

L'HYPOTHERMIE : UN ENNEMI SILENCIEUX

Modélisation des pertes thermiques du plongeur et conseils

1. Introduction

Un des plongeurs de votre palanquée vous fait signe qu'il a froid : quelles dispositions prenez-vous en réponse à ce signe ? Montrez comment cette manifestation apparemment sans gravité peut évoluer en accident.

Question posée lors de l'épreuve d'accidents à l'examen du MF2 (session d'Hendaye, 1998).

Ce type de question qui peut parfois entrer dans les évaluations à tous les niveaux des cadres de la plongée appelle un certain nombre de commentaires. En effet, la sensation de froid ressenti et les conséquences qu'elle peut avoir sur le plongeur incitent le moniteur à une extrême prudence. Au-delà de la sensation de gêne ressentie par le plongeur dans un environnement froid se produisent des manifestations physiologiques qui se traduisent par une modification importante des fonctions respiratoires, de la circulation et de toutes les fonctions vitales. Ces phénomènes sont décrits de manière exhaustive dans les traités de médecine, mais il appartient à chaque moniteur ou guide de palanquée d'en connaître sinon les exactes manifestations cliniques, au moins les signes qui seront précurseurs à une évolution vers l'accident. Cette approche ne peut se faire sans une compréhension précise des phénomènes physiques qui président à cette évolution de l'organisme vers un état d'hypothermie. Par ailleurs, la description du phénomène physique et son explication relèvent de l'enseignement théorique que tout moniteur est appelé à effectuer dans le cadre de ses fonctions aux élèves prétendant à un niveau de plongeur, qu'il soit élémentaire ou avancé.

Après avoir rappelé les lois de la thermique mises en jeu dans les échanges entre le plongeur et un environnement plus ou moins froid, nous proposons une modélisation du phénomène au cours de laquelle, au-delà des équations, nous tenterons d'avoir une approche phénoménologique qui devrait permettre au non-spécialiste de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu. Puis, nous ferons état d'une étude expérimentale en cours et tenterons de dresser quelques conclusions d'ordre physiologique. Enfin, nous proposerons une approche pédagogique de cette partie de la physique, au niveau théorique et lors de situations en immersion. Ainsi, l'objectif de ce mémoire sera de décrire les applications à la plongée en mettant en lumière les éléments qui permettront de rendre ces lois physiques « plus digestes » pour le néophyte par un recours permanent à des observations de la vie courante et à des sensations que tout plongeur a pu ressentir au cours de sa pratique de l'activité.

2. Phénoménologie des différents modes d'échange thermique

Tout corps mis en contact avec un environnement à une température différente de la sienne aura tendance à échanger de la chaleur avec celui-ci. Il relève de la logique que le sens des échanges sera déterminé par les valeurs respectives de ces températures. En effet (et cela se démontre par la thermodynamique), la chaleur va du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. La manière dont cette énergie thermique (chaleur) migre d'un corps à l'autre est décrite par des lois thermiques qui, on le verra, sont assez simples à comprendre. Par ailleurs,

ces échanges seront différemment décrits selon que l'on a affaire à des corps en mouvement ou immobiles et selon la nature des corps en présence. En clair, le corps humain qui peut, en première approximation, être assimilé thermiquement à de l'eau est en contact de milieux différents : un milieu solide, le néoprène, et un milieu fluide, l'air (au contact du corps : combinaison sèche, ainsi que celui qu'il respire) ou l'eau (combinaison humide). C'est pour le plongeur, à peu près les seuls paramètres physiques qui entreront dans les calculs. Au-delà, il y aura, bien entendu, des subtilités qui seront prises en compte dans une analyse des propriétés thermiques de chacun de ces corps.

2.1 La conduction

Il s'agit du processus de transmission de la chaleur à travers un milieu solide (ou un milieu fluide immobile). On parlera de ce mode de transfert pour décrire les échanges du corps avec un milieu froid à travers la barrière thermique qu'est le néoprène ou tout matériau isolant thermiquement. La loi à laquelle obéit ce phénomène en régime permanent c'est-à-dire après que le corps plus chaud (à température T_1) ait été placé un long moment en contact du corps plus froid (à température T_2), permet de calculer la quantité de chaleur Q_{cond} à travers un matériau d'épaisseur e :

$$Q_{\text{cond}} = \lambda e (T_1 - T_2)$$

On comprendra que cet échange thermique, proportionnel à l'écart de température sera d'autant plus intense que le corps chaud sera plus chaud que le corps froid. Le facteur de proportionnalité λ que l'on nomme conductivité thermique dépend de la résistance thermique du milieu isolant. Il est aisé de comprendre qu'un matériau thermiquement isolant aura un très faible coefficient de conductivité et que c'est ce type de matériau que le plongeur recherchera. En thermique, on se livre couramment à une analogie électrique où la température est assimilée à un potentiel électrique, le flux thermique à une intensité et la résistance à l'inverse de λ . On note que les matériaux qui sont de bons isolants électriques sont également de bons isolants thermiques.

2.2 La convection

Dans ce cas, un fluide froid (à température T_2) « lèche » un corps plus chaud (à température T_1), ou l'inverse, arrachant ainsi, sur une surface S , des calories à ce dernier. Ici encore ce phénomène est décrit par une loi identique :

$$Q_{\text{conv}} = hS(T_1 - T_2)$$

Ici, le facteur de proportionnalité que l'on nomme coefficient de convection dépend, comme nous le verrons, de la nature des corps en présence : fluide et solide. À ce stade et, contrairement à ce qu'on voit dans certains manuels de plongée, on ne donnera pas de valeurs précises. Il s'agit dans un premier temps, de décrire les lois sans affecter des valeurs aux variables qui les composent. L'objectif est de voir quels sont les paramètres importants et dans quel sens ils évoluent.

2.3 Le rayonnement

Tout corps qui n'est pas au zéro absolu émet un rayonnement. Ce mode de transfert, dont nous ne ferons qu'esquisser le processus, résulte d'un échange sans support physique. La chaleur se propage à travers un milieu, transparent ou partiellement absorbant, qu'il soit solide ou fluide sans utiliser ce dernier comme support, ainsi qu'il en est pour une émission lumineuse ou un signal électromagnétique. Il se trouve que ce mode de transfert est peu présent dans les échanges thermiques du plongeur. Toutefois, certains fabricants de combinaisons utilisent ces propriétés pour améliorer la réponse thermique de leurs vêtements en privilégiant les propriétés de réflexion du matériau au contact du corps. Nous n'en parlerons pas dans le cadre de cette étude. Nous nous contenterons de donner quelques exemples mettant qualitativement en évidence ce phénomène. Un individu placé dans une cave où la température ambiante est de l'ordre de 10°C a froid. Le même individu placé dans la neige au soleil dans un environnement proche de 0°C (sans vent) a chaud. Que se passe-t-il donc ? Dans le premier cas, le corps rayonne vers les murs de la cave, plus froide que le corps et, dans le deuxième cas, nul besoin de dire que c'est le corps qui recevra le rayonnement solaire. Autre exemple : on sait fabriquer des « réfrigérateurs solaires ». Il s'agit d'un récipient tourné vers l'espace qui, par nuit claire rayonne en permanence vers l'espace sidéral à basse température. On arrive par exemple à obtenir des températures de - 20°C dans certains déserts, notamment celui du Chili où le ciel est d'une transparence exceptionnelle. Mais ces exemples sont donnés à seul titre d'information et ne concernent pas directement la plongée.

2.4 L'évaporation

Nous ne donnerons pas les lois qui régissent ce mode de transfert car elles sont plus difficiles à comprendre et l'approche qualitative sera suffisante. Le refroidissement par évaporation résulte du fait que le changement d'état d'un liquide vers la vapeur requiert une certaine énergie thermique. Il faut, on le sait, des calories pour évaporer l'eau. Cette chaleur sera prise au milieu au contact duquel le fluide se trouve. On a tous remarqué qu'un fluide très volatil comme l'éther donne une impression de froid lorsqu'on en verse une goutte dans la main. On sait refroidir une bouteille en été en l'entourant d'un linge mouillé. Contrairement à la croyance, le liquide dans la bouteille se refroidira mieux non pas si le linge qui l'entoure est plus froid mais si le liquide que contient le linge est plus volatile. On abordera ces aspects uniquement dans les conseils que tout moniteur doit donner à ses élèves hors de l'eau, après la plongée car l'évaporation de la combinaison qu'un plongeur aura gardée sur lui s'accompagne d'un refroidissement du corps. Ce phénomène est naturellement couplé à la convection lorsque ce plongeur sera placé au vent ou simplement sur un bateau en mouvement.

3. Étude théorique et modélisation

3.1 Présentation du problème

Le refroidissement du plongeur est dû tout à la fois aux pertes thermiques qu'il subit en étant immergé dans un environnement froid (eau) et aux pertes thermiques relevant de sa ventilation. Ces échanges se font selon des processus distincts : convectifs, conductifs ou couplés conductifs-convectifs. Nous allons examiner ces différentes configurations.

Dans le cas où le plongeur porte un vêtement humide, celui-ci emprisonne de l'eau au contact du corps. Cette eau sera immobile dans le cas d'un vêtement très ajusté ou semi-sec et en mouvement dans le cas contraire. Ceci correspondra en termes d'échanges thermiques respectivement à un flux conductif ou convectif dans cette eau au contact du corps (Figure 1).

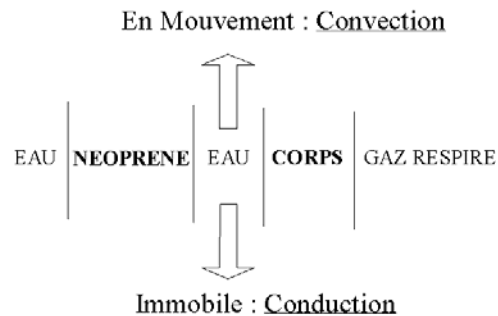


Figure 1

Dans le cas d'un vêtement sec, on aura un milieu (air ou autre gaz, par exemple Argon qui possède une chaleur spécifique élevée) immobile au contact du corps (Figure 2).

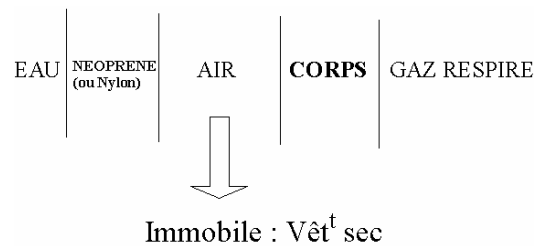


Figure 2

Si on représente maintenant l'intégralité des processus de transfert thermique, c'est-à-dire en tenant compte de toutes les pertes, nous aurons le schéma de la Figure 3. Il apparaît que les échanges se font au niveau pulmonaire (convectifs), au niveau de la face extérieure du vêtement (convectifs) et à travers l'eau qui y est emprisonnée au contact du corps (conductifs ou convectifs, ainsi qu'il vient d'être dit). Ainsi, le processus global de transfert à travers le vêtement se fera, selon le vêtement, sous l'association de trois modes :

- conductif + conductif + convectif (vêtement sec ou semi-sec), ou
- convectif + conductif + convectif (vêtement humide)

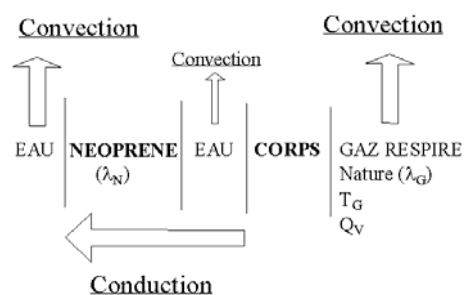


Figure 3

3.2 Mise en équations

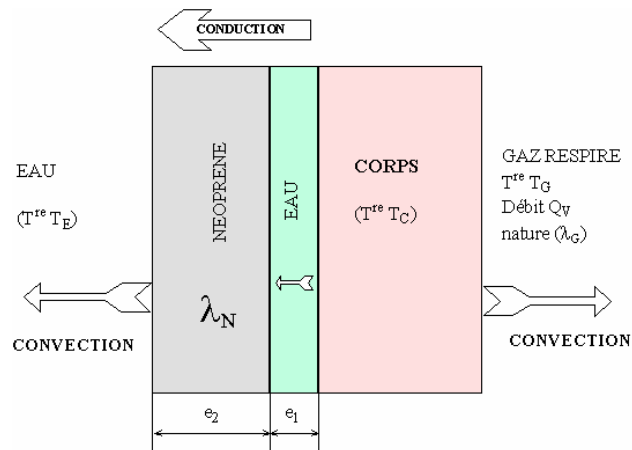
On aura recours aux schémas des Figures 4 a, b, et c. On considèrera que le corps est une plaque d'épaisseur finie, dont la valeur importe peu, à une température T_C , plongé dans un environnement (eau) à la température T_E et, sur une autre face, au contact d'un fluide gazeux de débit Q_V à la température T_G .

Entre l'eau et le corps, il y a une protection thermique multicouches :

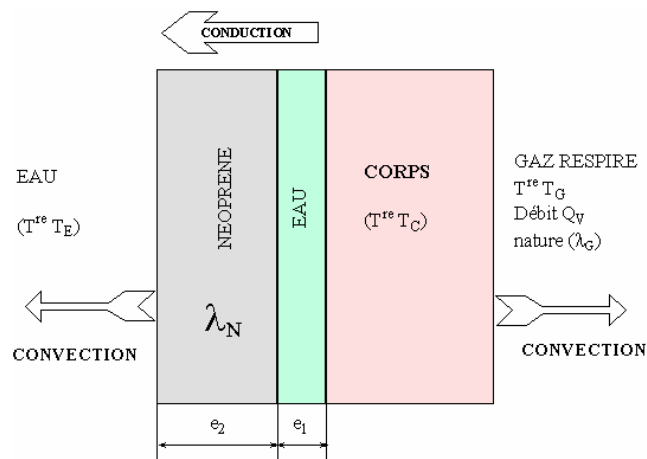
- Combinaison humide : eau en mouvement (convection) + néoprène (Figure 4a)
- Combinaison semi-sèche : eau immobile (conduction) + néoprène (Figure 4b)
- Combinaison sèche : air (ou autre gaz) immobile (pour simplifier : conduction)+ néoprène (ou éventuel matériau nylon constituant l'enveloppe du vêtement) (Figure 4c). On négligera la barrière thermique du vêtement porté sous la combinaison sèche.

Entre l'extérieur de la protection thermique et l'eau s'exerce un transfert par convection, ainsi qu'entre le corps et le gaz respiré.

(a)



(b)



(c)

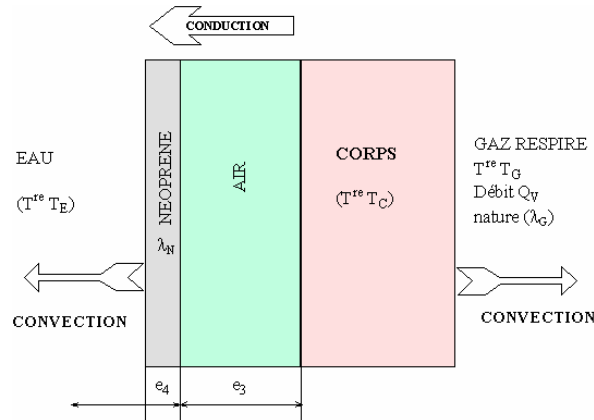


Figure 4

La mise en équation, sans rentrer dans les détails qui pourront sembler rébarbatifs aux non-spécialistes, est fondée sur des notions de bilan. Ce concept mérite cependant d'être explicité car il clarifie la mise en équations. La variation d'une grandeur physique au sein d'un système résulte de la conjugaison de deux termes :

- Un terme de production (ou de dissipation)
- Un terme d'échange

Ainsi, pour ce qui est de la variation de la température du corps (c'est-à-dire de son contenu énergétique), nous aurons :

VARIATION DU CONTENU ENERGETIQUE DU CORPS	=	APPORT DU METABOLISME	-	ENERGIE PERDUE DANS L'EAU	-	ENERGIE PERDUE DANS LA RESPIRATION
--	---	--------------------------	---	------------------------------------	---	---

Nous avons longuement explicité la manière dont cette énergie est transférée (perdue) à l'extérieur du corps, soit vers l'eau dans laquelle le plongeur est immergé, soit vers le mélange qu'il respire. Ce type de transfert, le thermicien sait parfaitement l'exprimer.

Le détail des équations mises en œuvre dépasse largement le cadre de ce mémoire. En tout état de cause, nous aboutissons à une équation différentielle qui exprime la variation de la température du corps en fonction du temps :

$$\frac{dT_c^t}{dt} = aT_c^t + b$$

et a pour solution :

$$T_c^t = -\frac{b}{a} + \left(T_0 + \frac{b}{a}\right) \exp(at)$$

Où T_c désigne la température du corps, ainsi qu'il a été dit. L'exposant t signifie qu'il s'agit de la valeur de T prise à un instant t (avec, pour condition limite $T_c=T_0$ à l'instant initial $t=0$). Quant à a (dont la valeur est négative : $a<0$) et b , ce sont des constantes qui dépendent de :

- La masse du corps
- Les coefficients d'échange convectifs air poumons et eau vêtement
- Les coefficients de transfert conductif à travers l'eau, l'air, le néoprène
- Les chaleurs spécifiques de l'eau, du corps et des gaz intervenant dans ce système thermique
- Les surfaces d'échanges
- Le débit de gaz respiré
- Les épaisseurs des protections thermiques (vêtement)
- L'énergie propre au métabolisme.

3.3 Résolution

Il convient de préciser que la résolution complète de ce problème et la modélisation complexe du phénomène sont en cours d'étude et constituent un travail de projet confié à des étudiants en deuxième année de DUT à l'IUT de Ville d'Avray. Cette étude qui a démarré en Septembre 1999 se poursuit cette année et a reçu une subvention de l'Agence Nationale de Valorisation de la Recherche (ANVAR). Il ne pourra donc pas être fait mention de résultats exhaustifs, en l'état actuel d'avancement des travaux. Les problèmes rencontrés sont essentiellement ceux de la recherche de données dans la littérature scientifique en relation avec la thermique (chaleur spécifique et conductivité thermique des tissus humains que l'on a, dans cette étude, et au cours de cette première approche, assimilés à de l'eau) ou avec la physiologie (surface du corps, des poumons, valeurs qu'on a choisi approximativement égales respectivement à 2 m^2 et 200 m^2). Par ailleurs, le corps n'est pas une surface plane et l'on pourra assimiler tronc, bras et jambes à des cylindres, avant de rentrer dans une description géométrique plus réaliste. Enfin, il manque, dans cette description un paramètre essentiel qui est la valeur exacte de la quantité d'énergie engendrée par le métabolisme. Nous ne connaissons pas cette valeur qui dépend d'un nombre trop grand de paramètres pour être évalué de manière précise et dont la connaissance dépasse le cadre de ce mémoire. Toutefois, à terme, nous pensons y avoir indirectement accès par l'analyse des enregistrements de température d'un plongeur, données que nous présentons plus avant dans ce mémoire.

On aboutit ainsi à une représentation graphique de la température T_c en fonction du temps ayant une forme exponentielle négative (Figure 5).

L'analyse de ce diagramme est simple : le corps reste à une température constante pendant un temps t_1 qui dépend ainsi qu'il vient d'être dit, de nombreux paramètres dont l'étude n'est pas envisagée ici, puis se refroidit jusqu'à atteindre, au bout d'un temps infini (pas si infini que cela si le corps est immergé dans les eaux dans lesquelles le Titanic a sombré !) la température de l'eau. Durant cette évolution, on atteindra, au bout d'un temps t_H le seuil de l'hypothermie et c'est ce qui nous intéresse ici (cette valeur qui reste à expliciter selon les avis des experts, et en fonction du degré d'atteinte, se situe entre 30 et 35°C). Ce temps dépendra de tous les facteurs que nous avons pris en compte dans cette modélisation et que nous pourrons, à terme, simuler. Ceci montre que, quel que soit le vêtement porté, le corps atteindra ce seuil d'hypothermie, avec, pour seule protection pendant les premiers instants, la valeur de son énergie de métabolisme. Toutefois, la composante temps jouera ici un rôle essentiel et la nature de la protection thermique se fera sentir tout spécialement durant

l'espace de temps ($t_H - t_1$). C'est à ce stade que se fera la différence entre vêtement humide, sec, semi-sec et autre nouveauté technologique. La valeur de t_1 qui correspond à la lutte propre de l'organisme contre l'agression thermique dont il est victime est, en particulier, dépendante de la brutalité avec laquelle le refroidissement s'effectue. Ainsi, il a été observé une différence sensible de temps entre la mort « à petit froid » et l'exposition brutale au froid (qui résulterait d'une chute dans une crevasse par exemple). Nous ne pouvons naturellement pas prendre en compte de tels facteurs dans notre modélisation.

Nous avons personnellement vu un plongeur frappé d'hypothermie en zone tropicale. Il avait séjourné dans une eau à 27 °C durant 4 heures sans protection thermique. Dans ces conditions, il n'avait à aucun moment senti le froid venir.

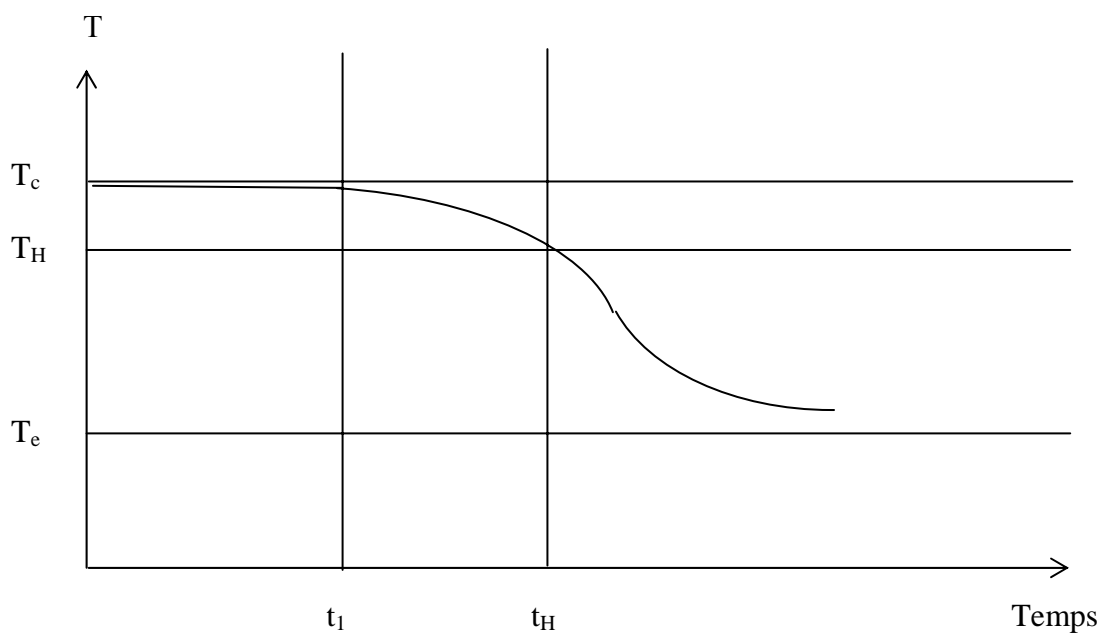


Figure 5

3.4 Remarques importantes

Une partie importante de cette étude est relative à l'effet du temps et de la pression sur les échanges thermiques. Nous en donnerons ci-après des éléments car ils sont tout à fait à la portée d'un non-thermicien et ont des conséquences très importantes sur la pédagogie de la plongée et sur l'enseignement théorique de la matière.

3.4.1 Caractère transitoire des phénomènes thermiques

La modélisation ici décrite se réfère à des processus qui, pour être transitoires, n'en sont pas moins suffisamment longs pour que leur soient appliquées des lois relatives aux régimes permanents. Toutefois, lors d'un contact brutal entre deux matériaux, par exemple la peau et un objet, la température ressentie dépendra des propriétés thermiques de l'objet et de la peau. Le contact avec un outil en métal froid donnera une sensation de froid beaucoup plus intense que le contact avec un outil en bois, pourtant à la même température. Ceci vient du

fait que de tels contacts rapides font intervenir la notion d'effusivité thermique ($b=(\lambda\rho c)^{1/2}$ où λ , ρ , et c sont respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique du matériau). Lors du contact brusque entre deux matériaux (1) et (2), la température ressentie sera le barycentre thermique des effusivités de ces deux matériaux :

$$T = \frac{b_1 T_1 + b_2 T_2}{b_1 + b_2}$$

On comprend alors mieux le phénomène dans l'exemple que nous venons de choisir où le métal imposera davantage sa température à la main ($b_{\text{main}} \ll b_{\text{metal}}$) que le bois.

Cet aspect est moins directement lié à la plongée, mais il fait partie des multiples points mettant en évidence l'adaptation thermique du corps à l'environnement et il nous semblait utile de le mentionner, notamment pour souligner l'importance (en matière de thermique et sans parler de l'impact physiologique) de la stabilisation thermique du plongeur avant son immersion.

3.4.2 Rôle de la pression sur les échanges conductifs et convectifs

On démontre (facilement) en thermique lors de l'étude de ce mode de transfert en géométrie cylindrique qu'une protection thermique de l'ordre de 7 mm (simulation d'une épaisseur de néoprène) verra ses pertes augmentées de l'ordre de 50% si on réduit l'épaisseur de l'isolant par un écrasement de 3 mm, soit 40% environ, ce qui peut être observé lors d'une immersion profonde. En outre, ce calcul ne tient pas compte de la perte d'isolation thermique due à la diminution des propriétés isolantes de ce matériau après compression. On mesure l'importance de cette donnée en considérant l'écrasement de la combinaison sous l'effet de la pression.

Par ailleurs, en ce qui concerne les échanges thermiques convectifs au niveau pulmonaire, on démontre, dans l'étude de ce mode de transfert, que le coefficient d'échange couramment désigné par h est fonction d'un nombre sans dimension appelé Nombre de Reynolds (désigné par Re) qui traduit le caractère plus ou moins turbulent de l'écoulement. La transition entre un écoulement non turbulent (qu'on qualifie de laminaire) et un écoulement turbulent se produit pour Re de l'ordre de 2000. Or ce nombre est directement proportionnel à la masse volumique (désigné par ρ) du gaz pris en compte. Lorsque l'écoulement est laminaire, ce qui correspond à une valeur faible de la masse volumique (en surface Re est de l'ordre de 1000), ce coefficient h a une valeur constante. On comprendra que si la masse volumique de l'air augmente (elle sera, par exemple, multipliée par 7 à 60 mètres de profondeur), le nombre Re prend une valeur de l'ordre de 7000 et h cesse d'avoir une valeur constante. On calcule alors sa valeur à l'aide d'une relation de la forme :

$$h = f(Re) = g(\rho)$$

où f et g sont des fonctions que nous ne détaillerons pas ici.

Dans le cas qui vient d'être cité, la valeur de h est de l'ordre de huit fois celle qu'il a en surface, ce qui signifie que les pertes thermiques au niveau de la respiration augmentent de manière phénoménale à profondeur élevée, par le simple jeu de l'écoulement dans « les canalisations ». On mesure l'effet accru si le gaz respiré est composé d'Hélium (mélanges de type Trimix) qui a des caractéristiques thermiques très particulières (conductivité thermique

élevée, ce que les plongeurs qui utilisent des mélanges dits « de fond » n'ignorent pas). D'autre part, le débit massique de gaz respiré intervient directement dans les équations. Or celui-ci est directement proportionnel à la pression.

Ces données, même si elles ont un caractère fortement spécialisé et réservé aux thermiciens doivent faire partie du champ des connaissances requises au niveau MF2.

4. Étude expérimentale

4.1 Dispositif expérimental

Les observations que nous avons réalisées ont été faites à l'aide d'une sonde thermique rectale qu'un plongeur accepte de porter durant plusieurs immersions effectuées en carrière. Cette sonde est reliée à un enregistreur électronique placé dans un boîtier (Figure 6a et 6b) dont l'étanchéité a été vérifiée jusqu'à une pression de 7 bar, ce qui correspond sensiblement à l'espace d'évolution possible en plongée loisir à l'air. Cet enregistreur (Figure 6c) peut être préalablement programmé pour effectuer un échantillonnage de températures sur des intervalles de temps à fixer entre 30 secondes et une heure. Après utilisation, les informations sont transférées à un ordinateur et exploitées sous forme de courbes ou tableaux. Les différents éléments du dispositif sont représentés sur les photographies de la Figure 6. Il convient de préciser que, simultanément à la température de la sonde, est enregistrée celle du boîtier électronique (température ambiante), ce qui permet de connaître la température de l'eau où a lieu l'immersion. Toutefois, à ce stade, des corrections seront faites lors de l'interprétation des résultats car l'acquisition de ces données de température ambiante ont lieu avec un retard dû à l'absence de contact entre l'enregistreur et le boîtier étanche immergé.



Figure 6a



Figure 6b



Figure 6c

Il convient de préciser que, simultanément à la température de la sonde, est enregistrée celle du boîtier électronique (température ambiante), ce qui permet de connaître la température de l'eau où a lieu l'immersion. Toutefois, à ce stade, des corrections seront faites lors de l'interprétation des résultats car l'acquisition de ces données de température ambiante ont lieu avec un retard dû à l'absence de contact entre l'enregistreur et le boîtier étanche immergé. Nous avons évalué ce retard à 10 minutes au moins. Ceci est confirmé en se reportant au Tableau I où figurent les enregistrements de température effectués dans une même ambiance par les deux modes d'enregistrement que sont le boîtier d'une part et la sonde d'autre part. Après 12 minutes, ces valeurs convergent à 1° près.

temps (mn)	temp. boîtier (°C)	temp. sonde (°C)	Ecart
0	15,91	19,87	3,96
2	16,26	19,3	3,04
4	16,82	18,89	2,07
6	16,79	18,46	1,67
8	17,24	18,32	1,08
10	17,35	18,55	1,2
12	17,59	18,65	1,06

Tableau I

4.2 Résultats expérimentaux et interprétation

La campagne expérimentale en est à ses débuts et nous ne disposons pour l'instant que d'un nombre réduit de données. En particulier, nous prévoyons d'effectuer des mesures de températures sur plusieurs plongeurs ayant des réactions différentes au froid. La phase cruciale de cette campagne de mesures est prévue durant l'hiver 2000 lorsque la température de l'eau de la carrière sera homogène et comprise entre 4 et 10°C. Par ailleurs, le dispositif sera amélioré par l'adjonction d'une deuxième sonde en contact direct avec l'eau pour éliminer ce retard à l'enregistrement.

Les premiers résultats expérimentaux sont présentés sur les Figures 7 à 9. Chaque figure comporte deux types de résultats : les valeurs de la température interne instantanée du plongeur et celles de la température ambiante avec le décalage qui vient d'être indiqué et sur lequel nous reviendrons. L'unité de temps est la demi minute. Ce plongeur, peu sensible au froid, est équipé d'une combinaison humide de 7 mm, non ajustée et en mauvais état.

Reportons-nous à la Figure 7b (évolution de la température du plongeur lors de la première des deux immersions successives à la carrière de Bécon les Granits (plongée au Nitrox 28/62 à 26 m dans une eau à 14.5 °C). On voit que la température du plongeur peut, dans un premier temps être considérée comme fluctuant autour d'une valeur qui se situe autour de 37.7°C. Cette valeur élevée résulte du fait que le plongeur, qui n'est pas en état fébrile, a revêtu sa combinaison et se livre à des mouvements qui font monter sa température, atteignant des pics élevés. On constate ensuite une diminution progressive de la température jusqu'à une valeur voisine de 36.5°C, ce qui traduit l'effet de l'immersion. On peut tenter de rapprocher ceci de la variation de température ambiante (Figure 7a) enregistrée simultanément mais avec le décalage que nous avons indiqué. Si nous nous référons à la chute de température, l'immersion aurait commencé au temps 480 et aurait duré jusqu'au temps 580 (soit 50 minutes). On peut admettre que la chute de température commence au temps 530. Si l'on estime à environ 10 minutes le temps de mise en température de la sonde à l'intérieur du boîtier, l'immersion aurait commencé au temps 460, pour se terminer au temps 560. Bien que

cette estimation du temps de réponse de la sonde qui mesure la température ambiante soit très problématique, on peut néanmoins donner une appréciation du temps au bout duquel l'immersion aura déclenché une chute de température. Ce serait ici de 460 à 530, soit de l'ordre de 35 minutes. Compte tenu de la température de l'eau (simplement fraîche à cette époque de l'année), du sujet (très peu sensible au froid), cette valeur qui mesure ce qu'on pourrait appeler « l'autonomie métabolique » de l'individu ne nous semble pas dénuée de sens. L'autre élément important est le fait que la température corporelle continue de baisser jusqu'au temps 650, ce qui correspondrait à 45 minutes après l'immersion. Cet effet de retard de l'organisme mérite d'être souligné : après une immersion dans un milieu plus froid, l'organisme conserve, bien après cette immersion, la mémoire de cette agression thermique.

Lors d'une autre expérience (plongée à la carrière de Montulat à 50 m à l'air), on voit sur la Figure 8 que la température de l'eau a chuté (Figure 8a) et il a été tenu compte, ici encore, du retard. Or, le plongeur avait observé, au fond, une température de 8°C (lecture sur l'ordinateur), ce qui n'est pas conforme à la valeur enregistrée. Nous attribuons ce désaccord une fois de plus au retard : la sonde du boîtier « n'a pas eu le temps de voir » la température basse du fond. De plus, en raison de cette plongée profonde, le séjour à basse température a été court (de l'ordre de 15 mn) et le temps de palier a été long (de l'ordre de 20 minutes, temps pendant lequel la température mesurée était voisine de celle de la surface). On trouvera sur le schéma de la figure 10 le profil de plongée. On observe, pour cette plongée, un profil de refroidissement du plongeur extrêmement voisin de celui enregistré dans le cas précédent.

5. Implications pédagogiques et conseils

Nous avons tenté, dans cette partie, de mettre en évidence les éléments nouveaux susceptibles de conduire à une définition des outils pédagogiques nécessaires à l'enseignement de cet aspect de la physique, assez souvent délaissé dans les programmes à tous les niveaux. Nous exprimons ceci sous forme de compétences du plongeur ou du cadre dans l'exercice de ses enseignements théoriques ou dans l'eau. Ceci n'exclut pas que le cadre, avant d'être un enseignant, est lui-même un plongeur et doit être à même d'observer ces indications pour ce qui le concerne. Bien entendu, la pertinence de ces consignes est variable en fonction des zones de plongée : le plongeur devra faire état, en la matière, de compétences différentes selon qu'il plonge en mer du Nord ou aux Maldives.

On trouvera, en Annexe, défini en termes de compétences les aspects de la thermique qu'il nous semblerait opportun de développer dans le *cursus* de la formation tant au profit des plongeurs qu'à celui des cadres.

Les éléments utiles à l'enseignement de la théorie sur les échanges thermiques figurent rarement dans les ouvrages consacrés à la théorie de la plongée. Notre intention est donc d'en fournir un certain nombre au lecteur que celui-ci trouvera dans la première partie de ce mémoire.

6. Conclusion

Cette approche des phénomènes thermiques intervenant dans le cadre des activités de plongée, loisir est devenue une nécessité, en raison du développement important que connaît actuellement la technologie dans notre discipline : vêtements de plus en plus sophistiqués, utilisations de vêtements secs, jusqu'alors réservés aux professionnels, usage de mélanges autres que l'air, immersions de plus en plus longues en raison de l'utilisation d'ordinateurs et de mélanges à faible taux de saturation (Nitrox), immersions de plus en plus fréquentes dans des eaux froides (carrières) pour la formation... Il convient donc maintenant de connaître le comportement de l'organisme face à l'agression thermique que constitue l'immersion en eau froide et de savoir évaluer les paramètres susceptibles d'y porter remède. Cela suppose une connaissance de ces phénomènes à tous les niveaux : depuis le niveau élémentaire de plongeur à qui il est simplement appris ce qu'est la sensation de froid et ses conséquences, jusqu'au niveau de plongeur confirmé qui, dans ses prérogatives de guide de palanquée devra assurer la sécurité thermique de ses plongeurs ainsi que la sienne, en passant par le plongeur autonome qui, seul, devra optimiser son équipement et réagir avec pertinence à une sensation de froid. Quant au moniteur, il devra, en tant que directeur de plongée, veiller à la parfaite adéquation thermique de ses plongeurs à l'environnement et, dans le cadre de son enseignement, introduire une part importante de connaissances sur ces phénomènes actuellement jugés trop souvent comme secondaires par rapport aux autres notions physiques plus classiques. Ce sera au moniteur deuxième degré de faire en sorte que cet aspect occupe dans le cadre de l'enseignement de la physique la place qui lui revient. C'est ce que nous nous sommes efforcé de faire dans ce mémoire.

Remerciements. L'auteur tient à remercier Jean Marie Garat, MF2 et Instructeur Régional Stagiaire qui a bien voulu accepter de participer à ces expériences de thermique en se prêtant à la mesure de la température, malgré l'inconfort que procuraient ces expériences.