initial



2. La pression

2.1 Définition

2.2 Loi de Pascal

2.3 Pression atmosphérique

2.4 Pression relative ou hydrostatique

2.5 Pression absolue



2. La pression

2.1 Définition :

Une force exercée sur une surface:

$$P = F/S$$

Unité légale : le pascal **Pa** ou encore le **N/m²**

Autres unités utilisées:

	atm	N/m ² Pa	bars	kg/cm ²	gm/cm ² cm H ₂ O	mm Hg	in Hg "Hg	lb/in ² psi
1 atmosphere	1	1.013×10 ⁵	1.013	1.033	1033	760	29.92	14.7
1 Newton (N)/m ² or Pascal (Pa)	.9869×10 ⁻⁵	1	10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻⁵	.0102	.0075	.2953×10 ⁻³	.1451×10 ⁻³
1 bar	.9869	10 ⁵	1	1.02	1020	750.1	29.53	14.51
1 kg/cm ²	.9681	.9807×10 ⁵	.9807	1	1000	735	28.94	14.22
1 gm/cm ² (1 cm H ₂ O)	968.1	98.07	.9807×10 ⁻³	.001	1	.735	.02894	.01422
1 mm Hg	.001316	133.3	.001333	.00136	1.36	1	.03937	.01934
1 in Hg	.0334	3386	.03386	.03453	34.53	25.4	1	.491
1 lb/in ² (psi)	.06804	6895	.06895	.0703	70.3	51.7	2.035	1

Abridged adaptation from NOAA



2. La pression (suite)

2.2 Loi de Pascal:

Dans un fluide (gaz ou liquide), la pression s'exerce uniformément dans toutes les directions sur toutes les surfaces qui lui sont opposées

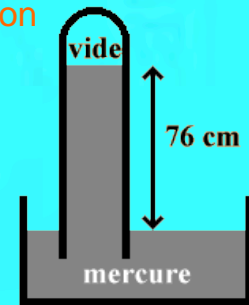


2. La pression (Suite)

2.2 Pression atmosphérique

- Le poids de l'air à la surface de la terre exerce sur celle-ci une pression (donc cette pression diminue avec l'altitude)
- Au niveau de la mer cette pression atmosphérique est de:

1013 mBar
 101325 pascal (1013 HectoPa)
 1 Atmosphère
 760 mm Hg (Mercure)



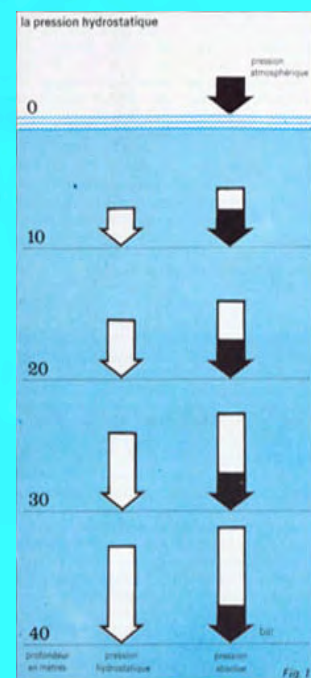
2. La pression (Suite)

2.3 Pression hydrostatique ou relative

- C'est la pression que subit un corps immergé par le poids de la colonne d'eau qui le surplombe.
- Elle est dite relative car elle ne se réfère qu'au poids de l'eau, et non pas à celui de l'atmosphère.

2.4 Pression absolue

- C'est la pression totale que subit un corps immergé par le poids de la colonne d'eau et de la colonne d'air qui le surplombe



Pression Absolue = Pression Atmosphérique + Pression Relative



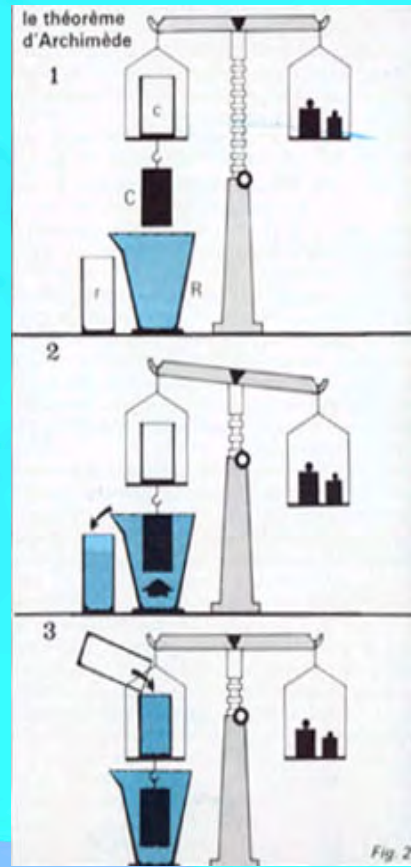
3. Loi d'Archimède

3.1 Principe d'Archimède

Tout corps plongé dans un fluide subit de la part de ce fluide une poussée verticale dirigée de bas en haut égale au poids du volume du fluide déplacé par le corps.

Corollaire :

$$\text{Poids Apparent} = \text{Poids Réel} - \text{Poussée d'Archimède}$$



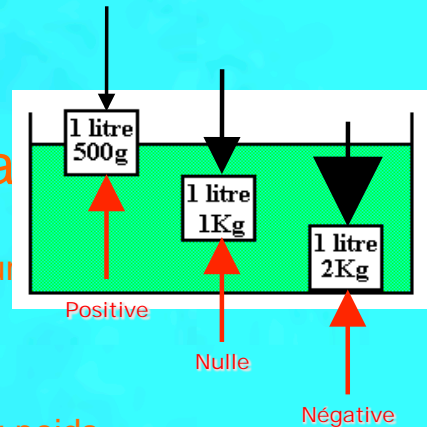
3. Loi d'Archimède (suite)

3.2 Applications : Flottabilité

Flottabilité positive : La poussée d'archimède est d'intensité supérieure au poids du corps immergé.

Flottabilité neutre : La poussée d'archimède est d'intensité égale au poids du corps immergé.

Flottabilité négative : La poussée d'archimède est d'intensité inférieure au poids du corps immergé.





3. Loi d'Archimède (suite)

Exercice

- Calculer la différence de lestage entre début et fin de plongée. Bouteille 12l. 1l d'air = 1,293 gr.
- NB de litres d'air: $12 \times 200 = 2.400$ litres
- Poids de l'air: $2.400 \times 1,293 = 3.103,2$ gr =>arrondi 3kg
- => Importance de prévoir le lestage suffisant pour pouvoir réaliser ls paliers.



4. La densité

4.1 Définition

La densité d'un gaz est le rapport entre la masse volumique du gaz considéré et celle de l'air.

La densité d'un liquide est le rapport entre la masse volumique du gaz considéré et celle de l'eau pure.

4.2 Applications à la plongée

Plombage en eau douce inférieur a celui en eau de mer, car l'eau de mer est plus dense d'environ 3 % que l'eau douce



5. Loi de Boyle et Mariotte

5.1 Principe

Boyle (physicien et chimiste irlandais, 1627-1691) et Mariotte (physicien et chimiste français, 1620-1684) découvrirent indépendamment la loi qui porte leur nom:

A température constante, le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression qu'il subit

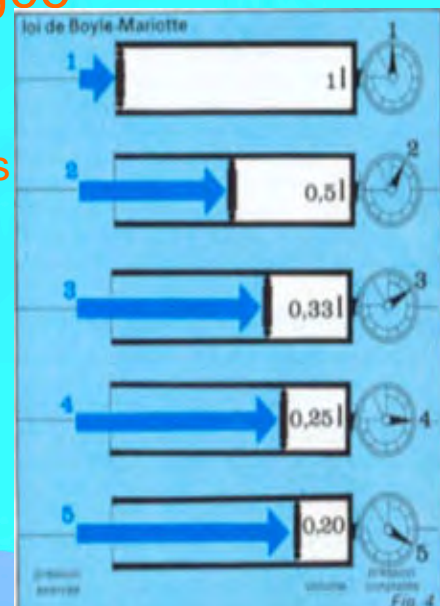
$$\text{Pression} \times \text{Volume} = \text{Constante}$$



5. Loi de Boyle et Mariotte (suite)

5.2 Applications à la plongée

- Le gilet
- Les accidents barotraumatiques
- Le lestage et le néoprène
- La consommation d'air
- Le parachute
- etc.





5. Loi de Boyle et Mariotte (suite)

Concrètement

- Consommation en surface: 20l d'air/min
- Bouteille 12l
- Plongée 80 m ou plongée 90 m

Entre 80 et 90 m, on considère 1' aller et 1' retour, soit 2' à une pression absolue de 10 bars x 20 l, soit 400 l + gonfler le gilet de 10l x 10 bars = 100 bars.

Donc 500 litres consommés entre 80 et 90 m

Consommation à 3m => $20 \text{ l} \times 1,3 = 26 \text{ l/min}$
 $500 / 26 = 19 \text{ min de différence à 3m}$



6. Loi de Gay Lussac

6.1 Principe

Pour une pression de gaz donnée, plus haute est sa température plus grand est son volume et inversement.



7. Loi de Charles

7.1 Principe

Pour un volume de gaz donné, plus haute est sa température plus grande est sa pression et inversement.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

7.2 Applications à la plongée

Gonflage des bouteilles



8. Loi de Dalton

8.1 Principe

La pression totale exercée par un mélange gazeux est égale à la somme des pressions qui seraient exercées si chacun des gaz occupait seul le volume du mélange initial.

La pression de chacun des gaz dans ces conditions est appelée pression partielle PP.

Pression totale = PP gaz 1 + PP gaz 2 + ... + PP gaz n

Pression du Gaz = Pourcentage du Gaz dans le mélange x Pression du mélange



8. Loi de Dalton (suite)

8.2 Applications à la plongée

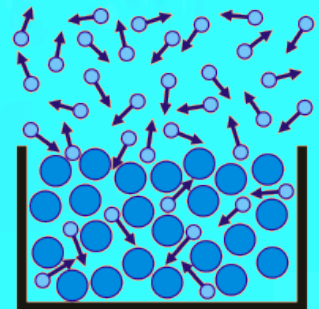
- Les effets Lorrain Smith et Paul Bert (Toxicité O_2)
 - L'air (PP. O_2 max 1,6 bar) est neurotoxique (CNS) à 66m
 - En effet $1,6 / 0,21 = 7,62$ bar équivalent air, soit une profondeur de $(7,62 - 1) \times 10 = 66,2$ m
- La narcose
 - L'air (PP. N_2 max 6,3 bar) est toxique à 70m
 - Exercice
- L'hypercapnie
 - Le gaz carbonique (PP. CO_2 max 0,08 bar) provoque la perte de connaissance
 - Une PP. CO_2 de 0,04 bar provoque systématiquement un essoufflement
- Le nitrox et autres mélanges gazeux
 - Quelque soit la profondeur, le pourcentage d'un gaz reste constant
 - Un mélange à 40 % d'oxygène (PP. O_2 max 1,6 bar) est neurotoxique (CNS) à 30m



9. Loi de Henri

9.1 Principe

La quantité de gaz qui se dissout dans un liquide est, à température donnée, une fonction de la pression partielle du gaz qui est en contact avec ce liquide et du coefficient de solubilité (a) de ce gaz dans ce liquide.



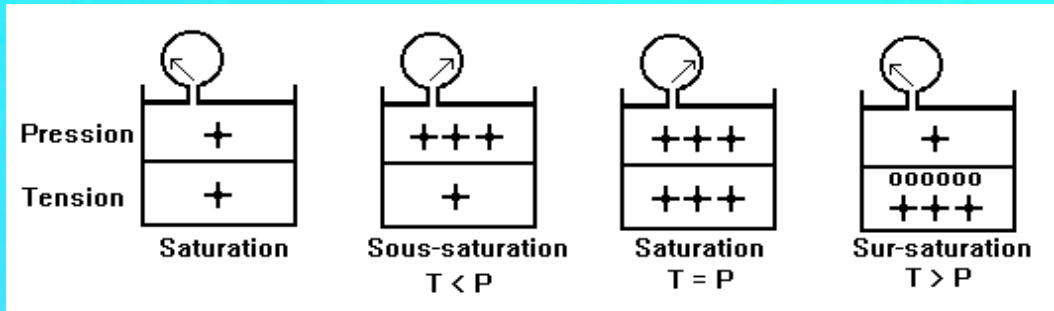
$$\text{Volume du Gaz} / \text{Volume du liquide} = a \times \text{Pression du Gaz}$$



9. Loi de Henri (suite)

9.2 Applications à la plongée

- La table de plongée
- Les phénomènes de saturation et désaturation



Saturation : l'état d'équilibre (initial ou final).

Sous-saturation : l'étape au cours de laquelle le liquide absorbe le gaz en le dissolvant.

Sur-saturation : l'étape au cours de laquelle le liquide restitue le gaz dissout



9. Loi de Henri (suite)

Plusieurs facteurs influent sur la dissolution des gaz dans les liquides.

En général	Equivalent en plongée	La dissolution augmente si :
Nature du gaz	Azote	-
Nature du liquide	Compartiment concerné	L'irrigation sanguine croît
Pression du gaz	Profondeur	La profondeur augmente
Température	Constante 37° C	La température diminue
Durée	Temps de plongée	Le temps augmente
Agitation	Travail physique au cours de la plongée	L'irrigation sanguine croît
Surface	Sensiblement constante pour un individu donné	La surface augmente



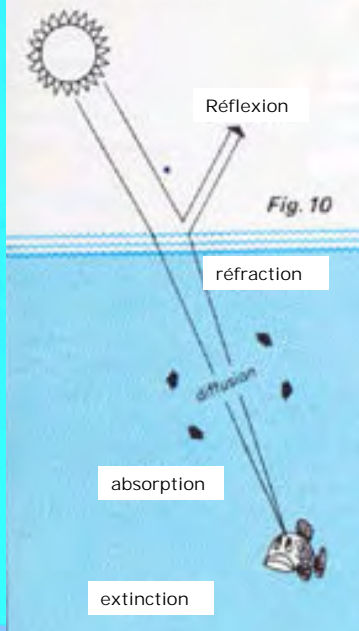
10. L'énergie lumineuse

S 10.1 La Reflexion

S Si un rayon lumineux rencontre une surface réfléchissante, il se réfléchit, c'est à dire qu'il change de direction selon une loi simple: l'angle d'incidence égale l'angle de réflexion.

- Plus le soleil est haut dans le ciel, plus ses rayons pénètrent dans l'eau. À l'aube, ou au crépuscule, les rayons du soleil étant rasants, la majeure partie est réfléchi et il y a peu de lumière sous l'eau. On préférera donc plonger vers la mi-journée.

Les aventures d'un rayon de lumière

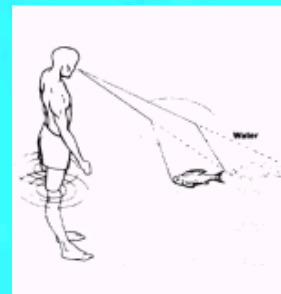


10. L'énergie lumineuse (suite)

S 10.1 La Réfraction.

S Lorsqu'un rayon lumineux passe de l'air dans l'eau, il est légèrement dévié. C'est la réfraction.

S L'effet de réfraction a pour conséquence de provoquer l'impression de voir un tiers plus grand et un quart plus près dans l'eau et réduit l'angle de vision de 180° (air) à 97° (eau).





10. L 'énergie lumineuse (suite)

S 10.2 Turbidité de l' eau

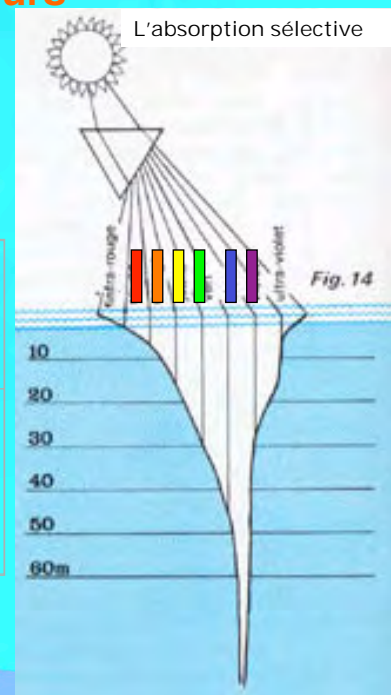
- S La turbidité de l'eau peut quelque fois profondément influencer la vision au cours de la plongée.
- S Plus elle est turbide, non seulement la visibilité en sera diminuée, mais la perception des distances le sera aussi:
- S Par exemple:
- S En zeelande, la distance des objets à 1 ou 1,5 metre est surestimée.
- S En Méditerranée, ce sont les objets à 6 à 7 metre qui apparaissent plus proche.
- S En Mer Rouge, ce phénomène apparaît aux alentours de 15 à 20 mètres.



10. L 'énergie lumineuse (suite)

S 10.4 L' absorpsion des couleurs

2mètres	5 mètres	10 et 15 m	25 et 65 m	> 65 m
Rouge modifié	Disparition du rouge	Disparition de l'orangé	Disparition du bleu, vert et violet	Disparition du monochrome vert





10. L'énergie lumineuse (suite)

- S **Absorption.**
- S =>transformation de l'énergie lumineuse en chaleur
- S 40% de lumière à 1m
- S 14% à 10m
- S 1,5 % à 40m

- S **Diffusion.**
- S Les particules dévient les rayons lumineux => effet brouillard



11 L'énergie sonore

11.1 Vitesse du son dans l'eau

Son : Une vibration qui se propage dans un milieu matériel (air, eau), de poche en poche.

Air : 330 m/s

Eau : 1500 m/s

Conséquence: le plongeur ne peut s'orienter grace au bruit

Application : L'écho-sondeur émet une onde verticale vers le fond et reçoit son écho après un délais, qui permet d'estimer la profondeur.

ex: Soit un délais d'1/10e de seconde. Quel est sa profondeur ?
 $1/10e \times 1500m = 150 \text{ mètres} / 2 = 75 \text{ mètres}$

11.2 Température de l'eau et le son.

Les thermoclines peuvent reflechir les ondes sonores, c'est à dire qu'un plongeur à 20m en méditerranée peut ne plus entendre ce qu'il ya en surface



12 Energie thermique

12.1 Conduction, Convection, et Radiation.

- s *Conduction* est la transmission de chaleur par contact direct. Parce que l'eau est un très bon conducteur de chaleur, le plongeur doit minimiser le contact entre son corps et l'eau froide, afin d'éviter l'hypothermie.
- s *Convection* est le transfert de chaleur par mouvement du milieu physique. C'est le principe de la combinaison humide. L'eau est immobilisée contre le corps du plongeur, et elle n'est pas refroidi par le milieu car la convection est limitée.
- s *Radiation* est la transmission de chaleur par ondes électromagnétique. C'est le principe du thermoplush au titane des vêtements de plongée haut de gamme.



- s **Merci de votre attention**