

SESSION 2014

**AGRÉGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : PHYSIQUE CHIMIE

**COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : *La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

A

Autour de la plongée sous-marine...

On oublie parfois que les premières plongées sous-marines en scaphandre autonome ne datent que de 1943 et ont été rendues célèbres avec la série *Le Monde du silence* de Jacques-Yves Cousteau. Depuis, de nombreux autres documentaires ou films ont contribué à rendre populaire cette activité. Citons *Le grand bleu*, en 1988, ou plus récemment *Océans* sorti en 2010.

On se propose ici d'étudier plusieurs aspects de la plongée sous-marine. Dans une première partie nous nous intéresserons aux fluides et à la notion de pression. Dans une deuxième partie, nous aborderons les conséquences de celle-ci sur la pratique de cette activité avant d'étudier dans une troisième partie, quelques effets relevant de l'optique, de l'acoustique et de la thermique, observés lors d'une évolution en milieu sous-marin.

Recommandations

La clarté, la lisibilité et la concision de la rédaction font partie des éléments d'appréciation de la copie. Le soin apporté aux raisonnements qualitatifs est aussi pris en compte dans le barème.

Le sujet comporte trois parties largement indépendantes :

Partie 1 : Généralités sur les fluides et notion de pression.

Partie 2 : Application à la plongée sous-marine.

Partie 3 : L'eau, un milieu non familier.

Les différentes parties sont, dans une large mesure, indépendantes, mais certaines questions font parfois appel à des notions ou à des résultats vus dans une partie antérieure.

Données, figures et documents :

Toutes les données numériques nécessaires sont regroupées en début d'énoncé.

Il est fortement conseillé d'en prendre connaissance avant de commencer à traiter le sujet car il n'y est pas toujours fait référence lors de la formulation des questions.

Toutes les données ne sont pas forcément nécessaires à la résolution de l'ensemble des questions.

Les figures et documents auxquels se réfèrent certaines questions sont également regroupés dans les premières pages.

Il est précisé en début de chaque partie quels sont les documents et figures qui s'y rapportent.

Questions pédagogiques :

Le sujet comporte des questions pédagogiques clairement identifiées dans le texte par l'abréviation « **QP** », comme par exemple : « 3.**QP** ».

L'ensemble des questions pédagogiques représente environ le tiers du total des points accordés à cette épreuve. Les candidats sont donc vivement invités à organiser leur travail en conséquence. Les réponses apportées doivent être suffisamment explicites et concises de façon à mettre en évidence les qualités pédagogiques d'un professeur de physique-chimie.

Données numériques

On note θ les températures exprimées en °C et T les températures exprimées en K.

Conversion d'unités :

Pression : 1 bar = 760 mm Hg

Partie 1

Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s

Constante de Planck réduite : $\hbar = h / (2\pi)$

Constante de Boltzmann : $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹

Constante des gaz parfaits : $R = 8,31$ J.K⁻¹.mol⁻¹

Viscosité dynamique de l'air : $\eta_{air} = 1,79 \times 10^{-9}$ Pa.s

Température au sommet de l'Everest : $\theta_{sommet} = -40$ °C

Pression au sommet de l'Everest : $P_{sommet} = 250$ mm Hg

Température de l'air au niveau de la mer : $\theta_{surface} = 15$ °C

Pression maximale admissible pour une roche de type silicate : $P_{max} = 6,5 \times 10^3$ bar

Masse volumique d'une roche de type silicate : $\rho_{silicate} = 2,5 \times 10^3$ kg.m⁻³

Partie 3

Le grand bleu :

Paramètres du mode électronique :

$$\omega_0 \sim 10^{16} \text{ rad.s}^{-1}$$

$$\tau_a \sim 10^{-12} \text{ s}$$

Longueur d'onde du "bleu" : $\lambda_{bleu} \sim 450$ nm

Caractéristiques acoustiques :

Pour l'eau :

Coefficient de compressibilité adiabatique : $\chi_{s,eau} = 5,0 \times 10^{-10}$ Pa⁻¹

Masse volumique : $\mu_{0,eau} = 1,0 \times 10^3$ kg.m⁻³

Pour l'air, à 20 °C sous $P_{atm} \sim 1$ bar

Coefficient de compressibilité adiabatique : $\chi_{s,air} = 0,7 \times 10^{-5}$ Pa⁻¹

Masse volumique : $\mu_{0,air} = 1,2$ kg.m⁻³

Protection thermique :

Caractéristiques du plongeur :

Masse : $m_p \sim 75$ kg

Capacité thermique massique : $c_p \sim 4$ kJ. K⁻¹.kg⁻¹

Conductance thermique du plongeur sans combinaison : $K_p \sim 16$ W.K⁻¹

Puissance thermique produite par le corps humain : $P_{th} \sim 120$ W

Température interne initiale du plongeur : $\theta_p = 37$ °C

Température de l'hypothermie : $\theta_{hyp} = 35$ °C

Caractéristiques extérieures :

Température de l'eau :

Eau tempérée : $\theta_{mer,temp} \sim 20$ °C

Eau tropicale : $\theta_{mer,tropic} \sim 28$ °C

Conductance thermique d'une combinaison de plongée d'épaisseur x (en m) :

$$K_{comb} \sim 0,1 \cdot x^{-1} \text{ W.K}^{-1}$$

Documents et figures

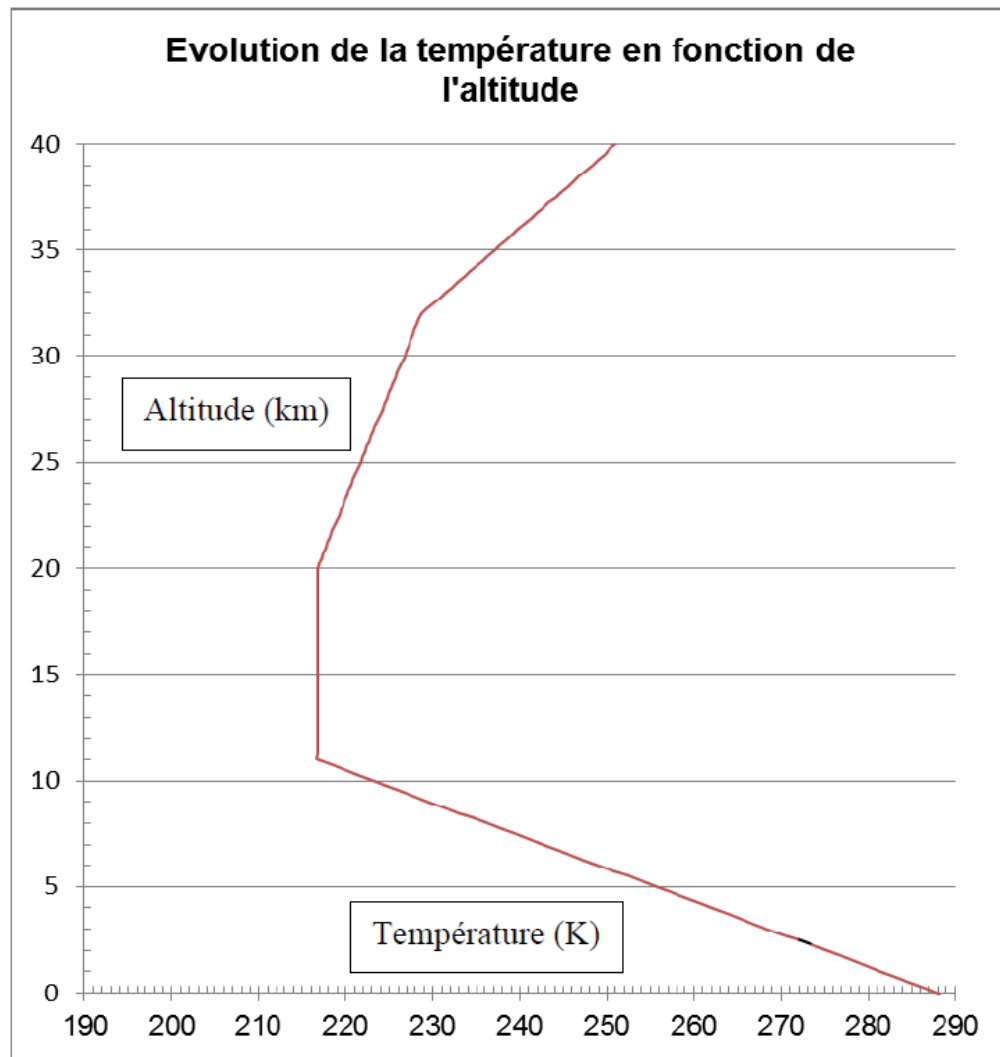


Figure 1 : Evolution de la température de l'atmosphère en fonction de l'altitude

NOTIONS ET CONTENUS	COMPÉTENCES ATTENDUES
La pression : la pression est une grandeur physique qui permet de comprendre l'influence de l'altitude sur les performances sportives et les effets physiologiques ressentis en plongée subaquatique.	
Pression d'un gaz, pression dans un liquide. Force pressante exercée sur une surface, perpendiculairement à cette surface.	Savoir que dans les liquides et dans les gaz la matière est constituée de molécules en mouvement. Utiliser la relation $P = F/S$, F étant la force pressante exercée sur une surface S , perpendiculairement à cette surface.
Pression dans un liquide au repos, influence de la profondeur.	Savoir que la différence de pression entre deux points d'un liquide dépend de la différence de profondeur. Savoir que la quantité maximale de gaz dissous dans un volume donné de liquide augmente avec la pression.
Dissolution d'un gaz dans un liquide. Loi de Boyle-Mariotte, un modèle de comportement de gaz, ses limites.	Savoir que, à pression et température données, un nombre donné de molécules occupe un volume indépendant de la nature du gaz. <i>Pratiquer une démarche expérimentale pour établir un modèle à partir d'une série de mesures.</i>

**Document 2 : Extrait du BO spécial n°4 du 29 avril 2010
Programme de la classe de seconde générale et technologique**

Dualité onde-particule Photon et onde lumineuse.	Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire.
Particule matérielle et onde de matière ; relation de de Broglie.	Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule. Connaître et utiliser la relation $p = h/\lambda$. Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.
Interférences photon par photon, particule de matière par particule de matière.	Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste.

**Document 3 : Extrait du BO spécial n°8 du 13 octobre 2011
Programme de la classe de terminale de la série scientifique**

« Dans un second article, publié en 1925, Einstein démontra une propriété extraordinaire pour un système de particules matérielles de spin entier : si sa densité spatiale n , est plus grande que la valeur critique donnée par :

$$n_c \approx \left(\frac{0,166}{h^3} \right) (m k_B T)^{3/2}$$

où k_B est la constante de Boltzmann, h la constante de Planck réduite et m la masse des particules, alors une fraction macroscopique des atomes se « condense » dans l'état d'énergie le plus bas, c'est-à-dire l'état d'impulsion nulle pour une enceinte de confinement arbitrairement grande. »

D'après la revue « Images de la physique 2000 », éditions du CNRS.

Document 4 : Condensation de Bose

Lors d'une mission scientifique en vue d'explorer la faune et la flore de la fosse des Mariannes, le sous-marin dénommé « Yellowsubmarine » progresse et s'enfonce dans des eaux noires et froides de l'océan. Ce sous-marin peut supporter des pressions jusqu'à 500 bars. Dans la salle de commande, le capitaine vérifie les différents afficheurs lui indiquant la pression, la profondeur, la vitesse... Le manomètre indique une pression de 413 bars (tout va bien !!!). L'exploration peut se poursuivre et le capitaine décide de poursuivre la descente. Un peu plus tard le manomètre indique 493 bars et le sonar situe la zone de la plaine abyssale à étudier encore 60 m plus bas. Le sous-marin pourra-t-il se poser, sans risque, pour effectuer des prélèvements de roches ?

Adaptation d'une activité sur internet proposée en lycée professionnel.

Document 5 : Exploration abyssale

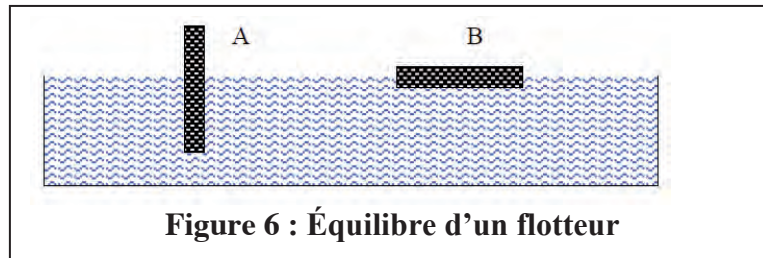


Figure 6 : Équilibre d'un flotteur

Extrait de la présentation d'un cours pour l'École d'été de physique E2Phy.

(Physique et sport, 2008)

La plongée en scaphandre autonome, est qualifiée de « plongée loisir », lorsque qu'elle se limite à des profondeurs de 40 m, voire 60 m, et à l'utilisation de mélanges N_2-O_2 gazeux ne dépassant pas 40 % en dioxygène. Elle se distingue ainsi de la plongée « TEK » ou hyperbare.

Elle peut se pratiquer après une formation spécifique visant à acquérir des techniques afin d'évoluer dans le milieu aquatique en toute sécurité.

En effet, le milieu aquatique modifie nos sens, vision et audition, mais aussi notre façon de respirer, notre mobilité, et la pression subie par l'organisme. Les techniques de la plongée scaphandre sont ainsi majoritairement issues de l'application de lois physiques simples concernant la pression.

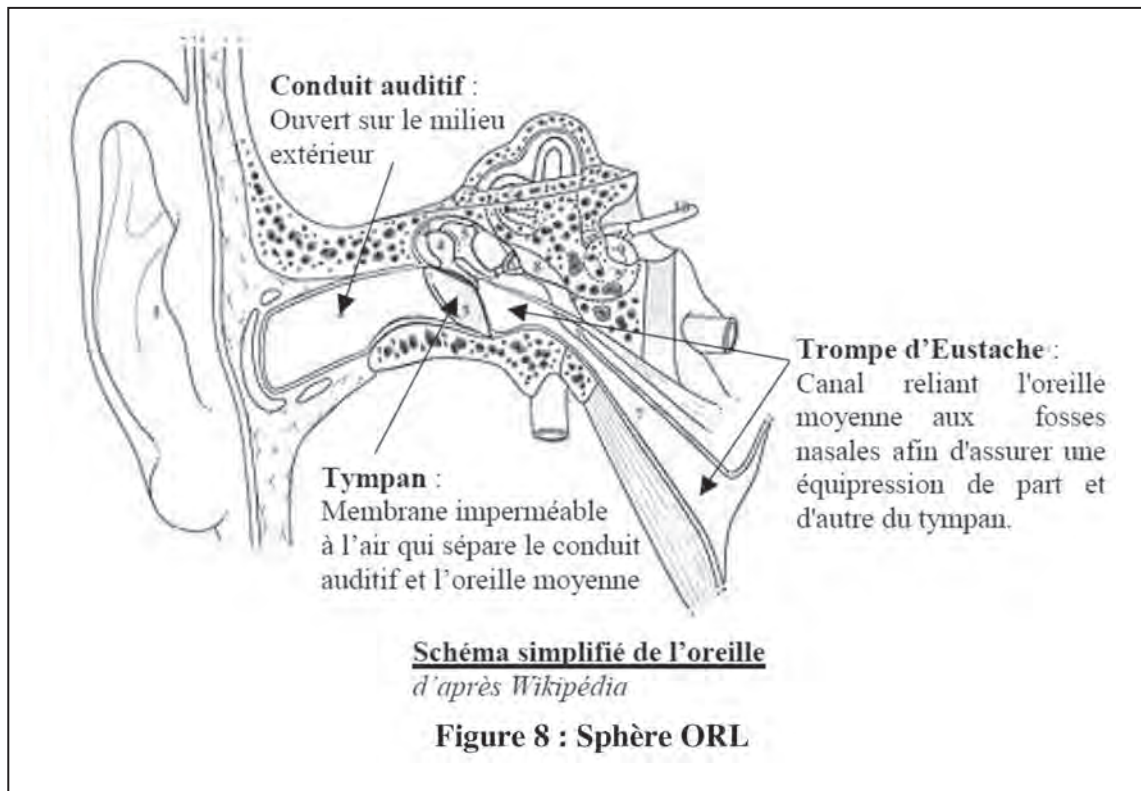
L'hydrostatique et la poussée d'Archimède permettent d'évoluer dans trois dimensions, ce qui est une sensation nouvelle. Cependant l'augmentation de la pression avec la profondeur a des effets physiques sur l'organisme qui peuvent conduire à des accidents graves, voire mortels.

On distingue :

- Les accidents « mécaniques », ou « barotraumatismes », dus à la variation des volumes gazeux de l'organisme.
- Les accidents « bio-chimiques », dus à la toxicité des gaz inhalés, les troubles intervenant au-delà d'une quantité limite, donc d'une pression partielle critique.
- Les accidents « bio-physiques », ou accidents de décompression (ADD), dus à la détente des gaz dissous dans l'organisme lors de la remontée.

Malgré les risques, la plongée loisir pratiquée par des plongeurs avertis et responsables, est une activité passionnante, qui au-delà de simples performances sportives, permet d'expérimenter des sensations nouvelles et de découvrir un univers absolument fabuleux !

Document 7 - Présentation de la plongée sous-marine



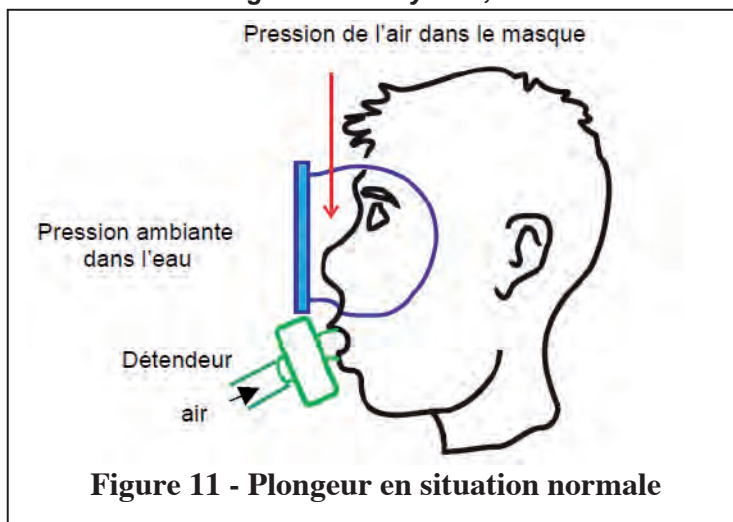
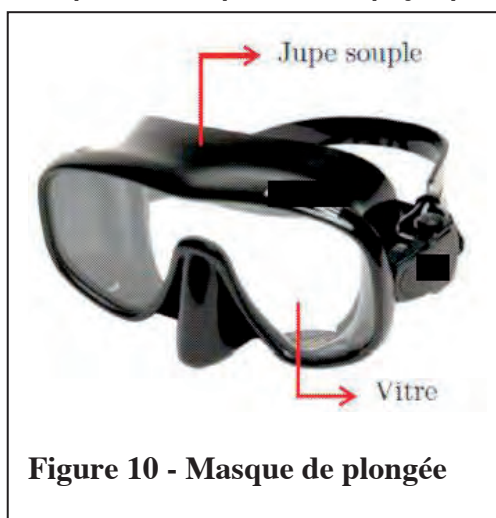
Extrait de l'énoncé de la composition de physique-chimie du concours général des lycées, session 2013.

Le placage de masque est un accident barotraumatique fréquemment rencontré chez un plongeur débutant.

Cet accident survient à faible profondeur chez le plongeur qui ne souffle que par la bouche l'air expiré. Lors de la descente, la pression hydrostatique extérieure augmente et vient comprimer la jupe du masque qui, dans un premier temps, se comporte comme un ressort. Le volume intérieur du masque diminue, jusqu'à ce que la déformation de la jupe ne soit plus possible. Le masque est alors plaqué sur le visage du plongeur. On considère qu'un masque ainsi plaqué (en limite d'élasticité de jupe) a perdu environ un tiers de son volume intérieur. Au-delà, la pression sanguine du plongeur (égale à la pression hydrostatique ambiante) est supérieure à la pression de l'air contenu dans le masque (effet ventouse). Lorsque cette dépression devient supérieure à 0,4 bar, il y a rupture des capillaires de la membrane superficielle de l'œil et de la muqueuse nasale, ce qui entraîne l'apparition d'hématomes sur le visage ou de saignement de nez. Ces troubles sont en général sans gravité et peuvent être évités simplement en soufflant par le nez régulièrement durant la descente pour rééquilibrer la pression à l'intérieur du masque.

Document 9 - Placage de masque

D'après la composition de physique-chimie du concours général des lycées, session 2013.



Question à résoudre :

Calculer la profondeur avant laquelle il est indispensable de souffler par le nez pour éviter ces troubles (la valeur attendue est une application numérique).

Pour répondre à cette question il vous appartient de modéliser la situation physique et de mettre cette situation en équation.

Il est par exemple attendu que :

- vous représentiez par un (ou plusieurs) schéma(s) la situation physique étudiée,
- vous choisissiez les notations que vous utilisez en attribuant un nom à chacune des grandeurs physiques que vous êtes amené à introduire,
- vous précisiez les lois physiques que vous appliquez et les éventuelles hypothèses et approximations que vous utilisez,
- les calculs soient menés sous forme littérale, avec pour objectif final d'obtenir une valeur numérique.

Document 12 - Question du problème



Adaptation d'extraits d'un article publié dans le BUP (BUP n°932 p283, avril 2011)

Généralités sur le mécanisme de la décompression

L'accident de décompression - ou ADD - est sans doute le plus connu des accidents encourus par les plongeurs. Il se produit à la remontée et consiste en une détente trop rapide des gaz dissous dans l'organisme. Les bulles soudainement créées peuvent altérer de façon irréversible des tissus et des organes du corps humain.

C'est un accident grave qu'il ne faut pas négliger car il peut entraîner la mort. Les risques peuvent néanmoins être évités en prenant quelques précautions.

Nous considérerons une plongée effectuée à partir du « niveau de la mer », avec de l'air « naturel » dont la composition est 21 % de O₂ et 79 % de N₂. Pour des calculs d'ordre de grandeur on simplifiera la composition en (20 %, 80 %) et la masse volumique de l'eau à la valeur de $\mu = 1 \text{ kg/L}$.

-1- Saturation des tissus à la descente

Processus de saturation

Les gaz respirés passent dans le sang par l'intermédiaire des alvéoles pulmonaires et se dissolvent dans le liquide sanguin au fur et à mesure de la descente.

Les molécules de gaz se lient alors avec les molécules de l'eau qui est le constituant majoritaire du sang, puis diffusent dans les « matériaux » plus denses du corps humain : muscles, graisses, os...

Au bout d'un « certain temps » passé à la profondeur h , un équilibre s'établit entre la quantité de gaz en phase gazeuse et la quantité de gaz dissous. On parle de **saturation**.

En ce qui concerne la saturation des tissus, point clé de l'accident de décompression, on se focalise principalement sur le diazote, N₂, non seulement parce qu'il n'est pas métabolisé par l'organisme comme le dioxygène O₂, et donc se stocke sans aucunement s'éliminer, mais surtout parce qu'il est largement majoritaire. Le diazote est le gaz qui sature majoritairement et qui pose problème en premier.

Tension d'un gaz dissous

La quantité totale de diazote qui peut « transiter » de la phase gazeuse à la phase aqueuse dépend de la pression extérieure, donc de la profondeur.

La quantité de N₂ en phase gazeuse s'exprime par sa pression partielle, et la quantité de N₂ dissoute dans les phases aqueuses de l'organisme est représentée par une quantité appelée « **tension** » T . Afin de comparer cette quantité T avec celle contenue dans la phase gazeuse en contact dans les poumons, on l'exprime dans la même unité que la pression partielle, par exemple en bar.

Ainsi un plongeur effectuant une plongée respire de l'air comprimé grâce à son détendeur à la pression extérieure environnante. Au bout « d'un certain temps » passé à la profondeur h , le transfert moléculaire d'azote de la phase gazeuse à la phase aqueuse cesse car la tension d'azote s'équilibre avec la pression partielle de diazote à la profondeur considérée. On appelle la quantité T_{sat}^h la tension de saturation à la profondeur h , et la quantité T_{sat}^0 représente la tension de saturation à la surface.

On montre que l'excédent d'azote dissous dans le corps suit une loi d'évolution telle qu'à la date t la tension d'azote à une profondeur h , $T^h(t)$, peut s'écrire :

$$T^h(t) = T_{sat}^0 + (T_{sat}^h - T_{sat}^0) \cdot (1 - 2^{-t/\tau})$$

Cette expression traduit ce qu'on a coutume d'appeler la « charge » du tissu en gaz dissous.

Toutes les parties du corps humain n'ont pas le même comportement face à la saturation en gaz. Les parties « fluides » (sang) sont plus réactives que les parties « visqueuses » (graisses).

On définit un « compartiment » comme une partie du corps (organes, tissus physiologiques...) ayant un comportement donné face à la saturation. Chaque compartiment est caractérisé par un « temps caractéristique » τ appelé selon le cas « demi-vie » ou « période », qui rend compte de la plus ou moins grande rapidité avec laquelle le tissu se « charge » - mais aussi se décharge - en gaz dissous. Selon les modèles utilisés par les algorithmes de décompression, le nombre de compartiments est plus ou moins élevé. Tous font intervenir des compartiments à courte période et d'autres à périodes plus longues.

Document 14 : Processus de saturation

-2- Algorithmes de décompression et désaturation à la remontée

Nous utiliserons pour la démonstration un algorithme à 12 compartiments de périodes τ réparties entre 5 et 120 minutes.

Ce modèle est utilisé pour l'élaboration des tables couramment utilisées en France : Ref MN 90 (Tables de la Marine Nationale datant de 1990). Cet algorithme se programme très facilement.

A la remontée, les gaz dissous, et notamment le diazote N_2 , repassent à l'état gazeux. C'est un phénomène « naturel » et sans danger pour l'organisme si le passage de l'état dissous à l'état gazeux se fait comme à la descente, à l'échelle microscopique au niveau des alvéoles pulmonaires.

Pour pratiquer en toute sécurité, le plongeur doit gérer sa remontée afin que le passage à l'état gazeux des espèces dissoutes se fasse à un rythme qui limite la taille des bulles dans les parties aqueuses à quelques microns. L'expérience montre que ces « micro-bulles » remontent alors les canaux sanguins puis s'éliminent via les poumons sans dégâts physiologiques à condition que leur volume n'atteigne pas une taille critique. Un critère de vitesse de remontée, empirique, est de ne pas dépasser la vitesse des très petites bulles d'air qui entourent le plongeur.

Examinons le cas d'un plongeur ayant passé un temps suffisant à la profondeur h afin que son compartiment de période τ soit saturé. Lorsqu'il entame sa remontée, la tension des tissus doit diminuer, afin que la tension à la nouvelle profondeur h' s'équilibre à nouveau. Tant que la valeur de la tension reste supérieure à cette valeur asymptotique pour cette nouvelle profondeur h' , on dit que le tissu est « sursaturé ».

Il est crucial que la vitesse de remontée du plongeur soit adaptée à la cinétique de la désaturation afin d'éviter qu'un tissu se retrouve en « sursaturation ».

En fait, l'expérience montre que la sursaturation devient dangereuse pour l'organisme si le rapport entre la tension et la pression partielle devient supérieur à une certaine valeur.

Pour chaque compartiment, est défini un **coefficient de sursaturation critique en surface**, appelé CSc° .

Il représente la tension en azote que ne doit pas dépasser un compartiment pour que le plongeur puisse remonter à la surface ($P_0 = 1$ bar) avec une vitesse « raisonnable ».

Dès que : $T^h(t) = CSc^\circ$ pour au moins 1 compartiment, appelé le « compartiment directeur », le plongeur doit s'arrêter et attendre que ses tissus « désaturent » au rythme de la loi cinétique. C'est le « palier de décompression » dont la durée se calcule à partir de la loi cinétique.

Les profondeurs de palier retenues par les protocoles sont 12, 9, 6 et 3 m.

On admet qu'il faut attendre au moins 12 h pour une désaturation complète (cf. période des compartiments les plus lents).

Par sécurité on recommande d'attendre 24 h avant de prendre l'avion.

-3- Plongée sans décompression

Il n'est pas toujours nécessaire d'effectuer des paliers avant de remonter, bien que de nombreux protocoles imposent malgré tout un « palier de sécurité » de 3 min à 5 m, quel que soit le temps passé en immersion.

Courbe de sécurité

On appelle « **courbe de sécurité** », la courbe qui donne la durée maximale passée à une profondeur donnée, pour que la remontée puisse s'effectuer sans palier.

Cette courbe dépend des systèmes de plongée enseignés, mais les valeurs restent du même ordre de grandeur.

Document 15 : Processus de désaturation

On porte sur le même graphique les valeurs des coefficients de sursaturation critique en surface, CSc° , et des tensions obtenues pour les différents compartiments en fonction de la durée de plongée.

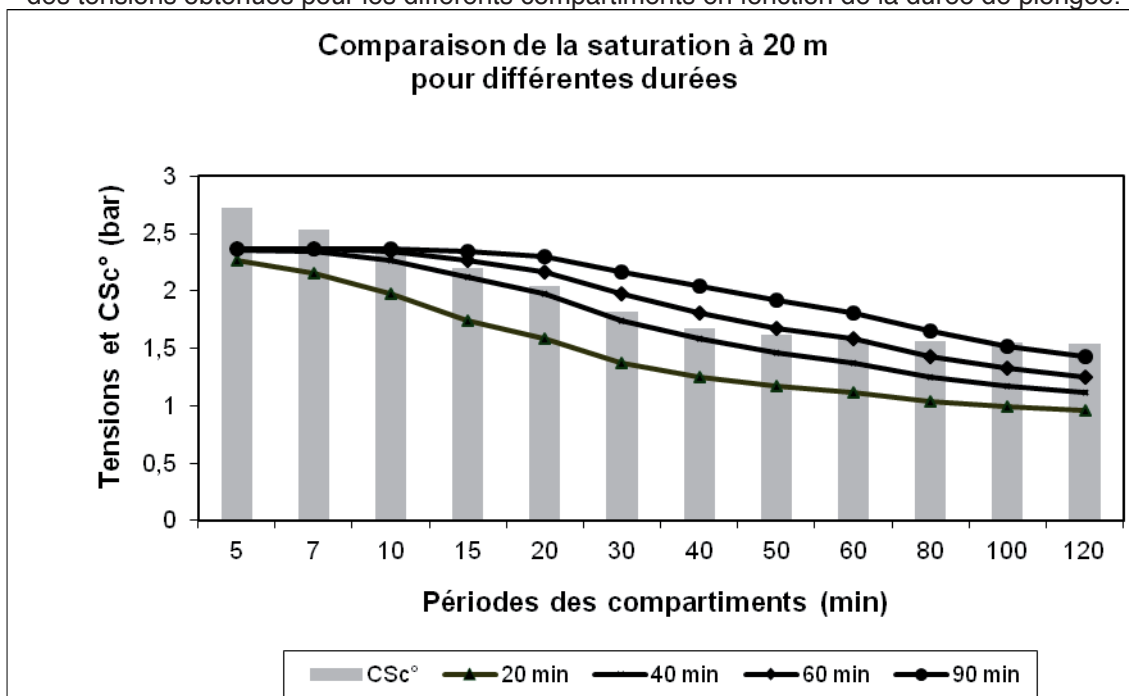


Figure 16 : Comparaison de la saturation à la profondeur de 20 m

On porte sur le même graphique les valeurs des coefficients de sursaturation critique en surface, CSc° , et des tensions obtenues pour les différents compartiments en fonction de la profondeur, cela pour la même durée de plongée.

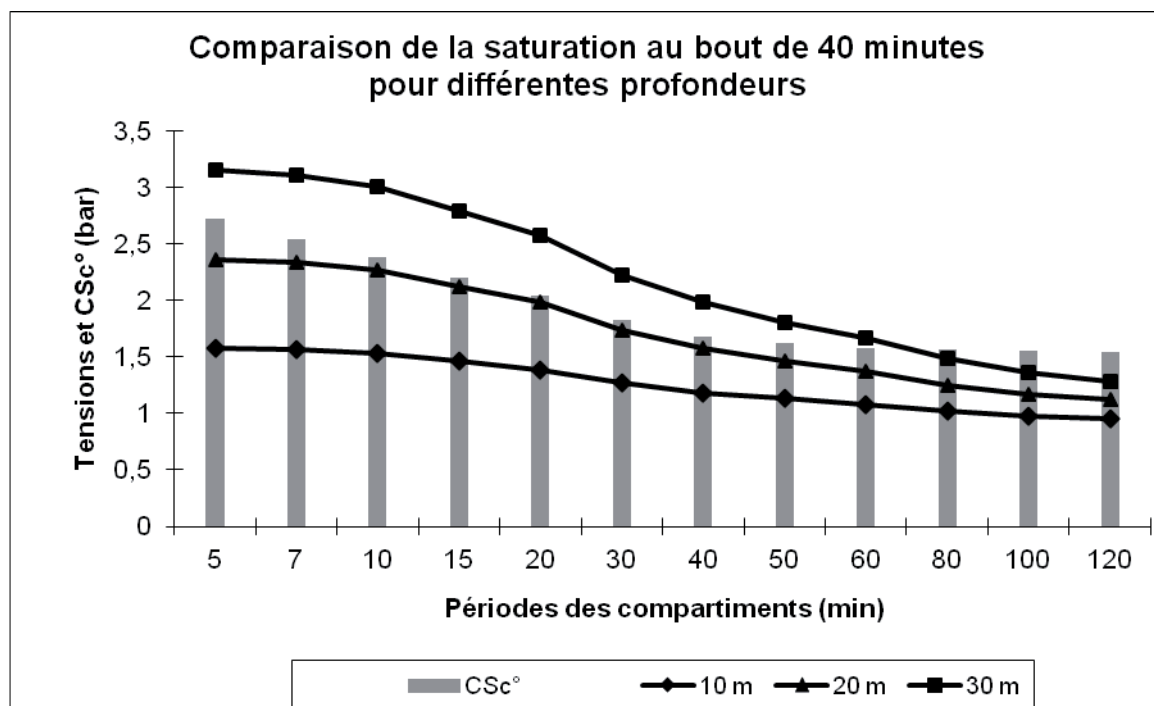
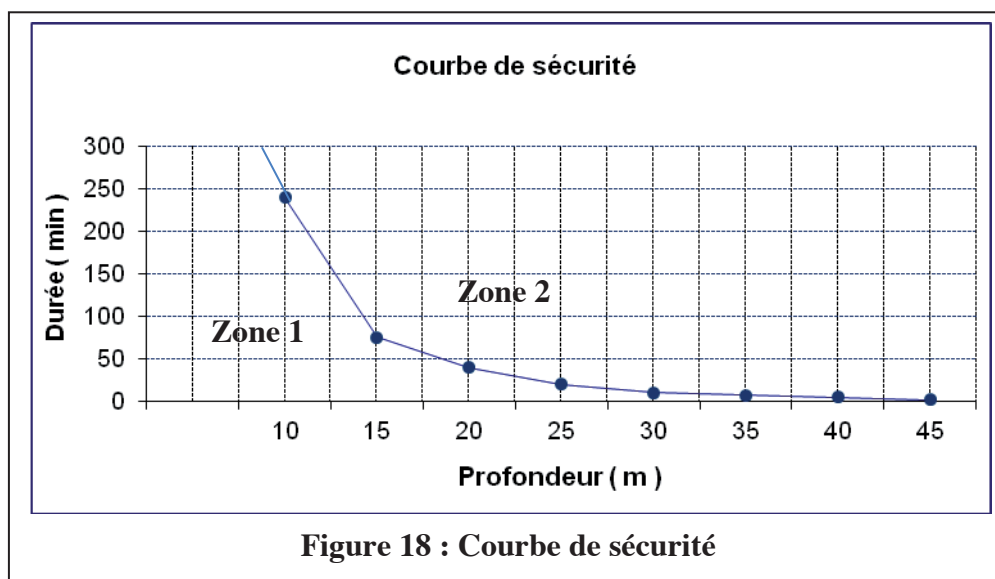
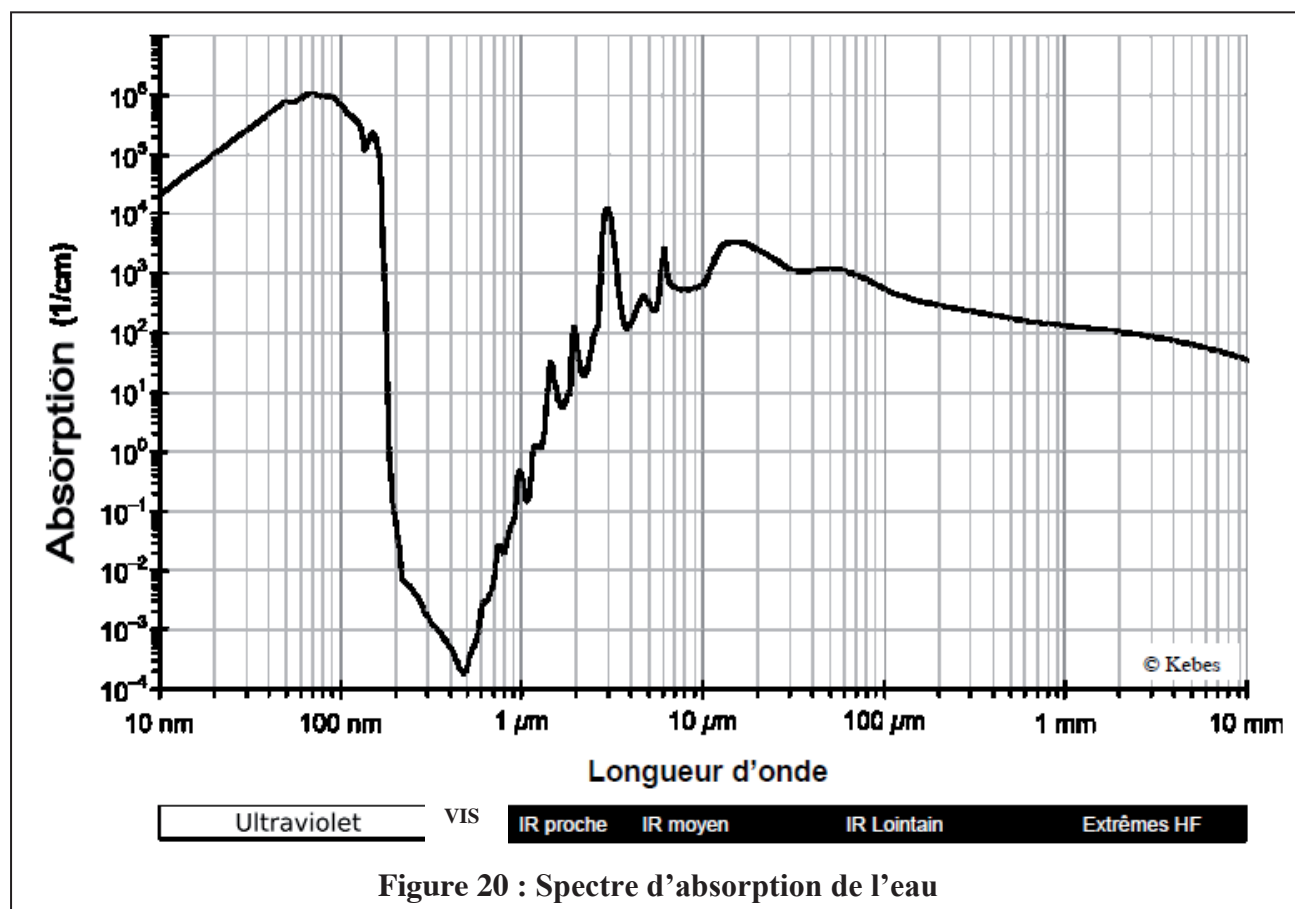


Figure 17 : Comparaison de la saturation pour une durée de 40 min



Conductivité	Métal	Verre	Eau salée	Eau pure	Polymères	Plasma	Air
S.m ⁻¹	10 ⁸ - 10 ⁷	10 ⁻⁸	5	10 ⁻¹	10 ⁻¹⁵ - 10 ⁻¹⁷	10 ³ - 10 ⁴	10 ⁻¹⁴

Document 19 : Conductivité électrique de quelques matériaux



PARTIE 1 - Généralités sur les fluides et la notion de pression.

Documents et figures 1 à 6

1. Un système fluide monphasé, est décrit comme un système à trois échelles de longueur. Dans le cas d'un liquide et d'un gaz à pression et température ambiante :
 - Citer celles-ci.
 - En s'appuyant sur une situation concrète, donner une valeur numérique caractéristique pour chacune de ces échelles.

2. Afin de modéliser les interactions intermoléculaires, il est parfois fait usage en physique statistique d'un potentiel intermoléculaire $V(r)$ de type Lennard-Jones :

$$V(r) = E_0 \left(\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right)$$

où r représente la distance intermoléculaire de deux molécules supposées ponctuelles et E_0 une constante positive.

Justifier en quoi ce potentiel permet de modéliser un gaz réel.

3. **QP** Proposer une explication accessible à un élève de terminale S permettant de comprendre l'expression de la densité critique donnée dans l'extrait d'article cité sur le document 4.
4. **QP** En vous aidant éventuellement d'un schéma, décrire en 10 lignes maximum, une expérience de cours destinée à une classe de seconde permettant d'aborder la notion de forces pressantes et de pression due à l'air ambiant.
 - Effectuer en une dizaine de lignes maximum, une interprétation de celle-ci accessible à un élève de seconde.
 - Justifier votre choix.
5. **QP** Déterminer, évaluer ou citer, puis placer sur un axe gradué les pressions suivantes : pression atmosphérique par beau temps, pression de gonflage d'une roue de voiture, pression à la sortie d'une trompe à eau, pression sous 1 m d'eau, pression dans l'œil d'un cyclone, pression exercée sur la neige par une raquette de randonnée, pression exercée par une lame de patin à glace, pression dans une cabine d'avion, pression au centre du Soleil, pression sanguine, pression acoustique, pression de l'ultra-vide, pression du vide interstellaire. **Le candidat a tout intérêt, dans la mesure du possible, à effectuer un raisonnement quantitatif pour chaque pression placée sur l'axe.**
6. En raisonnant sur un élément de volume de fluide homogène de forme parallélépipédique placé dans un champ de pesanteur, établir la relation vectorielle :
$$\overrightarrow{\text{grad}P} = \mu \vec{g}$$
liant, à l'équilibre, le gradient de la pression P à la masse volumique μ du fluide et à l'accélération du champ de pesanteur $\vec{g}$.
7. Au sommet de l'Everest et par beau temps, la température est θ_{sommet} et la pression P_{sommet} . En s'appuyant sur la figure 1, proposer un modèle quantitatif permettant d'expliquer l'évolution de la pression.
8. Justifier que l'on parle de « la pression » et de « la température » à l'échelle d'une salle de classe.

9. **QP** Commenter la phrase souvent citée : « En plongée on rencontre un bar tous les 10 m. »
10. **QP** On a nommé « pascal » l'unité de pression. Indiquer à quel siècle vécut Blaise Pascal et citer une expérience qu'il a réalisée.
11. Une montagne typique est composée de roches de type silicate de masse volumique ρ_{silicate} . Une telle roche ne peut pas supporter une pression supérieure à P_{max} . Proposer un modèle permettant d'obtenir un ordre de grandeur pour la hauteur maximale h_{max} d'une montagne.
12. **QP** Exposer en une dizaine de lignes, une utilisation, dans le cadre du programme de la classe de seconde générale et technologique, de la situation déclenchante décrite sur le document 5.
 - Préciser les objectifs visés.
 - Décrire succinctement les document(s) supplémentaire(s) que vous vous proposez de distribuer aux élèves.
13. **QP** Dans le cadre d'un TPE un groupe d'élèves trouve un protocole déterminant la poussée d'Archimède à l'aide d'une balance. Sans faire appel à la notion de poids apparent et en vous aidant éventuellement d'un schéma, expliquer en une dizaine de lignes comment cette mesure est possible.
14. **QP** Préciser à partir d'arguments accessibles à un élève de lycée laquelle des deux schématisations (A) ou (B) de la figure (6), illustrant la flottaison d'un objet de masse volumique inférieure à celle de l'eau, est correcte.
15. **QP** « Méfiez-vous de l'œuf qui flotte ! »
Un groupe d'élèves de 5^{ème} souhaite présenter au concours C.Génial Collège une tentative d'explication de la « recette de grand-mère » énonçant qu'un œuf périmé flotte alors qu'un œuf frais coule au fond d'un récipient rempli d'eau. Le travail est réalisé dans le cadre d'un atelier scientifique. Proposer des hypothèses et des expériences afin d'étudier cette affirmation.

PARTIE 2 : Applications à la plongée sous-marine

La plongée-loisir est une activité sous-marine (décrite document 7) qui requiert une bonne connaissance de l'évolution de la pression du milieu environnant.

L'océan est supposé isotherme et dans cette partie on considérera le corps du plongeur à la même température que l'eau de mer. Dans les situations étudiées, le plongeur respire de l'air assimilé à un mélange de gaz parfaits, constitué de dioxygène et de diazote, en proportions molaires respectives de 20 % de dioxygène et 80 % de diazote.

Accidents mécaniques ou barotraumatismes.

Documents et figures 7 à 13

Ces accidents concernent les espaces aériens du corps humain : sphère ORL, poumons, abdomen.

16. Proposer une explication du mot « barotraumatisme ».

17. Expliquer pourquoi « les espaces aériens » du corps humain, et en particulier la « sphère ORL » (figure (8)), sont vulnérables en plongée sous-marine.

Un danger souvent méconnu : le placage de masque.

18. **QP** Les documents 9 et 12 et les figures 10 et 11 sont les éléments constitutifs d'une résolution de problème proposée au Concours Général 2013.
- Proposer une solution au problème proposé par le document 12.
 - Comment modifier l'énoncé (ajout de documents, questions préliminaires...) pour rendre cet exercice accessible à la majorité des élèves d'une classe de Terminale S.
19. Compte-tenu de la valeur de la profondeur obtenue à la question précédente, conseiller vos élèves au sujet de l'usage des lunettes de natation (document 13) afin d'éviter de pareilles déconvenues.
20. Expliquer pourquoi les accidents barotraumatiques mortels concernent majoritairement des plongeurs qui retiennent leur respiration lors de la remontée. Proposer une solution très simple pour les éviter.
21. Dire si ces accidents mortels concernent un plongeur faisant de l'apnée.

Le problème de la décompression.

Documents et figures 14 à 18

L'accident de décompression est l'accident de plongée le plus connu mais il est tout à fait évitable en suivant les protocoles appropriés.

22. Justifier que la tension de saturation en surface ($h = 0$) vaut :

$$T_{sat}^0 = 0,8 \text{ bar.}$$

23. Proposer une analogie électrique pour la notion de « compartiments ».
24. A l'aide de l'analogie électrique précédente, retrouver l'expression de $T^h(t)$ proposée sur le document 14.
25. Estimer la durée passée à la profondeur h à partir de laquelle on peut considérer comme saturé, un compartiment de demi-vie τ (appelée « période » dans le texte).

Protocoles de plongée

26. Identifier sur la figure 18, en justifiant, quelle zone correspond à une plongée sans palier et celle qui correspond à une plongée avec palier(s).
27. Préciser combien de temps au maximum le plongeur peut rester à une profondeur de 10 m sans avoir à effectuer de palier au cours de la remontée. Citer des causes qui peuvent alors limiter le temps d'immersion.
28. Pour une plongée effectuée à 20 m de profondeur, indiquer, en justifiant, quelles durées d'immersion parmi celles proposées (20, 40, 60 ou 90 minutes), sont acceptables pour pouvoir remonter sans avoir à effectuer de palier. Dans la négative, indiquer les compartiments qui imposent des paliers.
29. Pour une plongée d'une durée de 40 minutes, indiquer les profondeurs auxquelles le plongeur peut rester sans avoir à effectuer de palier lors de la remontée.

30. A l'aide des résultats précédents, proposer une méthode pour obtenir la courbe de sécurité présentée sur la figure 18.

PARTIE 3 : L'eau, un milieu non familier

Document et figure 19 et 20

Le Grand Bleu.

L'interaction « lumière - eau de mer » peut être modélisée par un milieu diélectrique soumis à l'action d'un champ électrique extérieur sinusoïdal $\vec{E}$ de pulsation ω .

31. Une approximation dans la description des diélectriques est appelée « **DLHI** ». Expliciter cet acronyme et définir chaque adjectif.
32. Citer une caractéristique électrique de l'eau de mer qui pourrait justifier, ou pas, l'hypothèse de modélisation de l'eau de mer par un milieu diélectrique parfait. Argumenter.

La polarisation du milieu est reliée au champ électrique par l'introduction d'une grandeur appelée susceptibilité diélectrique, et dont l'expression complexe dans le cadre d'un modèle simple est donnée ci-dessous :

$$\underline{\chi_e} = \chi_0 \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i \frac{\omega}{\tau_a}}, \text{ où } i \text{ est tel que } i^2 = -1.$$

Les constantes ω_0 , χ_0 , et τ_a , sont des constantes associées au milieu, au type de charges liées excitées par le champ électrique extérieur, ainsi qu'au mode d'excitation.

33. Décrire un exemple de modèle classique associé à une charge liée dans un diélectrique DLHI.
34. Expliciter la condition qui permet de supposer que l'amplitude du champ électrique puisse être uniforme à l'échelle de l'amplitude du mouvement d'une charge liée.
35. Rappeler ce que représentent physiquement ω_0 et τ_a .
36. Représenter et commenter l'allure de $|\underline{\chi_e}|$, module de $\underline{\chi_e}$, en fonction de ω .
37. Exprimer le facteur de qualité Q en fonction de ω_0 et τ_a . Calculer Q pour le mode électronique. Commenter.

L'expression complexe de $\underline{\chi_e}$ s'écrit aussi : $\underline{\chi_e} = \chi_e' + i\chi_e''$

$$\text{avec : } \chi_e' = \chi_0 \frac{\omega_0^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\tau_a}\right)^2} \quad \text{et} \quad \chi_e'' = -\chi_0 \frac{\omega_0^2 \frac{\omega}{\tau_a}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega}{\tau_a}\right)^2}$$

On définit pour un tel milieu l'indice complexe $\underline{n}$ par : $\underline{n}^2 = \underline{\varepsilon}_r = I + \underline{\chi}_e = \varepsilon_r' + i\varepsilon_r''$.

38. Interpréter physiquement les parties réelle et imaginaire de l'indice complexe $\underline{n}$.

39. Discuter les propriétés électromagnétiques d'un milieu d'indice $\underline{n}$ en fonction de la fréquence. Interpréter en terme de transparence vis-à-vis des ondes électromagnétiques les qualités du milieu d'indice $\underline{n}$.

La figure 20 représente le spectre d'absorption (exprimée en cm^{-1}) de l'eau liquide.

40. Justifier quantitativement qu'à grande profondeur seul le « rayonnement bleu », de longueur d'onde caractéristique λ_{bleu} , pénètre.

Ondes acoustiques en milieu marin.

L'eau est considérée ici comme un milieu fluide suffisamment compressible pour que lui soit associé un coefficient de compressibilité isentropique χ_s défini par :

$$\chi_s = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial P} \right)_s ; \mu \text{ est la masse volumique, } P \text{ la pression.}$$

41. Justifier l'hypothèse d'une « transformation isentropique » dans le cas de la propagation d'une onde sonore.

On considère une onde sonore se propageant dans un milieu fluide. On néglige les effets de la viscosité et de la pesanteur. En l'absence de l'onde, la masse volumique du milieu vaut μ_0 , la pression locale P_0 , et le fluide est au repos par rapport au référentiel terrestre supposé galiléen.

Lors du passage de l'onde, le fluide subit une petite perturbation qui modifie localement la masse volumique, la pression et la vitesse $\vec{v}$ d'une particule mésoscopique de façon suivante :

$$\mu(\vec{r}, t) = \mu_0 + \mu_1(\vec{r}, t) ; \quad P(\vec{r}, t) = P_0 + P_1(\vec{r}, t) ; \quad \vec{v}(\vec{r}, t) = \vec{v}_1(\vec{r}, t).$$

Les grandeurs scalaires ou vectorielles d'indice 1 sont des infiniment petits du premier ordre.

42. Rappeler les hypothèses de « l'approximation acoustique ».

On rappelle l'équation locale de la conservation de la masse obtenue en mécanique des fluides :

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \text{div}(\mu \vec{v}) = 0.$$

43. Justifier en quoi cette équation traduit la conservation de la masse.

44. Par analogie avec l'équation locale traduisant la conservation de la masse, écrire deux autres équations locales de conservation rencontrées dans d'autres domaines et préciser pour chacune d'elles sa signification physique.

On rappelle l'équation d'Euler obtenue en mécanique des fluides :

$$\mu \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} \right) = -\text{grad} P.$$

45. Expliciter ce que traduit cette équation.

46. Rappeler les hypothèses liées à sa validité.

47. En utilisant l'approximation acoustique, linéariser les deux équations ci-dessus ainsi que l'expression de χ_s .
48. Établir l'équation aux dérivées partielles vérifiée par la surpression $P_l(\vec{r}, t)$.
49. En déduire l'expression de la célérité c de l'onde en fonction de μ_0 et χ_s .
50. Comparer les valeurs des célérités du son dans l'air c_a , et dans l'eau, c_e .

Etude de la transmission d'un son à travers le dioptre air-eau.

On considère une onde acoustique *sonore*, plane de fréquence ν se propageant dans l'air et arrivant perpendiculairement sur un plan d'eau supposé parfaitement plan.

Chaque milieu, l'air et l'eau, est caractérisé par une impédance acoustique Z , avec $Z = \mu_0 c$, μ_0 et c étant respectivement la masse volumique du milieu au repos et la célérité du son dans ce milieu. On note avec l'indice « a » les grandeurs relatives à l'air, et avec l'indice « e » celles relatives à l'eau.

Les coefficients de réflexion R_{Ps} et de transmission T_{Ps} en puissance représentent la fraction de puissance sonore réfléchi et transmise à l'interface de deux milieux.

Leurs expressions en fonction des impédances de chaque milieu Z_a et Z_e sont :

$$R_{Ps} = \left(\frac{Z_e - Z_a}{Z_e + Z_a} \right)^2 \quad \text{et} \quad T_{Ps} = \frac{4Z_e Z_a}{(Z_e + Z_a)^2}$$

51. Conclure sur la conservation de l'énergie acoustique lors de la transmission d'une onde acoustique lors de la traversée d'un dioptre « eau-air ».
52. Donner la signification de l'expression « adapter les impédances » et la condition que doivent remplir les impédances respectives des deux milieux pour qu'il en soit ainsi.
53. Citer un exemple où cette adaptation est recherchée.

On définit l'indice acoustique n_{ac} par :

$$n_{ac} = \frac{c_a}{c_e}$$

54. Évaluer l'indice acoustique n_{ac} .
55. Pour une onde acoustique, expliquer à l'aide d'un schéma si le phénomène de réflexion totale s'observe pour un sens de propagation allant de l'air vers l'eau ou de l'eau vers l'air.
56. Est-il efficace de rappeler des plongeurs en sifflant ou en agitant une cloche depuis le pont d'un bateau ? Pourquoi ? Proposer une meilleure méthode.

Protection thermique

Un plongeur (sans combinaison) dont la température interne est initialement θ_p se déplace dans de l'eau à la température θ_e supposée uniforme et constante.

57. Décrire en quelques lignes les processus possibles de transfert thermique entre le corps du plongeur et le milieu environnant.

58. Donner sans calculs, mais en justifiant, la température du plongeur au bout d'un temps suffisamment long dans le cas où il n'y a aucune source interne d'énergie.

Pour maintenir sa température interne, le corps humain produit une puissance thermique P_{th} supposée constante. Les échanges entre la surface extérieure de la peau et le milieu fluide environnant, de température constante et uniforme T_e , sont modélisés par un flux thermique $\Phi_{p \rightarrow e}$ vérifiant une loi de la forme :

$$\Phi_{p \rightarrow e} = -K(T_e - T),$$

où K est un paramètre caractéristique, T la température absolue du plongeur, variable, et T_e la température absolue du milieu extérieur.

59. Justifier que K s'appelle la « conductance thermique » du système.

La conductance thermique du plongeur sans combinaison est notée K_p .

60. Établir, en justifiant toutes les étapes, l'équation différentielle de l'évolution temporelle de la température T du plongeur supposée uniforme dans tout son corps.

On introduira c_p la capacité thermique massique du plongeur et m_p sa masse.

61. En déduire l'évolution temporelle $T(t)$ de la température du corps du plongeur.

62. Exprimer la constante de temps τ_{th} du phénomène et la calculer. Commenter le résultat.

63. Montrer que la température limite T_{lim} atteinte par le corps est donnée par : $T_{lim} = T_e + \frac{P_{th}}{K_p}$

La calculer numériquement pour une mer tempérée et une mer tropicale (voir données numériques).

Lorsque la température interne du plongeur atteint θ_{hyp} , l'hypothermie peut devenir fatale.

Le plongeur utilise donc une combinaison, caractérisée par une conductance K_{comb} , qui modifie la constante K_p en K' .

64. Justifier, en s'aidant éventuellement d'une analogie électrique, que K' est telle que :

$$\frac{1}{K'} = \frac{1}{K_p} + \frac{1}{K_{comb}}$$

65. Expliquer l'impact de la combinaison sur la constante de temps τ_{th} et la température T_{lim} .

66. Commenter la pertinence du port d'une combinaison en eau tropicale, du point de vue du risque d'hypothermie.

Les combinaisons de plongée couramment utilisées pour des températures d'eau de mer tempérées ou tropicales, sont constituées à base de néoprène poreux d'épaisseur x (3 mm, 5 mm, ou 7 mm) dont on peut modéliser la conductance K_{comb} par une loi du type :

$$K_{comb} = ax^{-1}$$

67. Choisir, en argumentant, parmi les trois valeurs proposées, l'épaisseur minimale x qui évite l'hypothermie dans une mer tempérée.

68. Citer une autre raison pour laquelle il est recommandé de porter une combinaison pour pratiquer la plongée sous-marine, cela quelle que soit la température de l'eau.