



Jean-Claude Taymans

Eléments de physique à l'usage des plongeurs et instructeurs

- *Les unités*
- *Analyse dimensionnelle*
- *Physique des gaz*
- *Actions mécaniques*
- *Optique*
- *Thermodynamique*



AVERTISSEMENTS

Ce livre ne remplace pas la formation et n'est pas un substitut à un encadrement professionnel.

L'auteur n'assume dès lors aucune responsabilité quant aux données et informations publiées dans cet ouvrage. L'auteur ainsi que l'éditeur ne peuvent encourir aucune responsabilité, légale ou contractuelle, pour les dommages éventuels encourus en raison de l'utilisation de cet ouvrage.

Toute reproduction d'un extrait quelconque de cet ouvrage, par quelque procédé que ce soit, notamment par photocopie, imprimerie, microfilm est interdite sans l'autorisation de l'auteur.

Copyright © Jean-Claude Taymans, tous droits réservés
2 Rue Mouzin – 7390 Wasmuël – Belgique
jctdive@gmail.com
D\Décembre 2022\Jean-Claude Taymans : Editeur
ISBN 978-2-930747-20-0



Table des matières

Partie 1 - Introduction	5
Introduction. (N1-N4)	6
Les unités fondamentales.	6
Les unités dérivées.	6
Les multiples et sous-multiple.....	7
Elément d'analyse dimensionnelle.....	7
Partie 2 - Physique des gaz	8
La Pression (N1-N2)	9
Pression atmosphérique.....	9
Pression hydrostatique ou pression relative	9
Pression absolue.....	9
Principe de Pascal.....	9
Les gaz parfaits (N1-N4).....	10
Caractéristiques thermodynamiques des gaz (N4-Tek).....	10
Conditions normales d'un gaz.....	10
La loi d'Avogadro (N4).....	10
La loi des gaz parfait - Equation d'état d'un gaz (N1-N2).....	11
Variation de l'état d'un gaz parfait (N1-N2)	11
Mélange des gaz parfaits (N3-N4)	12
Loi de Dalton (N3)	12
Les chaleurs massiques (Cp) et (Cv) dans les mélanges (N4-TEK).....	13
Gaz réels (N3-N4).....	14
Equations d'état des gaz réels (N4).....	14
Facteur de compressibilité (N4)	14
Equation de Van Der Waals (N4-TEK).....	15
Equation de Clausius (N4-TEK).....	16
Les coefficients a et b dans les mélanges de gaz réels (TEK).....	16
Loi de Henry (N3).....	17
Mécanisme de la dissolution.	17
L'équation d'Haldane. – (Equation instantanée) (N4)	18
L'équation de Schreiner – Kelley (Equation globale) (Informatif)	19
Partie 3 – Les actions mécaniques	20
Quelques notions préliminaires (N1).....	21
Force	21
Principe de l'action-réaction	21
Moment d'une force.....	21
Système en équilibre.....	21
Equilibre mécanique du plongeur (N1-N4)	22
Le principe d'Archimède. (N1-N2).....	22
La flottabilité.....	23
Partie 4 – Optique	24
Définition de l'optique.....	25
La lumière (N2)	25
Réflexion – Réfraction - absorption (N3).....	25
Réflexion.....	25
Réfraction.....	25
Absorption	25
Diffusion.....	26
Grandeurs photométriques (N4)	26
Flux lumineux	26
Intensité lumineuse.....	26
Luminance	26
Eclairage lumineux	26
Température de couleur de la lumière	26
Vergence et dioptrie d'un système optique (N4).....	27
Types de lentilles.....	27
Association de lentilles	27
Partie 5 – Thermodynamique	28



Définition de la thermodynamique (N2-N4)	29
La Température (N2)	29
La chaleur (N3).....	29
Les modes de transmission de la chaleur. (N3)	29
Conduction	29
Convection (N3).....	30
Rayonnement (N3)	30
Conséquences des échanges thermiques en plongée. (N1- N2)	31
Notion de bilan thermique. (N4)	31
La thermogenèse.....	31
Les pertes dues à la respiration.	31
Les pertes cutanées.	32
La dette thermique et le refroidissement de l'organisme.	33
La diffusion des gaz (N4-TEK-Blender)	34
Loi de Graham.....	34
Le coefficient de diffusion.....	34
Estimation du temps d'homogénéisation d'un Trimix.....	35
Partie 6 – Transmission des ondes	36
Une onde c'est quoi ? (N3)	37
Ondes mécaniques.....	37
Longueur d'onde, fréquence, célérité et amplitude	37
Les ondes sonores (N2-N3).....	37
Vitesse (célérité) du son dans le milieu gazeux. (N2)	37
Vitesse (célérité) du son dans le milieu liquide (N2)	38
Puissance sonore, pression sonore, perception des sons (N4).....	39
Atténuation de la pression (niveau) sonore (N4 - Blender).....	39

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, instructeurs, plongeurs TEK, Blender**



Partie 1 - Introduction

- Unités fondamentales.
- Unités dérivées.
- Multiples et sous-multiples.
- Élément d'analyse dimensionnelle.

Document non libre de droit



Introduction. (N1-N4)

La physique n'est pas concevable sans unités de mesure clairement établies, définies et universelles¹. 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 erreurs les plus fréquentes sont : utiliser des °C à la place de degrés Kelvin ; se tromper dans la valeur de la constante des gaz parfaits qui n'est pas un adimensionnel.

Lorsqu'on calcule il faut veiller à utiliser des unités cohérentes. Les coefficients utilisés dans certaines formules ne sont pas des adimensionnels, il faut y être particulièrement attentif. En cas de doute, il convient de faire une analyse dimensionnelle de la relation mathématique...

On ne multiplie pas des poires avec des pommes !

Les unités fondamentales.

Type	Unité	Symbole	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= °Celsius + 273,15
Quantité de matière	mole	mol	Quantité de matière qui contient 6,022 10 ²³ atomes ou molécules (Nombre d'Avogadro)

Les unités dérivées.

Type	Unité	Symbole	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 d'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 où 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/s² celle de la lune 1,62 m/s² et que la gravité dans l'espace est considérée comme nulle.

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

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.



Les multiples et sous-multiple

Préfixe	Symbole	Facteur multiplicatif	
Giga	G	1.000.000.000.	10^9
Méga	M	1.000.000	10^6
Kilo	k	1.000	10^3
Hecto	h	100	10^2
Déca	da	10	10^1
Unité	-	1	1
déci	d	0,1	10^{-1}
centi	c	0,01	10^{-2}
milli	m	0,001	10^{-3}
micro	μ	0,000 001	10^{-6}

Élément d'analyse dimensionnelle

Une analyse dimensionnelle permet de déterminer les unités d'un élément de formule en fonction des unités fondamentale ou de vérifier si les formules sont homogènes. Le plus simple consiste à remplacer, dans la relation, les variables par leur unité.

Exemple #2

Quels est l'unité de la constante des gaz parfaits en sachant que :

- n = nombre de moles
- P = pression en Pascal
- V = volume en mètre cube
- T = température en Kelvin
- $PV = nRT$ (1)

Résolution :

Pression Pa = N/m^2

Nm = Joule (J)

De la relation (1)
$$R = \frac{PV}{nT} \longrightarrow \frac{N.m^3}{m^2.mol.K} = \frac{N.m}{mol.K} = \frac{J}{mol.K}$$

R sera donc exprimé en Joule par mole et par Kelvin



Partie 2 - Physique des gaz

- Pression.
 - Pression atmosphérique, hydrostatique, absolue.
 - Principe de Pascal.
- Gaz parfaits.
 - Caractéristiques thermodynamiques, conditions normales.
 - Loi et nombre d'Avogadro.
 - Loi des gaz parfaits, équation d'état.
 - Variation d'état d'un gaz.
 - Loi de Boyle-Mariotte.
 - Loi de Charles.
 - Loi de Gay-Lussac.
 - Mélange des gaz parfaits.
 - Loi de Dalton.
 - Les chaleurs massiques (c_p) et (c_v) dans les mélanges
- Gaz réels.
- Equations d'état d'un gaz réel
 - Equation de Van Der Waals
 - Point critique, détermination des coefficients a et b
 - Valeurs usuelles de a, b, P_k , T_k
 - Equation de Clausius
 - Les coefficients a et b dans les mélanges de gaz réels
- Loi d'Henry
 - Mécanisme de la dissolution
 - Equation d'Haldane
 - Equation de Schreiner-Kelley



La Pression (N1-N2)

C'est le rapport entre une force et la surface sur laquelle elle s'exerce. Suivant le principe de Pascal : toute pression ou variation de pression se transmettent intégralement et dans toutes les directions du fluide²

$$P = F/S \quad (01)$$

Avec :

P : Pression en Pascal F : Force en Newton

S : Surface en mètre carré

Pression atmosphérique

Pression exercée par de notre atmosphère

Pression hydrostatique ou pression relative

Pression exercée par la hauteur de la colonne de fluide (liquide ou gaz)

$$P_{hyd} = mgh \quad (02)$$

Avec :

P_{hyd} : Pression hydrostatique en Pascal (Pa)

m : masse volumique du liquide en kg/m^3

g : gravité $9,81 m/s^2$ (sur 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 d'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

Principe de Pascal

Dans un milieu fermé, toute pression ou variation de pression exercée sur un fluide au repos se transmet intégralement et uniformément dans toutes les directions. La force engendrée par la pression sur une surface est perpendiculaire à cette surface.

Conséquences du Principe de Pascal sur la plongée.

- Les manomètres.
- Transmission de la pression vers le manomètre.
- Capteur de pression des ordinateurs.

² Fluide : Gaz ou liquide



Les gaz parfaits (N1-N4)

Caractéristiques thermodynamiques des gaz (N4-Tek)

Le tableau reprend les principales caractéristiques thermodynamiques des gaz utilisés en plongée.

Gaz		μ	Cp-Cv	Chaleurs massiques		k
Nom	Symbole			Cp	Cv	
Air sec	-	28,96	287	1004	717	1,401
Oxygène	O ₂	32	260	915	655	1,397
Azote	N ₂	28,016	296	1039	743	1,399
Hélium	He	4	2077	5193	3116	1,664
Argon	Ar	39,95	2081	520	312	1,667

Avec :

μ = Masse molaire (atomique) du gaz (g/mol) (en gramme par mole) On les trouvent dans le tableau périodique des éléments dit tableau de Mendeleïev³

Cp-Cv (J/Kg K)

Cp = Chaleur massique⁴ à pression constante (J/Kg K)

Cv = Chaleur massique à volume constant (J/Kg K)

k = Cp/Cv Constante adiabatique

v = Volume massique (m³/Kg)

$\rho = 1/v$ = Masse volumique (Kg/m³)

Q= S W ρ = Débit massique (Kg/s)

Conditions normales d'un gaz.

Par définition, on considère qu'un gaz est dans des conditions normales lorsqu'il se trouve à la pression de 101325 Pa (1 atm) et à la température de 273,15 K (0 °C).

La loi d'Avogadro (N4)

Quel que soit le gaz, dans des conditions normales une molécule gramme (masse en gramme par mole) de ce gaz occupe un espace de 22,4 litres⁵.

Le nombre d'Avogadro

Une molécule gramme contient 6,02214076 10²³ particules (atomes ou molécules). Ce nombre est, par convention, une constante qui définit⁶ la mole.

Conséquences de la loi d'Avogadro sur la plongée. (N4)

- Calcul de la capacité des cartouches de CO₂ dans les gilets.

Exemple #3

Un gilet de plongée de 18 litres est équipé d'une cartouche de CO₂ de 33 grammes. Est-il possible de le gonfler complètement en surface ?

Masse atomique du carbone (C) = 12

Masse atomique de l'Oxygène (O) = 16

Masse atomique du CO₂ = 12 + (16 x 2) = 44

Dans des conditions normales 44 grammes de CO₂ occupent un espace 22,4 litres. 33 grammes occupent un espace de 22,4 x 33 / 44= 16,8 litres. C'est donc insuffisant pour gonfler complètement le gilet.

³ Dmitri Ivanovitch Mendeleïev (27/1/1834 – 20/1/1907) chimiste russe.

⁴ La chaleur massique est la quantité d'énergie calorifique qu'il faut fournir à une masse de 1kg de gaz pour augmenter sa température de 1°C. Elle peut être mesurée en maintenant la pression du gaz constante (Cp) ou en maintenant son volume constant (Cv)

⁵ Amedeo Avogadro (Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro, comte de Quaregna et de Cerreto) (9/8/1176-9/7/1856), physicien et chimiste italien né à Turin.

⁶ Depuis le 20 mai 2019



La loi des gaz parfait - Equation d'état d'un gaz (N1-N2)

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

$$PV = nRT \quad (03)$$

Avec :

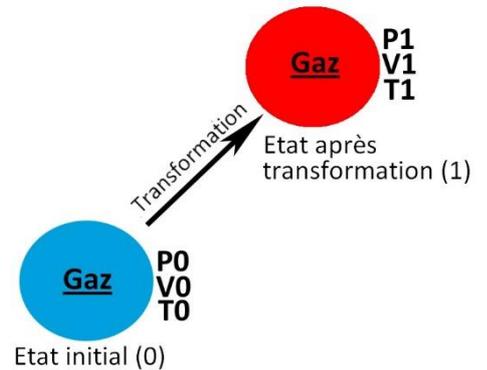
P : Pression en Pascal (Pa)

V : Volume du gaz en m³

R : Constante des gaz parfaits 8,314 J/mol K

T : Température en Kelvin (K)

n : Quantité de matière en moles (mol)



Cette relation va évoluer (Clausius, Van Der Waals...) pour se rapprocher de plus en plus du comportement réel des gaz dans des zones de pression, de température largement différentes de nos conditions habituelles

Variation de l'état d'un gaz parfait (N1-N2)

Considérons 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 : $P_0 V_0 = nRT_0$ et $P_1 V_1 = nRT_1$

De ces deux relations il vient que :

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \quad (04)$$

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 :
1	Isotherme (N1)	$T_0 = T_1$	$P_0 V_0 = P_1 V_1$ (05)	Boyle ⁷ -Mariotte ⁸
2	Isobare (N2)	$P_0 = P_1$	$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_1}{T_1}$ (06)	Charles ⁹
3	Isochore (N2)	$V_0 = V_1$	$\frac{P_0}{T_0} = \frac{P_1}{T_1}$ (07)	Gay-Lussac ¹⁰

C'est principalement la relation (1) et dans une moindre mesure la relation (2) qui intéressent les plongeurs. La loi de Gay-Lussac peut s'écrire sous la forme

$$P_1 = P_0 \left[1 + \frac{1}{273,15} (T_1 - T_0) \right] \quad (08)$$

Avec :

P_0 : Pression initiale de gaz en bar

P_1 : Pression finale de gaz en bar

⁷ Robert Boyle (25/01/1627 - 30/12/1691) physicien et chimiste irlandais.

⁸ L'Abbé Edmé Mariotte (1620 - 12/05/1684) physicien et un botaniste français.

⁹ Jacques Charles (12/11/1746 - 07/04/1823) chimiste, physicien et aéroplane français.

¹⁰ Louis Joseph Gay-Lussac (6/12/1778 - 9/05/1850) chimiste et physicien français.



T₀ : Température initiale

T₁ : Température finale

Exemple #4

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 (P ₀)	10 l (V ₀)	

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. (N1)

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

Mélange des gaz parfaits (N3-N4)

Loi de Dalton (N3)

Dans un mélange de gaz parfait Dalton ¹¹a 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 un réservoir contenant un mélange de n gaz non réactif ayant un pourcentage [x_i] dans le mélange. La loi de Dalton s'écrit sous la forme :

$$Pp_i = P [x_i] \quad (09)$$

$$P = \sum_{i=1}^n Pp_i = Pp_1 + Pp_2 + \dots Pp_n \quad (10)$$

Avec :

P : Pression totale du mélange.

Pp_i : Pression partielle de chaque constituant du mélange.

[x_i] : Pourcentage (fraction) du gaz considéré dans le mélange.

¹¹ John Dalton (06/09/1766 - 27/07/1844) chimiste et physicien britannique



Exemple #5

Une bouteille de Trimix 15/50 est gonflée à 200 bars quelles sont les pressions partielles des différents constituants ?

Mélange	Concentration		Pression partielle
	Symbole	Valeur	
Oxygène	[O ₂]	0,15	200 x 0,15 = 30 bars
Hélium	[He]	0,50	200 x 0,5 = 100 bars
Azote	[N ₂]	0,35	200 x 0,35 = 70 bars
Pression totale			200 bars

Conséquences de la loi de Dalton sur la plongée. (N2-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.

Les chaleurs massiques (Cp) et (Cv) dans les mélanges (N4-TEK).

Les chaleurs massiques des gaz purs sont parfaitement connues. Dans un mélange, il est démontré qu'il est possible de calculer les chaleurs massiques du mélange à partir des chaleurs massiques de chaque constituant. Considérons un réservoir contenant un mélange de n gaz non réactif ayant un pourcentage (fraction) [x_i] dans le mélange.

$$Cv = \sum_{i=1}^n [x_i] Cv_i = [x_1] Cv_1 + [x_2] Cv_2 + \dots [x_n] Cv_n \quad (11)$$

$$Cp = \sum_{i=1}^n [x_i] Cp_i = [x_1] Cp_1 + [x_2] Cp_2 + \dots [x_n] Cp_n \quad (12)$$

Avec :

Cp : Chaleur massique du mélange à pression constante. (J/Kg K)

Cv : Chaleur massique du mélange à volume constant. (J/Kg K)

Cp_i : Chaleur massique à pression constante des constituants du mélange. (J/Kg K)

Cv_i : Chaleur massique à volume constant des constituants du mélange. (J/Kg K)

[x_i] : Pourcentage (fraction) du gaz considéré dans le mélange.

Conséquences sur la plongée.

- Estimation du débit massique des buses soniques dans les recycleurs Tx.

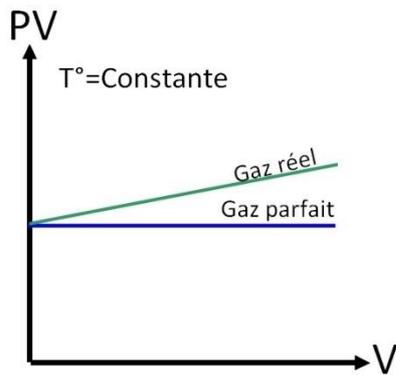
Exemple #6

Une bouteille de Trimix 15/50 est gonflée à 200 bars quelles sont les pressions partielles des différents constituants ?

Mélange	Données				[x _i] Cp _i	[x _i] Cv _i
	Symb.	Cp	Cv	x _i		
Oxygène	[O ₂]	915	655	0,15	0,15 x 915 = 137	0,15 x 655 = 98
Hélium	[He]	5193	3116	0,50	0,50 x 5193 = 2597	0,50 x 3116 = 1558
Azote	[N ₂]	1039	743	0,35	0,35 x 1039 = 364	0,35 x 743 = 260
Chaleurs massiques du mélange					3098 J/Kg K	1916 J/Kg K



Gaz réels (N3-N4).



Au-delà de 150 bars les gaz que nous utilisons en plongée ne se comportent plus tout à fait comme des gaz parfaits. Lorsque ces lois ont été écrites les compresseurs étaient loin d'atteindre les 200 à 300 bars. Il n'a donc jamais été tenu compte de l'interaction moléculaire et du rapprochement des molécules lors de la compression ni de la taille des différentes molécules qui composent le gaz. La différence de comportement est illustré par le diagramme (PV,V) d'Amagat

Equations d'état des gaz réels (N4)

Facteur de compressibilité (N4)

La manière la plus simple est de réécrire l'équation (03) en tenant compte d'un coefficient de compressibilité (Z) basé sur l'expérimentation. Cette équation devient alors :

$$\frac{PV}{Z} = nRT \quad (13)$$

Avec :

P : Pression en Pascal (Pa)

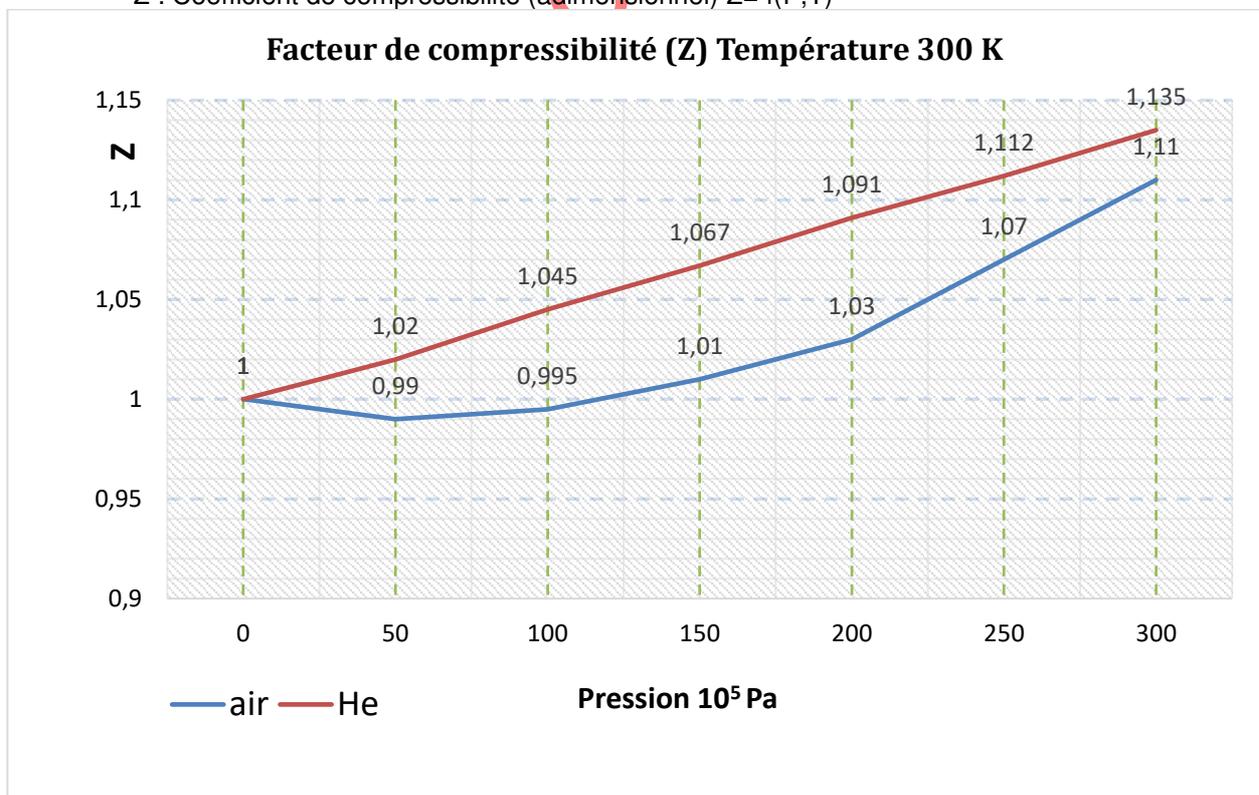
V : Volume du gaz en m³

R : Constante des gaz parfaits 8,314 J/mol K

T : Température en Kelvin (K)

n : Quantité de matière en moles (mol)

Z : Coefficient de compressibilité (adimensionnel) Z= f(P,T)





Equation de Van Der Waals (N4-TEK)

Une approche plus technique, mais largement plus complexe, a été réalisée par Van Der Waals¹². Dans la théorie des gaz parfait, on considère que :

- Les molécules de gaz sont des « points » sans dimensions et que la compression peut tendre vers l'infini. Ce qui n'est pas possible, les molécules ayant des dimensions ce qui aux fortes pressions va réduire la compressibilité.
- Qu'il n'y a pas de force attractive entre les molécules. Celles-ci peuvent prendre des valeurs considérables. Au sein du gaz, elles sont en équilibre mais ne le sont pas à la proximité des parois du récipient.

Van Der Waals introduit deux constantes liées au gaz pour tenir compte de la taille des molécules et des forces attractives entre celle-ci :

- a : qui tient compte de l'attraction entre les molécules.
- b : qui tient compte de la taille des molécules et qui est nommé « covolume ». C'est le volume d'une sphère entourant une molécule et qui est considérée comme impénétrable.

L'équation (03) devient :

$$\left(P + \frac{an^2}{v^2}\right) (v - nb) = nRT \quad (14)$$

Avec :

P : Pression en Pascal (Pa) (Atm)

V : Volume du gaz en m³ (litre)

R : Constante des gaz parfaits (8,314 J/mol K) (0,082 litre. atm/mol. K)

T : Température en Kelvin (K) (K)

n : Quantité de matière en moles (mol) (mol)

m³ : mètre cube

a : Coefficient de Van Der Waals interaction entre les molécules (Pa. m³² /mol²) (Atm.litre²/mol²)

b : Coefficient de Van Der Waals, covolume (m³/mol) (litre/mol)

Van der Waals a utilisé quelques hypothèses simplificatrices dans l'établissement de sa formule :

- Le coefficient a est considéré comme une constante et n'est donc pas fonction de la température. Lorsque les variations de température sont faibles cela n'est pas très important. Lorsque la température augmente, ce coefficient devrait diminuer. Clausius a proposé de remplacer a par la fonction $a' = a/T^m$.
- Il a considéré que toutes les molécules ont la même taille, ce qui n'est pas le cas dans les mélanges de gaz. A fortiori dans les mélanges comme le Trimix.
- Lors de la compression, il n'est pas tenu compte des chocs entre les molécules.

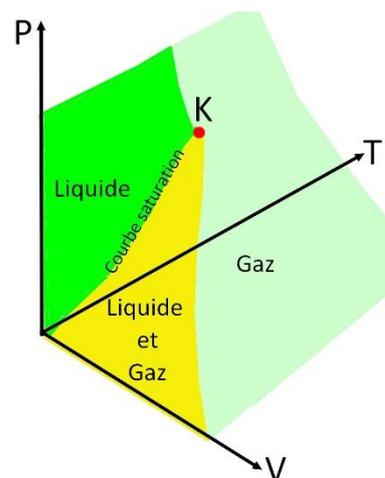
Point critique - Détermination des coefficients a et b

Le point critique

Au point critique, les masses volumiques (densités) du gaz et du liquide sont égales. Il n'y a plus de distinction entre les deux phases. Ce point se situe à l'extrémité de la courbe de saturation. Il est caractérisé par la pression critique (Pk), la température critique (Tk) et le volume molaire critique (Vk) ou la masse volumique (densité) critique (δ_k).

Détermination des coefficients a et b

Les coefficients a et b peuvent être déduit à partir de la température critique (Tk) et la pression critique (Pk).



¹² Johannes Diderik van der Waals (23/11/1837 – 8/3/1923) physicien néerlandais.



$$a = \frac{27 R^2 T_k^2}{64 P_k} \quad (15) \quad b = \frac{R T_k}{8 P_k} \quad (16)$$

Avec :

R : Constante des gaz parfaits (8,314 J/mol K) (0,082 litre. atm/mol. K)

T_k : Température critique en Kelvin (K) (K)

P_k : Pression critique en pascal (Pa) (atm)

a : Coefficient de Van Der Waals interaction entre les molécules (Pa. m³²/mol²) (Atm.litre²/mol²)

b : Covolume (m³/mol) (litre/mol)

m³ : mètres cube

Quelques valeurs usuelles de a, b, P_k, T_k

Nom	Sym.	a Atm.l ² /mol ²	b l/mol	P _k Atm	T _k K	δk Kg/m ³
Oxygène	O ₂	1,36	0,0318	49,8	154,6	436
Azote	N ₂	1,39	0,0391	33,5	126,2	313
Hélium	He	0,0341	0,0237	2,3	7,19	?
Air	-	1,36	0,0364	37,7	132,6	351

Equation de Clausius (N4-TEK)

Clausius¹³ à une approche plus simple que Van Der Waals mais moins élaborée. Elle ne tient pas compte de l'interaction entre les molécules qui a été introduit par la suite par Van Der Waals. L'équation d'état du gaz s'écrit :

$$P(v - nb) = nRT \quad (17)$$

Avec :

P : Pression en Pascal (Pa) (Atm)

V : Volume du gaz en m³ (litre)

R : Constante des gaz parfaits (8,314 J/mol K) (0,082 litre. atm/mol. K)

T : Température en Kelvin (K) (K)

n : Quantité de matière en moles (mol) (mol)

m³ : mètre cube

b : Coefficient de Van Der Waals, covolume (m³/mol) (litre/mol)

Les coefficients a et b dans les mélanges de gaz réels (TEK)

Les mélanges de gaz sont très problématiques. Lorsqu'on mélange n gaz on ne connaît absolument rien du diagramme d'état du mélange et donc du point critique du mélange. En étant cartésien, il faudrait en toute rigueur refaire les mesures mélange par mélange. Ce qui signifie des mesures pour chaque formule de Trimix. Même en ne considérant que des « Trimix normalisés » cela fait beaucoup ! Ce n'est bien entendu pas possible dans un contexte de « plongée loisir ».

Van Der Waals a établi une méthode pour estimer les coefficients a et b du mélange en partant des gaz purs. L'estimation du coefficient a est problématique. Elle fait appel à l'expérimentation pour déterminer les paramètres d'interaction entre les n gaz purs du mélange. L'estimation du covolume est nettement plus aisée car elle ne fait pas appel à de l'expérimentation. La détermination est possible à partir des covolumes des gaz purs. En première approximation, on pourra utiliser facilement l'équation de Clausius.

$$b = \sum_{i=1}^n [x_i] b_i = [x_1] b_1 + [x_2] b_2 + \dots + [x_n] b_n \quad (18)$$

Avec :

b : Covolume du mélange (m³/mol) (litre/mol)

b_i : Covolume de chaque composant du mélange (m³/mol) (litre/mol)

[x_i] : Pourcentage (fraction) du gaz considéré dans le mélange.

¹³ Rudolf Julius Emmanuel Clausius (2/1/1822 – 24/8/1888) physicien prussien.



Exemple #7

Quel est le covolume d'un mélange Trimix 15/50

	Symb.	Xi	b l/mol	
Oxygène	[O ₂]	0,15	0,0318	0,15 x 0,0318 = 0,00437
Hélium	[He]	0,50	0,0237	0,50 x 0,0237 = 0,01185
Azote	[N ₂]	0,35	0,0391	0,35 x 0,0391 = 0,01368
b mélange (l/mol)				0,02990

Loi de Henry (N3)

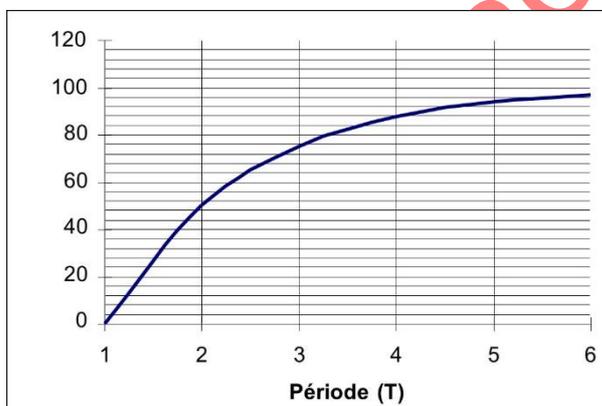
La loi de Henry¹⁴ régit la dissolution des gaz dans les liquides¹⁵. Lorsqu'un gaz est en contact avec un liquide il se produit un échange gazeux entre ceux-ci. Les gaz se dissolvent dans les liquides.

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.

- On appelle « Tension » la pression exercée par le liquide sur le gaz dissout 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.

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 $dp/dt = \gamma(P - p_0)$. 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 Henry sur la plongée.

- Calcul des protocoles de décompression - Haldane
- Accidents de décompression

¹⁴ William Henry (12/12/1775 – 02/09/1836) physicien et chimiste britannique.

¹⁵ Au sens large du terme : il en va de même avec les « Tissus » composant notre organisme.



L'équation d'Haldane. – (Equation instantanée) (N4)

Pour résoudre l'équation différentielle $dp/dt=\gamma(P-p_0)$ Haldane¹⁶ a dû faire des hypothèses simplificatrices¹⁷. L'informatique a permis de lever plusieurs de ces hypothèses, ce qui a permis de construire des modèles de décompression de plus en plus précis et de créer les algorithmes utilisés dans nos ordinateurs de plongée.

Les principales hypothèses simplificatrices 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.
- γ est considéré comme une constante.
- 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 de l'équation différentielle il vient :

$$p = P_0 + (P - P_0)(1 - e^{-\gamma t}) \quad (19)$$

$$\gamma = - \left(\frac{1}{T} \right) \ln 0,5 \quad (20)$$

Avec :

p : Tension du gaz inerte dans les tissus **après** le changement d'état

P_0 : Tension du gaz inerte 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

e : Base du logarithme népérien = 2,718

Exemple #7

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 ?

$P_{amb}=6$ bars $P=6 \times 0,8=4,8$ bars

$p_0= 0,8$ bar (tension d'azote en surface)

$(P-p_0)= 4,8-0,8=4$ bars

$\gamma = - (1/40) \ln 0,5 = 0,01733$

$\gamma t = 0,01733 \times 30 = 0,5199$

$(1-e^{-\gamma t}) = 1 - e^{-0,5199} = 0,4054$

$p = p_0 + (P - p_0) \cdot (1 - e^{-\gamma t}) = 0,8 + (4 \times 0,4054) = 2,42$ bars

¹⁶ John Scott Haldane (03/05/1860 – 15/03/1936) physiologiste irlandais.

¹⁷ A cette époque, il n'y avait pas d'ordinateur, ni même de l'électronique !



L'équation de Schreiner – Kelley (Equation globale) (Informatif)

En 1971 H.R. Schreiner et P.L. Kelley propose dans la revue Academic Press, New York une nouvelle résolution de l'équation différentielle $dp/dt=\gamma(P-p_0)$ qui tient compte de la vitesse de remontée (gradient de pression) et de la pression partielle des gaz inertes au niveau des poumons.

Cette équation est en fait une amélioration de l'équation d'Haldane.

$$p = P_{i0} + c \left(t - \frac{1}{\gamma} \right) - \left[P_{i0} - P_o - \left(\frac{c}{\gamma} \right) \right] e^{-\gamma t} \quad (21)$$

$$\gamma = - \left(\frac{1}{T} \right) \ln 0,5 \quad (21a)$$

Avec :

p : Tension du gaz dans les tissus **après** le changement d'état

P_o : Tension du gaz inerte dans les tissus **avant** le changement d'état

P_{i0} : Pression partielle initiale alvéolaire du gaz inerte moins la vapeur d'eau

T : Période

t : Durée d'exposition du tissu

e : Base du logarithme népérien = 2,718

c : Taux de remontée multiplié par le pourcentage de gaz inerte. Ce taux doit être constant. En fait c'est la variation de la pression du gaz respiré en fonction de la variation de la pression ambiante (bar)



Partie 3 – Les actions mécaniques

- Notion de force, moment d'une force.
- Système en équilibre
- Principe d'Archimède

Document non libre de droit

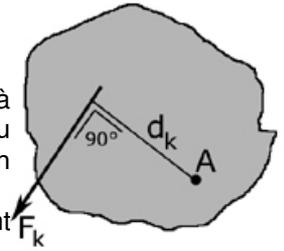


Quelques notions préliminaires (N1)

Force

Une force est une action mécanique exercée par un objet sur un autre afin de conférer à cet objet une accélération ou de déformer cet objet. L'intensité d'une force est égale au produit de la masse de l'objet mis en mouvement par l'action de la force et l'accélération qui lui est conférée.

Une force est parfaitement déterminée lorsqu'on connaît son intensité, son point d'application, sa direction et son sens. On représente les forces par des vecteurs.



$$F_k = m a \quad (21)$$

Principe de l'action-réaction

Lorsqu'un objet (A) exerce une force sur un autre objet (B), cet objet (B) exercera une force sur le l'objet (A) de même intensité mais de sens opposé.

Conséquence sur le plongeur

Les palmes exercent sur l'eau une certaine force et inversement l'eau va exercer une force égale de sens contraire qui va faire avancer le plongeur.

Moment d'une force

Le moment d'une force par rapport à un point est le produit de cette force par son bras de levier. Le bras de levier est la plus courte distance entre la ligne d'action de la force et le point par rapport auquel on calcule le moment de la force.

$$Mo_A = F_k d_k \quad (22)$$

Système en équilibre

Un objet est dit en équilibre lorsqu'il n'est pas en mouvement. Pour obtenir l'équilibre, il faut que résultante des forces qui agissent sur cet objet ainsi que le moment résultant de ces forces soit nul.

$$\sum_1^k F_k = F_1 + F_2 + \dots + F_k = 0 \quad (23)$$

$$\sum_1^k Mo_k = Mo_1 + Mo_2 + \dots + Mo_k = F_1 d_1 + F_2 d_2 + \dots + F_k d_k = 0 \quad (24)$$

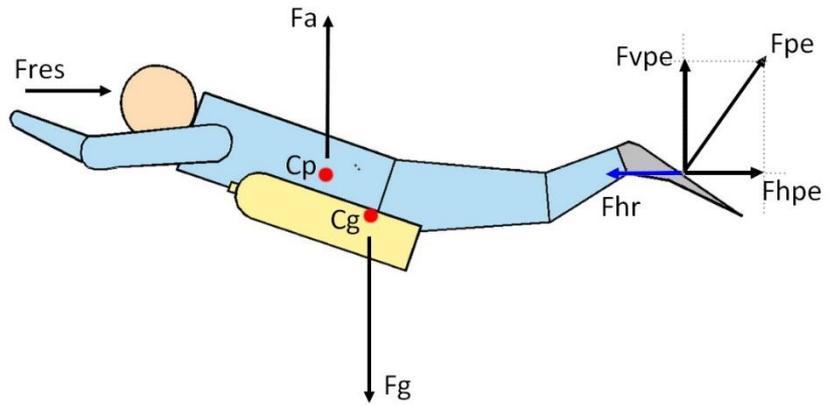
Avec :

- m : Masse en kilo (Kg)
- a : Accélération (m/sec²) g=9,81 m/sec²
- F_k : Force en Newton (N)
- Mo : Moment de la force (N.m)
- d_k : Bras de levier en mètre (m)



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. Examinons les différentes forces qui agissent sur le plongeur :



- F_g : Poids du plongeur et de son équipement. Force verticale due à la gravité, dirigée de haut en bas et passant par le centre de gravité (C_g) du plongeur. Le centre de gravité se situe approximativement au niveau du nombril. $F_g = m g = 9,81 m$ (N) où m représente la masse du plongeur et de son équipement en kilos (Kg).
- F_a : Poussée d'Archimède.
- F_{res} : Force de résistance à l'avancement exercée par l'eau qui s'oppose à la propulsion du plongeur. Cette force est nulle si le plongeur ne palme pas.
- F_{pe} ¹⁸ : Force exercée par les palmes sur l'eau. Elle se décompose en deux composantes. Une composante horizontale (F_{hpe}) et une composante verticale (F_{vpe}). Le mouvement des palmes étant alternatif de haut en bas et de bas en haut, les composantes verticales des palmes s'annulent.
- F_{hr} : Force de réaction horizontale de l'eau sur la palme et donc sur le plongeur. C'est cette force qui permet au plongeur d'avancer.

Le principe d'Archimède. (N1-N2)

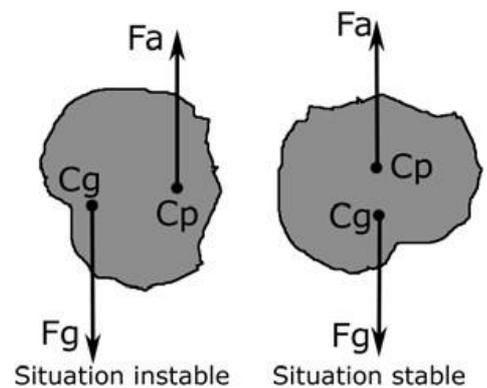
Tout corps plongé entièrement dans un fluide (gaz ou liquide) reçoit de la part de celui-ci une poussée (F_a) verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du volume de fluide déplacé.

Cette force passe par un point qui est le « centre de poussée » ou « centre de carène » (C_p). Le centre de poussée est le centre de gravité de la masse du fluide déplacé.

Le corps est aussi soumis à la force de gravité (F_g) qui est égale au poids du corps. Cette force est verticale et dirigée de haut en bas. Elle passe par le centre de gravité (C_g) du corps.

On appelle « Poids apparent » (P_a) la différence entre le poids réel du corps et la poussée d'Archimède¹⁹. Pour que le corps soit en équilibre il faut que d'une part le poids apparent soit nul et d'autre part 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.



$$P_a = F_g - F_a \quad F_g = m g \quad F_a = \delta V g \quad (25) \quad (26) \quad (27)$$

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 : $9,81 \text{ m/s}^2$
- δ : Masse spécifique du fluide en kg/m^3
- V : Volume du corps en m^3

¹⁸ Il est à noter qu'en cas de palmage en « Frogkick », cette force n'est plus verticale mais latérale.

¹⁹ Archimède de Syracuse : Mathématicien, géomètre et physicien Grec (287 av. J.-C. -212 av. J.-C.)



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 #8

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.



Partie 4 – Optique

- Définition
- La lumière
- Réflexion, réfraction, absorption
- Grandeurs photométriques
 - Flux lumineux
 - Intensité lumineuse
 - Luminance
 - Eclairement lumineux
 - Température de couleur
- Vergence et dioptrie d'un système optique
 - Types de lentilles
 - Association de lentilles

Document non libre de droit



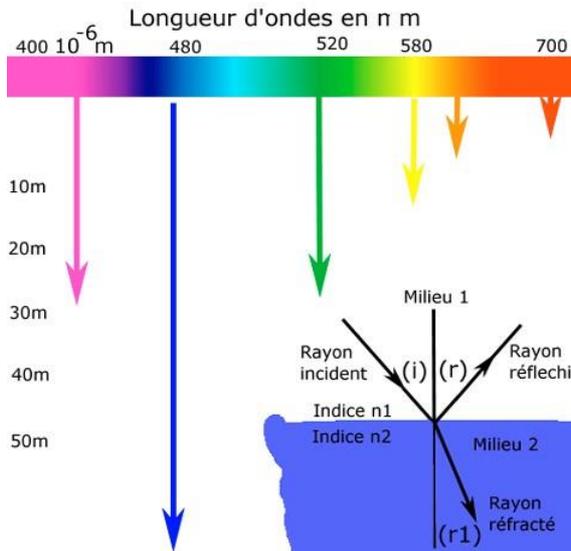
Définition de l'optique

L'optique est une branche de la physique qui s'intéresse à la lumière, ses propriétés et son comportement.

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.

Réflexion – Réfraction - absorption (N3)



Réflexion

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. Ces deux angles sont égaux. La réflexion (N3)

Réfraction

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 Snell²⁰- Descartes²¹

$$(i) = (r) \quad n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r_1) \quad r_{1 \text{ limite}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (28) \quad (29) \quad (30)$$

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
- (r_{1 limite}) angle de réfraction limite si n₁ > n₂

Indice de réfraction n

Air : 1,0003
Eau : 1,33
Verre : 1,5 à 1,65
Vide spatial : 1

Conséquence pour le plongeur

La différence entre les indices de réfractons 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'où 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

C'est le phénomène par lequel l'énergie des photons est 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 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.

²⁰ Willebrord Snell (1580-1626) mathématicien Hollandais.

²¹ René Descartes (31/03/1596 – 11/02/1650) Philosophe, mathématicien, et physicien français



Diffusion

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.

Grandeurs photométriques (N4)

Les grandeurs photométriques sont la base des mesures en éclairage.

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 de la lumière

Exprimée en degré Kelvin²² (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. On dit qu'une lumière est :

- Chaude lorsque la température de couleur est inférieure à 3000 K
- Froide lorsque la température de couleur est supérieure à 3000 K

Utilité pour la plongée

- Comparaison entre les divers système d'éclairage
- Comparaison de l'efficacité de l'éclairage par rapport à la puissance électrique.
- Comparaison de la couleur émises par les lampes par rapport à la lumière naturelle.

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 ²³	5500°K	450 lumen	21 W	21
HID ²⁴	6000°K	450 lumen	10 W	45

²² Kelvin, Lord William Thomson (1824-1907) : Physicien et mathématicien écossais

²³ Light Emetting Diodes : Semi-conducteur qui émet de la lumière

²⁴High Intensity Discharge : lampe a décharge de haute intensité



Vergence et dioptrie d'un système optique (N4)

La dioptrie est une unité de vergence ; elle est représentée par la lettre δ . La vergence est la capacité d'une lentille à dévier les rayons lumineux ; usuellement elle est notée « V » ou « C ». Elle est l'inverse de la distance focale exprimée en mètre.

$$V = \frac{1}{f} \quad \text{et} \quad f = \frac{1}{V} \quad (31)$$

Avec :

V=Vergence en dioptrie (δ) (m^{-1})

f=Distance focale en mètre (m)

Connaitre le nombre de dioptries permet de calculer facilement le grossissement (effet de loupe) d'une lentille ou sa distance focale. Le grossissement se calcule à l'aide de la relation :

$$G = 1 + (V \times 0,25) \quad (32)$$

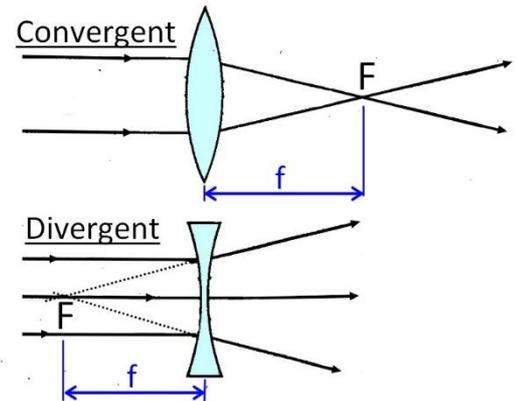
Avec :

V=Vergence en dioptrie (δ) (m^{-1})

G=Grossissement

Types de lentilles

Il existe deux types de lentilles. Les lentilles convergentes et les lentilles divergentes. La lentille convergente dévie les rayons lumineux de manière à les rayons réfractés se croisent en un point, le foyer (F). La courbure de la lentille influence la position du foyer (F). Les bagues macros sont des lentilles convergentes. La lentille divergente dévie les rayons lumineux de manière à les rayons réfractés s'éloignent les uns des autres.



Association de lentilles

Il arrive fréquemment d'associer des bagues macros en les vissant les unes sur les autres. Il est intéressant de pouvoir calculer la distance focale, la vergence et le grossissement d'un tel système. Dans le cas le plus général, lorsque deux lentilles sont séparées par la distance (e), la vergence globale se calcule par la relation²⁵

$$V = V_1 + V_2 - \frac{e}{n} V_1 V_2 \quad (33)$$

Avec :

V₁=Vergence en dioptries de la première lentille (δ) (m^{-1})

V₂=Vergence en dioptries de la deuxième lentille (δ) (m^{-1})

e=Distance séparant les lentilles en mètres (m)

n=Indice de réfraction du milieu qui sépare les lentilles (1 pour l'air – 1,33 pour l'eau)

Conséquence pour la plongée

Estimation du grossissement des bagues macros.

Les bagues macros sont visées les unes sur les autres de manière que la distance entre elles soit négligeable ! La relation de Gullstrand, ci-dessus, se simplifie considérablement, la distance (e) tendant vers zéro. On peut écrire :

$$V = \sum_1^k V_k = V_1 + V_2 + V_3 + \dots V_k \quad (34)$$

Exemple #9

On dispose de 3 bagues macros ayant respectivement des dioptries (δ) de 8 ; 6 et 4 m^{-1}

Si on associe les 3 bagues :

Vergence $V = 8+6+4 = 18 m^{-1}$

Distance focale $f = 1/18 = 0.055m$ soit 5.55 cm

Le grossissement $G = 1 + (18 \times 0.25) = 5.5$

²⁵ Relation de Gullstrand: Allvar Gullstrand (5 juin 1862 - 28 juillet 1930) ophtalmologue suédois, lauréat du prix Nobel en 1911.



Partie 5 – Thermodynamique

- Définition de la thermodynamique
 - La température
 - La chaleur
 - Les modes de transmission de la chaleur
 - Conduction
 - Coefficient de conductibilité thermique
 - Coefficient de résistivité thermique
 - Résistance thermique
 - Valeurs usuelles
 - Convection
 - Rayonnement
- Conséquences des échanges thermiques
- Notion de bilan thermique
 - La thermogénèse
 - Pertes dues à la respiration
 - Pertes cutanées
 - La dette thermique
- Diffusion des gaz
 - Loi de Graham
 - Coefficient de diffusion
 - Estimation du temps d'homogénéisation
 - Hypothèses simplificatrices
 - Facteurs favorisant l'homogénéisation



Définition de la thermodynamique (N2-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 (N2)

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 :

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{100} = \frac{(^{\circ}\text{K} - 273,15)}{100} = \frac{(^{\circ}\text{F} - 32)}{100} \quad (35)$$

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 modes de transmission de la chaleur : la conduction, la convection, le rayonnement.

Conduction

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 proches. Le transfert de chaleur au travers une paroi est un exemple de conduction.

Le coefficient de conductibilité thermique (λ)

C'est la quantité de chaleur qui traverse, en une seconde une paroi ayant une surface de 1m² et une épaisseur de 1m pour une différence de température des surfaces est d'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.

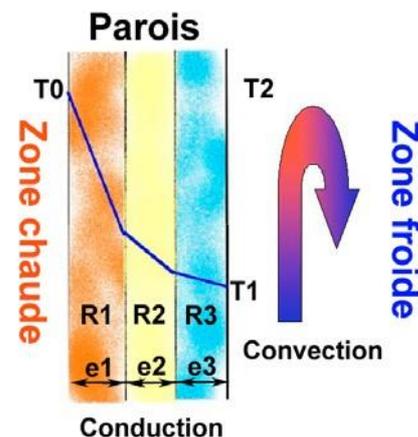
Le coefficient de résistivité thermique (ρ)

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, 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 d'un mètre carré en une seconde pour un écart de température entre les surfaces d'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.





$$R = \frac{e}{\lambda} \quad Rc = \sum_1^n R_n = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (36) (37)$$

$$U = \frac{1}{Rc} \quad P = U S (T_0 - T_1) \quad (38) (39)$$

Avec :

R, R1, Rn : Résistance thermique d'une paroi simple (m² °C / W)

e : épaisseur de la paroi (m)

Rc : Résistance thermique d'une paroi composite (m² °C / W)

U : Coefficient thermique d'une paroi (W / m² °C)

P : Puissance calorifique dissipée (W) S : Surface d'échange (m²)

(T0-T1) : Différence de température entre les parois chaude et froide

Utilité pour la plongée

- Estimer l'isolation des combinaisons
- Comparer les différents types de combinaison
- Estimer les pertes thermiques du plongeur
- Estimer les risques d'hypothermie

Quelques valeurs usuelles de λ

Matériaux	λ (W/m °C) à température ambiante
Conducteurs	Supérieur à 10
Isolants	Compris entre 0,01 et 1
Combinaison néoprène	+/- 0,2
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...

D'une manière empirique et en première approximation si on considère qu'un plongeur moyen à une surface corporelle de 1,4 m² le produit h.S= 16 W/°C (entre l'eau de mer et le plongeur)

$$W_{conv} = h S (T_1 - T_2) \quad (40)$$

Avec :

W_{conv} : Perte par convection (W)

h : Coefficient de convection (W / m² °C)

S : Surface d'échange (m²)

T₁ : Température de la paroi (°C)

T₂ : Température du milieu (°C)

Conséquences au niveau de la plongée. (N3)

- Perte par convection par circulation de l'eau autour du plongeur.
- Perte par convection lors de l'expiration

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 et considéré comme nul.



Conséquences des échanges thermiques en plongée. (N1- N2)

- Perte par convection due à la 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 adaptés aux conditions de plongée
- Risque de refroidissement de l'organisme, risque d'hypothermie

Notion de bilan thermique. (N4)

Un des problèmes majeurs 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 thermogénèse.

Le bilan thermique c'est la différence entre la chaleur produite par thermogénèse 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 thermique 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.

$$B_{th} = Thermo - (P_{cut} + P_{resp}) \quad (41)$$

Avec :

B_{th} : Bilan thermique en Watt
 P_{cut} : Pertes cutanées en Watt
 P_{resp} : Pertes dues à la respiration en Watt
 Thermo : Thermogénèse en Watt

La thermogénèse

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 intense. La puissance est fonction de la taille, du poids et de l'activité du sujet ainsi que de la durée d'exposition. Cette réduction peut atteindre 50% après 2 heures dans un eau froide. Il est possible d'estimer grossièrement la thermogénèse à l'aide de la relation empirique :

$$Thermo = 12,5 Cons \quad (42)$$

Avec :

Thermo : Thermogénèse en watt (W)
 Cons : Consommation d'air en litre par minute à la pression atmosphérique (l/min)

Les pertes dues à la respiration.

Les pertes dues à la respiration peuvent s'évaluer à la relation empirique suivante :

$$P_{resp} = \left\{ \frac{0,8(37 - T_{gresp}) P C Q}{60} \right\} + H \quad (43)$$

Avec :

P_{resp} : pertes dues à la respiration en Watt
 T_{gresp} : Température du gaz respiré en °C
 C : Capacité calorifique du gaz en W/°C
 Q : Débit du gaz circulant dans les poumons en surface en litres par minutes (20 l/min par défaut)
 P : Pression absolue en bar
 H : Facteur tenant compte de l'humidité du gaz respiré, exprimé en watt (W) (10W par défaut)



Quelques valeurs du coefficient de capacité calorique.

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

Exemple #10

Comparez les pertes dues 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 _{gresp}	4°C	25 °C
C	1,31	1,31
Q	20 l/min	20 l/min
P	5 bar	5 bar
H	10	10
	$P_{resp} = \left\{ \frac{0,8(37 - 4) 5 \times 1,31 \times 20}{60} \right\} + 10 = 68W$	$P_{resp} = \left\{ \frac{0,8(37 - 25) 5 \times 1,31 \times 20}{60} \right\} + 10 = 31W$

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.

$$P_{cut} = \frac{(37 - T_2)}{\sum \left(\frac{1}{C_n} \right)} \quad (44)$$

$$\sum \left(\frac{1}{C_n} \right) = \frac{1}{C_{org}} + \frac{1}{C_{cli}} + \frac{1}{C_{cle}} + \sum \left(\frac{1}{C_{vet}} \right) \quad (45)$$

Avec :

P_{cut} : Pertes cutanées en Watt (W)

T₂ : Température du milieu extérieur (°C)

C_n : Conductances (W/°C)

C_{org} : Conductance de la périphérie de l'organisme (W/°C)

C_{cli} : Conductance de la couche limite intérieure (W/°C)

C_{cle} : Conductance de la couche limite extérieure (W/°C)

C_{vet} : Conductance des sous-vêtements, de la combi, de la souris... (W/°C)

Le terme $\sum \left(\frac{1}{C_{vet}} \right)$ peut se développer

$$\sum \left(\frac{1}{C_{vet}} \right) = \frac{1}{C_{combi}} + \frac{1}{C_{souris}} + \frac{1}{C_{sous-vêtement}} + \dots \quad (46)$$

Avec :

C_{combi} : Conductance de la combinaison humide, étanche ou semi-étanche (W/°C)

C_{souris} : Conductance de la souris sous l'étanche (W/°C)

C_{sous-vêtement} : Conductance des divers sous-vêtement : pull, T-shir, polar (sous l'étanche) ou shorty sous la combinaison humide (W/°C)



Quelques valeurs de conductance

C _{org}	<ul style="list-style-type: none"> - Plongeur plutôt gras : 15 - Plongeur plutôt maigre : 40
C _{cli}	<ul style="list-style-type: none"> - Combinaison étanche : 8 (air) - Combinaison humide : 50-70 (eau)
C _{cle}	<ul style="list-style-type: none"> - Eau calme : 70 - Eau agitée : 300
C _{vet}	<ul style="list-style-type: none"> - Combinaison Néoprène humide, semi-étanche ou étanche de : <ul style="list-style-type: none"> o 3 mm : 50 o 5 mm : 30 o 7mm : 20 - Combinaison étanche toilée :300 - Souris en Thinsulate avec de l'Air de : <ul style="list-style-type: none"> o 100 gr/m² : 28 o 200gr/m² : 14 o 400gr/m² : 7 - Souris en Thinsulate avec de l'Argon de : <ul style="list-style-type: none"> o 100 gr/m² : 16 o 200gr/m² : 8 o 400gr/m² : 4 - Souris en Thinsulate trempé : 100

Exemple #11

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
T ₂	4°C	4°C
C _{org}	30 W/°C	30 W/°C
C _{cli}	60 W/°C	8 W/°C
C _{cle}	150 W/°C	150 W/°C
C _{vet}	20 W/°C	300 (combi étanche) et 14 (souris) W/°C
Σ (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
P _{cut}	(37-4)/ 0,1067= 309 Watt	(37-4)/ 0,2398= 138 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 d'un degré de la température centrale peut mettre le plongeur en danger.

Le refroidissement par heure peut s'évaluer à l'aide de la relation empirique

$$Refr = \frac{B_{th}}{Poids} \quad \text{si } B_{th} < 0 \quad (47)$$

Avec :

Refr: Refroidissement horaire (°C/heure)

B_{th} : Bilan thermique en Watt (W)

Poids : Poids du plongeur en kilo (Kg)



Exemple #12

En considérant les exemples 10 et 11, déterminer la dette thermique, le refroidissement et le temps maximum d'immersion pour un plongeur de 80 kg plongeant en costume humide et en circuit ouvert.

Thermogenèse estimée (Thermo)	250 watt
Perte cutanée (P_{cut})	309 Watt
Perte respiratoire (P_{resp})	68 Watt
Perte totale	377 Watt
Bilan Thermique	250-377= 127 watt
Poids	80 Kg
Refr	127/80= 1,6 °C/heure
Temps maximum d'immersion	1/1,6= 0,625 heures soit 37 minutes

Conclusion

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

La diffusion des gaz (N4-TEK-Blender)

Lorsqu'on prépare un mélange par pression partielle, l'homogénéité du mélange n'est pas instantanée. Il faudra un certain temps pour rendre le mélange homogène. Ce temps va dépendre de la vitesse de diffusion des gaz. La diffusion étant la dispersion progressive d'un gaz dans un autre. Théoriquement la vitesse de diffusion dépend de la vitesse moyenne de déplacement des molécules de ce gaz. Néanmoins étant donné la proximité des molécules, il y aura un grand nombre de collisions entre les molécules. Le trajet d'une molécule sera très éloigné d'un trajet rectiligne. La vitesse réelle sera plus lente que celle donnée par la relation ci-dessous.

$$V = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (48)$$

Avec :

V : Vitesse moyenne de déplacement des molécules (m/s)

T : Température du gaz (K)

R : Constante des gaz parfaits (8,314 J/mol K)

M : Masse molaire (Kg/mol)

Quelques valeurs de « V »

T : 300K			
Gaz	He	N ₂	O ₂
V (m/s)	1368	517	483

Loi de Graham

A pression et à température égale, les vitesses de diffusion de deux gaz sont inversement proportionnelles à la racine carrée de leurs masses molaires.

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad (49)$$

Avec :

V₁ : Vitesse de diffusion du gaz 1 (m/s)

V₂ : Vitesse de diffusion du gaz 2 (m/s)

M₁ : Masse molaire du gaz 1 (Kg/mol)

M₂ : Masse molaire du gaz 2 (Kg/mol)

Le coefficient de diffusion

Le coefficient de diffusion exprime la vitesse à laquelle un gaz diffuse dans un autre gaz. Pour l'hélium on peut se baser sur la valeur de $6,97 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Ce coefficient va permettre d'estimer le temps nécessaire pour rendre homogène un Trimix fabriqué par la méthode des pressions partielles.



Estimation du temps d'homogénéisation d'un Trimix

Lors de la fabrication d'un Trimix par pression partielle, la crainte est de voir l'hélium se placer au sommet de la bouteille par simple effet de gravité. En effet la masse molaire de l'hélium (4.10^{-3} Kg/mol) est largement inférieur à celui de l'azote (28.10^{-3} Kg/mol) ou de l'oxygène (32.10^{-3} Kg/mol). Il faudra donc attendre un certain temps pour que le mélange devienne homogène. Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, il est possible d'estimer le temps d'homogénéisation avec une relation mathématique simple.

Hypothèses simplificatrices

On suppose que :

- Seul la diffusion intervient dans l'homogénéisation du mélange. C'est-à-dire que le régime du gaz lors de l'injection d'hélium a été laminaire et non turbulent. Ce qui constitue une approche conservatrice.
- Le coefficient de diffusion reste constant, malgré l'augmentation de pression et donc de la masse volumique du mélange.
- Le coefficient de diffusion reste constant, malgré une légère augmentation de la température. L'augmentation de la température va dans le bon sens, pour réduire le temps d'homogénéisation (augmentation de l'agitation moléculaire).
- Le mélange O_2/N_2 est homogène avant l'injection d'hélium.

Facteur favorisant l'homogénéisation.

Certaines pratiques peuvent tendre à réduire le temps d'homogénéisation

- Injecter les gaz dans l'ordre des masses molaires croissantes. Donc l'hélium en premier, puis l'oxygène. Ce n'est pas toujours possible dans le cadre de la plongée loisir, l'oxygène ne pouvant pas passer dans un compresseur classique. Il faut un surpresseur compatible oxygène.
- L'injection de l'hélium en régime turbulent est favorable à l'homogénéisation.

$$t = \frac{l^2}{D} \quad t_{\text{homogène}} = \epsilon t \quad (50) (51)$$

Avec :

t : Temps pour qu'une molécule passe de la partie supérieure du réservoir jusqu'au fond du réservoir (s)

l : Distance verticale entre le sommet et le fond du réservoir (m)

D : Coefficient de diffusion (m^2/s) – ($6,97 \cdot 10^{-5} m^2/s$ pour l'hélium)

$t_{\text{homogène}}$: Temps d'homogénéisation

ϵ : Coefficient de sécurité – minimum 2

Exemple #13

Considérons une bouteille de 12l longue (hauteur 700mm, diamètre 170mm). Comparons le temps d'homogénéisation, bouteille debout et couchée en considérant un coefficient de sécurité de 2

	Bouteille debout	Bouteille couchée
l	0,7m	0,17m
ϵ	2	2
t	$t = \frac{0,7^2}{0,0000697} = 7030s$ soit 2 heures	$t = \frac{0,17^2}{0,0000697} = 414s$ soit 7 minutes
$t_{\text{homogène}}$	$2 \times 2 = 4$ heures	$2 \times 7 = 14$ minutes

Conclusion : Coucher la bouteille après le gonflage.



Partie 6 – Transmission des ondes

- Définition des ondes
 - Ondes mécaniques
 - Longueur d'onde, fréquence, célérité, amplitude
- Les ondes sonores
 - Ondes mécaniques
 - Longueur d'onde, fréquence, célérité, amplitude
- Les ondes sonores
 - Vitesse du son dans le milieu gazeux
 - Vitesse du son dans le milieu liquide
 - Puissance, pression sonore, perception des sons
- Atténuation de la pression sonore

Document non libre de droit



Une onde c'est quoi ? (N3)

C'est la propagation dans un milieu gazeux, liquide ou solide d'une perturbation. Cette perturbation engendre localement sur son passage une variation réversible des propriétés physique de ce milieu. L'onde se déplace à une vitesse (célérité) qui varie suivant les caractéristiques du milieu quelle traverse. Il existe plusieurs sortes d'ondes, les ondes électromagnétiques, les ondes mécaniques...

Ondes mécaniques

La propagation de l'onde ce fait dans un milieu matériel. Il n'y pas de transport de matière. Les ondes sonores qui intéressent plus particulièrement les plongeurs sont des ondes mécaniques. Elles ont donc impérativement besoin d'un milieu matériel pour se propager. Les ondes sonores ne se propagent pas dans le vide.

Longueur d'onde, fréquence, célérité et amplitude

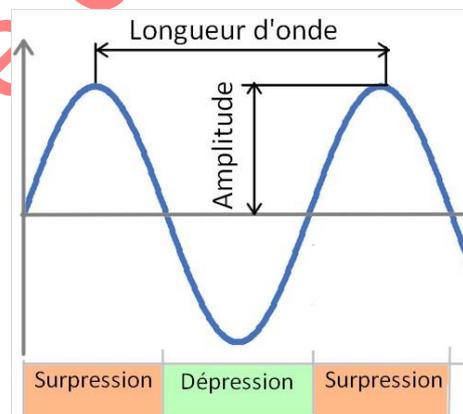
Une onde est caractérisée par sa « longueur », sa fréquence, son amplitude et sa célérité. Pour faire simple, la longueur d'onde est la distance entre deux pics d'amplitude maximum. La longueur d'onde varie en fonction de la célérité (vitesse) de propagation de l'onde dans le milieu quelle traverse. L'amplitude correspond à la hauteur maximale atteinte par l'onde. Son hauteur est proportionnelle à l'énergie transmise par l'onde.

La longueur d'onde, la fréquence et la célérité de l'onde sont reliés par la relation :

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (52)$$

Avec :

- f : Fréquence en Hertz (Hz)
- c : Célérité de l'onde en m/s
- λ : Longueur d'onde en m



Les ondes sonores (N2-N3)

Comme précisé dans le chapitre précédent, les ondes sonores sont des ondes du type mécanique. La propagation de l'onde engendre une variation de pression (surpression et dépression) qui se transmet de proche en proche aux molécules qui alternativement se rapprochent et s'éloignent les unes des autres. Plus les molécules sont rapprochées, plus le milieu est dense et plus la célérité du son sera élevée. Le son se transmet aussi bien dans les gaz, les liquides et les solides. En tant que plongeur, c'est principalement la transmission dans les milieux gazeux et liquide qui nous intéresse.

Vitesse (célérité) du son dans le milieu gazeux. (N2)

Dans le milieu gazeux les molécules sont très éloignées les unes des autres, ce qui se traduit par une très faible densité et une forte compressibilité. Pour des pressions voisines de la pression atmosphérique, la célérité dépend du gaz, de la température, de la constante adiabatique (k) du gaz, de la pression et de sa masse spécifique. Ces grandeurs sont reliées entre-elles par les lois des gaz parfaits (cf. Partie 1)

$$c_g = \sqrt{\frac{k P}{\rho}} = \sqrt{\frac{k R T}{M_m}} \quad (53)$$

Avec :

- c_g : Célérité du son dans le gaz (m/s)
- P : Pression du gaz en Pascal (Pa)
- ρ : Masse volumique du gaz (Kg/m³)
- k : Constante adiabatique des gaz parfaits $k=C_p/C_v$
- C_p : Chaleur massique à pression constante (J/kg K)
- C_v : Chaleur massique à volume constant (J/kg K)
- R : Constante universelle des gaz parfaits (8,314 J/mol K)
- T : Température absolue du gaz en Kelvin (K) $T= 273,15 + ^\circ\text{C}$
- M_m : Masse molaire du gaz (Kg/mol)

Transmission du son dans les liquides.



Quelques valeur usuelles

			Valeur	Unité
k	Gaz monoatomique	He, Ar...	1,67	-
	Gaz diatomique	O ₂ , N ₂ , Air	1,40	-
M _m	Oxygène	O ₂	0,032	Kg/mol
	Azote	N ₂	0,028	Kg/mol
	Air	-	0,0288	Kg/mol
	Hélium	He	0,004	Kg/mol
ρ	Air	P = 10 ⁵ Pa T = 273.15 K	1,293	Kg/m ³
R/M _m	Air		287	J/Kg K

Exemple #14

Quel est la vitesse du son au niveau de la mer (1 atm – 10⁵ Pa) dans un Tx 15/50 à la température de 30°C ?

Mélange	Données				[x _i] k	[x _i] M _m (Kg/mol)
	Symb.	k	M _m	x _i		
Oxygène	[O ₂]	1,4	0,032	0,15	0,15 x 1,40 = 0,210	0,15 x 0,032 = 0,0048
Hélium	[He]	1,67	0,004	0,50	0,50 x 1,67 = 0,835	0,50 x 0,004 = 0,0020
Azote	[N ₂]	1,4	0,028	0,35	0,35 x 1,40 = 0,490	0,35 x 0,028 = 0,0098
Somme					1,535	0,0166

$$T = 273,15 + 30 = 303,15$$

$$c = \sqrt{\frac{1,535 \times 8,314 \times 303,15}{0,0166}} = 483 \text{ m/s}$$

Vitesse (célérité) du son dans le milieu liquide (N₂)

Le son se propage particulièrement bien dans les liquide. 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 déplace à une vitesse qui se situe entre 1480 et 1530 m/s.

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

$$c_L = \frac{1}{\sqrt{\rho \chi}} \quad (54)$$

Avec :

c_L : Célérité du son dans le liquide (m/s)

ρ : Masse volumique du liquide (Kg/m³)

χ : Facteur de compressibilité du liquide (m²/N) +/- 4,4 10⁻¹⁰ pour de l'eau

Exemple #15

Quel est la vitesse du son dans l'eau de mer en considérant que son coefficient de compressibilité est de 4,4 10⁻¹⁰ m²/N et sa masse volumique de 1033 kg/m³.

$$c_L = \frac{1}{\sqrt{1,033 \times 10^3 \times 4,4 \times 10^{-10}}} = 1483 \text{ m/s}$$

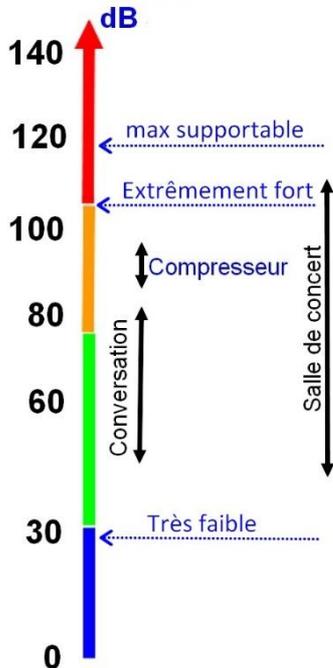


Conséquence sur le plongeur (N1)

Cette vitesse élevée n'est pas sans conséquence sur le plongeur. Si dans l'eau 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 dans nos deux oreilles. Elles n'ont pas une résolution suffisante pour pouvoir déterminer la direction du son. Dans l'air la résolution de notre ouïe est suffisante pour enregistrer la légère différence de temps entre la réception d'un son au niveau de chaque oreille.

Puissance sonore, pression sonore, perception des sons (N4)

La puissance sonore est la cause de la pression sonore qui en est l'effet.



Puissance sonore ou acoustique

La puissance sonore est l'énergie sonore totale émise par une source dans l'unité de temps. Elle s'exprime en watt.

Pression sonore ou acoustique

La pression sonore est le résultat de l'émission de sons pour une ou plusieurs sources qui rayonnent dans un environnement sonore donné. Elle s'exprime en décibel (dB) et est mesurée, à l'aide d'un sonomètre, en un point précis de l'environnement sonore. C'est le bruit que nous entendons.

Perception des sons

Nous ne percevons pas toute la gamme des sons. Une personne adulte ayant une bonne audition perçoit les sons entre 20 Hz (son grave) et 20.000 Hz (son aigu). En dessous de 20 Hz c'est la zone des infras sons et au-dessus de 20.000Hz c'est la zone des ultras sons. L'exposition de longue durée à des sons de plus de 85 dB est nocif pour le système auditif. Le seuil de la douleur se situe vers les 120 dB. En dessous de 80 dB on se trouve dans des conditions confortables pour suivre une conversation.

Atténuation de la pression (niveau) sonore (N4 - Blender)

Le son se propage uniformément autour de la source qui l'a engendré. La pression sonore va s'atténuer en fonction de la distance entre la source et l'observateur. Le plus généralement la pression sonore qui sert de référence est mesurée à une distance d'un mètre de la source. C'est cette valeur qu'on trouve dans les catalogues (compresseur...). La relation ci-dessous permet d'estimer l'atténuation du niveau sonore.

$$\Delta NS = 20 \log \left(\frac{\text{Pos ref}}{\text{Pos}} \right) \quad (55)$$

Avec :

ΔNS : Variation du niveau sonore (dB)

log : logarithme base 10

Pos ref : Position de référence (m). Le plus généralement 1m

Pos : Position de l'observateur par rapport à la source (m)

Exemple #16

La catalogue d'un compresseur avec moteur thermique indique un niveau de bruit de 84 dB à 1m de distance. Quel est :

- L'atténuation du bruit à 15m de distance du compresseur ?
- A cette distance, quel est l'estimation du niveau de bruit et quels sont les conséquences pour l'observateur ?

a) $\Delta NS = 20 \log \left(\frac{1}{15} \right) = -23,5 \text{ dB}$

b) $84 - 23,5 = 60,5 \text{ dB}$

L'observateur à un bon confort auditif et peut suivre facilement une conversation.

Conséquence sur le plongeur (Blender)

A longue échéance, éviter les problèmes auditifs lors des gonflages des bouteilles.



Index

- Absorption, 25
- amplitude, 37
- Archimède, 22, 23
- Association de bagues macros, 27
- Association de lentilles, 27
- Atténuation de la pression (niveau) sonore, 39
- bilan thermique, 31
- Boyle-Mariotte, 11, 12
- candelas, 26
- célérité, 37
- chaleur, 29
- chaleurs massiques, 13
- Charles, 11
- Clausius, 16
- coefficient de conductibilité thermique, 29
- coefficient de diffusion, 34
- coefficient de résistivité thermique, 29
- coefficient thermique, 29
- coefficients a et b, 16
- Conditions normales d'un gaz, 10
- conductance, 33
- Conduction, 29
- Convection, 30
- Cp, 13
- Cv, 13
- d'analyse dimensionnelle, 7
- Détermination des coefficients a et b, 15
- dette thermique, 33
- Diffusion, 26
- diffusion des gaz, 34
- Dioptrie, 27
- Eclairement lumineux, 26
- équation d'Haldane, 18
- Equations d'état des gaz réels, 14
- Equilibre mécanique du plongeur, 22
- Facteur de compressibilité, 14
- Facteur favorisant l'homogénéisation, 35
- flottabilité, 23
- Flux lumineux, 26
- Force, 21
- fréquence, 37
- Gay-Lussac, 11
- gaz parfaits, 10
- Gaz réels, 14
- Graham, 34
- Grandeurs photométriques, 26
- Haldane, 18
- Henry, 17
- homogénéisation d'un Trimix, 35
- Intensité lumineuse, 26
- Isobare, 11
- Isochore, 11
- Isotherme, 11
- Kelley, 19
- l'action-réaction, 21
- lentilles, 27
- Lentilles associées, 27
- loi d'Avogadro, 10
- loi de Charles, 12
- Loi de Dalton, 12
- Loi de Graham, 34
- Loi de Henry, 17
- loi des gaz parfait, 11
- Longueur d'onde, 37
- lumen, 26
- lumens, 26
- lumière, 25
- Luminance, 26
- Mécanisme de la dissolution, 17
- Mélange des gaz parfaits, 12
- Moment d'une force, 21
- multiples, 7
- nombre d'Avogadro, 10
- onde, 37
- Ondes mécaniques, 37
- ondes sonores, 37
- optique, 25
- Perception des sons, 39
- pertes cutanées, 32
- pertes dues à la respiration, 31
- Point critique, 15
- Pression, 9
- Pression absolue, 9
- Pression atmosphérique, 9
- Pression hydrostatique, 9
- pression relative, 9
- Pression sonore, 39
- principe d'Archimède, 22
- Principe de Pascal, 9
- Puissance sonore, 39
- Rayonnement, 30
- Réflexion, 25
- Réfraction, 25
- refroidissement de l'organisme, 33
- résistance thermique, 29
- Saturation, 17
- Schreiner, 19
- Sous saturation, 17
- sous-multiple, 7
- Sur Saturation, 17
- Système en équilibre, 21
- température, 29
- Température de couleur, 26
- thermodynamique, 29
- thermogenèse, 31
- transmission de la chaleur, 29
- unités dérivées, 6
- unités fondamentales, 6



valeurs de conductance, 33
Van Der Waals, 15
Variation de l'état d'un gaz parfait, 11
Vergence, 27

Vitesse (célérité) du son dans le milieu gazeux,
37
Vitesse (célérité) du son dans le milieu liquide,
38

Document non libre de droit