

La physique appliquée à la plongée.

Le but de cet ouvrage n'est pas de faire de vous des « physiciens accomplis » ni de remplacer les cours dispensés par vos instructeurs.

Son but est d'expliquer rationnellement les principes de base qui régissent notre activité.

- Unités fondamentales.
- Physique des gaz
 - Les gaz parfaits
 - Mélange des gaz
 - Loi de Henri
 - Equation d' Haldane
- Principe d'Archimède
- Optique
 - La lumière
 - Grandeurs photométriques
- Thermodynamique
 - La température
 - La chaleur
 - Transmission de la chaleur
 - Bilan thermique
- Transmission du son dans l'eau

Table des matières

Introduction.....	3
Les unités fondamentales.....	3
Les unités dérivées.....	3
La physique des gaz.....	3
La Pression.....	3
Les gaz parfaits.....	4
La loi des gaz parfait.....	4
Variation de l'état d'un gaz.....	4
Mélange des gaz.....	5
Loi de Dalton.....	5
Loi de Henri.....	6
L'équation d'Haldane.....	6
Equilibre mécanique du plongeur.....	7
Le principe d'Archimède.....	7
La flottabilité.....	8
Optique.....	9
La lumière.....	9
La réflexion.....	9
La réfraction.....	9
Absorption.....	9
Diffusion.....	9
Les grandeurs photométriques.....	10
Flux lumineux.....	10
Intensité lumineuse.....	10
Luminance.....	10
Eclairement lumineux.....	10
Température de couleur.....	10
La Thermodynamique.....	11
La Température.....	11
La chaleur.....	11
Les modes de transmission de la chaleur.....	11
Conduction.....	11
Convection.....	12
Rayonnement.....	12
Notion de bilan thermique.....	12
La thermogenèse.....	12
Les pertes dues à la respiration.....	13
Les pertes cutanées.....	13
La dette thermique et le refroidissement de l'organisme.....	14
La transmission du son dans l'eau.....	15

Indications des niveaux.

Les niveaux auxquels s'adresse le texte sont indiqués entre parenthèses après les titres.

- N1- N2 plongeurs débutants
- N3 plongeurs confirmés
- N4 experts

Introduction. (N1-N4)

La physique n'est pas concevable sans unités de mesure clairement établies, définies et universelles ¹. Il existe deux types d'unités, les unités fondamentales et les unités dérivées de celles-ci mais pouvant être relié par une relation mathématique.

Les unités fondamentales.

Type	Unité	Symb.	Remarques
Longueur	mètre	m	
Temps	seconde	s	
Masse	kilogramme	kg	Ne pas confondre avec le « poids, la masse représente une quantité de matière et est invariable quel que soit l'endroit de l'univers
Température	Kelvin	K	$K = \text{°Celsius} + 273,15$
Quantité de matière	mole	mol	

Les unités dérivées.

Type	Unité	Symb.	Remarques
Vitesse	m/s	w, v, u	C'est la vitesse d'un mobile qui animé d'un mouvement rectiligne uniforme parcourt un mètre en une seconde.
Accélération, gravité	m/s^2	a, g	C'est l'accélération d'un mobile animé d'un mouvement uniformément accéléré dont la vitesse varie en une seconde de 1 m/s
Force (poids)	Newton, N	F	Force=masse (Kg) x accélération ou gravité (m/s^2) C'est la force qu'il faut donner à un mobile d'une masse de 1 kg pour lui communiquer une accélération de 1 m/s^2
Pression	Pascal N/m^2 , Pa	P	C'est la pression qui est due à une force de 1N qui agit sur une surface de 1 m^2 Le Pascal étant une unité très petite on utilise un multiple le bar : $100.000 Pa = 10^5 Pa = 1 bar$
Energie, Chaleur	Joule N.m, J	J, Q	Joule
Puissance	Watt J/s	W	C'est la puissance de un joule par seconde

Il existe dans les esprits une confusion entre la masse qui est invariable et le poids, qui est la force exercée par la gravité sur un objet et qui varie suivant l'endroit ou l'on se trouve dans l'univers. J'espère que l'exemple ci-dessous dissipera vos doutes.

Exemple #1

Le LEM (Lunar Excursion Module) à une masse sur terre de 14700 kg, quelle est sa masse sur la lune et dans l'espace. Quels est son poids sur la terre, dans l'espace et sur la lune en sachant que la gravité terrestre est de $9,81 m/s^2$ celle de la lune $1,62 m/s^2$ et que la gravité dans l'espace est considérée comme nulle.

	Terre	Lune	Espace
Masse	14700 kg	14700 kg	14700 kg
Poids	$14700 \times 9,81 = 144207N$	$14700 \times 1,62 = 23814N$	$14700 \times 0 = 0N$

La physique des gaz.

La Pression (N1-N2)

C'est le rapport entre une force et la surface sur laquelle elle s'exerce, suivant le principe de Pascal : toutes pression ou variation de pression se transmet intégralement et dans toutes les directions du fluide ².

$P = F / S$	Avec : P : Pression en Pascal F : Force en Newton S : Surface en mètre carré
-------------	---

Pression atmosphérique : c'est la pression exercée par de notre atmosphère

¹ Depuis les conférences internationales des poids et mesures de 1963 et 1980 les unités de longueur et de temps ont été redéfini à l'aide de grandeurs universelles : longueur d'onde d'une radiation et célérité de la lumière dans le vide spatial.

² Fluide : Gaz ou liquide

Pression hydrostatique ou pression relative: c'est la pression exercée par la hauteur de la colonne de liquide.

$P_{hyd} = mgh$	Avec : m : masse volumique du liquide en kg/m^3 g : gravité $9,81 m/s^2$ sur la terre h : Hauteur de la colonne de liquide en m
-----------------	--

La pression hydrostatique exercée sur terre par une colonne de 10m d'eau de mer ($m=1020 kg/m^3$) est de :
 $P_{hyd} = 1020 \times 9,81 \times 10 = 100.062 Pa$ soit +/- 1 bar

Ce qui signifie que chaque fois que nous descendons de 10m la pression s'accroît de un bar

Pression absolue : C'est la somme de la pression atmosphérique et de la pression hydrostatique, c'est cette pression qu'il faut utiliser pour les calculs relatifs aux gaz.

Profondeur	Pression hydrostatique	Pression atmosphérique	Pression absolue
0 m	0 bar	1 bar	1 bar
10 m	1 bar	1 bar	2 bar
20 m	2 bar	1 bar	3 bar

Les gaz parfaits (N1-N2)

La loi des gaz parfait

L'état d'un gaz a un moment donné est caractérisé par ses variables d'état. C'est variable sont sa pression, sa température et le volume qu'occupe le gaz. C'est variables sont reliées par la relation suivante :

$PV = nRT$	Avec : P : Pression en Pascal V : Volume du gaz en m^3 n : Nombre de mole de gaz R : Constante des gaz parfait $8,32 J / mol.K$ T : Température en Kelvin
------------	--

Variation de l'état d'un gaz.

Considérons un une quantité de gaz n à l'état 0 qui est caractérisé par ses variables d'état, pression, volume et température soit P_0, V_0, T_0 . Faisons évoluer ce gaz vers l'état 1 caractérisé par les variables d'état P_1, V_1, T_1 . d'après la relation précédente nous pouvons écrire que: $P_0V_0=nRT_0$ et $P_1V_1=nRT_1$ de ces deux relations il vient que :

$\frac{P_0V_0}{T_0} = \frac{P_1V_1}{T_1}$

Si la transformation s'effectue en maintenant une des trois variables d'état constante il existe trois possibilités :

- La température reste constante, il s'agit d'une transformation isotherme.
- La pression reste constante, il s'agit d'une transformation isobare
- Le volume reste constant, il s'agit d'une transformation isochore

Transformation	Constante	Relation	Loi de :
Isotherme	$T_0=T_1$	$P_0V_0 = P_1V_1$	Boyle ³ -Mariotte ⁴ (1)
Isobare	$P_0=P_1$	$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_1}{T_1}$	Charles ⁵ Gay-Lussac ⁶ (2)
Isochore	$V_0=V_1$	$\frac{P_0}{T_0} = \frac{P_1}{T_1}$	

C'est surtout la relation (1) et dans une moindre mesure la relation (2) qui intéresse les plongeurs.

Exemple #2

³ Robert Boyle (25/01/1627 - 30/12/1691) physicien et chimiste irlandais

⁴ L' Abbé Edmé Mariotte (1620 - 12/05/1684) physicien et un botaniste français

⁵ Jacques Charles (12/11/1746 – 07/04/1823) chimiste, physicien et aéronaute français

⁶ Louis Joseph Gay-Lussac (6/12/1778 – 9/05/1850) chimiste et physicien français

1) Quel sont les variations de volumes d'un ballon de 10 litres qu'on lâche à une profondeur de 40m ?
 Quel conclusion en tirez-vous ?

Profondeur	Pression	Volume	Conclusions
Surface 0m	1 bar	50 l	Plus on se rapproche de la surface, plus la variation de volume est importante. Plus on est près de la surface et plus le risque de surpression pulmonaire est important
10m	2 bar	50/2=25l	
20m	3 bar	50/3=17l	
30m	4 bar	50/4=12,5l	
40m	5 bar (P0)	10 l (V0)	

2) Après remplissage de la bouteille on mesure une pression de 200 bar, la température de la bouteille est de 40°C. On plonge dans une eau à 4°C quel va être la pression lue sur le manomètre à la mise à l'eau ?

P0=200 bar

T0= 273 + 40 = 313 K

T1= 273 + 4 = 277 K

Pression lue = P1= 200 x 277 / 313 = 177 bar

Conséquences de la loi de Boyle-Mariotte sur la plongée.(N1)

- Barotraumatisme (Surpression pulmonaire, placage...)
- Consommation de gaz en circuit ouvert en fonction de la profondeur
- Gonflage des bouées, BCD, Costume étanche
- Profondimètre mécanique
- Gonflage des bouteilles

Conséquences de la loi de Charles sur la plongée.

- Refroidissement des compresseurs.
- Variation de la pression entre le gonflage et l'utilisation des bouteilles.

Mélange des gaz (N3-N4)

Loi de Dalton (N3)

Dans un mélange de gaz parfait Dalton⁷ a énoncé les lois suivantes:

- La pression partielle d'un gaz constituant d'un mélange est la pression qu'aurait ce gaz s'il occupait seul le volume total du mélange.
- La pression totale du mélange est la somme des pressions partielles.
- La pression partielle d'un gaz constituant d'un mélange est égale au produit de la pression totale par le pourcentage du gaz considéré.

Considérons une enceinte fermée qui contient un mélange de n gaz non réactif ayant un pourcentage [%n] dans le mélange. La loi de Dalton s'écrit sous la forme :

$Pp_n = P \times [\%n]$ $P = \sum_{(1 \text{ à } n)} Pp_n$	Avec : P : Pression totale du mélange Pp _n : Pression partielle de chaque constituant du mélange [%n] : Pourcentage du gaz considéré dans le mélange
--	--

Exemple #3

1) Une bouteille de Tx 15/50 est gonflée à 200 bar quelles sont les pressions partielles des différents constituants ?

Mélange	Concentration		Pression partielle
	Symbole	Valeur	
Oxygène	[O2]	0,15	30 bar
Hélium	[He]	0,50	100 bar
Azote	[N2]	0,35	70 bar
Pression totale			200 bar

⁷ John Dalton (06/09/1766 - 27/07/1844) chimiste et physicien britannique

Conséquences de la loi de Dalton sur la plongée.(N3)

- Calcul des tables
- Adaptation des tables à l'altitude (Méthode du Cdt Chauvin)
- Accidents toxiques, seuil de toxicité des gaz
- Calcul des mélanges respiratoires
- Oxygénothérapie

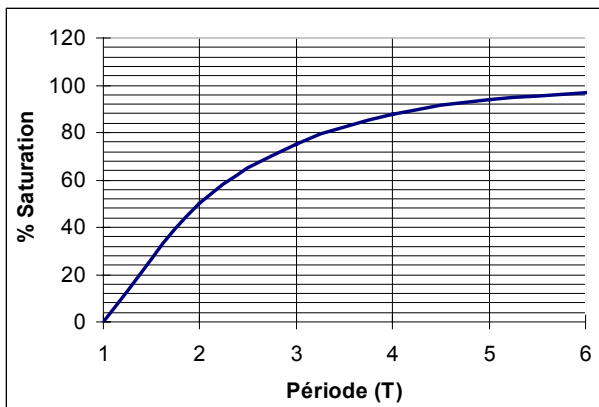
Loi de Henri (N3)

La loi de Henri régit la dissolution des gaz dans les liquides⁸. Lorsqu'un gaz est en contact avec un liquide il se produit un échange gazeux entre ceux-ci, les gaz se dissolvent dans les liquides. On appelle « Tension » la pression exercée par le liquide sur le gaz dissous en son sein. On appelle « Saturation » l'état par lequel la pression du gaz (P) et sa tension (Tg) au sein du liquide sont en équilibre c'est à dire lorsque le maximum de gaz est dissout.

Henri⁹ a énoncé la loi suivante : *A température constante et à saturation, la quantité de gaz dissout dans un liquide est proportionnelle à la pression qu'exerce ce gaz sur le liquide.*

Equation	Etat	Remarques
$P = Tg$	Saturation	Le maximum de gaz est dissout, la pression reste constante : Le système est stable.
$P > Tg$	Sous saturation	Le gaz se dissout dans le liquide. Ce qui se produit lorsque le plongeur descend.
$P < Tg$	Sur Saturation	Le gaz reprend sa forme gazeuse en quittant le liquide. Ce qui se produit lorsque le plongeur remonte

Mécanisme de la dissolution.



La quantité de gaz pouvant être dissoute dans un liquide et la vitesse dissolution dépendent de la nature du gaz et du liquide, de la pression, de la température, de la surface d'échange et de la diffusion. La diffusion d'un gaz c'est sa propriété à pouvoir pénétrer à l'intérieur dans un liquide où sa concentration est plus faible.

La dissolution n'est pas immédiate, elle va dépendre de l'affinité entre le liquide et le gaz. Cette affinité va être caractérisée par la « Période ». La période (T) est le temps nécessaire à un liquide pour atteindre la demi-saturation. A chaque période le liquide dissout 50% du gaz disponible. L'évolution dans le temps de la charge de gaz dissoute par rapport à la pression ambiante est donnée par l'équation différentielle

$dp/dt=k(P-p_0)$. C'est la résolution de cette équation qui a permis de confectionner les tables de plongée. Haldane¹⁰ a été le premier à résoudre cette équation en admettant certaines hypothèses simplificatrices pour permettre l'intégration avec les moyens de l'époque.

Conséquences de la loi de Henri sur la plongée.

- Calcul des protocoles de décompression
- Accidents de décompression

L'équation d'Haldane. (N4)

Pour résoudre l'équation différentielle $dp/dt=k(P-p_0)$ Haldane a dû émettre certaines hypothèses dont les principales sont :

- La pression des gaz dissous est uniforme à l'intérieur d'un tissu.
- La pression se transmet instantanément aux gaz contenus dans les alvéoles pulmonaires.
- Les tissus sont considérés comme isolés. Ils n'échangent des gaz seulement avec la circulation sanguine.
- K est considéré comme une constante.

⁸ Au sens large du terme : il en va de même avec les « Tissus » composant notre organisme.

⁹ William Henry (12/12/1775 – 02/09/1836) physicien et chimiste britannique.

¹⁰ John Scott Haldane (03/05/1860 – 15/03/1936) physiologiste irlandais

- P est considéré comme constant ce qui signifie que l'équation ne s'applique que dans le cas d'une profondeur constante. Lors de la remontée la marge d'erreur dans la résolution sera plus importante, les variations de pressions devront se faire lentement.

Après résolution il vient :

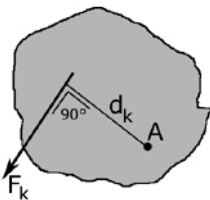
$p = p_0 + (P - p_0) \cdot (1 - e^{-kt})$ $k = - (1/T) \ln 0,5$	<p>Avec :</p> <p>p : tension du gaz dans les tissus après le changement d'état p₀ : tension du gaz dans les tissus avant le changement d'état P : Pression du gaz à la profondeur de calcul T : Période t : durée d'exposition du tissu à la pression P</p>
---	--

Exemple #4

Pour une plongée à l'air à la profondeur de 50m pendant 30minutes quel est la tension d'azote dans le tissu de période 40 minutes ?

P_{amb}=6 bar P=6x0,8=4,8 bar
p₀= 0,8 bar (tension d'azote en surface)
(P-p₀)= 4,8-0,8=4bar
k= - (1/40) ln 0,5 = 0,01733
kt= 0,01733x 30= 0,5199
(1-e^{-kt})= 1- e^{-0,5199}=0,4054
p= p₀ + (P - p₀). (1-e^{-kt})= 0,8 + (4x 0,4054)= 2,42 bar

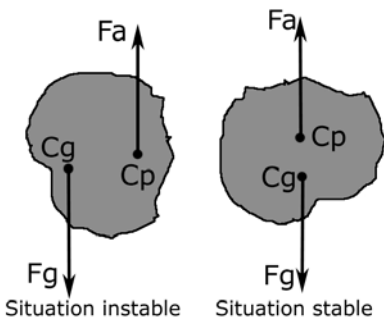
Equilibre mécanique du plongeur (N1-N4)



Le plongeur et l'ensemble de son équipement est un système mécanique soumis à plusieurs forces antagonistes. Le système est stable lorsque le plongeur reste au même niveau et ne tourne pas sur lui-même. Pour obtenir cet équilibre il faut que la résultante des forces qui agissent sur plongeur et leurs moments soient nul. Une force est parfaitement définie lorsqu'on connaît son intensité, sa direction et son sens. Le moment d'une force par rapport à un point est le produit de cette force par son bras de levier. Les principales forces qui agissent sur le plongeur sont la force de gravité et la poussée d'Archimède.

$\sum F_k = 0$ $\sum M_o F_k = 0 \quad \sum F_k d_k = 0$	<p>Avec :</p> <p>F_k = Force en Newton M_o = Moment de la force en N.m d_k = Bras de levier en m</p>
--	--

Le principe d'Archimède. (N1-N2)



Tout corps plongé dans un fluide (gaz ou liquide) reçoit de la part de celui-ci une poussée (Fa) verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du volume de fluide déplacé. Cette force passe par un point qui est le « centre de poussée » ou « centre de carène » (Cp) ou centre de gravité de la masse de fluide déplacé. Le corps est aussi soumis à la force de gravité (Fg) qui est égale au poids du corps. Cette force est verticale et est dirigée de haut en bas et passe par le centre de gravité (Cg) du corps. On appelle « Poids apparent » (Pa) la différence entre le poids réel du corps et la poussée d'Archimède¹¹. Pour que le corps soit en équilibre il faut que d'une part le poids apparent soit nul et d'autre par que le centre de gravité et le centre de poussée soit sur une même verticale. Si ce n'est pas le cas

le corps va tourner sur lui même jusqu'à la stabilité. L'équilibre sera stable si le centre de gravité est en dessous du centre de poussée. Plus le centre de gravité est éloigné du centre de poussée, plus la stabilité sera grande.

¹¹ Archimède de Syracuse : Mathématicien, géomètre et physicien Grec (287 av. J.-C. -212 av. J.-C.)

$P_a = F_g - F_a$ $F_g = m g$ $F_a = \delta V g$	Avec : P_a : Poids apparent en Newton (N) F_g : Poids du corps en Newton (N) F_a : Poussée d'Archimède (N) m : Masse du corps en kilogramme (Kg) g : 9,81 m/s ² δ : Masse spécifique du fluide en kg/m ³ V : Volume du corps en m ³
--	--

La flottabilité

Examinons dans quelles circonstances le corps, flotte, coule ou reste entre deux eaux.

$P_a = 0$	$F_g = F_a$	Flottabilité nulle	Le corps reste entre deux eaux
$P_a > 0$	$F_g > F_a$	Flottabilité négative	Le corps coule
$P_a < 0$	$F_g < F_a$	Flottabilité positive	Le corps flotte

Exemple #5

Une pierre d'une masse de 1500 kg et d'un volume de 0,5 m³ doit être sortie de l'eau quelle est la capacité minimale du parachute. On néglige le poids du parachute et de l'air.

$$F_g = 1500 \times 9,81 = 14715 \text{ N}$$

$$F_a = 0,5 \times 1000 \times 9,81 = 4905 \text{ N}$$

$$P_a = 14715 - 4905 = 9810 \text{ N}$$

Le parachute doit donc avoir une poussée de 9810N ce qui correspond à un volume de $9810 / (9,81 \times 1000) = 1 \text{ m}^3$ soit 1000 litres

Conséquences du principe d'Archimède sur la plongée.(N1)

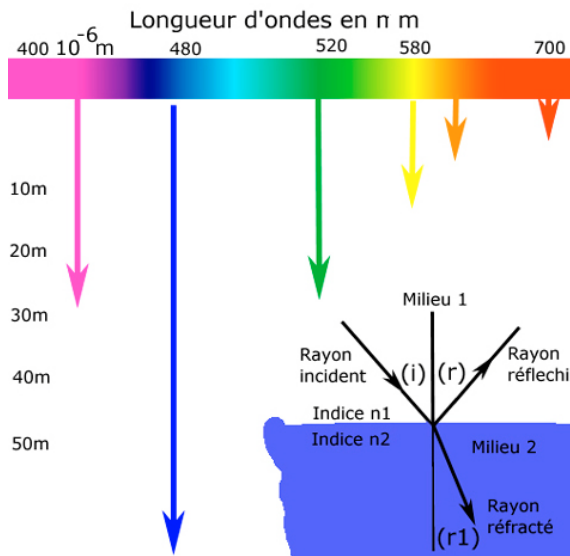
- Utilité du lestage.
- Poumons - ballast : La flottabilité du plongeur varie si ses poumons sont remplis ou pas.
- Utilisations des gilets.
- Utilisations des parachutes de marquage et de relevage.

Optique (N2-N4)

La lumière (N2)

La lumière désigne les ondes électromagnétiques visibles par l'œil humain. La vitesse ou célérité (c) de la lumière dans le vide est une constante universelle et vaut : 299 792 458 m/s. Sa vitesse dépend du milieu traversé. La lumière peut être composée de plusieurs longueurs d'onde comme la lumière blanche du soleil ou d'une seule longueur d'onde on parle alors de lumière monochromatique.

La réflexion (N3)



C'est le brusque changement de direction de l'onde lumineuse à l'interface entre deux milieux. L'angle d'incidence (i) est l'angle que forme le rayon qui arrive sur l'interface par rapport à un plan normal à l'interface. L'angle de réflexion (r) est l'angle que forme le rayon qui est réfléchi sur l'interface par rapport à un plan normal à l'interface. C'est deux angles sont égaux.

La réfraction (N3)

C' est la déviation de l'onde lumineuse lorsque celle-ci change de milieu. L'indice de réfraction d'un milieu est défini par le rapport entre la célérité de la lumière et sa vitesse dans ce milieu.

Les relations entre les rayons incidents, réfléchis et réfractés sont données par les lois de Snell¹² - Descartes¹³.

$(i) = (r)$ $n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r_1)$ $(r_{1\text{limite}}) = \text{Arcsin}(n_2/n_1)$	Avec : (i) Angle d'incidence (r) Angle de réflexion (r1) Angle de réfraction n1 indice de réfraction du milieu 1 n2 indice de réfraction du milieu 2 (r1limite) angle de réfraction limite si $n_1 > n_2$	Indice de réfraction n Air : 1,0003 Eau : 1,33 Verre : 1,5 à 1,65 Vide spatial : 1
---	---	---

La différence entre les indices de réfractions de l'eau et de l'air modifie considérablement notre vue :

- Il y a 42 dioptries de différence entre par rapport à l'air si l'œil est dans l'eau. L'image se forme derrière la rétine (hypermétropie) d'on l'obligation d'avoir une couche d'air (masque) pour assurer une vision correcte.
- Les objets nous sommes plus proche de 1/ 4 et plus gros de 1/3

Absorption (N3)

C'est le phénomène par lequel l'énergie des photons dissipée sous forme de chaleur dans le milieu matériel que traverse la lumière. La manière dont l'absorption va se faire dépendra du milieu, de la présence de particules et surtout de la longueur d'onde de la lumière. La couleur rouge est très vite absorbée, tandis ce que le bleu ne l'est pas

Dans quelques mètres d'eau nous ne voyons plus le rouge, il faut donc une lampe dont la lumière émise est proche de la lumière solaire pour restituer notre vision des couleurs.

Diffusion (N3)

C'est le phénomène par lequel un faisceau lumineux est dévié dans de multiples directions en rencontrant le milieu et les particules contenues dans celui ci. Les conséquences qui en résultent sont : la diminution progressive de la lumière et un effet de brouillard.

¹² Willebrord Snell (1580-1626) mathématicien Hollandais.

¹³ René Descartes (31/03/1596 – 11/02/1650) Philosophe, mathématicien, et physicien français

Conséquences sur la plongée (N2)

- Disparition progressive des couleurs et de la lumière
- Grossissement des objets de 1/3
- Raccourcissement de la distance de 1/4
- Réduction de la profondeur de champs de 1/4
- Obligation de porter un masque

Les grandeurs photométriques (N4)

Flux lumineux

C'est la puissance lumineuse émise par une lampe, exprimée en lumens (lm). Cette grandeur permet de comparer l'efficacité lumineuse des différentes lampes, exprimée en lumens émis par watt de puissance électrique consommée (lm/W).

Intensité lumineuse

C'est la quantité de flux lumineux émise dans une direction particulière, exprimée en candelas (cd).

Luminance

C'est la grandeur la plus représentative de la qualité de l'éclairage : c'est la lumière réfléchie que perçoit l'œil humain. C'est la "brillance" d'une surface éclairée ou d'une source lumineuse telle que perçue par l'œil humain, exprimée en candelas par m² (cd/m²). Elle est difficilement mesurable, ce sera l'éclairement, représentant la lumière incidente, qui sera le plus souvent utilisé dans la pratique.

Eclairement lumineux

C'est le flux lumineux reçu par unité de surface. L'éclairement s'exprime en lumen par mètre carré ou en lux (1 lx=1 lm/m²)

Température de couleur

Exprimée en kelvins¹⁴ (K) elle permet de déterminer la couleur d'une source de lumière. Plus la température de couleur est élevée et plus la lumière sera blanche. La lumière du jour se situe entre 5000 et 6000 K

Utilisation appliquée à la plongée

- Comparaison de l'efficacité de l'éclairage par rapport à la puissance électrique.
- Comparaison de la couleur émise par les lampes par rapport à la lumière naturelle.

Exemple #6

Comparez les éclairages Halogène, HID, LED d'un point de vue lumineux

Type	T° de couleur	Luminosité	Puissance	Lm / W
Halogène LL	3000 K	2200 lumen	100W	22
Halogène HLX	3300 °K	3600 lumen	100 W	36
LED ¹⁵	5500°K	450 lumen	21 W	21
HID ¹⁶	6000°K	450 lumen	10 W	45

D'un point de vue éclairage les lampes HID sont les plus performantes¹⁷.

¹⁴ Kelvin, Lord William Thomson (1824-1907) : Physicien et mathématicien écossais

¹⁵ Light Emitting Diodes : Semi conducteur qui émet de la lumière

¹⁶ High Intensity Discharge : lampe à décharge de haute intensité

¹⁷ Elles présentent néanmoins pas mal d'inconvénients : utilisation de ballast HT, prix, allumage non instantané.

La Thermodynamique (N3-N4)

Pour faire simple la thermodynamique est la science de la chaleur. Ce qui intéresse surtout le plongeur c'est la manière dont la chaleur se transmet et se perd, comment se protéger du froid et comme limiter les pertes de chaleur qui sont des pertes d'énergie.

La Température (N3)

C'est la chaleur ou la froideur d'une substance. Les deux échelles de température couramment utilisées sont le degré Celsius (°C) et le degré Fahrenheit (°F) aux USA. L'échelle Celsius est fixée le point de congélation et le point d'ébullition de l'eau, à la pression atmosphérique normale soit 0°C et 100°C. 0°C est équivalent à 32°F et à 100°C à 212°F. L'échelle de la température de Kelvin (°K) est l'échelle de température absolue. Le zéro absolu est la température la plus froide de l'univers (-273,15 °C).

Ces échelles sont reliées par la relation suivante :

$$^{\circ}\text{C}/100 = (^{\circ}\text{K} - 273,15)/100 = (^{\circ}\text{F} - 32)/180$$

La chaleur (N3)

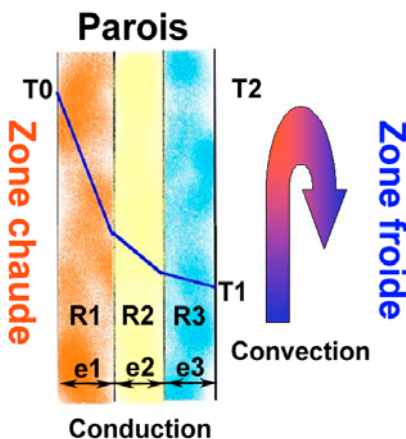
C'est l'énergie produite par l'agitation thermique au niveau moléculaire, elle s'exprime en Joule (J)

Les modes de transmission de la chaleur. (N3)

La transmission de la chaleur se fait toujours du corps le plus chaud vers le plus froid. Il existe trois mode de transmission de la chaleur : la conduction, la convection, le rayonnement.

Conduction (N3)

La chaleur se propage de molécule en molécule à travers la matière . La conduction se produit dans les solides, liquides ou gaz. Elle est plus importante dans les solides que dans les gaz ou les liquides car les molécules sont plus proche. Le transfert de chaleur au travers une paroi est un exemple type de conduction.



Le coefficient de conductibilité thermique (λ)

C'est la quantité de chaleur qui traverse, en une seconde, une paroi de 1m² d'une épaisseur de 1m si la différence de température des surfaces est de un degré. La conductivité thermique s'exprime en W/m °C. C'est une caractéristique des matériaux.

λ élevée : matériau conducteur de la chaleur.

λ faible : matériau isolant.

Le coefficient de résistivité thermique (ρ)

C'est l'inverse du coefficient de conductibilité thermique . $\rho = 1/\lambda$

ρ faible: matériau conducteur de la chaleur.

ρ élevée: matériau isolant.

La résistance thermique (R), le coefficient thermique (U) et la transmission de la chaleur au travers d'une paroi .

La résistance thermique est la capacité d'isolation thermique d'une paroi, elle dépend des matériaux qui composent la paroi et de leurs épaisseurs. Plus la valeur de R est importante et plus la paroi sera isolante. Le coefficient thermique est l'inverse de la résistance thermique. C'est la quantité de chaleur qui passe au travers d'une paroi de un mètre carré en une seconde pour un écart de température entre les surfaces de un degré. La quantité d'énergie traversant une paroi dans un temps donné sera fonction de ces coefficients, des surfaces d'échanges et de la différence des températures entre les parois.

$R = e / \lambda$ $R_c = R_1 + R_2 + R_n$ $U = 1/R_c$ $P = U S (T_0 - T_1)$	Avec : R, R1, Rn : Résistance thermique d'une paroi simple (m ² °C / W) e : épaisseur de la paroi (m) Rc : Résistance thermique d'une paroi composite (m ² °C / W) U : Coefficient thermique d'une paroi (W / m ² °C) P : Puissance calorifique dissipée (W) S : Surface d'échange (m ²) (T0-T1) : Différence de température entre les parois chaude et froide
---	---

Quelques valeurs usuelles de λ

Matériaux	λ (W/m °C) à température ambiante
Conducteurs	Supérieur à 10
Isolants	Compris entre 0,01 et 1
Liquides	Compris entre 0,1 et 1
Gaz	Compris entre 0,02 et 0,2
Air / Nitrox	0,0257
Hélium	0,146
Argon	0,0177

Convection (N3)

Dans les fluides les différences de température produisent des différences de densité mettant en mouvement celui-ci. La transmission de chaleur se fait par transfert de matière, on ne rencontre donc pas ce type de transmission dans les solides. L'expression du coefficient de convection est très complexe il dépend de la nature et de la vitesse du fluide, de la forme et du type de parois, des températures...

$W_{\text{conv}} = hc S (T1 - T2)$	Avec :
	W conv : Perte par convection (W)
	hc : Coefficient de convection (W /m ² °C)
	S : Surface d'échange (m ²)
	T1 : Température de la paroi (°C) T2 : Température du milieu (°C)

Rayonnement (N3)

L'énergie est émise sans support matériel par leur surface des objets sous forme de radiations. Dans nos applications ce mode de transmission est très faible.

Conséquences au niveau de la plongée.(N2)

- Perte par convection par circulation de l'eau autour du plongeur.
- Perte par convection lors de l'expiration
- Transmission de chaleur par conduction au travers de la combinaison
- Obligation d'utiliser des vêtements isothermiques
- Risque de refroidissement de l'organisme

Notion de bilan thermique.(N4)

Un des problèmes que rencontre le plongeur est le choix de sa combinaison en fonction de la température de l'eau et de la durée de la plongée, il doit éviter l'hypothermie et l'hyperthermie. Notre organisme produit de la chaleur pour maintenir notre température corporelle constante c'est la thermogenèse. Le bilan thermique c'est la différence entre la chaleur produite par thermogenèse et les pertes de chaleur. Les pertes sont de deux types : les pertes cutanées par conduction au travers de la combinaison et les pertes dues à la respiration. Si le bilan thermique est positif : nous produisons trop de chaleur et il y a risque d'hyperthermie. Dans le cas contraire si le bilan est négatif il y a risque d'hypothermie. L'idéal est d'avoir un bilan thermique nul. Dans une certaine mesure nos systèmes de thermorégulation permettent de rétablir l'équilibre.

Les formules et coefficients que nous publions ci après sont empiriques. Elles ne permettent pas d'effectuer un bilan « au Watt près » mais sont suffisantes pour déterminer le danger réel d'hypothermie ou pour comparer les équipements.

$BT = Th - \text{pertes}$ $\text{Pertes} = P_{\text{cut}} + P_{\text{resp}}$	Avec : BT : Bilan thermique en Watt Pcut : Pertes cutanées en Watt Pres : Pertes dues à la respiration en Watt Th : Thermogenèse en Watt
---	--

La thermogenèse

C'est le moteur qui produit notre chaleur interne. La puissance de ce moteur est très variable de 60 Watt pour un sujet au repos elle peut passer à 300 Watt en cas d'effort physique très intense. La puissance est fonction de la taille, du poids et de l'activité du sujet ainsi que de la durée d'exposition à l'élément perturbateur. Cette réduction peut atteindre 50% après 2 heures dans un eau froide.

$TH = \text{Cons} \times 100 / 8$	Avec : TH : Thermogenèse en W Cons : Consommation d'air en L/min à la pression atmosphérique normale (1 bar)
-----------------------------------	--

Les pertes dues à la respiration.
 On peut les évaluer à l'aide de la relation empirique suivante.

$\text{Presp} = (0,8(37-T)C.Q.P/60) + H$	Avec : Presp : pertes du à la respiration en Watt T : Température des gaz respiré en °C C : Capacité calorifique du gaz en W/°C Q : Débit de gaz circulant dans les poumons en surface en L/min (20 L/min par défaut) P : Pression absolue en bar H : Facteur qui tient compte de l'humidité des gaz respiré. 10W par défaut
--	--

Quelques valeurs du coefficient de capacité calorifique.

	Air	Nitrox	Hélium	Trimix	Héliox
C en W/°C	1,31	1,31	0,93	+ /- 1,10	+/- 0,93

Exemple #6

Comparez les pertes du à la respiration entre deux plongeurs dans une eau à 4°C l'un évoluant en circuit ouvert, l'autre en recycleur à la profondeur de 40m. On considère que la température dans la boucle de recyclage est de 25°C et que dans un circuit ouvert la température du gaz respiré est identique à la température ambiante.

	Circuit ouvert	recycleur
T	4°C	25 °C
C	1,31	1,31
Q	20 L/min	20 L/min
P	5 bar	5bar
H	10	10
Presp	(0,8 (37-4)x1,31x20x5 /60)+10= 68 Watt	(0,8 (37-25)x1,31x20x5 /60)+10= 31 Watt

Conclusion

Pour une plongée dans nos eaux habituelles en hiver la perte due à la respiration est moitié moindre qu'en circuit ouvert.

Les pertes cutanées.

Ces pertes proviennent principalement de la convection et de conduction à l'interface entre le milieu extérieur et l'organisme. Les différentes parois isolantes limitant le transfert de chaleur sont la périphérie de l'organisme, les différents vêtements, la couche limite d'eau... Chacune des parois est caractérisée par sa conductance qui est une « image » du coefficient thermique ramené à la taille d'un plongeur moyen.

$P_{\text{cut}} = (37 - T_2) / \sum (1/C_n)$ $\sum (1/C_n) = 1/C_{\text{or}} + 1/C_{\text{li}} + \sum 1/C_v + 1/C_{\text{le}}$	Avec : Presp : pertes cutanées en Watt T2 : Température du milieu extérieur en °C Cn : Conductances en W/°C Cor : Conductance de la périphérie de l'organisme. Cli : Conductance de la couche limite intérieure Cv : Conductance des sous-vêtements et de la combi Cle : Conductance de la couche limite extérieure
--	--

Quelques valeurs de conductance

Cor	Plongeur plutôt gras : 15
	Plongeur plutôt maigre : 40
Cli	Combinaison étanche : 8 (air)
	Combinaison humide : 50-70 (eau)
Cle	Eau calme : 70
	Eau agitée : 300
Cv	Combinaison Néoprène 3mm :50 5mm :30 7mm :20
	Combinaison toilée:300
	Thinsulate (Air) 100 gr/m2=28 200gr/m2=14 400gr/m2=7
	Thinsulate (Argon) 100 gr/m2=16 200gr/m2=8 400gr/m2=4
	Thinsulate trempé : 100

Exemple #7

Comparez les pertes cutanées entre deux plongeurs de taille moyenne dans une eau à 4°C l'un évoluant en combinaison humide de 7mm et l'autre en combinaison étanche toilée gonflée avec de l'air.

	Combinaison humide	Combinaison étanche
T2	4°C	4°C
Cor	30 W/°C	30 W/°C
Cli	60 W/°C	8 W/°C
Cle	150 W/°C	150 W/°C
Cv	20 W/°C	300 et 14 W/°C
$\Sigma (1/C_n)$	$1/30 + 1/60 + 1/150 + 1/20 = 0,1067$	$1/30 + 1/8 + 1/150 + 1/300 + 1/14 = 0,2398$
Pcut	$(37-4)/ 0,1067= 309 \text{ Watt}$	$(37-4)/ 0,2398= 138 \text{ Watt}$

Conclusion

- 1) Pour une plongée dans nos eaux habituelles en hiver la perte cutanée en combinaison humide est double de celle en combinaison étanche.
- 2) L'utilisation de la combinaison humide engendre une perte supérieure à ce que la thermogenèse peut produire. Il y aura donc une dette thermique qui va engendrer un refroidissement de l'organisme.

La dette thermique et le refroidissement de l'organisme.

Lorsque le bilan thermique est négatif il y a dette thermique. Cette dette thermique va engendrer un abaissement de la température corporelle. Un refroidissement de un degré de la température centrale peut mettre le plongeur en danger.

Le refroidissement par heure peut s'évaluer de la manière suivante.

Ref=BT / Poids Si : BT<0	Avec : Ref: Refroidissement horaire (°C/heure) BT : Bilan thermique en Watt Poids : Poids du plongeur en kilo
--	--

Exemple #8

En considérant les exemples 6 et 7 déterminer la dette thermique et le refroidissement du plongeur en costume humide et en circuit ouvert si celui-ci à un poids de 80 Kg.

Thermogenèse estimée (Th)	250 watt
Perte cutanée (Pcut)	309 Watt
Perte respiratoire (Presp)	68 Watt
Perte totale	377 Watt
Bilan Thermique	$250-377= 127 \text{ watt}$
Poids	80 Kg
Ref	$127/80= 1,6 \text{ °C/heure}$
Temps maximum d'immersion	$1/1,6= 0,625 \text{ heures soit } 37 \text{ minutes}$

Conclusion

Pour une plongée dans nos eaux habituelles en hiver la plongée ne pourra pas dépasser 30 minutes en costume humide.

La transmission du son dans l'eau. (N2)

Le son se propage particulièrement bien sous l'eau, l'atténuation est beaucoup plus faible que pour les ondes électromagnétiques. Les ondes acoustiques constituent le meilleur moyen de transmission sous l'eau elles se déplacent à une vitesse qui se situe entre 1490 et 1530 m/s.

Plus un milieu est dense, moins il est compressible et plus grande sera la vitesse de déplacement de l'onde sonore. Ce qui explique que la vitesse du son dans l'eau est cinq fois plus élevée que dans l'air. La vitesse du son dans l'eau varie en fonction du coefficient de compressibilité et de la masse volumique du milieu. Cette masse volumique varie aussi en fonction de la pression, de la température et de la salinité.

Ce n'est pas sans conséquence sur le plongeur car si nous entendons clairement des sons lointains il nous est impossible d'estimer la distance et la position de la source sonore. La vitesse du son est tellement plus importante dans l'eau par rapport à l'air que le son arrive pratiquement au même moment à nos deux oreilles qui n'ont pas une finesse suffisante pour pouvoir déterminer la direction du son. Dans l'air la finesse de notre ouïe est suffisante pour enregistrer la légère différence de temps dans la réception d'un son au niveau de l'oreille.