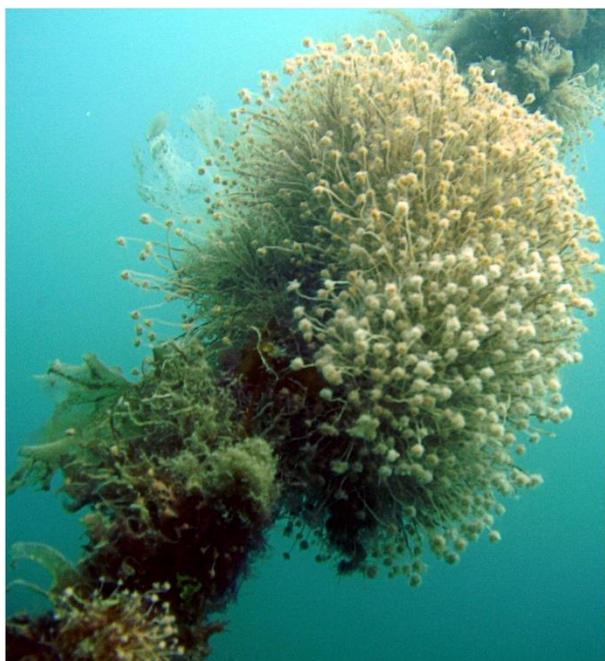




LA PLONGEE EN EAU FROIDE

JEAN-CLAUDE TAYMANS





AVERTISSEMENTS

La plongée est une activité à risque. Elle ne peut être pratiquée que par des personnes correctement formées, bien entraînées et en bonnes conditions physiques et mentales. Le non-respect des règles peut conduire à des blessures graves, des invalidités permanentes ou à la mort. Il vous incombe personnellement d'en évaluer les risques. Ne comptez pas sur les données de cet ouvrage pour garantir votre sécurité. Avant d'entrer dans l'eau, vous devez exercer votre propre jugement quant aux dangers et difficultés que vous allez rencontrer. A vous de faire une évaluation réaliste des conditions de plongée, de la difficulté du site et de votre condition physique !

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.

Photo de couverture :

Jean-Claude Taymans
Narvik (Norvège) ; Zélande (Pays-Bas)

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\janvier2016\Jean-Claude Taymans : Editeur
ISBN 978-2-930747-13-2



SOMMAIRE

TABLEAU DES MISES À JOUR ET MODIFICATIONS.....	5
1. INTRODUCTION	6
1.1. DÉFINITION.....	6
1.3. POURQUOI PLONGER EN EAU FROIDE?.....	6
2. LES MILIEUX NATURELS.....	6
2.1. LA TEMPÉRATURE DES OCÉANS.....	6
2.2. LA TEMPÉRATURE DANS LES LACS, CARRIÈRES, GRAVIÈRES ET LES BASSINS DES BARRAGES	7
2.2.1. <i>Influence du vent</i>	7
2.2.2. <i>La stratification</i>	7
2.2.3. <i>Mouvement et turbulences de l'eau</i>	8
2.3. L'OXYGÉNATION DES LACS, CARRIÈRES, GRAVIÈRES ET LES BASSINS DES BARRAGES	9
3. LES DANGERS DE LA PLONGÉE EN EAU FROIDE	9
3.1. LA GESTION DU STRESS	9
3.1.1. <i>Conduite à tenir en cas d'anxiété</i>	9
3.2. L'ŒDÈME PULMONAIRE D'IMMERSION (OPI)	9
3.2.1 <i>Conduite à tenir</i>	10
3.3. LE CHOC THERMO-DIFFÉRENTIEL OU HYDROCUTION.....	10
3.3.1. <i>Prévention du choc thermo-différentiel</i>	10
4. PHYSIOLOGIE	10
4.1. LES EFFETS DU FROID SUR L'ORGANISME	10
4.2. LA TEMPÉRATURE RESENTIE	10
4.3. L'HYPOTHERMIE	11
4.3.1 <i>Tableau clinique</i>	12
4.3.2. <i>Facteurs favorisant l'hypothermie</i>	12
4.3.3. <i>Prévention de l'hypothermie</i>	12
4.4. FACTEUR INFLUENÇANT LA RÉSISTANCE AU FROID	12
4.5. LES DÉFENSES DE L'ORGANISME CONTRE LE FROID.....	13
4.5.1. <i>Stratégie offensive</i>	13
4.5.2. <i>Stratégie défensive</i>	13
4.6. COMMENT SE PRÉMUNIR DES EFFETS DU FROID ?	14
4.7. LES CONSÉQUENCES DU FROID	14
5. PRINCIPE DE PROTECTION CONTRE LE FROID.....	15
5.1. LES VÊTEMENTS : PRINCIPE DES TROIS COUCHES	15
5.2. LE CONFORT THERMIQUE	15
5.2.1. <i>Les unités de résistance thermique vestimentaire</i>	16
5.3. LE BILAN THERMIQUE.....	17
5.4. LES ÉCHANGES THERMIQUES.....	18
5.4.1. <i>La conduction</i>	18



5.4.2 La convection	18
5.4.3. Le rayonnement	18
5.4.4. L'évaporation	18
5.5. EVALUATION DES PERTES THERMIQUES	19
5.5.1. Les pertes cutanées	19
5.5.2. valeurs approximatives des pertes cutanées.	21
5.5.3. Influence de la corpulence sur les pertes cutanées	21
5.5.2. Les pertes respiratoires	22
5.6. EVALUATION DU BILAN THERMIQUE ET DE LA DETTE THERMIQUE	23
5.6.1. Exemple numérique.....	24
6. INFLUENCE DU FROID SUR LE MATÉRIEL.....	26
6.1. GIVRAGE DU DÉTENDEUR.....	26
6.1.1. Mécanisme	26
6.1.2. Facteurs favorisant les risques de givrage du détendeur	27
6.1.3. Facteurs réduisant les risques de givrage du détendeur	27
6.1.4. Conduite à tenir en cas de givrage du détendeur.	28
7. NOTIONS DE « WHAT-IF » ET PRINCIPES DE REDONDANCE	29
7.1. NOTION DE « WHAT-IF »	29
7.2. LES REDONDANCES	29
7.2.1. La philosophie de la « tranche d'emmental ».	29
7.2.2. La redondance.....	29
8. EQUIPEMENTS CONSEILLÉS POUR LA PLONGÉE EN EAU FROIDE.....	30
8.1. LES BOUTEILLES	30
8.1.1. External drive	31
8.2. LES DÉTENDEURS.....	31
8.2.1. Le « Free Flow Control Device» et la « Pressure Relief Valve ».....	32
8.3. LE MASQUE FACIAL	32
8.4. LE GILET	32
8.5. LE LESTAGE	32
9. LES PROTECTIONS THERMIQUES	33
9.1. COMBINAISONS SEMI-ÉTANCHE	33
9.2. COMBINAISONS ÉTANCHES.....	33
9.2.1. Les matériaux.	34
9.2.2. Comparaison des matières.....	36
9.2.3. La tirette.....	37
9.2.4. Les joints.....	37
9.4. LES SOUS-COMBINAISONS OU SOURIS.....	38
9.4.1. Estimation de la densité du sous-vêtement	39
9.5. T-SHIRTS EN TISSUS INTELLIGENTS	39
9.6. LE GILET CHAUFFANT.	40
9.7. GANTS.....	41
9.7.1. Gants humides.	41



9.7.2. Gants étanches.....41
9.7.3. Gants chauffants.....42
9.8. CAGOULES.....42
10. ANALYSE DES RISQUES..... 43
10.1. DÉFINITIONS44
10.2. MÉTHODE KINNEY44
 10.2.1 Tableaux des facteurs G, E et P.....45
 10.2.2 Tableaux de l'évaluation du « Risque » (Rk)46
10.3. APPLICATION DE LA MÉTHODE KINNEY.....46

TABLEAU DES MISES A JOUR ET MODIFICATIONS.

Version	Date	Remarques
0.00	26/12/2015	Version originale
0.01	Février 2024	Mise à jour, suppression standards ADIP
2.01	Mars 2024	Analyse des risques

Non libre de droit



1. INTRODUCTION

1.1. Définition

On peut considérer que la plongée se déroule en eau froide lorsque la température en pleine eau ne dépasse pas 18°C.

1.3. Pourquoi plonger en eau froide?

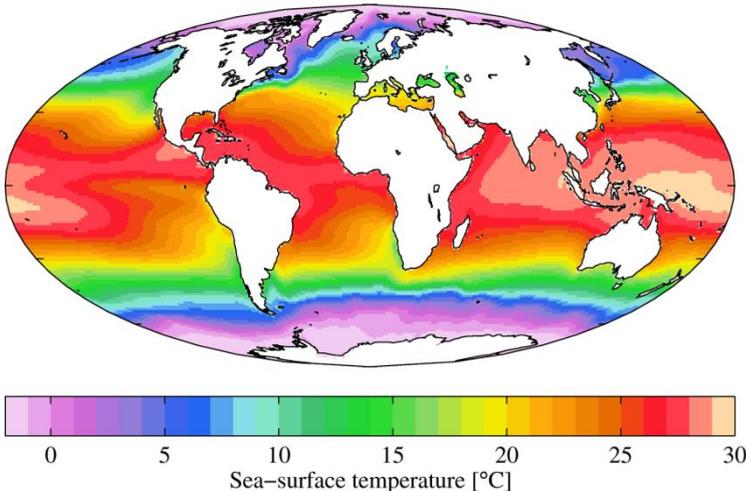
Les motivations peuvent être aussi multiples que variées :

- Voir une faune et une flore différente de celle que l'on rencontre dans les eaux tropicales. Faune moins colorée que dans les eaux tropicales mais pouvant être très abondante ;
- La proximité : les sites sont souvent plus proche du domicile, pas besoin de faire des milliers de kilomètres pour aller plonger ;
- Curiosité naturelle, esprit d'aventure ;
- Faire des plongées qui sortent des « sentiers battus » ;
- Photographie et vidéographie.

2. LES MILIEUX NATURELS

Les milieux naturels sont variés : mers, carrières et gravières inondées, lacs, bassin de barrage...

2.1. La température des océans



Source: World Ocean Atlas 2009 – license CC BY-SA 3.0

Température moyenne à la surface des océans

Les coraux sont particulièrement sensibles aux variations saisonnières de la température et de la luminosité. La température de surface est influencée par l'ensoleillement, les courants océaniques et les vents. En Méditerranée, le mistral fait chuter la température en surface de plusieurs degrés. Des phénomènes climatiques comme El Niño ou La Niña peuvent augmenter de quelques degrés la température de l'eau avec des conséquences dramatiques sur le plancton et le reste de la chaîne alimentaire. Le Gulf Stream est un puissant courant chaud de surface qui part du golfe du Mexique, qui traverse l'océan Atlantique pour longer vers le nord les côtes de l'Europe. Il évite que des ports qui se trouvent au-delà du cercle polaire arctique ne soient pris dans les glaces en hiver. Le Kuroshio est au Pacifique ce que le Gulf Stream est

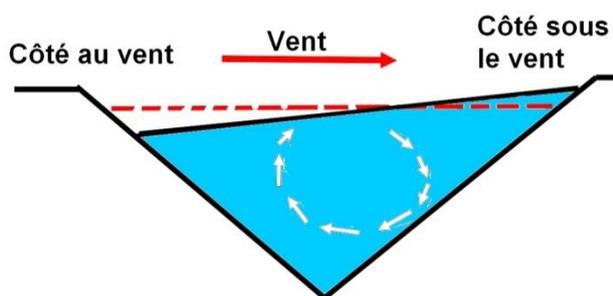


à l'Atlantique ! Il prend naissance au large de Taïwan pour remonter jusqu'aux côtes du Japon. Ce qui permet l'existence des récifs coralliens japonais. Le courant de Californie est un courant froid qui longe les côtes ouest de l'Amérique du nord, de la Colombie Britannique jusqu'au Mexique. Ce qui a pour conséquence qu'en Californie le corail fait place au « Kelp » et autres algues ! Il faiblit en décembre à l'apparition du courant El Niño et il est responsable conjointement avec les remontées d'eaux froides (upwellings) du fameux « brouillard californien ».

2.2. La température dans les lacs, carrières, gravières et les bassins des barrages

Les lacs, carrières, gravières et les bassins des barrages sont des entités dynamiques, la température de l'eau n'y est pas uniformément répartie. Ils constituent d'importantes réserves caloriques. L'énergie prélevée dans l'air et accumulée durant l'été est restituée durant l'hiver. La quantité d'énergie accumulée dépend du climat, du régime des vents, de la surface et de la profondeur du plan d'eau. L'eau chaude et froide ne se mélange pas, car elles ont des densités différentes.

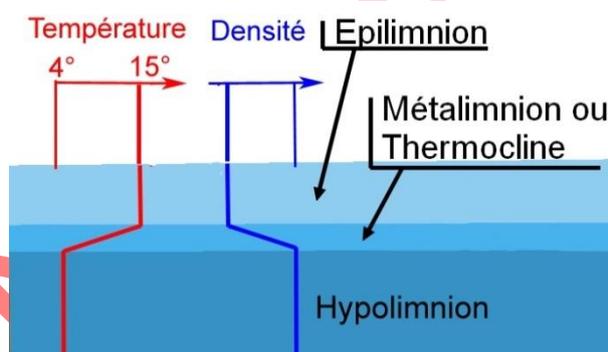
2.2.1. Influence du vent



La friction engendrée par le vent entraîne continuellement l'eau vers la rive opposée à la direction du vent. Celle-ci s'y accumule jusqu'à provoquer une élévation locale du niveau : c'est le phénomène de seiche. Pour des lacs importants, il n'est pas rare d'avoir des surcotes de l'ordre de 30 à 40 cm. L'eau la plus chaude va s'accumuler du côté sous le vent contrairement à l'eau froide venant du

fond va circuler vers le côté au vent. La couche supérieure peut subir des oscillations de température importantes, le brassage de l'eau peut être total lors d'hivers rigoureux. Ces mouvements de l'eau permettent d'oxygéner le plan d'eau.

2.2.2. La stratification.



La stratification désigne la disposition en couches superposées de l'eau. Cette disposition est due aux variations de masse spécifique (densité) des différentes couches d'eau. Variations, causées par les différentiels de température. L'eau atteint sa densité maximale à 4°C, puis au-delà de cette température, sa densité diminue. C'est cette particularité unique qui est à l'origine de la stratification thermique. Des plans d'eau peu

profonds peuvent ne pas stratifier en été, si l'exposition au vent est suffisamment importante pour mélanger toute la colonne d'eau. On distingue trois niveaux : l'épilimnion ; le métalimnion ou thermocline et l'hypolimnion.

2.2.2.1. Epilimnion

C'est la couche située près de la surface et qui est réchauffée par le soleil. Elle est la plus chaude, la moins dense et la plus bio productive.



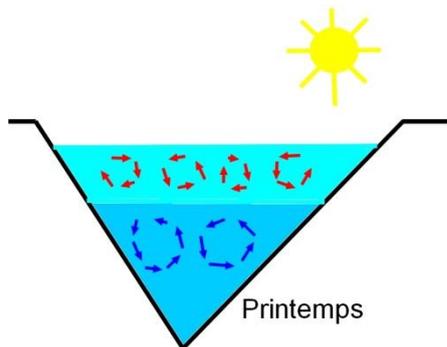
2.2.2.2. Métalimnion ou thermocline

C'est la couche de transition qui sépare l'Épilimnion et l'hypolimnion. Cette couche est généralement peu épaisse ; quelques mètres tout au plus. Elle marque généralement la séparation entre deux écosystèmes (écotone). Dans certains cas, si elle est associée à une chute de concentration en oxygène, elle joue le rôle d'une véritable barrière écologique.

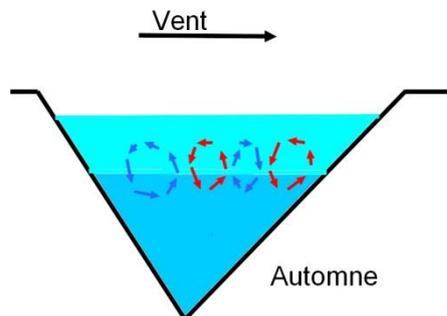
2.2.2.3. Hypolimnion

C'est la couche profonde, isolé du soleil. Elle est plus dense et reste toujours froide.

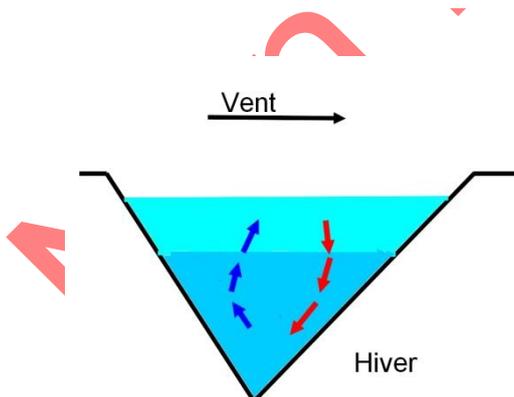
2.2.3. Mouvement et turbulences de l'eau



Au printemps et en été, les eaux de surface se réchauffent les premières. Le vent, les vagues, courants dispersent la chaleur vers les couches d'eaux situées en profondeur, ce mouvement est contrarié par l'inertie de la masse d'eau. Il se crée donc naturellement, au-dessus de la couche d'eau froide (hypolimnion), une couche d'eau chaude de surface (épilimnion). La transition thermique entre les deux couches (métalimnion ou thermocline) est très rapide.



Dès le début de l'automne, l'hypolimnion se refroidit progressivement jusqu'à uniformiser la température de la masse d'eau. Le vent arrive à faire circuler tout le volume d'eau. Ce brassage d'automne permet aux eaux de surface de se recharger de nutriments et aux eaux du fond de s'oxygéner.



En hiver, la faible température de l'air engendre, sur les eaux de surface des pertes supplémentaires de chaleur. L'eau de surface, riches en oxygène, va se refroidir, sa densité va augmenter et elle va s'enfoncer, tandis les couches d'eaux plus profondes vont remonter lentement vers la surface. C'est le brassage d'hiver.



2.3. L'oxygénation des lacs, carrières, gravières et les bassins des barrages

Pour que les équilibres biologiques soient maintenus, il faut de l'oxygène dissous dans l'eau. Les sources d'oxygène sont diverses :

1. Les affluents, dont les eaux sont fortement chargées en oxygène dissous
2. Les plantes qui produisent de l'oxygène par la photosynthèse
3. L'action du vent qui diffuse l'oxygène dans l'eau.

3. LES DANGERS DE LA PLONGEE EN EAU FROIDE

Les dangers spécifiques de la plongée en eau froide, par rapport aux plongées dans des eaux tropicales, sont :

- Psychologique : augmentation du stress lié au froid, à l'inconfort des combinaisons, à l'impression de confinement ;
- Physiologiques :
 - Engourdissement des doigts et difficultés à gérer l'équipement ;
 - Hypothermie ;
 - Risques accrus d'essoufflement, d'hypercapnies (CO₂) et donc de crampes
 - Risques accrus d'œdème pulmonaire d'immersion (OPI), surtout si la plongée demande des efforts importants.
 - Choc thermo-différentiel
- Physique : panne de matériel, mise en débit constant du détendeur ;
- Le manque de visibilité : les eaux froides et notamment les lacs et carrières inondées présentent souvent des visibilités réduites. Ce qui augmente les risques de perdre le compagnon de plongée, le risque d'emmêlement et les facteurs de stress.

3.1. La gestion du stress

La plongée en eau froide est sensiblement plus stressante qu'une plongée le long d'un tombant dans une mer tropicale.

3.1.1. Conduite à tenir en cas d'anxiété

1. Prévenir ses compagnons de plongée ;
2. S'arrêter, réfléchir et se raisonner ;
3. S'efforcer d'avoir une respiration calme, profonde (bien expirer) et régulière ;
4. Si le problème persiste : interrompre la plongée.

3.2. L'œdème pulmonaire d'immersion (OPI)

Un œdème pulmonaire c'est le contenu des capillaires pulmonaires qui se déverse dans les alvéoles. Il se produit lorsque la barrière alvéolo-capillaire devient perméable. L'OPI se caractérise par une augmentation de la pression capillaire, qui rend la barrière alvéolo-capillaire perméable. Cette augmentation de pression capillaire est due à une défaillance cardiaque (augmentation des pressions de remplissage des cavités cardiaques gauches).

C'est un accident respiratoire, qui commence dans l'eau, les premiers signes sont susceptibles d'apparaître dès le début de la plongée. Les symptômes sont :

- Une gêne respiratoire ou même des difficultés respiratoire ;
- Toux ;
- Crachats de mousse rosâtre.
- Malaise et perte de connaissance.



3.2.1 Conduite à tenir

1. Si un plongeur présente des difficultés respiratoires, essouffement ou tout autre signe anormal : sortir de l'eau le plus rapidement possible, éventuellement avec une assistance pour éviter tout effort ;
2. Mettre sous oxygène ;
3. Evacuer vers l'hôpital le plus proche.

3.3. Le choc thermo-différentiel ou hydrocution

Le choc thermo-différentiel, au moment de la mise à l'eau, est dû à la grande différence de température entre le milieu aérien et le milieu aquatique. Il peut provoquer un arrêt cardio-respiratoire, une syncope suivie d'une noyade si la victime n'est pas sortie rapidement de l'eau. Dans un milieu ambiant chaud, les vaisseaux sanguins sous la peau sont dilatés pour favoriser la circulation sanguine périphérique afin d'évacuer la chaleur. Le rythme cardiaque est élevé pour accélérer le refroidissement. Lors d'une mise à l'eau brutale dans l'eau froide, la température centrale risque de diminuer rapidement. L'organisme, pour maintenir cette température centrale, va contracter rapidement les vaisseaux sanguins périphériques et ainsi réduire les pertes caloriques. Le sang va donc refluer vers le cœur en augmentant la pression artérielle. Pour réduire cette hypertension, le rythme cardiaque va ralentir ! Ce ralentissement va réduire l'apport en oxygène du cerveau et provoquer une syncope, suivi dans les 5 minutes d'un arrêt cardio-respiratoire.

3.3.1. Prévention du choc thermo-différentiel.

- Eviter une exposition prolongée au soleil avant de se mettre à l'eau.
- Ne pas plonger à jeun, mais éviter les repas trop copieux.
- Avoir une alimentation correcte, favoriser les sucres lents (pâtes).
- La consommation d'alcool est totalement à proscrire.
- Adapter la combinaison à la température de l'eau (costume étanche...)
- Utiliser impérativement une cagoule pour protéger la nuque.

4. PHYSIOLOGIE

4.1. Les effets du froid sur l'organisme

Le froid rend manipulations de l'équipement plus difficile, car il réduit : la sensibilité, la dextérité et la force des doigts. La perte de force et de dextérité est de l'ordre de 2 à 4% pour un degré de perte de chaleur au niveau de la main. Perte qui peut rendre difficile, voire impossible, la manipulation des inflateurs et des purges. L'inconfort lié aux basses températures réduit également la vigilance mentale. La sensation de froid est provoquée par le flux thermique, c'est-à-dire la quantité de chaleur qui passe à travers la surface de votre peau pour en sortir. Le flux thermique est fonction de la température mais aussi du vent. Pour quantifier les effets du vent la notion la notion de « Température ressentie » est utilisée par de nombreux services météorologiques.

4.2. La température ressentie

La température ressentie (T_R) est une indication de l'impression physiologique de chaud ou de froid ressentie par le corps humain. Elle combine : la température, l'humidité relative et la circulation d'air. Elle se détermine empiriquement en comparant les conditions



météorologiques avec la température qu'il faudrait atteindre dans des conditions normale d'humidité et par vent calme de façon à ce que le corps ressente la même impression

Vent			Température de l'air sous abri °C													
km/h	m/s	Beaufort	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20
5	1.4	1	5	3	1	-2	-4	-6	-8	-11	-13	-15	-17	-20	-22	-24
10	2.8	2	4	1	-1	-3	-6	-8	-10	-13	-15	-18	-20	-22	-25	-27
15	4.2	3	3	1	-2	-4	-7	-9	-12	-14	-17	-19	-22	-24	-27	-29
20	5.6	4	2	0	-3	-5	-8	-10	-13	-15	-18	-20	-23	-25	-28	-30
25	6.9	4	2	-1	-3	-6	-8	-11	-14	-16	-19	-21	-24	-26	-29	-32
30	8.3	5	1	-1	-4	-6	-9	-12	-14	-17	-20	-22	-25	-27	-30	-33
35	9.7	5	1	-2	-4	-7	-10	-12	-15	-18	-20	-23	-25	-28	-31	-33
40	11.1	6	1	-2	-5	-7	-10	-13	-15	-18	-21	-23	-26	-29	-31	-34
45	12.5	6	0	-2	-5	-8	-10	-13	-16	-19	-21	-24	-27	-29	-32	-35
50	13.9	7	0	-3	-5	-8	-11	-14	-16	-19	-22	-24	-27	-30	-33	-35
			Note 1				Note 2				Note 3					

Note 1 : On ressent de l'inconfort, il faut se vêtir chaudement

Note 2 : Ressenti du froid important, risque de faibles engelures et hypothermie

Note 3 : Risque de fortes engelures et important risque d'hypothermie.

Le tableau ci-dessus a été établi à l'aide de la relation empirique, la plus souvent retenue dans les régions tempérées, et qui est la suivante :

$$T_R = 13,12 + 0,6215 t_c - 11,37 V^{0,16} + 0,3965 t_c V^{0,16}$$

Avec : T_R = température ressentie en °C

t_c = température de l'air, mesurée sous abri en °C

V = vitesse du vent en km/h

4.3. L'hypothermie

On parle d'hypothermie lorsque la température centrale d'une personne ne permet plus d'assurer normalement les fonctions vitales de celle-ci. Cela se produit lorsque la température du corps descend en dessous de 35°C. La chute de température peut être brutale comme lors d'une chute dans l'eau glacée ou bien progressive comme lors d'une longue exposition au froid.

A notre niveau de secourisme, la lutte contre l'hypothermie se fait par un réchauffement passif. La victime est placée dans un milieu chaud¹ et se réchauffe par elle-même.

Ne surtout pas donner d'alcool, car celui-ci ne réchauffe pas, c'est même le contraire qui se produit ! L'alcool dilate les vaisseaux sanguins, ce qui accroît les déperditions calorifiques.

Il faut déplacer la victime prudemment, sans mouvements brusques, sans réchauffement actif (friction...) car cela active la circulation au niveau de la peau avec pour conséquence un abaissement de la température centrale.

¹ On peut aussi utiliser une couverture de survie. Couverture qui devrait se trouver dans toutes les trousse de secours des moniteurs !



4.3.1 Tableau clinique

Temp. centrale	Hypothermie	Symptômes	Conduite à tenir
35 – 34°C	Modérée	Frissons, vasoconstriction, baisse de la tension artérielle, respiration et pouls rapide. <u>La victime est lucide</u>	1. Couvrir la victime. 2. Evacuation vers un local chaud. 3. Boisson tiède 4. Surveiller la température
34 – 32°C	Moyenne		
32 – 30°C	Grave	Troubles de conscience, pupilles contractées, ralentissement du cœur, pas de frisson, chair de poule, respiration lente et pouls est irrégulier, muscles sont contractés. <u>La victime est consciente mais non lucide</u>	1. Alerter les secours. 2. Eviter les manipulations brutales et inutiles 3. Couvrir la victime avec une couverture de survie, vers un local chaud. 4. Si la victime est consciente donner des boissons tièdes (ne pas la frictionner, ni l'exposer à une chaleur trop importante). 5. En cas de refroidissement rapide (par exemple en cas de fuite massive du costume étanche), immerger la victime dans un bain chaud à 40°C. L'échauffement doit être progressif de l'ordre de 0,5°C tous les ¼ d'heure). 6. En cas de refroidissement lent et de longue durée, le réchauffement doit être lent soit de l'ordre de 0,5°C par heure. 7. Surveiller l'évolution de sa température.
30 – 28°C	Majeure	Coma, pupilles dilatées, respiration lente, pouls et respiration très lent et presque imperceptible, hypotension, pas de frisson, bleuissement des lèvres et des bouts de doigts, « état de mort apparente ». <u>La victime est inconsciente</u>	
< 28°C		Risque d'arrêt cardiaque par fibrillation ventriculaire	

4.3.2. Facteurs favorisant l'hypothermie

La fatigue, la déshydratation, la faim, la maigreur, l'alcool, le tabac, le cannabis, le stress, les antidépresseurs, les tranquillisants, le vent constituent des facteurs favorisant l'hypothermie.

4.3.3. Prévention de l'hypothermie

Il convient de prendre très au sérieux les risques d'hypothermie. La première des préventions consiste à limiter le plus possible les déperditions de chaleur avant, pendant et après la plongée.

- Avant la plongée, il est possible de devoir patienter quelque temps à l'extérieur pour monter son matériel et préparer le site de plongée... Il convient de se vêtir chaudement avec des habits convenant à la situation météorologique, se couvrir la tête et mettre des gants. Evitez les vêtements et pièces d'équipements trop serrants (gants, ceintures, manchettes, joint de cou...)
- Durant la plongée, le costume étanche est vivement. L'isothermie peut être améliorée par injection d'argon dans le costume ou l'utilisation d'un gilet chauffant.
- Limiter le temps de plongée.
- Après la plongée, il faut se mettre le plus rapidement possible à l'abri dans un endroit chaud, boire une boisson chaude non alcoolisée et ne surtout pas oublier de mettre des gants pour démonter le matériel.

4.4. Facteur influençant la résistance au froid

Divers facteurs peuvent influencer favorablement ou défavorablement la résistance au froid
On peut citer :



- L'âge : les personnes âgées ont une moins bonne résistance au froid et sont plus rapidement sujettes à l'hypothermie. La capacité de réaction du système de vasodilatation des capillaires périphériques diminue avec l'âge.
- Morphologie : La résistance au froid, dépend de la quantité de graisse corporelle, des muscles, de la taille et du poids. Généralement les individus massifs ont une meilleure résistance au froid.
- Alimentation : Elle doit être équilibrée, riche en énergie et un peu plus grasse qu'à l'accoutumée. Les cellules graisseuses permettent au corps de produire de la chaleur sans puiser dans ses réserves de glucides (hydrates de carbone). Manger des aliments riches en acides gras oméga 3, des poissons tel qu'harengs, sardines, maquereaux, saumons, anchois, des fromages, des féculents rassasiants, riches en glucides et protéines, des pâtes complètes riches en sucres lents. Et bien entendu fruits et légumes de saisons pour l'apport en fibres et antioxydants.
- Fatigue, manque de sommeil, alcool, tabac, drogues et certains médicaments influents négativement sur la résistance au froid.

4.5. Les défenses de l'organisme contre le froid

La défense de l'organisme contre le froid, peut se comparer à une opération militaire ! Elle est axée sur deux stratégies distinctes. Une stratégie « offensive » par production de chaleur et une stratégie « défensive » qui consiste à abandonner les parties non essentielles pour concentrer la « défense » sur les organes vitaux (cerveaux, cœur...).

4.5.1. Stratégie offensive

La stratégie offensive consiste à obliger le métabolisme à produire la quantité de chaleur nécessaire au maintien de la température centrale. Le mécanisme principal de cette stratégie est la thermogénèse. Lorsque la température de l'organisme est inférieure 37°C, l'hypothalamus active plusieurs mécanismes de thermogénèse :

1. L'organisme augmente son métabolisme, ce qui produit de la chaleur mais ce qui engendre aussi : une diminution des réserves énergétiques, une accélération des rythmes cardiaques et respiratoires.
2. Mouvements musculaires volontaires : 80% de la puissance musculaire est transformée en chaleur. La puissance musculaire, pour des sportifs entraînés, peut aller jusqu'à 1000W.
3. Mouvements musculaires involontaires tel que frissons, claquement de dents, chair de poule produisent aussi de la chaleur. Les frissons peuvent développer une puissance de 400W durant maximum 3h.

4.5.2. Stratégie défensive

Si la thermogénèse ne suffit pas à maintenir la température centrale, l'organisme va se défendre avec une stratégie comparable à celle de la « terre brûlée », en abandonnant progressivement la défense des organes non vitaux. La limitation des pertes caloriques va s'effectuer en contractant les vaisseaux sanguins capillaires périphériques (vasoconstriction périphérique). Le débit sanguin dans ces vaisseaux va diminuer, la quantité de sang refroidit par le milieu extérieur va diminuer ce qui va contribuer à maintenir la température centrale. Les extrémités : doigts, nez, lèvres... non irriguées vont se teinter de bleu et à terme être atteintes de gelures. Lorsque ce mécanisme est activé, le débit sanguin peut être divisé par vingt !

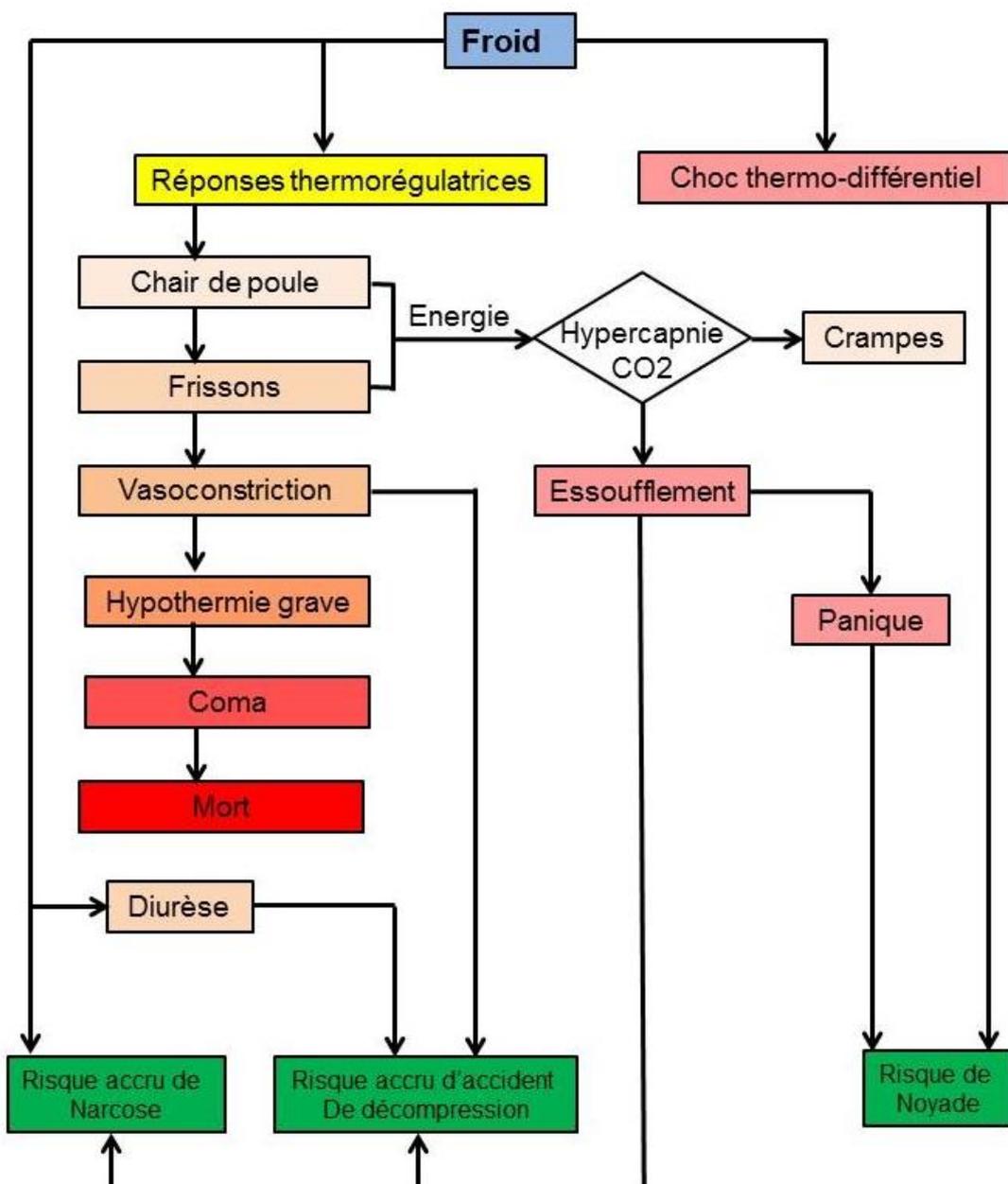


4.6. Comment se prémunir des effets du froid ?

Afin d'offrir une bonne résistance au froid, il convient :

- D'avoir un régime alimentaire équilibré bien et bien adapté aux conditions de froid.
- De maintenir une bonne forme physique.
- De limiter le temps de plongée
- De bien adapter les protections isothermiques aux conditions de température.
- Planifier la plongée de manière à limiter la durée des paliers obligatoires.
- Interrompre la plongée dès les premiers frissons.
- Se protéger du froid avant et après la plongée.
- Les surfaces exposées au froid doivent être les plus réduites possibles.

4.7. Les conséquences du froid





5. PRINCIPE DE PROTECTION CONTRE LE FROID.

5.1. Les vêtements : principe des trois couches

Ce ne sont pas les vêtements qui réchauffent le corps, mais la chaleur produite par notre métabolisme. Le vêtement, n'est qu'un accessoire qui emprisonne de l'air et l'empêche de circuler. C'est cet air emprisonné qui donne la partie la plus importante de l'isolation thermique. Il faut à tout prix éviter que la transpiration reste sur la peau, celle-ci est un « gouffre à calories », l'eau étant un très mauvais isolant thermique.

Couche 1	A même la peau	Cette couche de fine épaisseur est destinée à évacuer la transpiration et elle doit pouvoir sécher rapidement. Vêtement technique thermorégulateur (type Outlast)
Couche 2	Intermédiaire	Cette couche de forte épaisseur, emmagasine de l'air et de la chaleur tout en évacuant la sueur.
Couche 3	Extérieure	Couche plus ou moins épaisse imperméable au vent tout en étant si possible « transpirante ».

5.2. Le confort thermique

La notion de confort thermique² et de température de confort est fort suggestive, elle varie d'un individu à un autre. Elle dépend de la taille, du poids, de l'état de santé du plongeur mais aussi du type d'activité exercée et bien sûr du degré de protection thermique. La sensation de froid est propre à chaque individu !

Le degré de protection thermique d'un vêtement est donné en CLO³. Cet indice relatif, utilisé par l'industrie du textile, est une image de la résistance thermique. Plus le CLO est élevé, plus le degré de protection thermique est important et plus la température de confort diminue. La température d'équilibre (confort) s'estime à l'aide de la relation empirique suivante :

$$T = 31 - (0,155 W CLO)$$

Avec : T = Température de confort en °C (température minimum du milieu)
W = Puissance métabolique de (production de chaleur) en W/m² (100 à 180 W/m² en plongée)
CLO = Indice CLO (1 CLO = 0,155 °C·m²/W)

Globalement pour la plongée en eau froide le CLO global (souris + combinaison) ne doit pas être inférieur à 1,5 et 2 pour une plongée sous la glace.

Exemple :

Quel est la température de confort pour un plongeur ayant une production métabolique de 125 w/m² (effort moyen en plongée) et une combinaison possédant un indice CLO global de 1,4 ?

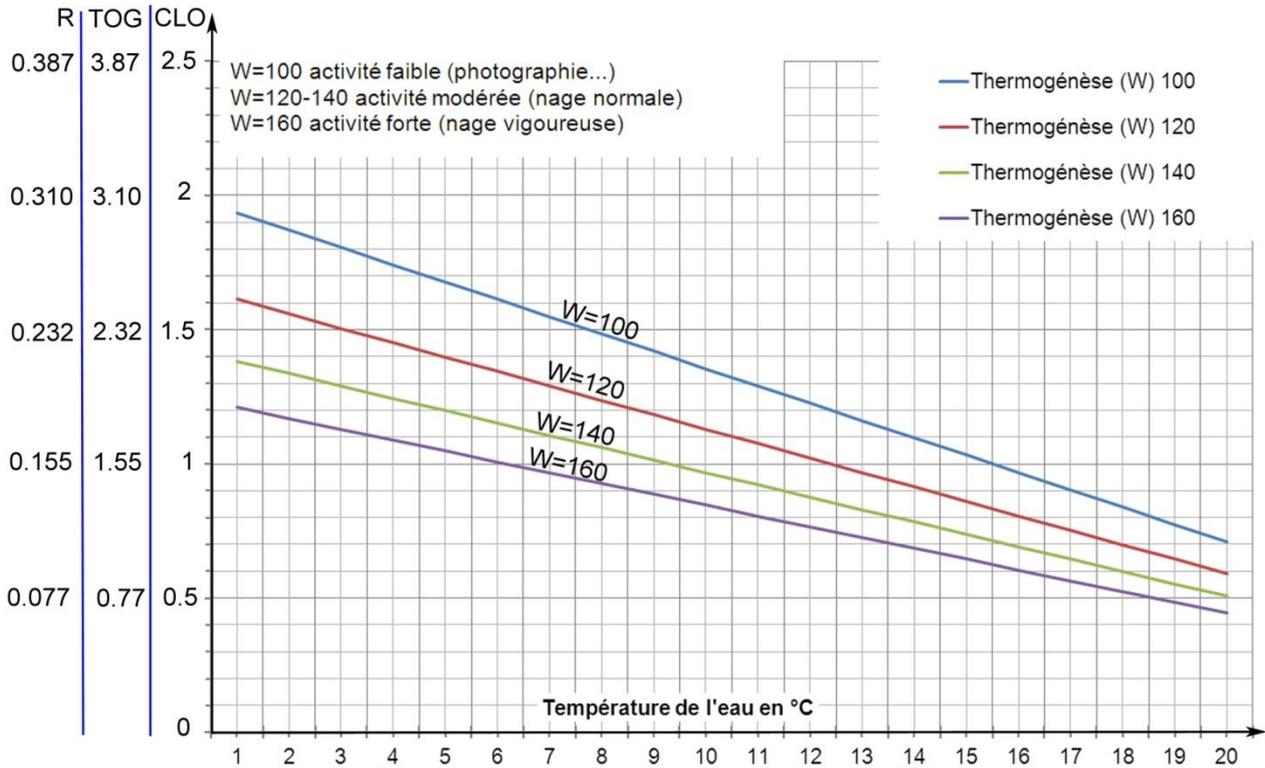
$$T = 31 - (0,155 \times 125 \times 1,4) = 4^{\circ}\text{C}$$

² Ce chapitre est abordé en détail dans la spécialisation « plonger en costume sec ».

³ Un CLO est défini comme étant la quantité de vêtement indispensable, pour assurer l'équilibre thermique d'une personne moyenne, au repos, à la température de 21°C, une humidité relative de 50% et un vent de 0,25m/s.



La plongée en eau froide



Les courbes représentent en fonction de la production de chaleur (Thermogénèse) du plongeur la résistance thermique minimum de sa combinaison pour lui assurer une plongée confortable.

Exemple :

Un plongeur qui produit une énergie de 120W (plongeur de taille moyenne, effectuant une nage normale) pour plonger confortablement dans une eau à 3°C devra avoir une combinaison ayant un CLO de 1,5 soit une résistance thermique de 0,232 °C.m²/W

5.2.1. Les unités de résistance thermique vestimentaire.

Le niveau de protection thermique est caractérisé par la résistance thermique aux échanges de chaleur de ou vers le milieu extérieur (R). Elle s'exprime en °C.m²/W.

Pour des raisons de facilité et bien que non reprise dans le système international des poids et mesures, les fabricants utilisent volontiers le CLO comme unité d'isolement thermique des vêtements (1 CLO = 0,155 °C.m²/W).

D'autres fabricants, principalement en UE, utilisent aussi le TOG (1 TOG = 0,645 CLO) ou 10R.

	R (°C.m ² /W)	CLO	TOG
1R	1	6.452	10
1CLO	0.155	1	1.55
1TOG	0.1	0.645	1



5.3. Le bilan thermique

Notre organisme produit de la chaleur pour maintenir notre température corporelle constante, c'est la thermogénèse. Le bilan thermique est la différence entre la chaleur produite par thermogénèse et les pertes de chaleur. Si le bilan thermique est négatif, il y a des risques d'hypothermie. L'idéal est d'avoir un bilan thermique nul. Dans une certaine mesure nos systèmes de thermorégulation permettent de rétablir l'équilibre. La thermogénèse c'est le moteur interne qui produit notre chaleur interne. En fonction de la stature de l'individu et de son activité, sa puissance varie entre 60W au repos et 300W lors d'un effort physique moyen (palmage).

Lors d'une immersion de l'ordre de deux heures dans une eau glacée, la puissance de ce moteur chute de 50%! De plus, un déficit thermique engendre un abaissement de la température centrale de l'ordre d'un degré par watt heure et par kilo. Approximativement, il est possible d'estimer la chute de la température centrale à l'aide de la relation :

$$\Delta T = \frac{Wt \times t}{Mc}$$

Avec :

ΔT = Chute de la température centrale (°C)

Wt = Dette thermique (W)

Mc = Masse corporelle du plongeur (Kg)

t = Temps d'exposition au froid (h)

Exemple :

Quelle est la chute de la température centrale d'un plongeur de 85 Kg ayant une dette thermique de 100 watt durant une plongée de 30 minutes.

$$\Delta T = \frac{100 \times 0,5}{85} = 0,6^{\circ}C$$

Il est possible d'estimer la thermogénèse en fonction du débit ventilatoire, en effet pour fonctionner le « moteur thermogénèse » a besoin d'un comburant. Ce comburant est l'oxygène fourni par la respiration.

$$TH = \frac{Cons \times 100}{8}$$

Avec :

TH = Thermogénèse (W)

Cons = Débit ventilatoire en surface (litres/minutes)

Exemple :

Quelle est la thermogénèse d'une personne dont le débit ventilatoire est de 20 l/min ?

$$TH = \frac{20 \times 100}{8} = 250 W$$



5.4. Les échanges thermiques.

La chaleur est l'énergie produite par l'agitation thermique au niveau moléculaire, elle s'exprime en Joule (J). La transmission de la chaleur se fait toujours du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Il existe quatre modes d'échanges thermiques entre l'humain et le milieu extérieur : la conduction, la convection, le rayonnement, l'évaporation.

5.4.1. La conduction

La chaleur se propage, au travers des liquides, des solides ou des gaz de molécule en molécule, c'est-à-dire de proche en proche. La quantité de chaleur échangée dépend :

- De la surface d'échange ;
- De la matière et de ses caractéristiques thermiques : conductibilité thermique, résistance thermique ;
- De l'épaisseur à de matière à traverser ;
- De la différence de température entre les divers milieux.

La conductibilité thermique de l'eau est 24 fois supérieure à celle de l'air sec. Ce qui signifie que l'air sec est 24 fois plus isolant que l'eau, d'où l'intérêt des costumes étanches.

5.4.2 La convection

La transmission de chaleur se fait entre un solide et un fluide en mouvement (liquide ou gaz) ayant des températures différentes. La variation de température du fluide, va faire varier sa densité et le mettre en mouvement pour l'éloigner du solide. Ce fluide sera remplacé par une nouvelle couche de fluide à la température initiale. Celle va à son tour va subir les effets thermiques du solide... et ainsi de suite, jusqu'à l'équilibre des températures. La quantité de chaleur échangée dépend :

- De la surface d'échange ;
- De la forme et du type de la surface d'échange ;
- Des solides et des fluides en présences et de leurs caractéristiques thermiques : le coefficient de convection ;
- De la vitesse de circulation des fluides le long du solide ;
- De la différence de température entre solide et fluides.

5.4.3. Le rayonnement

La transmission de chaleur se fait, sans support matériel, par rayonnement infrarouge. Dans le cas de la plongée, ce mode de transmission est négligeable.

5.4.4. L'évaporation

Pour combattre la chaleur, l'évaporation de la sueur est un puissant moyen. Il faut une quantité d'énergie importante pour évaporer⁴ la sueur. Cette énergie est fournie par la chaleur de la peau, ce qui engendre une diminution de sa température. En costume humide, il n'y a pas d'évaporation, ce n'est le cas si on plonge en étanche. Ce qui signifie qu'il faut éviter, dans la mesure du possible, de transpirer lorsqu'on s'équipe.

⁴ De l'ordre de 2700 Joules pour un gramme d'eau dans des conditions normales (Pression atmosphérique normale de 1033 mb, température initiale de l'eau 0°C)



5.5. Evaluation des pertes thermiques.

En plongée on peut considérer, lors d'une première approche, que les pertes sont uniquement dues aux pertes cutanée et respiratoire. La perte thermique liée à l'évaporation de la sueur dans l'étanche est considérée comme négligeable. Les formules proposées sont des formules simples qui permettent une évaluation des pertes, mais pas un calcul « au watt près ». Un calcul précis est très complexe, étant donné le nombre important de paramètres. Néanmoins, ces relations sont largement suffisantes pour une évaluation rapide des pertes thermiques et la comparaison entre différents modes de plongée (circuit ouvert, recycleur...).

$$P_t = P_{cut} + P_{resp}$$

Avec :

P_t = Pertes thermiques totales (W)

P_{cut} = Pertes cutanées (W)

P_{resp} = Pertes respiratoires (W)

5.5.1. Les pertes cutanées

Ce sont des pertes par conduction et convection à l'interface entre le milieu extérieur et l'organisme du plongeur. Les différentes parois limitant le transfert de chaleur vers le milieu extérieur sont :

- La périphérie de l'organisme ;
- Les couches successives de vêtements sous la combinaison, la combinaison ;
- La couche limite thermique⁵.

Chacune de ces parois est caractérisée par sa conductance. Celle-ci est une « image » du coefficient de transmission thermique ramené à la taille d'un plongeur moyen.

$$P_{cut} = \frac{(37 - T_{ext})}{\sum_1^n \frac{1}{C_n}}$$

Avec :

P_{cut} = Pertes cutanées (W)

T_{ext} = Température du milieu extérieur, c'est-à-dire de l'eau ! (°C)

C_n = Conductances (W/°C)

Le terme $\sum_1^n \frac{1}{C_n}$ peut-être développé de la manière suivante :

$$\sum_1^n \frac{1}{C_n} = \frac{1}{C_{or}} + \frac{1}{C_{li}} + \frac{1}{C_{le}} + \sum_1^i \frac{1}{C_{vi}}$$

Avec :

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

C_{li} = Conductance de la couche limite thermique intérieure (W/°C)

C_{le} = Conductance de la couche limite thermique extérieure (W/°C)

$\sum_1^i \frac{1}{C_{vi}}$ = Conductance globale des sous-vêtements (W/°C)

⁵ Pour faire simple : la couche limite thermique est la zone dans laquelle les échanges thermiques se produisent.



Le terme $\sum_1^i \frac{1}{C_{vi}}$ peut-être développé, en première approximation, en ne tenant compte que de la combinaison et de la souris de la manière suivante :

$$\sum_1^i \frac{1}{C_{vi}} = \frac{1}{C_{vs}} + \frac{1}{\xi C_{vc}}$$

Avec :

C_{vs} = Conductance de la souris (W/°C)

C_{vc} = Conductance de la combinaison (W/°C)

ξ = Coefficient qui tient compte de l'écrasement et de la diminution de l'épaisseur de la combinaison en fonction de la pression.

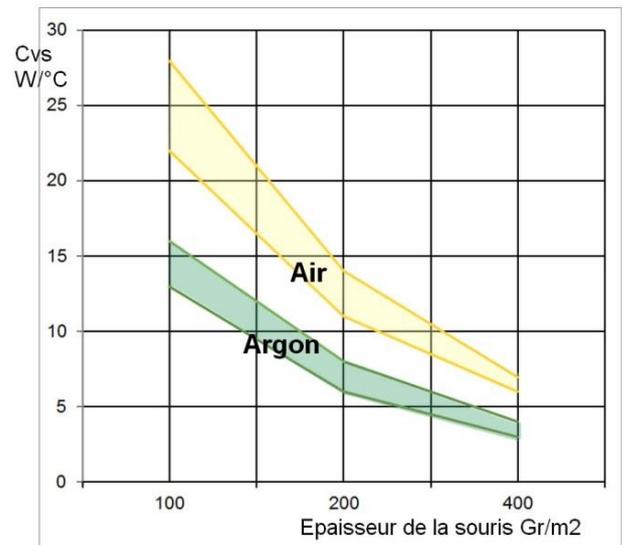
Quelques valeurs usuelles de conductance

	W/°C	Remarques
Cor	15	Plongeur à forte stature (embonpoint)
	30	Plongeur à stature moyenne
	40	Plongeur à faible stature (maigre)
Cli	50-70	Combinaison humide
	8	Combinaison étanche gonflée à l'air
	6	Combinaison étanche gonflée à l'argon
Cle	70	Mer calme
	300	Mer agitée
Cvc	300	Costume toilé
	50	Costume néoprène 3 mm
	30	Costume néoprène 5 mm
	20	Costume néoprène 7 mm
Cvs	100-120	Souris en Thinsulate mouillée
	50	Lainage avec de l'air dans la combinaison étanche
	35	Lainage avec de l'argon dans la combinaison étanche

Les valeurs des conductances dans les tableaux et graphiques sont des valeurs moyennes.

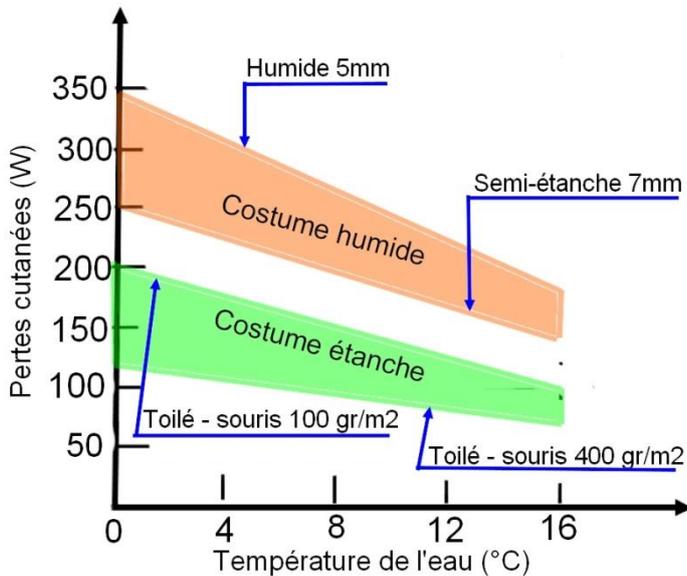
Valeurs usuelles du coefficient d'écrasement (ξ)

	(ξ)			
	Profondeur	5m	20m	30m
Humide néoprène		1	2	3
Étanche néoprène		1	1,3	1,6
Étanche néoprène compressé		1	1,1	1,2
Étanche toilé		1	1	1





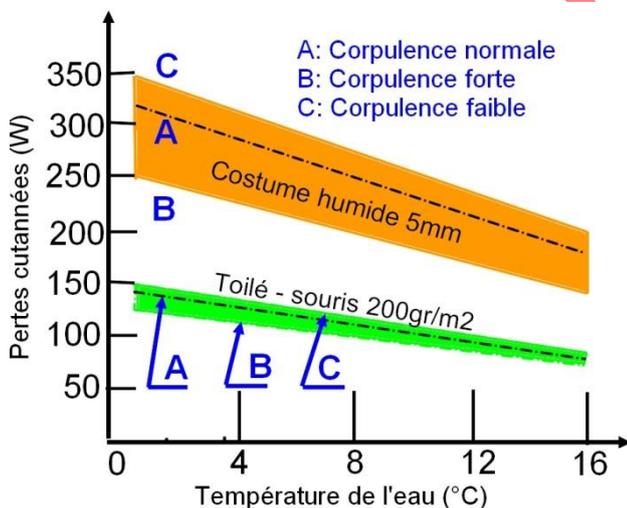
5.5.2. valeurs approximatives des pertes cutanées.



Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, le nombre de paramètres influant sur les pertes de chaleur cutanées est important, il est difficile de faire un graphique précis de ces pertes. Néanmoins, le graphique ci-contre donne une idée approximative de l'importance des pertes cutanées, en fonction de la température de l'eau. Il est établi pour des plongeurs ayant une stature moyenne, résistant normalement au froid, plongeant dans une eau peu agitée.

Ce graphique permet, malgré le peu de précision, de tirer certaines conclusions :

1. Même avec une souris légère il est nettement plus profitable de plonger en étanche, lorsque la température est en dessous de 16°C
2. En dessous de 12°C, même en utilisant un costume semi-humide de bonne qualité, la thermogénèse n'arrivera plus à compenser les pertes cutanées, sans tenir compte des pertes respiratoires.
3. En dessous de 8°C la souris classique de 100 gr/m² associé à un costume étanche toilé est trop peu isolante : il faut au minimum une souris de 200 gr/m².



5.5.3. Influence de la corpulence sur les pertes cutanées

Le graphique ci contre montre quelle est l'influence de la corpulence du plongeur sur les pertes cutanées en fonction de la température de l'eau et du type de combinaison. On constate que :

1. La corpulence n'a pratiquement aucune importance si les plongeurs utilisent des costumes étanches.
2. En costume humide la corpulence du plongeur joue un rôle fondamental
3. En fonction de la température de l'eau, il peut y avoir entre 50 à 100W d'écart entre les pertes cutanées d'un plongeur de forte et un autre de faible corpulence.
4. En terme des pertes cutanées, Il y a peu de différences entre un plongeur de corpulence normale et un plongeur de forte corpulence si les deux plongent en costume humide.
5. En terme des pertes cutanées, Il y a beaucoup de différences entre un plongeur de corpulence normale et un plongeur de faible corpulence si les deux plongent en costume humide.



5.5.2. Les pertes respiratoires

L'air respiré en circuit ouvert durant la plongée, à une température voisine de celle de l'eau, et à l'expiration elle à une température qui se rapproche de la température corporelle, les poumons étant un très bon échangeur de chaleur. Pour de l'air ou du Nitrox et pour un débit ventilatoire de 20 l/min à pression atmosphérique normale, les pertes thermiques peuvent s'estimer à l'aide de la formule simplifiée ci-dessous.

$$Presp = \left[0,35 (37 - Ti) \left(\frac{Pr + 10}{10} \right) \right] + H$$

Avec :

Presp = Pertes respiratoires (W)

Ti = Température des gaz inspirés (°C). Par défaut on utilise la température de l'eau pour le circuit ouvert et 25°C pour les recycleurs SCR ou CCR

Pr = Profondeur de la plongée (m)

H = Facteur qui tient compte de l'humidité des gaz respirés (W)

Par défaut, on peut utiliser les valeurs suivantes :

H (Watt)	
10	Circuit ouvert
7	Recycleur SCR ou CCR

Ti (°C)	Profondeur (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
0	29	36	42	49	55	62	68	75	88	101
1	29	35	42	48	54	60	67	73	86	98
2	28	35	41	47	53	59	65	71	84	96
3	28	34	40	46	52	58	64	70	81	93
4	27	33	39	45	50	56	62	68	79	91
5	27	32	38	44	49	55	60	66	77	88
6	26	32	37	43	48	53	59	64	75	86
7	26	31	36	42	47	52	57	63	73	84
8	25	30	35	40	46	51	56	61	71	81
9	25	30	35	39	44	49	54	59	69	79
10	24	29	34	38	43	48	53	57	67	76
11	24	28	33	37	42	46	51	56	65	74
12	23	28	32	36	41	45	49	54	63	71
13	23	27	31	35	39	44	48	52	60	69
14	22	26	30	34	38	42	46	50	58	66
15	22	25	29	33	37	41	45	49	56	64
16	21	25	28	32	36	39	43	47	54	61
SCR/CCR	13	15	18	20	22	24	26	28	32	36
Pertes respiratoires (W)										



5.6. Evaluation du bilan thermique et de la dette thermique

Le bilan thermique est égal à la thermogénèse (chaleur produite par le corps) diminué des pertes thermiques (chaleur fournie par le corps au milieu extérieur). Ce bilan est négatif, lorsque les pertes thermiques sont supérieures à la chaleur produite par la thermogénèse... On dit qu'il y a dette thermique ! Cette dette aura pour conséquence de faire diminuer la température centrale. On considère qu'une diminution d'un degré de la température centrale, commence à mettre le plongeur en danger. Il est possible d'évaluer la dette thermique et le temps d'immersion maximum à l'aide des relations empiriques suivantes :

$$Bt = TH - Pt$$

$$Rtc = \frac{Bt}{Mp}$$

$$Tpm = \frac{60}{Rtc}$$

Avec :

Bt = Bilan thermique (W)

TH = Thermogénèse (W)

Pt = Pertes thermiques (W)

Rtc = Diminution de la température centrale (°C)

Mp = Masse (poids) du plongeur (Kg)

Tpm = Temps maximum d'immersion (minutes)

Les relations qui permettent de calculer la diminution de la température centrale (Rtc) et le temps maximum d'immersion (Tpm) sont assez grossières. Elles présument que la thermogénèse est constante, ce qui n'est pas le cas. En effet :

- La thermogénèse varie de concert avec l'effort fourni durant la plongée et cet effort n'est pas constant. Un plongeur épuisé par le froid et l'effort va réduire son rythme de palmage... La production de chaleur va donc diminuer.
- Au bout d'un laps de temps plus ou moins long, la production de chaleur diminue faute de « carburant ». Deux heures dans une eau glacée fait chuter la production de chaleur de 50%.

Pour ces raisons il est préférable de se baser sur une thermogénèse moyenne de 100W pour les femmes et 120W pour les hommes pour estimer le temps maximum d'immersion.



5.6.1. Exemple numérique

Deux plongeurs de stature moyenne (80kg) équipé l'un d'une combinaison étanche toilée et d'une souris de 200 gr/m² et l'autre en combinaison humide ; plongent à 30m, sans effort important. La température de l'eau est de 6°C. Déterminer pour les deux plongeurs :

1. Les pertes thermiques cutanées ?
2. Les pertes thermiques dues à la respiration ?
3. Les pertes thermiques totales ?
4. Déterminer les bilans thermiques ?
5. La durée maximum d'immersion ?
6. La durée maximum d'immersion avec une combinaison étanche remplie d'eau ?
7. Quels sont les conclusions que l'on peut tirer des calculs ?

5.6.1.1. Données

	Plongeur 1	Plongeur 2
Mode de plongée	Circuit ouvert	Circuit ouvert
Combinaison	Semi-humide	Toilée
Souris	-	200 gr/m ²
Poids du plongeur	80 Kg	80 Kg
Stature du plongeur	Moyenne	Moyenne
T° de l'eau	6°C	6°C
Profondeur	30m	30m

5.6.1.2 Paramètres et hypothèses de calcul

Les paramètres de calculs sont établis suivant les tableaux du chapitre précédent

	Plongeur 1 (humide)	Plongeur 2 (sec)	Unités
Cor	30	30	W/°C
Cli	60	8	W/°C
Cle	70	70	W/°C
Cvc	20	300	W/°C
Cvs (souris sèche)	-	12	W/°C
Cvs (souris mouillé)	-	100	W/°C
Ti	6	6	°C
PR	30	30	m
H	10	10	W
Text	6	6	°C
ξ	3	1	-
Cons	20 (estimée)	20 (estimée)	l/min

Hypothèses :

- On considère la thermogénèse constante pendant toute la plongée.
- On considère que toute la plongée se déroule à 30m de profondeur.



5.6.1.3. Calcul

1) Thermogénèse:

$$TH = \frac{20 \times 100}{8} = 250W$$

2) Pertes thermiques cutanées:

$$\sum_1^i \frac{1}{C_{vi}} = \frac{1}{3 \times 20} = 0,0167 \quad \text{Plongeur 1}$$

$$\sum_1^i \frac{1}{C_{vi}} = \frac{1}{12} + \frac{1}{300} = 0,0867 \quad \text{Plongeur 2 (souris sèche)}$$

$$\sum_1^i \frac{1}{C_{vi}} = \frac{1}{100} + \frac{1}{300} = 0,0133 \quad \text{Plongeur 2 (souris mouillée)}$$

$$\sum_1^n \frac{1}{C_n} = \frac{1}{30} + \frac{1}{60} + \frac{1}{70} + 0,0167 = 0,0810 \quad \text{Plongeur 1}$$

$$\sum_1^n \frac{1}{C_n} = \frac{1}{30} + \frac{1}{8} + \frac{1}{70} + 0,0867 = 0,2593 \quad \text{Plongeur 2 (souris sèche)}$$

$$\sum_1^n \frac{1}{C_n} = \frac{1}{30} + \frac{1}{8} + \frac{1}{70} + 0,0133 = 0,1859 \quad \text{Plongeur 2 (souris mouillé)}$$

$$P_{cut} = \frac{(37-6)}{0,0810} = 383W \quad \text{Plongeur 1}$$

$$P_{cut} = \frac{(37-6)}{0,2593} = 120W \quad \text{Plongeur 2 (souris sèche)}$$

$$P_{cut} = \frac{(37-6)}{0,1859} = 167W \quad \text{Plongeur 2 (souris mouillé)}$$

3) Pertes thermiques dues à la respiration

$$P_{resp} = \left[0,35 (37 - 6) \left(\frac{30+10}{10} \right) \right] + 10 = 53W \quad \text{Plongeur 1 et 2}$$

4) Pertes thermiques totales

	Plongeur 1	Plongeur 2 (souris sèche)	Plongeur 2 (souris mouillé)
Pertes cutanées	383	120	167
Pertes respiratoires	53	53	53
Pertes totales	436	173	220
Thermogénèse	250	250	250
Bilan thermique	-186	+77	+30



5) Calcul du temps maximum d'immersion

Seul le plongeur en costume humide est en dette thermique. On se propose de calculer son temps maximum d'immersion, de manière que sa température centrale ne chute que d'un degré au maximum.

$$Rtc = \frac{186}{80} = 2,3^{\circ}C \quad Tpm = \frac{60}{2,3} = 26 \text{ min} \quad \text{Plongeur 1}$$

6) Conclusions

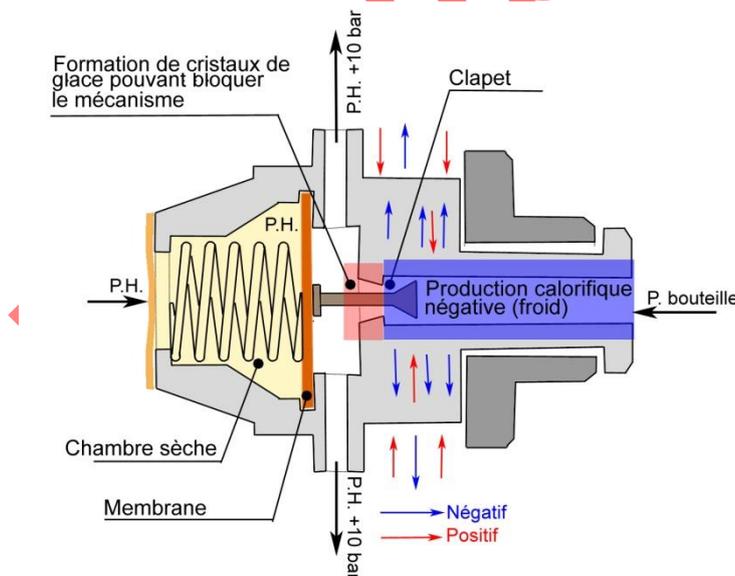
Dans nos conditions de plongée en carrière, on peut écrire que :

1. Le bilan thermique est positif, le plongeur en costume sec et négatif pour le plongeur en costume humide. Il faut donc privilégier la plongée en costume sec.
2. Le temps d'immersion en costume humide, ne doit pas dépasser les 25-30 minutes.
3. En cas de perte d'étanchéité de la combinaison :
 - a. Les pertes thermiques ne sont pas négligeables.
 - b. Une souris mouillée protège mieux du froid qu'une combinaison humide... même si la sensation désagréable que génère ce genre d'incident semble faire penser le contraire.
 - c. Les temps maximum d'immersion, avant de mettre le plongeur en danger par hypothermie est divisé par un facteur de 2 à 4.
4. En étant prudent, la perte d'étanchéité du costume étant toujours possible, il convient de limiter la durée de la plongée au maximum à 60 minutes.

6. INFLUENCE DU FROID SUR LE MATERIEL

6.1. Givrage du détendeur

6.1.1. Mécanisme



Le givrage du détendeur, c'est la lutte ancestrale entre le bien (la chaleur) et le mal (le froid) !

Lorsque le gaz respiratoire sous haute pression se détend, sa température chute entre -30 et $-55^{\circ}C$. Cette action calorifique négative doit être compensée par un apport de chaleur venant de l'extérieur. Cet apport calorifique positif⁶ ne peut être fourni que par le milieu ambiant, c'est-à-dire l'eau. Lorsque la compensation entre l'action calorifique négative et positive devient insuffisante, des cristaux de glace peuvent se former et bloquer le mécanisme du détendeur.

⁶ Par rapport à la température de détente du gaz respiratoire une eau à zéro degré est « chaude » !



Le détendeur se met alors en débit constant, ce qui va amplifier son refroidissement. La détente du gaz respiratoire ce fait alors d'une manière ininterrompue et par effet boule de neige, accroît le givrage. Dans l'immense majorité des cas, c'est le 1^{er} étage du détendeur qui givre car la détente des gaz y est la plus importante. Néanmoins le givrage du 2^e étage n'est jamais à exclure, quoique très rare.

6.1.2. Facteurs favorisant les risques de givrage du détendeur

1. Le transfert d'énergie thermique (Il n'y a pas production mais transfert) par conduction grâce au gradient thermique positif, puisse son énergie dans l'eau. Plus l'eau est froide, moins il y a de l'énergie disponible et plus le risque de givrage sera important.
2. Plus le débit du détendeur est important (essoufflement...) plus le risque de givrage sera important car il faudra un transfert calorifique positif plus important pour combattre la production calorifique négative qui sera plus importante.
3. L'humidité relative du gaz respiratoire favorise la formation de givre dans le mécanisme du détendeur, d'où l'importance d'avoir les filtres du compresseur en bon état et de les purger régulièrement.
4. Avoir un détendeur mal entretenu et entartré.
5. Avoir du matériel glacé avant de commencer la plonger ou pire de la neige, de la glace dans ou autour du détendeur.
6. Faire fonctionner le détendeur avant d'être dans l'eau (test, gonflage du gilet...).
7. Avoir un débit ventilatoire important (essoufflement...).
8. Utiliser des bouteilles à 300 bar, plus le facteur de détente est important, plus la température dans le détendeur chute et la compensation thermique extérieure de moins en moins efficace.
9. Utiliser des détendeurs non conçus pour les eaux froides, 1^{er} étage à piston...
10. Utiliser un octopus et respirer à deux sur un seul 1^{er} étage, double le débit du gaz respiratoire et donc accroît sensiblement le risque de givrage.

6.1.3. Facteurs réduisant les risques de givrage du détendeur

1. Le design du détendeur qui, à l'aide d'artifices techniques, permet d'optimiser les échanges thermiques entre la zone de détente et le milieu extérieur ; d'éviter la formation de glace sur la face extérieure de la membrane (chambre sèche) ; de réduire l'accrochage des cristaux de glace au niveau du clapet (revêtement isolant des pièces sensibles ; pièces sensibles placée à l'opposé de la source de froid ; absence d'angles vifs ; ailettes de réchauffage⁷...). Ces détendeurs sont nommés « Antigivre » ou « Détendeur eau froide ». Mais il n'y a pas de miracle, ces « artifices » ne sont pas des garanties absolues que le détendeur ne va pas « partir en débit constant » !
2. Choisir un 1^{er} étage à membrane et un 2^e étage métallique pour favoriser les échanges thermiques vers l'extérieur.
3. Un entretien régulier avec un réglage légèrement dur.
4. Utiliser un gaz respiratoire sec et de préférence du Nitrox.
5. Maintenir le matériel le plus longtemps possible au chaud.
6. Ne pas utiliser le détendeur avant d'être dans l'eau.
7. Utiliser les inflateurs (gilets, costumes étanches) avec parcimonie et par petites inflations. Pour l'étanche, utiliser de préférence une bouteille séparée gonflée à

⁷ Elles font office d'échangeur thermique, l'eau étant plus chaude que l'intérieur du détendeur



l'argon. Si ce n'est pas possible, monter l'inflateur du gilet et l'inflateur du costume étanche sur des détendeurs séparés.

8. Limiter ses efforts en plongée, afin de réduire le débit ventilatoire.
9. Sous gonfler la bouteille (150 bar), de manière à diminuer le ratio de détente et donc la production de froid.
10. Plonger au Nitrox, car plus sec que l'air.

6.1.4. Conduite à tenir en cas de givrage du détendeur.

Il est illusoire de respirer dans une eau froide sur un détendeur en débit constant sans se faire des brûlures froides au niveau des lèvres !

En cas de givrage et de débit constant du détendeur durant la plongée, la conduite à tenir doit être débattue lors du « What-if ». Les mesures à prendre seront en grande partie conditionnées par le degré d'engagement de la plongée ainsi que l'équipement mis en œuvre. Un débit constant, peut vider la bouteille en quelques minutes, en tout état de cause : il convient d'agir rapidement, sans précipitation ni panique.

1. Prévenir le buddy et/ou la sécurité de surface.
2. Passer sur son détendeur de secours, il est tout à fait inconcevable de faire une plongée dans une eau froide, sans avoir deux détendeurs séparés (pas d'octopus).
3. Bloquer, le plus rapidement possible, le débit du détendeur en givrage. Ce qui peut se faire de plusieurs manières en fonction de l'équipement :
 - a. Fermer le robinet de la bouteille. Cette opération peut s'avérer difficile seul à cause de la raideur des combinaisons étanches et des gants. Il est préférable que le détendeur principal soit équipé d'une « flow stop valve⁸ ».
 - b. Si le détendeur est équipé d'une « flow stop valve », il suffit de mettre celle-ci en position « off » pour stopper net le débit constant.
4. Terminer la plongée le plus rapidement possible.

Ouvert



Fermé



6.1.4.1. Fonctionnement de la « flow stop valve » utilisée en blocage d'un givrage

L'importance du débit d'air est non seulement l'élément déclencheur d'un « débit constant » mais qu'il entretient ce « débit constant ». Il suffit donc de bloquer le passage de l'air ou de diminuer fortement le débit, pour que l'action calorifique du milieu extérieur puisse jouer son rôle. A la fermeture de la « flow stop valve », l'air ne peut plus s'échapper par le second étage du détendeur, la pression dans la flexible moyenne pression (MP) entre le 1^{er} et le 2^e étage va augmenter, ce qui va diminuer le débit. Deux cas peuvent se présenter :

1. La pression dans le flexible MP va rester inférieure à la pression de tarage de la soupape de surpression.

⁸ La Flow Stop Valve[®] doit être associée à une soupape de surpression visée sur une MP du 1^{er} étage, pour éviter une surpression dans le flexible MP reliant le 1^{er} au 2^e étage du détendeur. Cette soupape est tarée à +/- 15 à 20 bars au-dessus de la pression hydrostatique.



2. La pression dans le flexible MP va être supérieure à la pression de tarage de la soupape de surpression. Celle-ci va s'ouvrir en provoquant une micro-fuite pour diminuer la pression et protéger le flexible MP de l'éclatement.

Dans les deux cas, le débit sera suffisamment diminué pour stopper le débit constant.

7. NOTIONS DE « WHAT-IF » ET PRINCIPES DE REDONDANCE

7.1. Notion de « What-if »

Littéralement : Que faire au cas où! Cette philosophie des plongeurs « Tek » est très facile à comprendre, moins facile à mettre en œuvre. Il s'agit de faire une liste, non exhaustive, de tous les problèmes matériels ou non que l'on puisse rencontrer en plongée. On ne plonge que si tous les points ont reçu une réponse satisfaisante. L'aide obligatoire de la part du buddy pour résoudre un problème de la liste n'est pas considérée comme une option valable et doit être rejetée. C'est cette liste qui va permettre de mettre en place un système de redondance.

Exemple exhaustif dans le cas de plongée en eaux froides

- Que faire si je perds le buddy ?
- Puis-je atteindre tous mon matériel en aveugle ?
- Que faire si mon costume étanche prend l'eau ?
- Que faire en cas de givrage de mon détendeur ?
- Que faire si la fermeture des robinets est problématique en cas de givrage ?

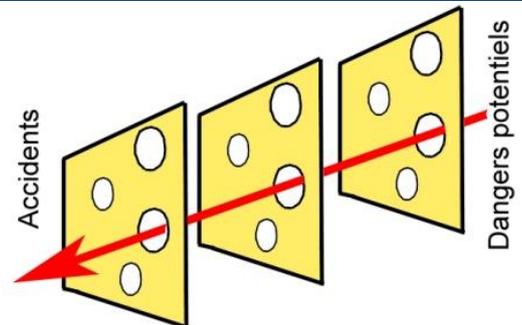
7.2. Les redondances

7.2.1. La philosophie de la « tranche d'emmental ».

Pour passer d'un "danger" à un "accident" il faut passer au travers d'une série de barrière de sécurité. James T. Reason de l'université de Manchester compare ses barrières à des tranches d'emmental "swiss cheese model".

Pour limiter les risques il est nécessaire :

- D'avoir un nombre de trous réduits et donc, peu de possibilité de panne ;
- Que la taille des trous soit la plus réduite possible et donc d'avoir une bonne fiabilité ;
- Que les trous ne soient pas alignés, c'est-à-dire que la faillite d'un système ne peut pas engendrer la faillite dans le système suivant ;
- Avoir un nombre de tranches suffisant, c'est-à-dire diminuer la probabilité d'un alignement des trous. C'est le principe fondamental de la redondance.



7.2.2. La redondance

La redondance consiste à disposer plusieurs exemplaires d'équipements ayant les mêmes fonctions de base. Les solutions peuvent être mécaniques et/ou électronique. Ce système permet de réduire les risques induits par une panne mais aussi d'augmenter les performances de l'outil ou combiner les deux effets. La redondance peut être symétrique, asymétrique, évolutive ou modulaire.



- La redondance symétrique est réalisée à l'aide de deux systèmes ayant des fonctions identiques strictement opposées dans l'espace.
- La redondance asymétrique permet de basculer d'un type d'équipement vers un autre.
- La redondance évolutive consiste en cas de panne d'isoler le mécanisme défaillant pour utiliser une autre partie du système.
- La redondance modulaire consiste à dévier une panne d'un équipement vers un autre (free flow control device).

Les redondances pour des plongées en eaux froides sont comparables à celles mises en place pour des plongées en eaux tempérées sauf qu'il faut tenir du risque accru de givrage du détendeur. La redondance est constituée par le doublement symétrique du matériel ou des dispositifs sensibles (détendeurs...) pour une même fonction vitale. De sorte qu'en cas de défaillance de l'un ou de plusieurs appareils, la fonction vitale puisse être assurée. Avec plusieurs appareils pour une fonction, la probabilité de défaillance simultanée sera bien inférieure à celle d'une seule machine. La probabilité de survenance d'un événement est convertie en degré de confiance ou de criticité.

7.2.2.1. Le défaut de mode commun.

Le défaut de mode commun consiste à risquer de perdre plusieurs systèmes redondants à cause d'une et une seule cause extérieure, on peut citer les exemples suivants :

- Pas de vanne manifold sur une bi-bouteille. Un défaut qui survient sur une des bouteilles risque de vider les deux bouteilles.
- Utilisation de deux ordinateurs identiques : Un bug au niveau du logiciel fait perdre la fiabilité de l'ensemble du système.

8. EQUIPEMENTS CONSEILLES POUR LA PLONGEE EN EAU FROIDE

UNE RÈGLE GÉNÉRALE : IL FAUT QUE L'ENSEMBLE DU MATÉRIEL DE PLONGÉE SOIT FACILEMENT MANIPULABLE AVEC DES GANTS ÉPAIS OU DES GANTS ÉTANCHES.

8.1. Les bouteilles

La bouteille de plongée doit posséder deux sorties distinctes, les doubleurs de sortie ne sont pas suffisamment fiables. Le bi-bouteille avec manifold d'isolation entre les bouteilles est un fortement conseillé. Il est possible de choisir en fonction de ses propres désidératas de plonger manifold ouvert ou fermé. Chacune des méthodes présentant des avantages et des inconvénients. Il faut veiller à ce que la vanne de manifold soit correctement orientée pour pouvoir la fermer seul. Il ne faut donc PAS, qu'elle soit orientée vers l'arrière de la bouteille, comme on le voit trop souvent ! Le portage latéral des bouteilles (Sidemount), présente l'avantage de pouvoir manipuler très facilement les robinets, mais oblige d'alterner les détendeurs régulièrement.



Manifold	Avantages	Inconvénients
Ouvert	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'obligation d'alternier les détendeurs. • Un seul manomètre est suffisant. 	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut de redondance en mode commun. • Risque de perte totale du gaz en cas d'incapacité à fermer le(s) robinet(s) • Difficulté potentielle pour fermer le(s) robinet(s) et notamment le robinet de manifold (raideur des combis, gants étanches..)
Fermé	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de défaut de redondance en mode commun. • Aucun risque d'une perte totale du gaz 	<ul style="list-style-type: none"> • Obligation d'alternier les détendeurs régulièrement. • Obligation d'avoir deux manomètres

8.1.1. External drive

L' « external drive » est un prolongateur mécanique, bien utile, qui permet d'ouvrir ou de fermer facilement la vanne de manifold. Pour assurer sa fiabilité, il convient de le manipuler régulièrement. Il se monte facilement à la place du volant de la vanne de manifold.



8.2. Les détendeurs



Les détendeurs complets doivent être au nombre de deux avec une connexion DIN. A cause du risque de givrage, il est aberrant et dangereux d'utiliser un octopus pour une plongée dans des eaux froides ! La connexion DIN assure une meilleure tenue et une meilleure fiabilité des joints par rapport à l'étrier. Il faut privilégier les détendeurs conçus pour les eaux froides ayant un premier étage à membrane avec chambre sèche et un deuxième étage compensé avec radiateur, réglage du Venturi et de la tension du ressort (molette de dureté). La configuration la mieux adaptée à la plongée en eaux

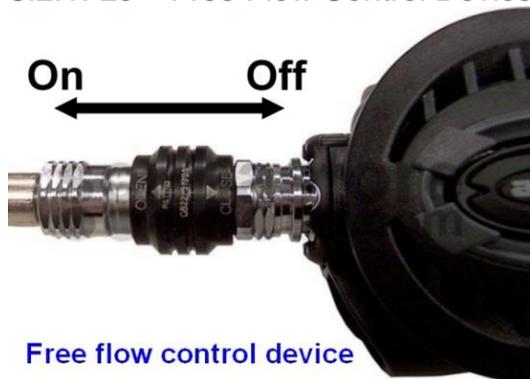
froides est une configuration inspirée des principes « Hogarthiens⁹».

Détendeur	Configuration
A gauche Détendeur de réserve	<ul style="list-style-type: none"> • Inflateur pour le gilet • Manomètre • Second étage avec élastique « tour du cou »
A droite Détendeur principal	<ul style="list-style-type: none"> • Inflateur pour le costume étanche • Manomètre uniquement si la plongée se fait « Manifold » fermé • Long hose • Free flow control device (option) monté sur le deuxième étage • Soupape de surpression montée sur la MP du 1er étage, uniquement s'il y a un « free flow control device ».

⁹ William "Bill" Hogarth Main: plongeur souterrain américain



8.2.1. Le « Free Flow Control Device » et la « Pressure Relief Valve »



Free flow control device

Le « free flow control device » est un petit accessoire particulièrement intéressant pour les plongées en eaux froides. La facilité d'accès, de cette petite vanne à glissière, permet de bloquer instantanément, en moins d'une seconde, un débit constant. Il se monte directement sur le second étage du détendeur principal uniquement : le détendeur de secours ne pouvant jamais être bloqué.

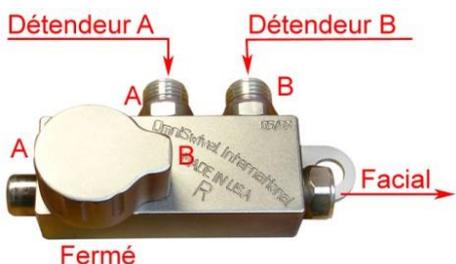
Cet accessoire est toujours associé à une « Pressure Relief Valve ». Cette vanne de sécurité, évite les surpressions dans le flexible entre le premier et le second étage du détendeur. Elle est tarée à une vingtaine de bar au-dessus de la pression hydrostatique et est montée sur une sortie moyenne pression du premier étage.



Pressure Relief Valve

8.3. Le masque facial

Le masque facial possède l'avantage d'assurer un très bon confort thermique au niveau du visage, pour cette raison de nombreux plongeurs d'eau froide l'ont adopté. Des problèmes peuvent survenir en cas de givrage du 1^{er} étage du détendeur. Enlever le facial, prendre le détendeur de secours et mettre le masque de réserve est extrêmement délicat dans de l'eau glacée. Le choc thermique est tel, qu'on a l'impression de prendre un coup de « poing dans la figure ».



La solution à ce problème consiste à utiliser une vanne trois voies (Dual Tank Valve ou Gas Switch Block) qui permet d'utiliser, alternativement, deux 1^{er} étages sur un masque facial. Ce qui revient à créer deux circuits de gaz respiratoire.



8.4. Le gilet

Pas de règle particulière pour le gilet en dehors du fait qu'il faut tenir compte que les combinaisons sont plus épaisses et qu'elles s'écrasent plus en fonction de la profondeur. Si la plongée est faite en étanche le volume du gilet doit pouvoir remonter le plongeur, alors que son costume est plein d'eau. En pratique, le volume doit être de minimum 16 litres.

8.5. Le lestage

Le lestage pouvant être assez important, il convient d'éviter la perte accidentelle de celui-ci. Pour éviter ce problème la meilleure solution consiste à remplacer la classique ceinture à largage rapide par un harnais à trois points de fermeture. Avec ce système, on conserve une bonne facilité pour enlever le lestage dans l'eau, tout en rendant impossible le largage accidentel.



9. LES PROTECTIONS THERMIQUES

La plongée en eaux froides se pratique dans une eau dont la température varie entre 1°C et 18°C. Il faudra choisir les protections thermiques en fonction de la température. Les déperditions caloriques dans l'eau sont une trentaine fois supérieures à celle de l'air pour une température identique. Il va sans dire que les protections thermiques doivent être choisies avec le plus grand soin ! Le costume étanche est fortement conseillé et l'indice CLO ne devra jamais être inférieur à 1,2 (voir le tableau ci-dessous). Il ne faut jamais plonger sans cagoule et sans gants : le refroidissement des doigts est un sérieux handicap pour se dépêtrer d'un emmêlement. Les nouvelles technologies permettent d'augmenter considérablement le confort thermique soit à l'aide de « tissus intelligents », qui ont la particularité d'emmagasiner la chaleur et de la restituer au besoin, soit à l'aide d'un gilet chauffant électrique. Une autre manière d'améliorer le confort thermique est d'utiliser un recycleur fermé ou semi-fermé. En effet les réactions chimiques d'élimination du CO₂ sont exothermiques, ce qui réchauffe le mélange respiratoire, réduit les pertes thermiques et élimine le risque de débit constant.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Température
CLO=2						CLO=1,5				CLO=1,2				CLO=1				Indice CLO	
Thinsulate 400 gr/m ²						Thinsulate 200 gr/m ²				Thinsulate 100 gr/m ²				Etanche trilaminée					
Gilet chauffant																			
														Epaisseur 7mm				Humide	
														Epaisseur 7mm				Semi-étanche	

Le tableau donne une idée de la gradation de la protection thermique en fonction de la température de l'eau. Le CLO a été calculé pour un plongeur de taille moyenne, effectuant une plongée sans effort particulier.

9.1. Combinaisons semi-étanche

La combinaison semi-étanche est une combinaison en néoprène de 5 à 7mm d'épaisseur où l'entrée d'eau, ainsi que la circulation de l'eau dans la combinaison, a été limité au maximum. Pour atteindre cet objectif, les tirettes des poignets et des chevilles sont remplacées par des manchons souples assurant une certaine étanchéité. Les combinaisons de haut de gamme utilisent aussi une tirette dorsale avec rabats et une manchette au niveau du cou. Contrairement à la combinaison étanche, l'isolation se fait toujours par la fine couche d'eau entre la peau du plongeur et la combinaison. Il n'y a ni soupape de purge, ni inflateur.

Waterproof SD Combat 7mm



9.2. Combinaisons étanches

Contrairement aux combinaisons humides, les combinaisons étanches¹⁰ assurent l'isolation par un gaz qui est le plus généralement de l'air ou dans certain cas de l'argon (Ar). Elles sont munies d'une vanne d'entrée d'air et d'une soupape de purge.

¹⁰ Ce chapitre n'est qu'une approche succincte : description, utilisation... sont abordés en détail dans le cours de spécialité « costume étanche ».



La vanne d'entrée d'air permet, durant la descente, d'insuffler de l'air dans la combinaison pour maintenir l'équilibre. Elle est le plus souvent placée au milieu de la poitrine et est connectée via un raccord rapide à une sortie moyenne pression du détendeur ou une bouteille d'argon.



La soupape de purge permet, lors de la remontée, d'expurger l'air de la combinaison afin d'éviter une remontée trop rapide. C'est une soupape automatique, avec une possibilité de commande manuelle et dont le débit est ajustable. Elle est toujours placée sur une épaule de manière à pouvoir purger la combinaison dans n'importe quelle position.

9.2.1. Les matériaux.

Elles peuvent être fabriquées en différentes matières qui se divisent en deux grandes catégories : les costumes « toilés » et les costumes « néoprènes ». Chaque matériau ayant des avantages et des inconvénients.

9.2.1.1. Les combinaisons toilés.

Elles sont fines et ne participent pratiquement pas à l'isolation thermique : il faut donc des sous-vêtements isothermiques sous la combinaison. Elles possèdent l'avantage de ne pas s'écraser avec la pression et donc de maintenir le volume du plongeur constant. D'où l'ancienne appellation de ce type de costume¹¹ : « volume constant » ou plus simplement « volume ».



EPDM

L'EPDM¹² est un « caoutchouc » vulcanisé à chaud. Ce matériau présente l'avantage d'être facilement réparable et d'avoir un faible coefficient d'absorption d'eau. Il est donc très prisé par les opérateurs en travaux subaquatiques travaillant en milieu contaminé et ce malgré une relative faible résistance à l'abrasion. Les principaux fabricants sont : Viking, Gates, White

Trilaminé

Le trilaminé comme son nom l'indique est un tissu composé de trois couches superposées. La couche interne est dans un matériau hypoallergénique, la couche intermédiaire, en EPDM ou néoprène, donne la souplesse et la couche externe donne la résistance à l'abrasion et au poinçonnement. Le prix de la combinaison est fortement conditionné par la qualité de la couche externe : Cordura¹³, Kevlar¹⁴, Nylon¹⁵...Généralement ces combinaisons sont assez souples, mais présentent un coefficient d'absorption d'eau nettement plus important que l'EPDM.



¹¹ Dans le milieu des scaphandriers

¹² Ethylène Propylène Diène Monomère

¹³ Le Cordura (DuPont de Nemours) est une fibre textile résistante 4 fois plus que le Nylon à l'abrasion.

¹⁴ Le Kevlar est un polymère thermoplastique qui se caractérise par une très bonne résistance au poinçonnement, mais qui a l'inconvénient d'avoir un fort coefficient d'absorption d'eau (4%)

¹⁵ Le Nylon (DuPont de Nemours) est un polyamide qui a l'avantage de sécher rapidement. La résistance à l'abrasion et au poinçonnement est largement inférieure au Cordura et au Kevlar.



9.2.1.2. Les combinaisons néoprènes

Les combinaisons en néoprène¹⁶ sont plus épaisses que les combinaisons toilées et participent activement à l'isolation thermique du plongeur, dans certain cas il est possible de se passer de sous-vêtements isothermiques. Elles présentent l'inconvénient d'être compressible. L'isolation thermique du vêtement décroît avec la profondeur alors que le poids apparent du plongeur augmente. Ce type de combinaison est souvent moins couteux et plus facile à fabriquer sur mesure que les combinaisons toilées. De ce fait, elles ont une meilleure aquaticité.



Néoprène cellulaire

Les combinaisons sont fabriquées à partir de feuilles de néoprène cellulaire ayant une épaisseur de 6 à 8mm. Les pièces sont cousues et collées avec un couvre-joint. Les avantages de ce type de combinaison sont une bonne isolation thermique et un prix de vente avantageux, mais elles ont un fort coefficient d'écrasement en fonction de la profondeur et sont fort rigide, ce qui ne facilite pas l'habillement.

Néoprène compressé

Par rapport au néoprène cellulaire, les procédés de fabrication ont permis de réduire la taille des microbulles internes. Cela permet de réduire la compression de la combinaison en fonction de la profondeur. En contrepartie, pour maintenir une certaine souplesse, l'épaisseur de ne peut pas dépasser 4mm et de ce fait une partie de l'isolation thermique est perdue. Il s'agit donc d'une solution de compromis entre les combinaisons toilées et les combinaisons en néoprène cellulaire.

Crushed néoprène

Le « Crushed » néoprène est un néoprène ultra-compressé qui ne s'écrase pratiquement plus avec la profondeur. Son épaisseur ne dépasse pas 1,5 à 2mm. Il n'a donc pratiquement pas de qualité d'isolation, mais il est très souple.

Néoprène cellulaire		6 à 8mm
Néoprène compressé		3 à 4mm
Crushed néoprène		1,5 à 2mm

¹⁶ Le Néoprène : est un caoutchouc synthétique crée en 1931 par Du Pont de Nemours.



9.2.2. Comparaison des matières

Matière		Avantages	Inconvénients	Utilisation
Toilés	EPDM	<ul style="list-style-type: none"> Absorption d'eau très faible. Séchage rapide Facile et rapide à réparer. Facile à décontaminer. Bonne inertie chimique. Très bonne durée de vie. Non compressible. Pas de variation de flottabilité 	<ul style="list-style-type: none"> Lourd et encombrant. Assez rigide. Prix très important. Uniquement en taille standard. Utilisation obligatoire d'un sous-vêtement. Effet de paroi froide et donc condensation dans le vêtement. Aquaticité très médiocre 	<ul style="list-style-type: none"> Pro : OTS, pompiers... Eaux contaminées. Soudure, découpage...
	Trilaminés	<ul style="list-style-type: none"> Non compressible Pas de variation de flottabilité Bonne durée de vie. Possibilité d'une confection sur mesure. Résistance à l'abrasion. Résistance au poinçonnement. Souple. Sèche plus vite que le néoprène. 	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation obligatoire d'un sous-vêtement. Absorption d'eau Difficile à réparer. Sèche moins vite que l'EPDM Prix assez élevé en fonction de la qualité de la couche extérieure. Effet de paroi froide et donc condensation dans le vêtement. Faible aquaticité 	<ul style="list-style-type: none"> Loisir. Tek.
Néoprène	Cellulaire	<ul style="list-style-type: none"> Peu couteuse. Confection sur mesure possible. Ne nécessite pas l'utilisation d'une souris. Pas d'effet de paroi froide. Bonne aquaticité 	<ul style="list-style-type: none"> Très compressible. Difficile à réparer. Sèche très lentement. Forte variation de flottabilité. Durée de vie assez moyenne. Absorption d'eau. Résistance à l'abrasion et au poinçonnement moyenne. Peu de souplesse. L'isolation thermique diminue en fonction de la profondeur. 	<ul style="list-style-type: none"> Loisir.
	Compressé	<ul style="list-style-type: none"> Effet de paroi froide fortement atténué. Bonne aquaticité. Peu compressible. Faible variation de flottabilité. Confection sur mesure possible. 	<ul style="list-style-type: none"> Difficile à réparer. Sèche plutôt lentement. Durée de vie assez moyenne. Absorption d'eau. Résistance à l'abrasion et au poinçonnement moyenne. Utilisation d'une souris de faible ou de moyenne densité 	<ul style="list-style-type: none"> Loisir. Tek.
	Crushed	<ul style="list-style-type: none"> Effet de paroi froide atténué. Bonne aquaticité. Pas compressible. Pas de variation de flottabilité. Très souple Sèche rapidement Confection sur mesure possible. 	<ul style="list-style-type: none"> Difficile à réparer Prix très élevé Utilisation obligatoire d'un sous-vêtement. 	<ul style="list-style-type: none"> Tek



9.2.3. La tirette

La tirette est un élément essentiel dans la combinaison, c'est aussi une des parties des plus fragile qui demande soins et entretien. Elle peut être dorsale (classique) ou frontale, placée au travers du torse pour faciliter la fermeture seul. Le principe de la tirette étanche consiste à plaquer mécaniquement deux lamelles en latex l'une contre l'autre. Trois critères sont essentiels :



1. La pression sur les lamelles doit être suffisante pour garantir l'étanchéité.
2. Les efforts pour fermer et ouvrir la tirette doivent être humainement possibles.
3. Le système de fermeture doit être irréversible ; la tirette ne peut pas s'ouvrir « toute seule » sous l'action d'une force perturbatrice extérieure.

Pour maintenir la tirette en bon état, il convient de :

- La paraffiner avant chaque plongée.
- La laisser ouverte lors du rangement de la combinaison.
- Rouler la combinaison pour le transport en veillant à ne pas croquer la tirette.

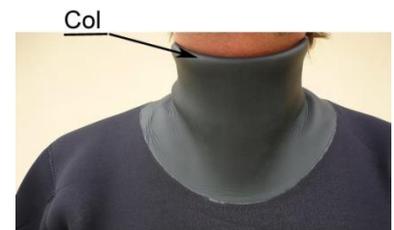
9.2.3.1. Comparaison entre les tirettes dorsales et latérales

Tirette	Avantages	Inconvénients
Dorsale	<ul style="list-style-type: none"> • Tirette plus courte. • Moins couteuse et plus facile à remplacer que la tirette latérale. • Costume facile à rouler, sans croquer la tirette, durant le transport. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficile à fermer seul. • Les bouteilles peuvent poser sur la tirette.
Latérale	<ul style="list-style-type: none"> • Facile à fermer seul. • Les bouteilles ne posent pas sur la tirette. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tirette très longue • Plus chère que la tirette dorsale. • Costume plus difficile à transporter sans risquer de croquer la tirette.

9.2.4. Les joints

Pour maintenir l'étanchéité les combinaisons possèdent des manchettes et un joint au niveau du cou. Manchettes et joints doivent être ajustés à la morphologie du plongeur (encolure et diamètre des poignets). Ils sont fabriqués en latex ou en néoprène avec une face lisse. Le néoprène n'est utilisé que sur les costume « Néoprène », alors que le latex est utilisée indifféremment sur les deux types de combinaison. Une tendance actuelle est de fabriquer des joints en silicone au lieu du classique latex. Ces joints ne sont pas collés mais amovibles pour faciliter le remplacement.

La face lisse du joint néoprène doit se trouver contre la peau du plongeur ce qui oblige le retournement du joint, de manière à former un « col ».



Confort Zone Drysuit





Joint	Avantages	Inconvénients
Latex	<ul style="list-style-type: none">• Très souple.• Facile à enfiler, pas besoin de former un col.• Convient, même en cas de pomme d'Adam proéminente.• Laisse échapper de l'air en cas de blow-up.• Facile à remplacer.• Peu couteux.	<ul style="list-style-type: none">• Fragile.• Obligation de mettre du talc sur le joint.
Silicone	<ul style="list-style-type: none">• Très souple.• Facile à enfiler, pas besoin de former un col.• Convient, même en cas de pomme d'Adam proéminente.• Laisse échapper de l'air en cas de blow-up.• Facile à remplacer.• Très facile à remplacer• Amovible.	<ul style="list-style-type: none">• Fragile.• Obligation de mettre du talc sur le joint.• Très couteux.
Néoprène	<ul style="list-style-type: none">• Solide.• Plus confortable que le latex.• Ne fuit pas, même si la combinaison est en surpression.	<ul style="list-style-type: none">• Obligation de former un col.• Ne laisse pas échapper l'air en cas de blow-up.• Ne convient pas pour tous les types de combinaison.• Difficile à réparer.

9.4. Les sous-combinaisons ou souris

Les sous-combinaisons ou « souris¹⁷ » sont des sous-vêtements isothermiques portés sous la combinaison étanche. Le principe consiste à emprisonner entre les fibres du vêtement le gaz isolant, éviter la circulation de celui-ci et donc son refroidissement. On maintient donc une couche de gaz isolant (air ou argon) entre le plongeur et l'enveloppe de la combinaison. Diverses matières peuvent être utilisées, mais le plus couramment utilisé est le thinsulate associé à du polyuréthane, du nylon et du polyester hygiénique. Le vêtement de qualité dispose généralement de 4 couches qui sont respectivement de l'extérieur vers l'intérieur :

1. Nylon imperméable
2. Polyuréthane pour l'isolation thermique
3. Thinsulate en fibre pour emprisonner le gaz isolant
4. Polyester hygiénique et antiallergique

En outre une sous-combinaison efficace se doit de posséder les qualités suivantes :

- Evacuer facilement la transpiration.
- Même mouillée, elle doit conserver de bonnes propriétés isothermiques.
- Avoir de bonnes propriétés antiallergiques.
- Facile à entretenir et à laver
- Conserver ses propriétés après de nombreux lavages
- Sécher rapidement.



¹⁷ Le terme de « souris » vient des premières sous-combinaisons développées par la société « Viking ». Elles étaient invariablement gris clair et boudinées ce qui faisait ressembler le plongeur à une souris géante.



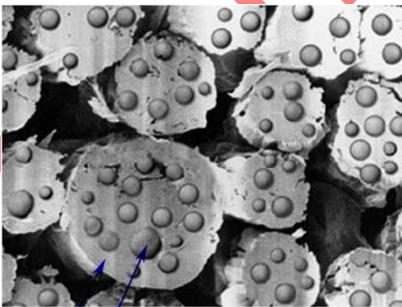
On choisit la densité de la souris, c'est-à-dire indirectement son épaisseur, en fonction de la température du milieu et du type de combinaison utilisée.

9.4.1. Estimation de la densité du sous-vêtement

Le tableau ci-dessous donne une idée relative de la densité du sous-vêtement préconisé en fonction du type de combinaison sèche et de la température de l'eau.

Température	Toilés			Néoprène	
	Trilaminé	EPDM	Crushed	Compressé 7mm	Cellulaire
1	400 gr/m²	400 gr/m²	400 gr/m²	200 gr/m²	100 gr/m²
2					
3					
4					
5					
6					
7	200 gr/m²	200 gr/m²	200 gr/m²	100 gr/m²	50 gr/m²
8					
9					
10					
11					
12					
13	100 gr/m²	100 gr/m²	100 gr/m²	100 gr/m²	50 gr/m²
14					
15					
16					
17					
18					
19					

9.5. T-Shirts en tissus intelligents



Micro capsule
Fibre acrylique

Les tissus intelligents sont des tissus thermorégulateurs issus de la recherche spatiale, ce sont des textiles à changement de phase ou PCM (Phase Change Materials). Les matériaux à changement de phase (PCM) sont capables de créer au niveau de la peau un véritable microclimat. Ils sont capables d'absorber la chaleur corporelle excédentaire, de la stocker et de la restituer lorsque le corps en a le plus besoin. Le résultat est que le plongeur n'a ni trop chaud ni trop froid, qu'il est juste bien, qu'il transpire moins et qu'il frissonne moins. La technologie des PCM fut au départ développée par la NASA, pour protéger les astronautes des fluctuations importantes de température dans l'espace. La société Outlast Technologies Inc. est le pionnier et

le leader mondial en ce qui concerne la R&D ainsi que la commercialisation des PCM. Ce sont des matériaux eutectiques qui passent de la forme solide à la forme liquide à des températures



bien déterminées. Lorsque la température dépasse un certain seuil le PCM se liquéfie en puisant l'énergie dans le milieu extérieur en produisant ainsi un effet rafraîchissant. Lorsque la température descend en dessous d'un certain seuil le PCM restitue l'énergie vers le milieu extérieur en se solidifiant produisant un effet de réchauffement.

Le premier grand défi technologique va consister à produire une « paraffine » dont les changements de phases sont dans la zone de notre confort thermique c'est à dire entre 30° et 32°C. Il va sans dire que les secrets de ces molécules d'hydrocarbures paraffiniques sont bien gardés ! Les autres défis technologiques seront d'intégrer ces matériaux dans les fibres textiles de manière qu'ils conservent leurs caractéristiques même après lavage tout en ayant un tissu présentant une bonne souplesse.

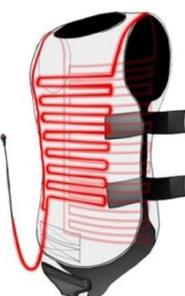
Le véritable secret c'est la micro-encapsulation du PCM. Par la suite les microcapsules sont mélangées à un liant polymère qui servira à enrober les fibres textiles. Le liant étant suffisamment élastique pour conserver la souplesse du tissu. La micro-encapsulation consiste à enfermer un produit dans des microparticules creuses nommées microcapsules. Leur taille peut varier entre 1 et 1000 microns. Les techniques de micro-encapsulation permettent d'emprisonner des substances, solides ou liquides dans une enveloppe qui les isole et les protège du milieu extérieur. Pour l'application qui nous concerne l'enveloppe doit être imperméable. Contrairement à d'autres applications dans le domaine des cosmétotextiles ou l'enveloppe doit être perméable pour laisser filtrer le produit actif. Les procédés sont nombreux et variés. Le choix des techniques va dépendre de la granulométrie désirée, des produits à encapsuler, de la nature de l'enveloppe, de son épaisseur et de la production à obtenir.

Pour être efficace, le T-shirt doit être porté directement sur la peau.

9.6. Le gilet chauffant.



Gilet Thermalution
* Batterie interne
* Commande extérieure sans fil



Veste Santi

Le gilet chauffant se porte sous la combinaison étanche, mais pas directement sur la peau. Il est particulièrement efficace dans des eaux très froides ou sous la glace. Il est composé d'un gilet en Thinsulate, généralement de 200 gr/m², dans lequel on a inséré un fil chauffant.

Pour prévenir les risques d'électrocution la tension d'alimentation du fil ne peut pas dépasser 12v. Le plus souvent l'alimentation se fait par une batterie à l'extérieur de la combinaison, via

un câble qui passe par la vanne d'entrée d'air¹⁸. Certains modèles ont les batteries à l'intérieur de la combi, avec une commande à distance sans fil fixé au poignet¹⁹. Cette solution peut à priori sembler élégante, d'autant plus qu'il est possible de réguler la puissance de chauffe et donc la température à l'intérieur de la combinaison. Mais il ne faut pas perdre de vue qu'en cas de noyage de la combinaison dans de l'eau de mer, la batterie peut diffuser de l'O₂ et de l'H₂ dans la combinaison et ce



Adaptateur Santi



vanne Santi

¹⁸ Soit via une pièce d'adaptation à monter sur la vanne existante, soit via une vanne spéciale à monter à la place de la vanne existante.

¹⁹ La société Thermalution a développé une veste de ce type pouvant être utilisée avec une combinaison humide ou étanche. Le système est garanti étanche jusqu'à 100m de profondeur.



mélange est explosif. Dans tous les cas de figure, le circuit électrique à l'extérieur comme à l'intérieur de la combinaison doit garantir une bonne isolation, même si de l'eau pénètre dans la combinaison. Certains fabricants vont même plus loin, ils proposent en option des combinaisons chauffantes intégrale et des gants chauffants.

9.7. Gants

Les mains étant fortement vascularisées, il est possible de perdre pas mal d'énergie si elles ne sont pas efficacement protégées du froid. Il existe trois types de gants de plongée : les gants humides, les gants étanches et les gants chauffants.

9.7.1. Gants humides.

C'est la manière la plus simple et la plus ancienne de protection contre le froid. Il existe des gants à 5 doigts et des moufles à 3 doigts, qui peuvent s'utiliser, indifféremment, avec des combinaisons humides ou étanches. Le principe est identique aux « costumes humides », l'isolation se fait à l'aide d'une mince couche d'eau réchauffée au contact de la peau. Pour que ces gants soient efficaces, il faut :

- Une épaisseur de minimum 5mm de néoprène.
- Qu'ils soient bien ajustés pour éviter la circulation de l'eau dans le gant.
- Qu'ils ne soient pas trop serrant, pour éviter d'entraver la circulation sanguine.
- Qu'ils soient munis de velcro ou de joints, pour étanchéifier au maximum le gant au niveau du poignet.



9.7.2. Gants étanches.



Nettement plus sophistiqué que les gants humides, l'isolation se fait par l'intermédiaire du gaz isolant venant de la combinaison étanche. Les sous-gants en Thinsulate est placé sous la manchette de la combinaison étanche, afin d'éviter le placage du gant lors de la descente. De cette manière une petite quantité de gaz isolant peut passer de la combinaison étanche vers le gant. L'étanchéité peut se réaliser caoutchouc sur caoutchouc ou à l'aide de pièces de raccordement sur la combinaison.

L'étanchéité caoutchouc sur caoutchouc, globalement moins couteux, ne nécessite aucune pièce de raccordement. Ce système convient pour toutes les combinaisons et est simple à réaliser. Mais présente quelques désavantages par rapport au système à « pièces de raccordement » :

- Le remplacement d'un gant perforé est plus couteux.
- Le risque d'arrachement d'un gant est plus important.
- Difficile d'enfiler les gants seul.



Etanchéité caoutchouc/caoutchouc

Quoique plus couteux à l'achat la plupart des plongeurs optent pour le système à « pièces de raccordement » pour la sécurité de raccordement, la facilité d'équiper et la facilité de remplacement d'un gant percé.



9.7.3. Gants chauffants



C'est le nec plus ultra, ce système combine les gants étanches et le gilet chauffant. Le sous gants est muni d'un fil chauffant qui se raccorde sur la prise du gilet chauffant. Le seul point négatif est le prix particulièrement élevé du système !

9.8. Cagoules

Les cagoules pour eau froide, sont fabriquées en néoprène cellulaire et ont une épaisseur de 5 à 7mm. Généralement elles ne sont pas attenantes aux costumes étanches. Pour éviter une circulation d'eau importante elles sont munies d'un joint facial présentant une face interne lisse (glide skin). Pour protéger efficacement la nuque, la collerette doit être longue²⁰ de manière à recouvrir largement le joint de la combinaison étanche. La partie inférieure de cette collerette descend largement sur le dos, les épaules et la poitrine.

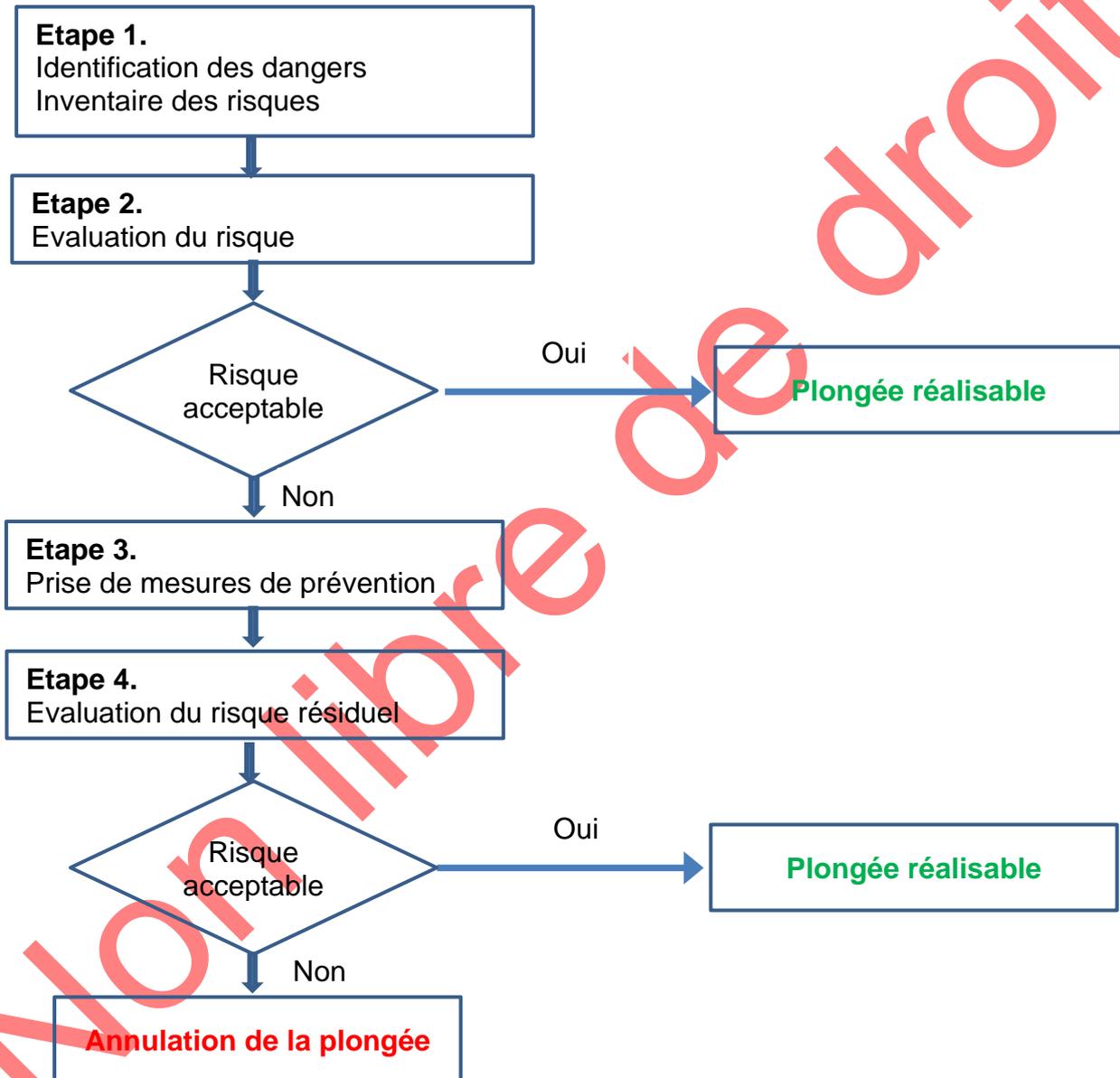


²⁰ Ce qui n'est pratiquement jamais le cas avec les cagoules standards livrées avec les costumes étanches.



10. ANALYSE DES RISQUES.

L'analyse des risques est une science largement répandue dans le milieu industriel et notamment au niveau de la plongée professionnelle²¹. On peut s'en inspirer pour analyser et quantifier le risque en plongée loisir et plus particulièrement en plongée solo. Cette analyse vise à identifier les risques (danger), les facteurs de risques, les quantifier et les prévenir d'une manière systématique. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer le risque, la plus courante est la méthode Kinney.



²¹ Opérateur en Travaux Subaquatiques



10.1. Définitions

- **Danger** : Tout élément qui peut mettre en péril l'intégrité physique et la sécurité du plongeur.
- **Exposition** : durée d'exposition au danger.
- **Domage** : Atteinte à l'intégrité physique ou psychologique du plongeur.
- **Risque** : Probabilité pour qu'un « Domage » se produise.
- **Risque résiduel** : Risque qui subsiste lorsque les mesures de prévention ont été prises.
- **Facteur de risque** : Élément ou évènement qui peut engendrer un « Domage ».
- **Prévention** : Toutes mesures pour limiter le « Risque », éviter les « Dommages » ou les atténuer.
- **Probabilité** : Paramètre variable en fonction de la nature du « Risque ».

10.2. Méthode Kinney

La Méthode Kinney est une méthode d'hierarchisation des risques et pas une méthode de dépistage des risques. Elle présente l'avantage d'être facile, rapide et de quantifier le risque. Le postulat de départ indique que le Risque est proportionnel à la probabilité (P), à l'exposition (E) et la gravité des conséquences possibles (G). Ce qui conduit à écrire la formule suivante :

$$Rk = G \times E \times P$$

Cette formulation ne tient pas compte de la formation et de l'expérience. Malchaire J. & Koob J-P²² proposent d'en tenir compte en affectant la formule précédente d'un facteur (F), sans toutefois donner un tableau de valeur. La relation devient donc :

$$Rk = G \times E \times P \times F$$

Avec :

- Rk : Risque estimé suivant la méthode Kinney.
- G : Gravité des conséquences possibles (Domage).
- E : Durée d'exposition au facteur de risque.
- P : Probabilité d'émergence du dommage pendant la durée d'exposition.
- F : Facteur qui tient compte de la formation et de l'expérience.

Des tableaux donnent pour ces trois facteurs des valeurs numériques²³. L'estimation du « score » du risque est le produit de ces facteurs. Le score ainsi obtenu peut être nuancé en fonction de la formation, l'expérience et la pratique régulière ou non du plongeur. Ce score permet à tout un chacun d'estimer si le risque est acceptable ou non.

La première difficulté consiste à faire l'inventaire des facteurs de risque. Il n'est pas facile de ne rien oublier ! La seconde difficulté, qui est de loin la plus gênante consiste à calculer le « score ».

²² Fiabilité de la méthode Kinney d'analyse des risques - Malchaire J. & Koob J-P – Université catholique de Louvain

²³ Les tableaux originaux donnaient une échelle de coût. Dans le cadre de la plongée, je n'ai pas trouvé utile de les reprendre. D'autant plus que les originaux datent de 30 ans, sans mise à jour des valeurs !



Celui-ci peut fortement varier en fonction de l'observateur, de son expérience, de sa sensibilité, de sa formation, de son niveau d'études, de son expérience de terrain... D'après l'étude de Malchaire J. & Koob J-P²⁴, le « score » varie en fonction en fonction de l'observateur dans une fourchette de 1 à 15.

10.2.1 Tableaux des facteurs G, E et P

10.2.1.1. La « Gravité » (G)

Gravité	Conséquences	Valeur
Catastrophique	Nombreux morts	100
Désastre	Quelques morts	40
Très grave	Un mort	15
Sérieux, grave	Blessure sérieuse, invalidité permanente	7
Important	Blessure incapacitante	3
Incident	Petite blessure non incapacitante	1

10.2.1.2. L'« Exposition » (E)

Exposition	Valeur
En continu	10
Régulièrement, de l'ordre d'une fois par jour	6
De temps à autre, de l'ordre d'une fois par semaine	3
Parfois de l'ordre, d'une fois par mois	2
Quelques fois par an	1
Maximum une fois par an	0,2

10.2.1.3. La « Probabilité » (P)

Probabilité	Valeur
Probable	10
Possible	6
Inhabituel mais possible	3
Petite possibilité dans des cas limites	1
Concevable mais peu probable	0,5
Pratiquement impossible	0,2
A peine concevable	0,1

²⁴ Fiabilité de la méthode Kinney d'analyse des risques - Malchaire J. & Koob J-P – UCL



10.2.2 Tableaux de l'évaluation du « Risque » (Rk)

En fonction du « score » ce tableau indique le degré d'acceptabilité du risque.

Valeur	Evaluation	Action
Rk > 400	Risque très élevé	Risque tout à fait inacceptable
200 < Rk ≤ 400	Risque élevé	Mesures de correction impératives
70 < Rk ≤ 200	Risque important	Adopter des mesures de correction
20 < Rk ≤ 70	Risque moyen	Attention particulière requise
Rk < 20	Risque faible	Acceptable

10.3. Application de la méthode Kinney

Risque	Degré engagement de la plongée et Conditions particulières	Facteurs / score				Préventions	Risque résiduel			
		G	E	P	Rk		G	E	P	Rk
Hypothermie		15	1	3	45	limiter le temps de plongée, combinaison étanche, vêtements chauds, boissons chaudes	15	1	0,5	7,5
Givrage du détendeur		15	3	6	270	Deux détendeurs séparés. Free flow stop, soupape de suppression	15	3	0,2	9
ADD		15	3	1	45	Durcir le mode de décompression O ₂ sur le site, moyen d'évacuation rapide. Limiter le degré d'engagement	15	3	0,2	9
Oedème		7	3	1	21	O ₂ sur le site, moyen d'évacuation rapide. Limiter le degré d'engagement	7	3	0,2	9
Hydrocution		15	3	1	45	O ₂ sur le site, combinaison étanche	15	3	0,1	4,5

Note : le tableau est basé sur l'expérience de l'auteur est n'est donné qu'à titre didactique. La probabilité (P) a été estimée avec le plus de rigueur possible. Néanmoins, comme expliqué au chapitre précédent, celle-ci dépend grandement du ressenti. De ce fait il y a toujours une part de subjectivité. L'exposition (E) a été estimée en fonction d'un plongeur régulier qui plonge au minimum 5 fois par mois. Chacun devra adapter les facteurs en fonction de son style de plongée et des circonstances locales. Le partage du matériel avec le compagnon de plongée n'est pas considéré comme une option valable. La liste n'est pas exhaustive