



LA PLONGEE EN COMBINAISON ETANCHE

JEAN-CLAUDE TAYMANS



**Comment et pourquoi
plonger en combinaison
étanche ?**

**Les choisir, les utiliser,
les entretenir**

Version 1.0
2025-2026



Photo de couverture :

Rawpixel, Libre de droit (www.rawpixel.com)

Non libre de droit



La plongée en combinaison étanche

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 physique et mentale. 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.

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

Copyright © Jean-Claude Taymans, tous droits réservés
2 Rue Mouzin – 7390 Wasmuël – Belgique
jctdive@gmail.com
D\Décembre 2025\Jean-Claude Taymans : Editeur
ISBN 978-2-930747-27-9



Table des matières

TABLEAU DES MISES A JOUR ET MODIFICATIONS.....	7
CHAPITRE 1.....	8
LES FONDAMENTAUX	8
INTRODUCTION	9
UN BREF HISTORIQUE	13
AVANTAGES ET INCONVENIENTS	15
L'ÉTANCHE POUR QUEL TYPE DE PLONGEUR ?	16
LE VRAI ET LE FAUX.....	16
CHAPITRE 2.....	19
FLOTTABILITE ET STABILITE	19
NOTIONS DE PHYSIQUE	20
FORCES AGISSANT SUR LE PLONGEUR	21
STABILITE ET INSTABILITE.....	24
INSTABILITE EN FONCTION DU SUR LESTAGE	27
QUANTITE D'AIR A INSUFFLER DANS LE COSTUME	28
CHAPITRE 3.....	29
PREVENTION DES ACCIDENTS.....	29
LES RISQUES SPECIFIQUES	30
ANALYSE DE RISQUES.....	39
CHAPITRE 4.....	45
DESCRIPTION DES COMBINAISONS ETANCHES	45
SYNOPTIQUE DES COMBINAISONS ETANCHES	46
COMBINAISONS A PAROIS MINCES (MEMBRANE)	47
COMBINAISONS NEOPRENE	55



La plongée en combinaison étanche

COMBINAISONS EN NEOPRENE COMPRESSE	56
JOINT DU COU (NECK SEAL)	58
CAGOULES.....	65
COMPARAISONS ENTRE LES TYPES DE CAGOULES	70
MANCHETTES	70
BOTTES ET CHAUSSONS.....	74
TUYAU D'INFLATEUR.....	75
TIRETTE.....	77
VALVES	79
SOUPAPE DE PURGE	81
CONFIGURATION DU SCAPHANDRE.....	86
CHAPITRE 5.....	88
PROTECTIONS ISOTHERMIQUES	88
RAPPEL DE LA THERMODYNAMIQUE	89
ISOTHERMIE ET INDICES R, CLO, TOG	91
PRINCIPE DE LA PROTECTION CONTRE LE FROID	92
LES PROTECTIONS THERMIQUES.....	97
LE GILET CHAUFFANT.....	101
GANTS	103
CHAPITRE 6.....	109
LES ACCESSOIRES	109
LE LESTAGE.....	110
LES SYSTEMES DE FLOTTABILITE	110
LES RENFORTS DE COUDE ET DE GENOU	111
LES POCHES	111
LA TIRETTE PIPI.....	112
LA PURGE PIPI (PEE VALVE)	112
CHAPITRE 7.....	113



La plongée en combinaison étanche

UTILISATION DES COMBINAISONS ETANCHES	113
PREPARATION	114
TRANSPORT	114
LA TECHNIQUE D'HABILLAGE	115
LA PLONGEE ET LE CONTROLE DE LA FLOTTABILITE.....	117
DESEQUIPEMENT	119
ENTRETIEN	120
RANGEMENT.....	121
REPARATIONS	121
CHAPITRE 8.....	124
UTILISATION DE L'ARGON	124
L'ARGON C'EST QUOI ?	125
LE MATERIEL	126
REPLISSAGE DE LA BOUTEILLE	126
CHAPITRE 9.....	129
LES EAUX CONTAMINEES	129
OBJECTIF DE CE CHAPITRE.....	130
TYPE DE CONTAMINATION.....	130
EFFET DE LA CONTAMINATION.....	130
ANALYSE DE RISQUES.....	131
COMPOSITION DE L'EQUIPE DE PLONGEE.....	132
TYPE DE COMBINAISON A UTILISER.....	133
DECONTAMINATION.....	135
CRITERES DE REUSSITE	135
CHAPITRE 10.....	137
QUELQUES CRITERES DE SELECTIONS.....	137
QUELQUES REFLEXIONS DE BASE.....	138



La plongée en combinaison étanche

ANALYSE DES COUTS	140
CHAPITRE 11.....	142
CALCUL DU BILAN THERMIQUE	142
EVALUATION DES PERTES THERMIQUES.....	143
EVALUATION DU BILAN THERMIQUE ET DE LA DETTE THERMIQUE	150
BILANT THERMIQUE, EXEMPLE NUMERIQUE	151
BIBLIOGRAPHIE.....	155

TABLEAU DES MISES A JOUR ET MODIFICATIONS.

Version	Date	Remarques
Vers. 1.00	Décembre 2025	Version originale



CHAPITRE 1

LES FONDAMENTAUX

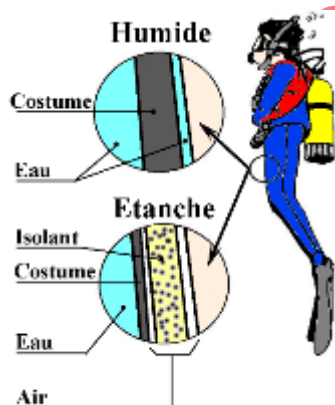
- Introduction
- Un bref historique
- Avantages et inconvénients
- L'étanche pour quel type de plongeur ?
- Le vrai et le faux

Non libre de droit



Introduction

Sous nos latitudes, avec notre climat tempéré froid, la plongée subaquatique serait totalement impossible sans combinaisons isothermiques. Les combinaisons humides ne nous permettraient que de plonger confortablement 3 à 5 mois par an ! Le reste du temps la plongée prendrait des allures de « galère », ne ressemblant plus à une activité de loisir, mais à un combat acharné contre le froid. Il a fallu attendre la mise sur le marché, il y a plus de 30 ans, de vêtements étanches fiables à des prix démocratique afin de pouvoir, enfin, exercer notre activité favorite durant toute l'année. Ils sont utilisés depuis des décennies par les OTS¹, mais la pénétration du marché de la plongée récréative par les « secs » ne s'est faite que très progressivement et pas toujours sans heurts ni quolibets. Dans les années quatre-vingt certains plongeurs équipés en « sec » se sont même vu refuser l'accès à des carrières. Mais depuis, fort heureusement, beaucoup d'eau a coulé sous les ponts et l'utilisation de costumes étanches est tout à fait entrée dans les mœurs.



La différence essentielle entre les costumes humides, semi-étanche et les vêtements étanches est le mode d'isolation. Pour les combinaisons humides et semi-étanches l'isolation est assurée par un fin film d'eau qui se réchauffe au contact de la peau et qui reste emprisonné entre la peau et la combinaison. Pour les vêtements étanches l'isolation est assurée par l'air se trouvant à l'intérieur de la combinaison.

Figure 1- Type d'isolation

¹ OTS : Opérateur en travaux subaquatiques.



La plongée en combinaison étanche

La conductivité thermique de l'air est de 20 à 25 fois inférieure à celles de l'eau, ce qui revient à dire que par rapport à l'eau, l'air va retirer 25 fois moins rapidement la chaleur du corps. De plus la chaleur spécifique de l'air est 800 à 1000 fois moins élevée que celle de l'eau. Par rapport à l'eau la quantité de chaleur retirée par l'air sera donc nettement moindre. Notre température de neutralité thermique qui est de l'ordre de 25°C dans l'air, passe à 33°C dans l'eau. L'eau nous est donc, d'un point de vue thermique, beaucoup plus agressive que l'air. Nous avons de ce fait tout avantage à avoir de l'air comme isolant et non de l'eau, même chaude.

Les vêtements semi-étanches sont des vêtements avec ou sans tirettes, munis de joints qui permettent de limiter très fortement les entrées d'eau et surtout la circulation de l'eau dans le vêtement. Ces costumes ne possèdent pas de soupapes et ne sont pas gonflables. Ils sont fabriqués en néoprène cellulaire ou en lycra d'une épaisseur de 5 à 8 mm en exécution mono-pièce ou en un ensemble de deux pièces comprenant une veste et un pantalon (long john).

Les vêtements étanches, plus populairement appelés volume, étanche, costume sec, dry-suit. Ils répondent à une recherche maximaliste de la protection isothermique en minimisant les déperditions calorifiques dues au contact de la peau avec l'élément liquide. Le corps du plongeur est maintenu au sec dans le vêtement par l'intermédiaire de joints et de bottes. Néanmoins dans la plupart des costumes le visage et les mains sont nus.

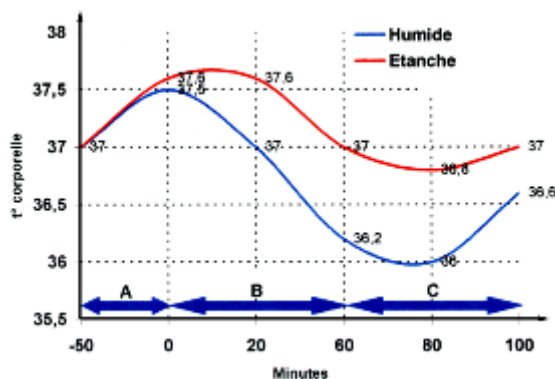
Ils sont munis d'une vanne de gonflage et d'une soupape de purge qui peut être automatique ou semi-automatique. Ces soupapes sont destinées respectivement à l'introduction d'air dans le costume afin d'assurer l'isolation thermique, la bonne tenue des joints, et l'évacuation de l'air. L'évacuation de l'air est nécessaire pour assurer l'équilibre en fonction de la profondeur.



La plongée en combinaison étanche

On distingue deux catégories de vêtements. Les vêtements en tissu mince (membrane) qui sont par construction faiblement isothermique et qui requièrent l'utilisation obligatoire de sous-vêtements chauds. Ces sous-vêtements sont communément appelés « souris »² ou « wooly bear ». Les costumes en néoprène cellulaire épais, qui présentent une bonne isothermie et ne nécessitent pas le port obligatoire d'une souris. Une souris est cependant conseillée étant donné que l'isothermie du vêtement en néoprène décroît en fonction de la profondeur.

Par rapport aux costumes humides, l'utilisation d'un costume étanche supprime totalement le choc thermique lors de la mise à l'eau. Il améliore considérablement l'isolation thermique, la chute de température corporelle ainsi que la fatigue après plongée, principalement lors de plongées successives. Ce qui a pour conséquence de réduire le risque d'accident de décompression.



Le graphique (Fig 2) donne la variation de la température corporelle d'un plongeur équipé d'un costume étanche ou d'un costume humide mono-pièce de 7mm.

La température de l'eau étant de 14°C. La durée de la plongée est de 60 minutes et débute au temps $t=0$.

Figure 2 - Variation de la température corporelle

- A. De -50 à 0 minutes : habillage.
- B. De 0 à 60 minutes : durée de la plongée.
- C. De 60 à 100 minutes : plongeur en surface.

² Note de l'auteur : les premières « souris » mises en vente par la société Viking » étaient grises et boudinées. Elles faisaient penser à une souris !



La plongée en combinaison étanche

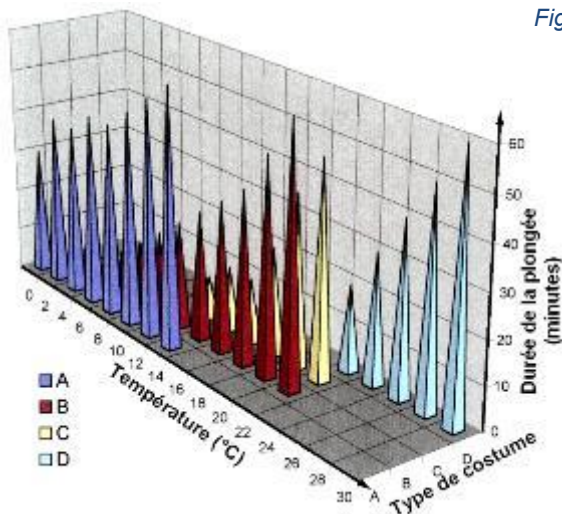


Figure 3 - Domaine d'utilisation

- A. Costume étanche.
- B. Semi-étanche 7mm.
- C. Humide 8 mm.
- D. Humide 3 mm.

Le graphique (fig 3) représente le domaine d'utilisation des différents types de costumes. Ces courbes représentent la durée de plongée qu'on peut envisager d'effectuer confortablement à -20m en fonction du type de costume et de la température.

De l'examen des graphiques on peut tirer les conclusions suivantes :

- le costume en néoprène de 3mm est exclusivement réservé à des eaux tropicales ;
- la seule façon de plonger confortablement en hiver sous nos latitudes est d'utiliser un costume étanche ;
- l'utilisation d'un semi-étanche peut sembler être une alternative mais les durées de plongée sont fort réduites en hiver.

L'utilisation d'un vestiaire par temps froid devient totalement superflue, car on peut mettre le costume au-dessus de ses vêtements. Ce qui rend ce type de costume particulièrement intéressant pour les plongées faites du bord (Bretagne, Zélande...). La construction en série de ces costumes en a largement réduit le coût, ce qui met ce type de matériel à la portée des plongeurs récréatifs.



Un bref historique



Figure 4 – Pied lourd

En 1837, Auguste (Augustus) Siebe³ met au point une la première combinaison étanche en toile imperméabilisée, surnommée « peau de bouc » par les scaphandriers de l'époque. Cette combinaison sans gants ni soupapes était directement reliée au casque du scaphandrier. Afin de contrôler la flottabilité, une soupape d'admission d'air et une soupape de purge furent placées sur le casque. Cette combinaison s'enfilait par le cou.

En 1946, le commandant Cousteau⁴ met au point une combinaison étanche dite à « volume constant » car conçue pour conserver, malgré les variations de pression, un volume intérieur constant. Des purges au niveau de la tête, des poignets et des chevilles permettaient à l'air excédentaire de s'échapper. Cette combinaison n'avait pas de vanne d'entrée d'air, le plongeur devait souffler par le nez de l'air dans la cagoule⁵ ! cette combinaison sera commercialisée en 1950 par la Spirotechnique.

³ Augustus Siebe (1788 -1872) ingénieur allemand naturalisé anglais.

⁴ Jacques-Yves Cousteau ou commandant Cousteau (1910 - 1997) officier de la Marine nationale, explorateur océanographique français.

⁵ Note de l'auteur : Je n'ose même pas imaginer l'inconfort... C'était une autre époque.



La plongée en combinaison étanche

En 1956, Bev Morgan⁶ est le premier à utiliser une tirette étanche et résistante à la pression. Tirette issue des recherches dans le domaine spatial. Il confectionna une combinaison en néoprène munie d'un inflateur buccal. A la même époque, Ingvar Elfström⁷ conçoit la combinaison en néoprène UNISUIT. C'est la première combinaison réellement moderne qui intègre : joints, tirette, soupape d'air avec inflateur et une purge d'air. En parallèle deux plongeurs suédois Jörn Stubdal et Stig Insulan développent une combinaison en caoutchouc vulcanisé qui sera commercialisé par la société Viking. Ils perfectionnent la purge d'air en 1960 en se basant sur la purge de casque des scaphandriers. Leur conception est encore utilisée de nos jours.

1980, la révolution commerciale ! Viking avec son modèle « sport » en caoutchouc vulcanisé de 750 gr/m² se lance sur le marché de la plongée récréative. Les dogmes ayant la vie dure, le succès n'est pas immédiat. Néanmoins petit à petit l'idée suit son chemin et d'autres fabricants vont emboîter le pas aux précurseurs.



Figure 5 – Combinaison « Viking »

⁶ Bev Morgan (1932 -2018) américain, concepteur de matériel et instructeur.

⁷ Bengt Ingvar Elfström (1928 - 1998) inventeur et pionnier suédois de la plongée.



Avantages et inconvénients

Le costume étanche présente des avantages indéniables dans les eaux tempérées froides. L'inconvénient majeur est son prix élevé, ce qui freine son expansion au niveau de la plongée récréative.

Avantages

- Une isothermie largement meilleure au costume humide ou semi-étanche, ce qui retarde le refroidissement du plongeur.
- L'isothermie varie peu avec la profondeur, principalement pour les combinaisons membranes (toilées).
- Pas de choc thermique à la mise à l'eau.
- Pas de contact avec l'eau, le plongeur reste au sec.
- Augmentation du temps d'immersion tout en conservant un bon confort.
- Diminution des risques d'hypothermie, d'accident de décompression et d'essoufflement.
- Permet de plonger toute l'année dans les zones géographiques froides et même glaciales.
- Permet des plongées plus extrêmes : plongée sous glace...
- Possibilité d'enfiler la combinaison au-dessus des vêtements. Fini les déshabillages dans le froid, le vent et la pluie.

Inconvénients

- Prix élevé.
- Nécessite un lestage plus important qu'en humide.
- Nécessite un entretien plus important et rigoureux, notamment au niveau de la tirette et des joints.
- Risque d'hyperthermie (coup de chaleur) si le plongeur reste trop longtemps au soleil avec la tirette fermée.



La plongée en combinaison étanche

- Risque d'humidité, lié à la transpiration et à un phénomène de paroi froide. C'est-à-dire la condensation de l'humidité de l'air au niveau de la paroi intérieure des costumes membranes. Cet inconvénient est éliminé si on injecte de l'argon en lieu et place de l'air.
- Moins hydrodynamique et généralement plus lourde que les combinaisons humides.
- Elles nécessitent une petite formation supplémentaire, qui peut très bien se faire par compagnonnage.

L'étanche pour quel type de plongeur ?

A priori pour tous les plongeurs adultes et les adolescents en fin de croissance, sans distinction d'âge et de sexe, qui plongent régulièrement dans des eaux dont la température est inférieure à 14°C et qui souhaitent un certain confort thermique. Pour les plongeurs techniques qui font des plongées profondes et longues au Trimix. Pour les photographes qui restent longtemps immobile.

Le vrai et le faux

C'est très cher.	Vrai	C'est exact mais il faut nuancer. Si à l'achat le prix est élevé, la durée de vie des combinaisons étanches est plus importante que celle des humides.
C'est pour les « chochottes ».	Faux	Argument fallacieux, à la limite de l'insulte. Très utilisé dans les années 80-90 par les « vieux de la vieille ». Pourquoi se priver de confort et de sécurité !
Garde au chaud toute seule.	Faux	C'est l'air emprisonné dans la combinaison et la souris qui assurent l'essentiel de l'isolation thermique.
Il faut une formation	Vrai	Pour connaître et gérer les risques spécifiques.



La plongée en combinaison étanche

Pour les eaux très froides	Faux	Elles peuvent être utilisées dans les eaux chaudes en ajustant l'épaisseur des sous-vêtements et elles sont pratiquement indispensables lorsque la température de l'eau est en dessous de 12°C.
Dangereux à utiliser	Faux	Les risques liés au froid sont en grandes parties éliminés. Les risques spécifiques que le « blow-up » sont contrôlables.
Inconfortable	20% vrai 80%Faux	Elles sont moins hydrodynamiques que les humides. Les progrès réalisés dans les matériaux et la conception les rendent plus confortables.
Pour les Tek uniquement	Faux	Indispensable pour le Tek mais aussi pour le plongeur récréatif qui cherche le confort thermique.
La formation est difficile	Faux	Il suffit de quelques heures en milieu protégé pour apprendre à gérer le costume.
Il faut un carte de certification	30% vrai 70%Faux	Rarement si vous venez avec votre propre matériel. Si vous louer l'étanche, certains centres vont vous demander une carte de certification, ou tenter de vous vendre la formation !
Pas pour les débutants	Faux	Dans les pays froids, la formation initiale se fait directement en étanche.
Pas pour les femmes !	Archi faux	Heureusement on entend de moins en moins cette remarque sexiste.
Il faut plus d'entretien	Vrai	Il être particulièrement attentif à la tirette et aux joints.
Difficile à réparer	50% vrai 50%Faux	Le remplacement de la tirette et des joints est assez délicat. Il vaut mieux s'adresser à un magasin. Les petites fuites se résolvent facilement avec une colle adéquate ou une rustine pour les combinaisons EPDM.
Réparations couteuses	80% vrai 20%Faux	Le remplacement de la tirette et des bottes sont très couteux. Le coût de remplacement des joints est assez raisonnable et le prix des petites réparation dérisoire.
Remplace la stab (BCD)	Faux	Même si la flottabilité est totalement gérée par l'étanche, la stab (BCD) sert de redondance pour la sécurité.
Il faut plus de lestage	Vrai	Il faut quelques kilos en plus par rapport à ue combinaison humide. Le lestage dépend de la quantité de sous-vêtements.



La plongée en combinaison étanche

Pas de Nitrox dans la combinaison.	50% vrai 20%Faux	On peut utiliser sans problème, pour gonfler la combinaison, du Nitrox ayant jusqu'à 40% d'oxygène. Au-delà de ce pourcentage d'oxygène il y a un risque d'inflammation ⁸ .
Pas de Trimix dans la combinaison.	Vrai	L'hélium est un gaz frigorigène, qui aura tendance à refroidir l'organisme. Sa conductivité thermique est défavorable est préjudiciable à l'isothermie. Il est à proscrire pour gonfler la combinaison.
L'argon ne sert à rien.	Faux	L'argon a un pouvoir isolant 2 à 3 fois supérieur à celui de l'air. De plus c'est un gaz sec. Contrairement à l'air il ne provoque pas de condensation dans la combinaison par le phénomène de paroi froide.

⁸ Rappeler-vous les astronautes d'Apollo 1 (Virgil Grissom, Edward White et Roger Chaffee) qui ont brûlé vif lors des essais de la capsule.



CHAPITRE 2

FLOTTABILITE ET STABILITE

- Rappel des notions de physique
 - Les unités
 - Principe d'Archimède
- Forces agissant sur le plongeur
- Stabilité et instabilité
 - Instabilité en profondeur
 - Instabilité en fonction du lestage
 - Quantité d'air à insuffler dans le costume

La physique permet de déterminer le lestage et sa répartition, mais aussi les conditions de stabilité du plongeur, qui est la faculté de rester facilement en équilibre à une profondeur donnée. Cette stabilité sera bien sûr fonction du type de combinaison qu'il utilise. La physique permet également d'établir les caractéristiques isothermiques des combinaisons.



Notions de physique

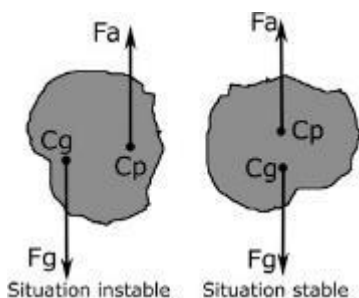
Les unités

Les unités fondamentales			
Type	Unité	Sym.	Remarques
Longueur	mètre	m	
Temps	seconde	s	
Masse	kilogramme	kg	Ne pas confondre avec le « poids, la masse représente une quantité de matière et est invariable quel que soit l'endroit de l'univers
Température	Kelvin	K	K= °Celsius + 273,15

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



Le principe d'Archimède



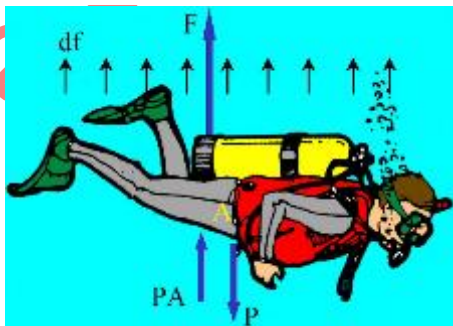
Tout corps plongé entièrement dans un fluide (gaz ou liquide) reçoit de la part de celui-ci une poussée (F_a) verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du volume de fluide déplacé.

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

Forces agissant sur le plongeur

Figure 6 – Equilibre horizontal

Le plongeur est soumis à des forces antagonistes. Pour pouvoir déterminer la répartition du lestage il est indispensable de les identifier et de définir leurs caractéristiques. Pour la simplification, on considère que le plongeur est en équilibre, qu'il n'y a pas de courant et qu'il ne palme pas. Ces forces sont :



- La poussée d'Archimède qui est une force verticale dirigée de bas en haut appliquée au centre de poussée. Celui-ci est le centre de gravité de la masse de liquide déplacé. La poussée d'Archimède est égale au poids du volume de liquide déplacé (PA).



La plongée en combinaison étanche

- Le poids du plongeur et de son équipement qui est une force verticale dirigée de haut en bas appliquée au centre de gravité du plongeur c'est-à-dire au près du nombril (P).
- Des forces (df) réparties le long du corps et qui sont dues à la présence d'air dans le costume. Ces forces sont dirigées de bas en haut et sont uniformément réparties si le plongeur est à l'horizontal.
- La résultante des forces élémentaires df est la force (F), qui est dirigée de bas en haut et dont le point d'application se trouve près du centre de poussée, uniquement si le plongeur est horizontal ou vertical.
- La mécanique rationnelle nous apprend que pour que l'équilibre se réalise, il faut que les deux conditions suivantes soient réunies simultanément :

1. La somme géométrique de ces forces doit être nulle.
2. Le couple résultant doit être nul. Comme toutes les forces sont verticales, cela veut dire que les résultantes de ces différentes forces doivent se trouver sur une même verticale.

Figure 7- Lestage correct, plongeur en équilibre

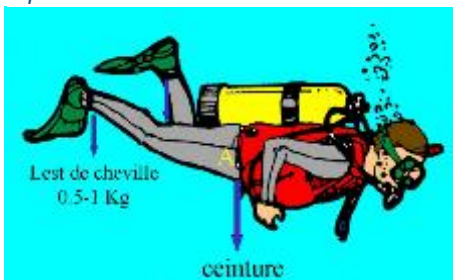


Figure 8 – Rupture de l'équilibre



Equilibre des forces et des moments

$$F = \sum df = \int df \quad (1) \quad \sum F_k = \vec{F} + \vec{P} + \vec{PA} = 0 \quad (2)$$

$$\sum \vec{M}_o(F_k)_A = \sum \vec{M}_o(df)_A + \vec{M}_o(P)_A + \vec{M}_o(PA)_A + \vec{M}_o(FL)_A = 0 \quad (3)$$

$$\vec{M}_o(df)_A = \int df \times dl \quad (4)$$

$$\vec{M}_o(P)_A = P \times Lp \quad (5)$$

$$\vec{M}_o(PA)_A = PA \times LpA \quad (6)$$

$$\vec{M}_o(FL)_A = F1 \times LFl \quad (7)$$

Avec :

Fl = Lest de cheville

Lp = bras de levier de la force P

Lpa = bras de levier de la force PA

LFl = bras de levier des forces F1

On constate sur les dessins (Fig. 7 et Fig. 8) que l'équilibre horizontal est assez fragile à cause de la grande distance entre les extrémités du plongeur et le centre de gravité (A). Le bras de levier (dl) des forces (df) dues à la présence d'air dans le costume est très important. Ce qui signifie qu'une faible variation de volume d'air au niveau des chevilles peut entraîner le plongeur tête vers le bas avec l'impossibilité de purger le costume et engendrer une remontée incontrôlée en « blow-up ». Le bras de levier (de la résultante des forces df) croît lors de la rotation, ce qui signifie que le déséquilibre va aller en s'accroissant au cours de la rotation.

Pour atténuer ce phénomène, il est conseillé de répartir le lest le long du corps en plaçant par exemple un demi à un kilogramme de plomb à chaque cheville. Pour combattre ce phénomène il faut réduire le bras de levier (dl), ce qui peut se faire en ramenant les genoux sous le ventre. Il est également inutile d'avoir un volume d'air trop important dans le costume. Il faut veiller à ne pas être trop lesté. L'accumulation d'air au niveau des chevilles entraîne un déplacement du point



La plongée en combinaison étanche

d'application de la force (F) vers l'extrémité du pied, ce qui engendre un couple de rotation (MF) qui tend à redresser le plongeur en position verticale. Ce mouvement est contrarié par le couple de rotation (MFI) qui est engendré par le lest des chevilles (FI).

Stabilité et instabilité

Comme nous l'avons vu, la stabilité est la faculté que possède le plongeur de maintenir facilement son équilibre à une profondeur donnée. Cette stabilité sera fonction de la profondeur, du type de costume utilisé, du sur ou du sous lestage et de l'ajustement de la combinaison. Un plongeur sera dit stable s'il reste facilement à une profondeur donnée ; Il sera dit instable si pour une petite action perturbatrice son niveau de profondeur varie fortement. Pour résumé, on parle d'instabilité lorsque la moindre perturbation de la position d'équilibre du plongeur amplifie la perturbation. Il est possible d'évaluer l'importance de cette instabilité à l'aide des lois physiques, Boyle-Mariotte entre autres. La stabilité peut s'étudier de deux façons différentes :

- La première, l'instabilité en fonction de la profondeur, consiste à étudier quelle est la variation de volume du plongeur et de son équipement, lorsqu'il effectue une remontée d'un

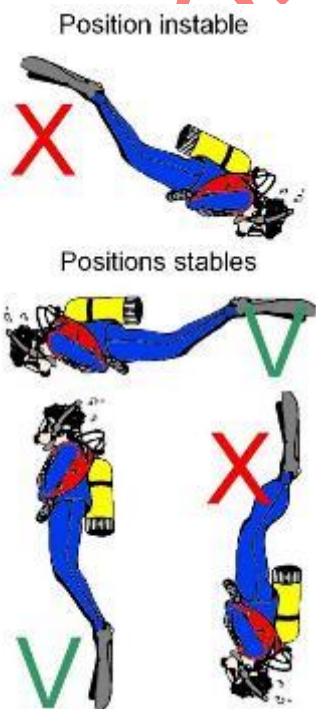


Figure 9 – Stabilité

Les positions horizontales et verticales sont stables. Un plongeur en costume étanche ne doit pas être tête vers les bas !



La plongée en combinaison étanche

mètre. Cette étude est faite sur un plongeur bien équilibré et à différentes profondeurs.

« Plus la variation de volume est faible, plus le plongeur est stable. »

- La seconde, l'instabilité en fonction d'un sur lestage, consiste à étudier quelle est la variation de volume du plongeur et de son équipement, lorsqu'il effectue une remontée d'un mètre. Cette étude est faite sur un plongeur surlesté à une profondeur constante. Les courbes sont tracées en fonction de la variation de la surcharge pondérale.

« Plus la variation de volume est faible, plus le plongeur est stable. »

Les courbes ci-après ne sont données qu'à titre didactique. Elles supposent que les vêtements soient parfaitement ajustés aux mesures du plongeur. Ce qui est rarement le cas avec les combinaisons en tissu mince. Elles sont néanmoins fort intéressantes pour établir des comparaisons.

Instabilité en profondeur

Ces courbes (Fig. 10) représentent la variation de volume en litres des costumes pour une variation de niveau d'un mètre en fonction de la profondeur.

L'utilité de ces courbes est double, elles permettent de calculer mètre après mètre la quantité d'air qu'il faut insuffler dans le costume lors de la descente et de calculer la quantité d'air à extraire du costume lors de la remontée. Ces données permettent de calibrer les soupapes. Le plongeur est lesté pour être en équilibre sans air dans le costume en surface.



La plongée en combinaison étanche

Figure 10 – instabilité

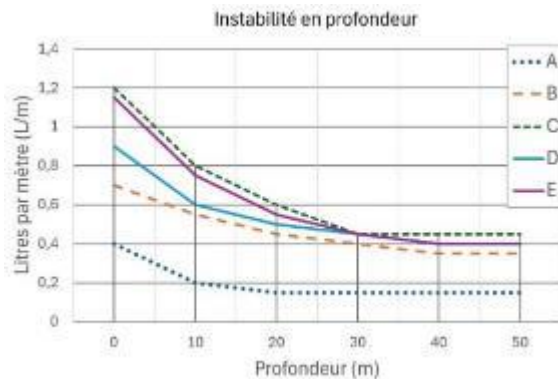
A : Plongeur nu, La variation de volume est uniquement due à la variation du volume des parties creuses de l'organisme.

B : costume humide 8 mm.

C : costume étanche néoprène 6,5 mm.

D : costume sec tissu mince.

E : costume sec néoprène compressé 4 mm



Conclusion

- Un costume en tissu fin est moins instable qu'un costume en néoprène.
- Le costume en tissu mince à partir de 20 m est aussi stable qu'un costume humide.
- Le costume en tissu mince et le costume en néoprène présentent leurs plus grandes instabilités entre 0 et 10 m de profondeur. L'apprentissage de la plongée en étanche, devra se faire dans cette fourchette de profondeur pour être le plus efficace.
- Le costume en néoprène compressé est un excellent compromis entre le néoprène traditionnel et le tissu mince.

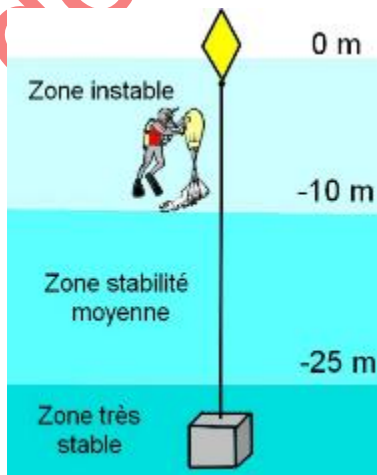


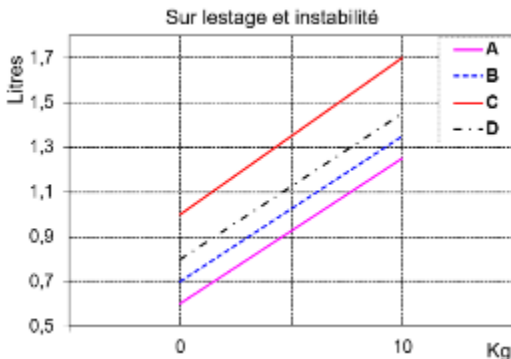
Figure 11 – Instabilité



Instabilité en fonction du sur lestage

Figure 12 – Sur lestage et instabilité

A: costume humide 8 mm.
B: costume sec tissu mince.
C: costume sec néoprène 6,5 mm.
D: costume sec néoprène compressé 4 mm.



Ces courbes (Fig. 12) représentent la variation de volume des costumes pour une variation de niveau d'un mètre, à un niveau moyen de -5 m en fonction d'un lestage excessif. L'abscisse est graduée en kg de lestage excédentaire et l'ordonnée en litre. L'intérêt de ces courbes est de démontrer l'importance d'un lestage correct.

Conclusions

- Les costumes étanches en néoprène sont nettement plus sensibles aux erreurs de lestage.
- Le costume en néoprène compressé est un excellent compromis entre le costume en néoprène traditionnel et le costume en tissu mince.
- Pour un sur lestage de 5 kg un plongeur moyen devra insuffler 40 % d'air en plus dans sa combinaison pour se stabiliser !



Quantité d'air à insuffler dans le costume

Ces courbes (Fig. 13) représentent, en fonction de la profondeur, la quantité d'air, qu'il faut insuffler dans le costume, à la pression hydrostatique, pour maintenir le plongeur en équilibre. Ces graphiques sont déduits des courbes d'instabilité. L'étude du graphique nous permet de constater que le costume en néoprène compressé est un excellent compromis entre le néoprène traditionnel et le tissu mince !

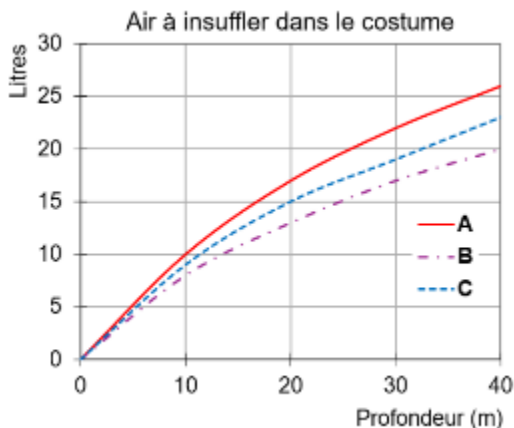


Figure 13 – Air à insuffler

A: costume sec néoprène 6,5 mm.

B: costume sec tissu mince.

C: costume sec néoprène compressé 4 mm.



CHAPITRE 3

PREVENTION DES ACCIDENTS

- Les risques spécifiques
 - Blow-up
 - Remontée « pied en l'air »
 - Squeeze de la cagoule
 - Plaquage du vêtement
 - Entrée d'eau dans le costume
 - Le « coup de chaud »
 - Le coup de froid - hypothermie
- Analyse de risques
 - What-if
 - Méthode Kinney
 - Application de la méthode Kinney

L'utilisation de costumes étanches est très spécifique. Des incidents résultants de leur utilisation peuvent se produire en plongée. Les plus courants sont la remontée incontrôlée (blow-up), l'effet de ventouse de la cagoule (squeeze de la cagoule), le plaquage du vêtement. Le plongeur habitué à son costume humide, sans expérience des étanches, risque d'être fort désorienté si ces incidents se produisent. Pour éviter que ces désagréments même bénins, ne se transforment en accident aux conséquences parfois dramatiques, nous vous donnons ici quelques conseils afin de les éviter ou d'en réduire les conséquences.



Les risques spécifiques

Blow-up.

Le blow-up est une remontée rapide au-delà de la vitesse autorisée résultant du gonflement incontrôlé du vêtement. Les causes principales sont au nombre de quatre :

- Soupape de purge fermée ou bloquée lors de la remontée, d'où augmentation du volume d'air (conséquence de la loi de Boyle et Mariotte).
- Vanne d'entrée d'air non étanche ou en débit constant.
- Plomb, bouteille de gilet ou tout autre objet appuyant sur la soupape d'entrée d'air.
- Perte du lestage.

Conséquences:

- Risque de surpression pulmonaire.
- Accident de décompression (ADD).
- Etranglement par le joint du cou. Il s'agit en général d'un étranglement sanguin au niveau des carotides, des syncopes peuvent se produire rapidement avec ce type d'étranglement.
- Rupture de l'habit et noyade. Rarissime avec les matériaux modernes.

Prévention:

- Vérification et réglage des soupapes.
- Bien ajuster le joint du cou.
- Prudence dans les déplacements verticaux.
- Vérifier l'état de sa ceinture, et ne la mettre que lorsque le vêtement est entièrement purgé de son air. Sinon elle



La plongée en combinaison étanche

risque de glisser lorsque les premiers effets de la pression se feront sentir sur le costume.

La vérification, le réglage des soupapes ainsi que l'ajustement du joint de cou sont décrits dans le chapitre traitant de la description du matériel.

Que faire en cas de Blow-up:

- Mettre la tête en hyperextension pour éviter la surpression pulmonaire.
- Ouvrir la soupape de purge à fond.
- Purger manuellement.
- Mettre les bras le plus haut possible, éventuellement maintenir la vanne de purge ouverte avec le menton. Ce qui a pour résultat de faciliter l'échappement de l'air par les manchettes et de protéger la tête contre la rencontre d'obstacles.
- Déconnecter l'inflateur, si le problème vient de la vanne d'entrée d'air.
- Appliquer les règles de réimmersion.

La remontée « pied en l'air »

C'est un cas particulier de « Blow-up » grave. Il faut réagir très rapidement pour contrer le mouvement de bascule, lorsque l'air veut s'accumuler au niveau des bottes. La position verticale est une position stable, le centre de gravité et le centre de poussée du plongeur sont sur une même verticale. La position tête vers le bas est aussi stable que la position tête vers le haut. Etant donné qu'il n'y a pas de purge au niveau des chevilles, l'air s'accumulant va se dilater, faire basculer le plongeur et le tirer vers la surface.



La plongée en combinaison étanche

Conséquences

- Risque important de surpression pulmonaire (SP).
- Risque important d'accident de décompression (ADD).
- Risque de noyade.
- Le gonflement des bottes peut « éjecter » les palmes.

Prévention

- Eviter l'excès d'air dans la combinaison.
 - Avoir un combinaison bien ajustée, à la limite confectionnée sur mesure.
 - Eviter le surlestage.
 - Assurer une partie l'équilibrage avec la stab (BCD) du moins pour les débutants.
- Eviter que l'air se déplace vers les pieds avec des genouillères.
- Répartir le lestage le long du corps, utiliser des plombs de cheville et/ou des palmes lourdes.
- S'entraîner en milieu protégé pour « sentir » lorsque le déséquilibre se produit.

Que faire en cas de remontée « pied en l'air »

1. Ne pas paniquer et agir rapidement en ramenant les genoux sous le ventre pour contrer le mouvement de bascule en ramenant l'air au niveau du torse et de la purge.
2. Expirer pour éviter la surpression pulmonaire.
3. Si les pieds sont au-dessus de la tête, faite un cumulet pour vous retrouver en position verticale tête vers le haut.
4. Une fois en position tête vers le haut, purger le costume et contrôler votre remontée.
5. Le cas échéant appliquer les règles de réimmersion pour une remontée trop rapide et/ou une rupture de palier.



Squeeze de la cagoule

Le squeeze de la cagoule est un plaquage qui a pour conséquence de diminuer la pression à l'intérieur de la cagoule. La pression à l'intérieur de la cagoule devient plus faible que la pression ambiante. La cagoule agit alors comme une ventouse et attire le tympan vers l'extérieur. Le squeeze de la cagoule se produit toujours lors de la descente, donc en principe en début de plongée, ce qui peut éventuellement en limiter le risque. La cause en est :

- Trop peu d'entrée d'air ou d'eau sous la cagoule.

Conséquences :

- Impression qu'un étau enserre la tête.
- Barotraumatisme de l'oreille. Contrairement au barotraumatisme classique, le tympan est attiré vers l'extérieur du conduit auditif. Les manœuvres de Valsalva n'apportent aucun soulagement, que du contraire elles ne font qu'empirer le baro-traumatisme.
- Vertige de Meunière. Le vertige de Meunière. Résultat d'un déséquilibre de pression ou de température, entre les deux oreilles internes. Pour le squeeze de la cagoule c'est surtout les déséquilibres de pression qui seront prépondérants. Le vertige de Meunière, qui est un incident, peut être le départ d'un accident grave, car il perturbe le sens de l'équilibre, le sens de la verticalité et provoque des vertiges, nausées, vomissements.
- Rupture du tympan.
- Arrachage du cérumen. Qui provoque des hémorragies dans le conduit auditif. Ces hémorragies sont souvent prises par le secouriste pour une rupture de tympan.



La plongée en combinaison étanche

Prévention :

- Placer le rebord du masque sous la cagoule de façon à pouvoir insuffler de l'air sous celle-ci en expirant par le nez durant toute la descente. L'air excédentaire va passer sous la jupe du masque et entrer sous la cagoule.
- Utiliser une cagoule semi-étanche en néoprène compressible qui présente des risques limités de squeeze.

Que faire en cas de squeeze :

- Insuffler de l'air sous la cagoule.
- Provoquer une entrée d'eau en écartant délicatement le joint de la cagoule.

Plaquage du vêtement.

Le plaquage ou squeeze du vêtement est dû à un manque d'air dans le costume qui vient se plaquer sur le plongeur.

Causes :

- Vanne d'entrée d'air défectueuse ou pas raccordée.
- Soupape de purge trop ouverte.
- Inflateur défectueux.
- Oubli ou impossibilité d'actionner la vanne d'entrée d'air.
- Bouteille pas ouverte.
- Plus d'air dans les bouteilles.

Conséquences :

- Descente trop rapide avec risque de barotraumatismes. Barotraumatisme du tympan et plaquage de masque.
- Sensation de froid.
- Sensation d'écrasement.



La plongée en combinaison étanche

- Être immobilisé, comme dans une camisole de force, sans pouvoir atteindre les vannes.
- Risque d'hématomes dû au contact avec les bords intérieurs des soupapes ou la présence d'objets durs sous la combinaison.

Préventions:

- Vérifier le bon raccordement et le fonctionnement de la soupape d'entrée d'air.
- Veiller à ce qu'aucune partie de l'équipement empêche l'utilisation des celle-ci.
- Eviter les objets durs sous la combinaison (clés, portefeuille etc.).
- Ouvrir la bouteille avant de se mettre à l'eau.
- Terminer la plongée avec une réserve d'air suffisante.

La vérification, le réglage des soupapes, la connexion de l'inflateur sont décrits dans le chapitre traitant de la description du matériel.

Que faire en cas de plaquage du costume :

- Gonfler le costume.
- Gonfler le gilet.
- Evitez les costumes trop serrant qui favorisent le placage.

Entrée d'eau dans le costume

Si les petites fuites sont désagréables et réduisent le confort du plongeur, il n'en va pas de même pour une entrée massive d'eau dans la combinaison. Celle-ci peut mettre la vie du plongeur en danger. Heureusement les fuites massives arrivent rarement. Elles arrivent principalement à cause de la distraction et en début de plongée.



La plongée en combinaison étanche

Causes

- Oubli de fermer la tirette, c'est la cause principale d'une entrée d'eau massive !
- Déchirure dans le vêtement.
- Tirette usée. Joint de tirette, non lubrifié endommagé par un actionnement brutale.
- Fixation de la vanne d'inflation ou de la purge sur le vêtement desserrée.
- Joint entre les vannes et le vêtement détérioré.
- Membrane de la vanne de purge détériorée ou encrassée.
- Joint du cou ou des poignets détérioré.
- Usure du vêtement, principalement au niveau des coutures.
- Matériau du vêtement devenu perméable.

Conséquences

- Les conséquences pour les petites sont peu importants en dehors de l'inconfort.
- Entrée d'eau massive :
 - Hypothermie, essoufflement, hydrocution, risque de noyade.
 - Diminution de l'aquacité.
 - Augmentation du poids apparent.
 - Augmentation du poids hors de l'eau et difficulté à sortir de l'eau avec le costume rempli.

Préventions

- Faire l'entretien de la combinaison, graisser la tirette, lubrifier les joints (talc...).
- Vérifier l'état général de la combinaison.
- Vérifier la fixation des vannes, leur propreté et leur fonctionnement.



La plongée en combinaison étanche

- Inclure lors du buddy-check : fermeture complète de la tirette et le raccordement de l'inflateur.
- Ne pas plonger sans stab (BCD)

Que faire en cas de fuite

- Petite fuite : réduire le temps de plongée et dans la mesure du possible, pas de décompression obligatoire.
- Entrée d'eau massive :
 - Mettre immédiatement fin à la plongée.
 - Remonter en surface, éventuellement à l'aide de la stab.
 - Tenter de fermer la tirette.

Coup de chaud

Paradoxal de se faire un coup de chaud lorsqu'on plonge en étanche, et pourtant cela arrive plus rapidement qu'on le pense, même sous nos latitudes. Tirette fermée, la température dans la combinaison et la température corporelle augmente rapidement. Le coup de chaud se traduit par un dépassement des possibilités du corps à se refroidir. Notre thermorégulation à ses limites !

Causes

- Rester longtemps sous le soleil tirette fermée.
- Longue marche, totalement équipé (plongée du bord).

Conséquences

- Transpiration, qui va donner une sensation de froid dans l'eau.
- Essoufflement, déshydratation, maux de tête, vomissement, crampes...
- Risque accru d'ADD.



La plongée en combinaison étanche

Préventions

- Diminuer le délai entre le moment où le plongeur s'équipe et le moment de se mettre à l'eau. Faire le briefing avant de s'équiper.
- Fermer la tirette le plus tard possible.
- S'hydrater avant la plongée.

Que faire en cas de coup de chaud

- Ouvrir la tirette, s'hydrater et se reposer.
- Dans les cas graves renoncer à la plongée, déséquiper le plongeur et le mettre à l'ombre.

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

Causes

- Souris et autres protections (gants...) inadaptées à la température de l'eau.
- S'équiper à l'extérieur dans le froid, le vent, la pluie, ou la neige.

Conséquences

- Inconfort, chair de poule, frissons, hypercapnie, essoufflement, crampes.
- Dans les cas les plus graves : confusion mentale, coma, mort.



La plongée en combinaison étanche

Préventions

- Adapter l'isothermie aux conditions de température (souris, gants, système de chauffage, masque facial...)
- Eviter de transpirer avant de se mettre à l'eau. Avoir une souris qui permet l'évacuation de l'humidité sur la peau.
- Diminuer, le cas échéant, la durée totale de plongée.

Que faire en cas d'hypothermie

- Couvrir la victime, évacuation vers un local chaud, boisson tiède, surveiller la température.
- Dans les cas graves : évacuation vers un hôpital.

Analyse de risques

L'analyse des risques vise à identifier les risques (danger), les facteurs de risque, les quantifier et les prévenir d'une manière systématique. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer les risques, les plus courantes sont le What-if, la méthode matricielle et la méthode Kinney. Dans cet ouvrage, nous utiliserons la méthode Kinney

Pourquoi faire une évaluation de risques ?

- Prévenir les accidents et leurs conséquences : décès, incapacité temporaire ou permanente...
- Déterminer les mesures à prendre pour un danger particulier.
- Déterminer si les mesures de gestion des risques mises en place sont adéquates et le cas échéant les adapter.
- Le cas échéant, satisfaire à des obligations légales ou d'assurances (plongée à haut degré d'engagement).



Les Limites de l'évaluation de risques

L'évaluation des dangers et facteurs de risques n'est pas une science exacte, elle a ses limites !

- Tous les dangers et facteurs de risque ne sont pas identifiables.
- L'estimation du niveau du risque et des dangers est emprunté d'une dose plus ou moins importante de subjectivité et varie de personne à personne.
- L'estimation de la durée d'exposition au danger n'est pas toujours facile à établir.

L'important, c'est de faire au mieux, avec le plus de réflexion et d'objectivité possible.

Quelques 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.



La plongée en combinaison étanche

- **Probabilité** : Paramètre variable en fonction de la nature du « Risque ».

Le « What-if »

Littéralement le terme signifie : « 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 dresser une liste, non exhaustive, de tous les problèmes matériels ou autres susceptibles d'être rencontrés en plongée. On ne plonge que si tous les points ont reçu une réponse satisfaisante. L'aide obligatoire de la part du binôme pour résoudre un problème de la liste n'est pas considérée comme une option valable et doit être rejetée. C'est la technique d'analyse de risques la plus simple, mais elle présente l'inconvénient de ne pas quantifier le risque contrairement à la méthode Kinney.

Liste de What-if appliqué à la plongée en étanche

Que faire au cas de Blow-up ; de fuites ; d'une entrée importante d'eau ; d'une vanne d'air ou d'une purge non fonctionnelle ; de la rupture de l'inflateur ; de la perte de lestage, de la remontée pied en l'aier...

La méthode Kinney

Elle présente l'avantage d'être facile, rapide et de quantifier le risque. Le postulat de départ indique que le Risque (R_k) 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 :

$$R_k = G \times E \times P \quad (8)$$

R_k : Risque estimé suivant la méthode Kinney (score).



La plongée en combinaison étanche

G : Gravité des conséquences possibles (Dommage).

E : Durée d'exposition au facteur de risque.

P : Probabilité d'émergence du dommage pendant la durée d'exposition.

Tableaux des facteurs G, E et P

Gravité (G)	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

Exposition (E)	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

Probabilité (P)	Valeur
Probable	10
Possible	6
Inhabituel mais possible	3
Petite possibilité dans des cas limites	1
Concevable mais peu probable	0,5



La plongée en combinaison étanche

Pratiquement impossible	0,2
A peine concevable	0,1

Tableaux de l'évaluation du « Risque » (Score = R_k)

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

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

Application de la méthode Kinney

Risque	Facteurs / score				Prévention	Risque résiduel			
	G	E	P	R_k		G	E	P	R_k
Blow-up (0-10m)	1	3	3	9	Néant	1	3	3	9
Blow-up (11-30m)	3	3	3	27	Formation adéquate	3	3	1	9
Blow-up (31-50m)	7	2	3	42	Combinaison ajustée à la taille. Vérifier les vannes. Purge non fermée. Lestage correct et bien réparti. Plomb de cheville et genouillères.	7	2	0.5	7
Blow-up (>50m)	15	2	3	90		15	2	0.5	15
Remontée pied en l'air	15	3	3	135		15	3	0.2	9
Entrée massive d'eau	15	3	3	135	Vérifier : l'état général de la combinaison, son degré d'usure, la tirette, la fixation des vannes, les joints. Avoir une stab (BCD)	15	3	0.2	9



La plongée en combinaison étanche

Risque	Facteurs / score				Prévention	Risque résiduel			
	G	E	P	R _k		G	E	P	R _k
Plaquage de la combinaison	15	3	1	45	Vérifier : si la bouteille est ouverte avant de plonger, le circuit d'inflation. Buddy-Check adapté Source de gonflage alternative (argon ou air) Souris anti-squeeze	15	3	0.2	9
Squeeze cagoule	3	3	1	9	Bord du masque sous la cagoule. Cagoule néoprène. Sous-cagoule anti-squeeze	3	3	0.2	5
Coup de chaud	1	3	6	18	Fermer la tirette le plus tard possible. Eviter les longues marches tout équipé.	1	3	1	3
Hypothermie	15	3	3	135	Adapter les protections isothermiques a la température de l'eau. Abri pour s'équiper. Moyen rapide pour retrouver un plongeur perdu en surface (balise).	15	3	0.2	9



CHAPITRE 4

DESCRIPTION DES COMBINAISONS ETANCHES

- Synoptique
- Combinaisons membranes
 - Caractéristiques mécaniques
 - *Résistance à l'abrasion*
 - *Résistance mécanique*
 - *Résistance à la pénétration*
 - *Absorption d'eau*
 - Avantages et inconvénients des matériaux
 - Avantages des combinaisons membranes
- Combinaisons en néoprène
- Combinaison en néoprène compressé et Crushed néoprène
- Joint du cou et manchettes
- Gants, bottes et chaussons
- Inflateur
- Tirette
- Vanne d'entrée d'air
- Soupape de purge
- Configuration du scaphandre

Il existe deux grandes catégories de combinaisons étanches, les combinaisons à parois minces (aussi nommé membrane ou enveloppe) et les vêtements secs en néoprène. Ces catégories de vêtements possèdent chacun des avantages et des inconvénients. Le vêtement en néoprène est isolant par lui-même et ne nécessite pas l'emploi d'une souris, tandis que les combinaisons à parois minces exigent le port d'un sous-vêtement appelé "souris" ou « Wooly Bear ». Le choix de la combinaison devra se faire en fonction du genre de plongées effectuées, de la fréquence de celles-ci et bien entendu de sa bourse.

Il est évident qu'un plongeur récréatif qui effectue 30 plongées par an ne choisira pas la même combinaison qu'un professionnel qui en fait 250.



Synoptique des combinaisons étanches

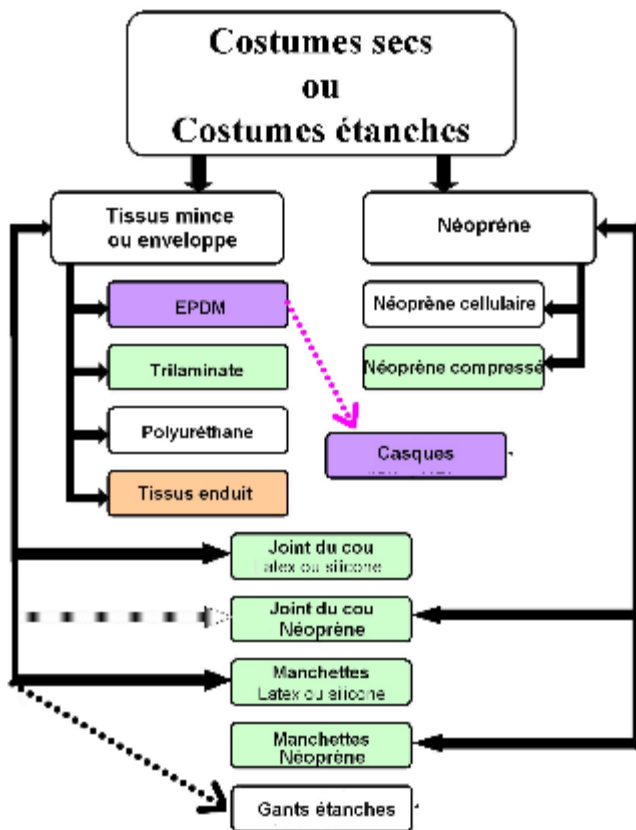


Figure 14 – Synoptique

En vert : les plus utilisés.

En orange : pratiquement plus utilisé

En Violet : Principalement utilisé par les OTS – Eaux contaminées



Combinaisons à parois minces (membrane)

A l'origine c'étaient des combinaisons en toile enduite. Elles ont été remplacées par des combinaisons en caoutchouc vulcanisé à chaud (EPDM), des polyamides (polyuréthane) et du Trilamine de faible épaisseur garni intérieurement d'une toile hygiénique. Pour leur inertie chimique, les OTS préfèrent l'EPDM et les plongeurs récréatifs un Trilamine.

Le Trilamine est une toile composite en trois couches, qui présente l'avantage d'allier une certaine souplesse avec une bonne résistance mécanique. La souplesse est donnée par la feuille centrale en EPDM (caoutchouc) et la résistance mécanique par la couche extérieure. La structure est la suivante :

- Couche extérieure qui donne la résistance mécanique : nylon, polyester, cordura, kevlar.
- Couche centrale qui donne la souplesse et l'étanchéité : EPDM.
- Couche intérieure hygiénique : nylon, polyester, polypropylène.

L'utilisation de ce type de vêtement nécessite une souris. En plus de très bonnes qualités isothermiques celles-ci doivent présenter un bon rembourrage au niveau des épaules et du dos pour combattre un léger écrasement dû aux bouteilles et doivent être fabriquées dans un matériau qui évacue rapidement la transpiration et qui sèche facilement.

L'épaisseur du costume est exprimée en gramme par mètre carré. Pour un même matériau, plus le vêtement est lourd, plus grande sera sa résistance à la rupture et à l'abrasion. Sa rigidité, et par conséquent son inconfort, augmentera de pair. En pratique pour la plongée sportive on se limite à un costume ne dépassant pas 1000 gr/m². Pour la plongée professionnelle on adopte généralement un costume en



La plongée en combinaison étanche

EPDM de 1500 gr/m². La présence de renfort aux genoux, aux coudes et sur les coutures rend les combinaisons très résistantes mais augmente le prix. La présence de renforts aux genoux est un minimum indispensable.

Ces combinaisons ne sont généralement pas faites sur mesure. Les combinaisons destinées aux OTS n'existent qu'entre à six à huit tailles différentes. Les fabricants de combinaisons destinées aux plongeurs récréatifs, pour le besoin du marché, proposent un plus grand nombre de tailles. L'identification des tailles n'est pas standardisée et est propre à chaque fabricant.

Mens Drysuits & Mens Undersuits

Measurement/Size	HEIGHT	CHEST	INNER ARM	BICEPS	FOREARM	WAIST	HIPS	INNER LEG	THIGH	CALF	BODY TRUNK
XS	162-166	84-88	51	28	26	70-74	84-88	74	50	34	155
S	168-172	90-94	52	29	27	76-80	90-94	76	52	36	160
SL	174-178	92-96	53	30	27	78-82	92-96	80	52	38	165
M	172-176	96-100	53	32	28	82-86	96-100	79	55	39	165
ML	176-180	96-100	55	32	29	82-86	96-100	84	55	40	170
MLL	182-186	100-104	57	33	29	84-88	100-104	88	55	40	175
LS	172-176	106-110	52	35	30	92-96	106-110	79	62	43	165
L	180-184	106-110	54	35	29	92-96	106-110	83	60	41	170
LL	184-188	106-110	56	36	30	92-96	106-110	86	61	42	175
LLL	190-194	110-114	58	37	30	98-102	110-114	89	61	42	180
XLS	174-178	112-116	54	38	31	100-104	112-116	80	65	44	170
XL	184-188	112-116	56	37	30	100-104	112-116	85	65	44	175
XLL	192-196	112-116	58	38	30	100-104	112-116	89	65	44	180
XXLS	176-182	118-122	55	40	31	108-112	118-122	80	68	46	175
XXL	190-194	118-122	57	40	31	108-112	118-122	84	68	46	185
XXXL	192-196	130-134	58	42	32	116-120	130-134	86	72	47	195

Figure 15 - exemple sélection des tailles - source: SANTI



La plongée en combinaison étanche

Exemple type de costume membrane



Figure 16 - Combinaison Viking HD (pro)



Caractéristiques mécaniques

Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion est la propriété que possèdent les tissus à résister aux frottements. Deux méthodes de mesures sont généralement utilisées, la « perforation » et la « perte de poids ».

- La méthode de perforation consiste à compter le nombre de révolutions, d'un disque abrasif standardisé, que peut supporter un tissu avant perforation et sous une charge constante (*charge 10 Newton-abrasif grade H18*). Cette méthode est parfaite pour comparer des toiles d'un même matériau présentant des épaisseurs différentes.
- La méthode de perte de poids consiste à mesurer la perte de poids d'un matériau qui a été soumis au frottement d'un galet standardisé avec une charge déterminée et un nombre de cycles déterminé (*norme ISO 5470 charge 2,45 Newton*). Cette méthode est parfaite pour comparer des tissus différents car elle possède l'avantage de ne pas être influencée par les poids surfaciques des matériaux utilisés.

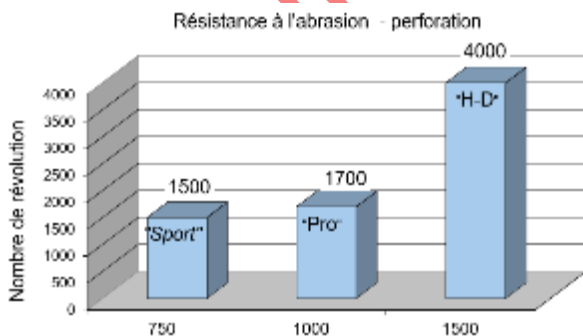


Figure 17 – Abrasion méthode de la perforation

Le diagramme (fig. 17) compare suivant la méthode de perforation plusieurs tissus EPDM de poids surfacique différents. On constate que la différence essentielle entre un costume de qualité sportive et professionnelle se situe au niveau de la résistance à l'abrasion.



La plongée en combinaison étanche

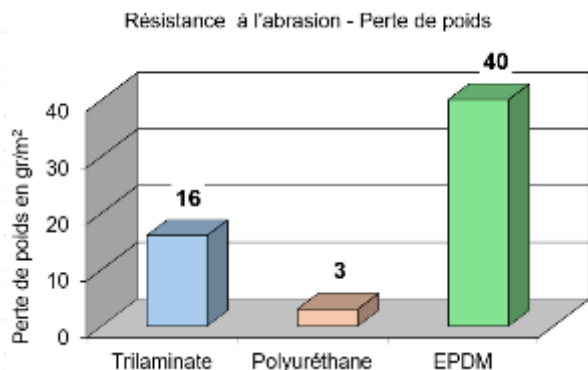


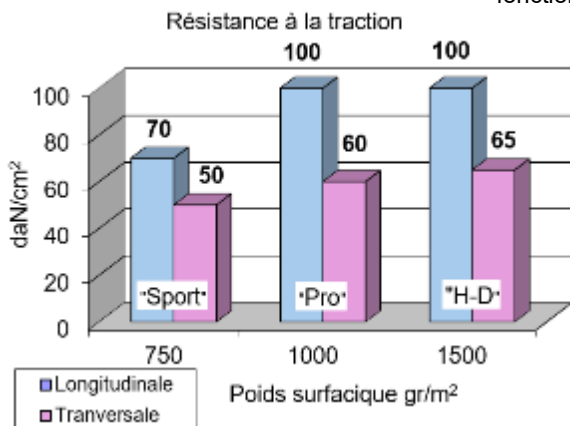
Figure 18 – Abrasion méthode perte de poids

peut de ce fait fabriquer de très bons costumes légers à usage sportif dans ces matières. Malheureusement, ces matériaux, comme nous le verrons plus loin, absorbent beaucoup d'eau et sont pour cette raison dédaignés par les professionnels.

Résistance mécanique

Figure 19 - Résistance à la traction

Résistance à la traction de l'EPDM en fonction de son poids surfacique.



La résistance mécanique est la propriété que possèdent les tissus à résister à la traction. Les essais de résistance sont en général faits suivant deux directions, de façon à obtenir la résistance dans le sens longitudinal et transversal. Ces deux mesures sont rarement identiques.



La plongée en combinaison étanche

Pour trouver la résistance à la traction, on divise la force exercée sur les tissus au moment de sa rupture par la section de la pièce d'épreuve.

Résistance à la pénétration

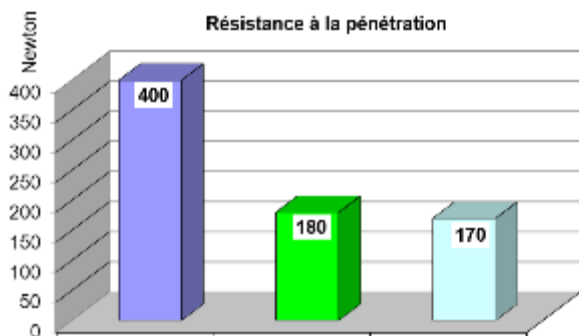


Figure 200 - Résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration est la propriété que possèdent les tissus à résister à la perforation. On mesure la force qu'il faut exercer sur un poinçon standard pour perforer un tissu.

L'histogramme (Fig 20), donne la résistance à la pénétration de différents matériaux (polyuréthane 600 gr/m²-EPDM 1000 gr/m²-trilaminate 400 gr/m²). Nous constatons que pour un poids surfacique faible le trilaminate a une très bonne résistance à la pénétration.

Absorption d'eau

L'absorption est la propriété que possèdent les tissus à absorber l'eau lorsqu'ils sont immergés. Elle est déterminée par les normes ISO 1817.

Le tissu est plongé dans une eau à 20 °C

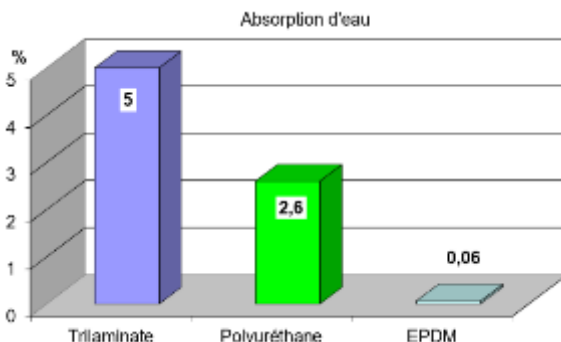


Figure 21 - Absorption d'eau



La plongée en combinaison étanche

pendant 6 heures et est ensuite séché pendant 2 minutes sans circulation forcée d'air. On mesure le pourcentage d'eau contenue en volume.

L'histogramme (Fig 21) donne l'absorption d'eau pour différents matériaux (polyuréthane 600 gr/m², EPDM 1000 gr/m², trilaminate 400 gr/m²). Nous constatons que l'EPDM n'absorbe pratiquement pas d'eau ce qui en fait un matériau de choix pour les plongées longues et répétitives, ainsi que pour la fabrication des combinaisons utilisées dans les eaux contaminées.

Avantages et inconvénients des matériaux

EPDM

Avantages :

- Très facile à réparer.
- Très faible absorption d'eau.

Inconvénients :

- Faible résistance à l'abrasion.
- Résistance à la pénétration très moyenne.

Trilaminate

Avantages :

- Résistance à la pénétration remarquable.
- Bonne résistance à l'abrasion.

Inconvénients :

- Enorme absorption d'eau.
- Réparation moins facile que pour l'EPDM. (Colle à 2 composants)



La plongée en combinaison étanche

Polyuréthane.

Avantages :

- Résistance à l'abrasion tout à fait remarquable.

Inconvénients :

- Forte absorption d'eau.
- Résistance à la pénétration très moyenne.
- Difficile à réparer.

Avantages des combinaisons membranes

- Habillage facile.
- Grand confort et possibilité d'enfiler le costume directement au-dessus des vêtements de ville.
- Il est possible de graduer la couche de sous-vêtement en fonction de la température de l'eau.
- Isothermie quasi constante en fonction de la profondeur
- Grand choix possible dans les types d'étanchéité du cou.
- Entretien et réparation très faciles.
- Très bonne durée de vie.
- Réparation effectuée très rapidement.

Inconvénients des combinaisons membranes

- Réserve de flottabilité quasi nulle (Stab obligatoire).
- Coefficient de pénétration dans l'eau plus élevé que les autres types de costumes. 47
- Formation de plis.
- Obligation d'utiliser une souris.



Combinaisons néoprène



Figure 22 - Combinaison néoprène

- A : Joint de cou
- B : Vanne d'entrée d'air
- C : Purge
- D : Renfort de couture
- E : Tirette transversale
- F : Manchettes
- G : Poche
- H : Renfort des genoux
- I : Bottes
- J : Cagoule
- K : Renfort de coude

Ces combinaisons sont réalisées à l'aide d'une feuille en néoprène cellulaire d'une épaisseur variant entre 4 et 8 mm. Elles sont assemblées par couture et collage avec ou sans couvre joint qui donne une meilleure garantie d'étanchéité. Les joints du cou et les manchettes sont exclusivement réalisés en néoprène présentant une face lisse qui doit être maintenue contre la peau. L'épaisseur de ces joints est généralement de l'ordre de 3 à 4mm. L'utilisation d'une souris est tout à fait superflue tout au plus peut-on mettre sous la combinaison un training et un bon lainage étant donné que ce type de vêtement présente des qualités isothermiques.

Avantages

- Bonne aquacité.
- Réserve de flottabilité.
- Peu sensible au plaquage.
- Utilisation moins pointue que le vêtement à paroi mince.



La plongée en combinaison étanche

Inconvénients

- Difficile à rincer.
- Détection des fuites et réparations difficiles.
- Manchettes, joint du cou, tirette sont difficiles à remplacer.
- Intervalle important entre les réparations et l'utilisation.
- Faible qualité mécanique des réparations.
- Les perforations éventuelles faites en cours de plongée s'agrandissent lors du gonflage du costume
- Isothermie décroissante en fonction de la profondeur.

Combinaisons en néoprène compressé

Elles sont de construction identique aux combinaisons en néoprène. Cependant l'épaisseur du matériau utilisé ne dépasse pas 4 mm. Ces combinaisons présentent un excellent compromis entre les qualités des combinaisons en néoprène traditionnel et la combinaisons membranes. Les matériaux compressés sont obtenus en comprimant les feuilles de néoprène cellulaire de façon à réduire la taille des cellules et d'augmenter sa densité.

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



La plongée en combinaison étanche

Avantages du néoprène compressé par rapport au néoprène cellulaire.

- Plus forte densité.
- Réduction du lest.
- Matériau peu compressible.
- L'isothermie varie peu en fonction de la profondeur.
- Plus de stabilité que les costumes en néoprène cellulaire.
- Les erreurs de lestage ont moins d'influence.
- Il est possible de réaliser des costumes de qualité identique avec une épaisseur de feuille moindre.

Inconvénients du néoprène compressé par rapport au néoprène cellulaire.

- A épaisseur égale le matériau est plus rigide.
- Prix plus élevé.

Comparaison entre les matériaux

Type	Membrane		Néoprène		
	Latex	Trilaminé	Non compressé	Compressé	Crushed
Récréatif	Non	Oui	Oui	Oui	Non
Sportif	Non	Oui	Oui	Oui	Oui/Non
TEK	Non	Oui	Non	Non	Oui
Semi-Pro	Oui	Oui	Non	Non	Non
Pro	Oui	Non	Non	Non	Non
Eau contaminée	Oui	Non	Non	Non	Non
Absorption eau	Néant	+	+++++	+++	++
Abrasion	++	++++	+	+	++
Pénétration	++	++++	+	++	++
Prix	+++++	++++	+	++	+++



Joint du cou (Neck seal)

Le joint du cou a pour fonction d'empêcher l'eau d'entrer à l'intérieur de la combinaison par le cou. Pour que cette fonction soit réalisée, il faut assurer une bonne tenue du joint qui n'est efficace que si la pression à l'intérieur de la combinaison est légèrement supérieure à la pression ambiante, pour ce faire, il doit toujours y avoir de l'air dans la combinaison. Le lestage doit donc être légèrement excédentaire (+/-1 kg) et la purge bien réglée.

La bonne tenue du joint peut être contrariée par plusieurs facteurs extérieurs, chaînette, bijoux, présence de cheveux ou de saletés, pomme d'Adam proéminente, plis ou mauvais ajustement.

Pour favoriser la mise en place et éviter les déchirures, il est conseillé de talquer le joint avant l'habillement.

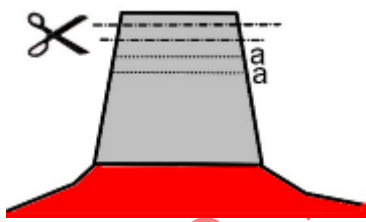


Figure 23 ajustement joint du cou
a : Repère de découpe

Le joint de cou est conique pour permettre un ajustement du diamètre en fonction du cou du plongeur, le premier ajustement doit se faire à l'essayage et se peaufiner par la suite. Il faut éviter de trop réduire le joint lors des 10 à 20 premières plongées, car les matériaux qui les composent ont tendance à se distendre et on risque de se retrouver avec un joint trop large, totalement inefficace.

En fait il faut trouver le juste compromis entre son confort et la tenue du joint. S'il est très serrant il sera bien étanche mais très inconfortable, voire dangereux. A la limite il pourrait provoquer un étranglement sanguin, avec une éventuelle syncope, si la pression à l'intérieur de la combinaison croît exagérément par rapport à la pression ambiante. En revanche un joint trop peu serrant laissera inmanquablement passer de l'eau. Il doit donc être ajusté pour chaque



La plongée en combinaison étanche

plongeur. Ce qui revient à dire que dans la plupart des cas la combinaison devient un équipement quasi individuel ne pouvant être utilisé que par des plongeurs ayant des encolures semblables.

Il existe deux grandes catégories présentant chacune des avantages et des inconvénients. Les joints en néoprène qui sont surtout utilisés sur des costumes du même matériaux. Et ceux en latex principalement utilisés sur les costumes en tissu mince.

Joint en néoprène

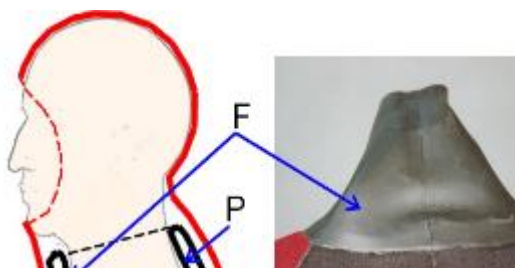


Figure 24 - Etanchéité joint néoprène

P : Pression

F : Face lisse

Ce type de joint s'utilise principalement sur des costumes en néoprène. Il se présente sous la forme d'une feuille de néoprène d'une épaisseur de 4 à 6 mm, ayant une surface lisse qui doit être placée contre la peau. Ce qui oblige l'utilisateur à retourner le joint de façon à former un col. Cette façon d'assurer l'étanchéité pré-

sente l'avantage d'être très sûre et très confortable mais occasionnent certains inconvénients :

- Difficulté à former le col surtout si la cagoule est attenante.
- L'air ne s'évacue pas par le cou en cas de blow-up.

Ce joint est conique de façon à pouvoir s'ajuster à toutes les morphologies. L'ajustement doit se faire de façon à avoir un périmètre égal à l'encolure moins 10 à 15 %. Pour les costumes faits sur mesure, le joint est en général ajusté à l'usine. L'ajustage armé de sa seule paire



La plongée en combinaison étanche

de ciseaux n'est en général pas facile, il vaut mieux laisser faire le vendeur. Ce type d'étanchéité est très solide mais peu flexible. Des irrégularités, comme une pomme d'Adam fort prononcée, peuvent engendrer des fuites, surtout si la pression à l'intérieur de la combinaison est trop faible. Pour assurer une bonne tenue de ce joint il est impératif que la pression à l'intérieur de la combinaison soit supérieure à la pression ambiante.

Joint en feuille anglaise - latex

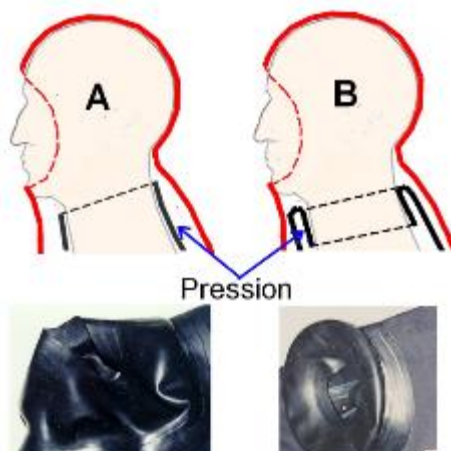


Figure 25 - Joint latex

Ce type de joint s'utilise principalement sur des costumes en tissu mince. Il se présente sous la forme d'une feuille en latex de faible épaisseur. L'avantage est de mouler parfaitement le cou, y compris la pomme d'Adam et d'assurer ainsi une parfaite étanchéité. Il est néanmoins plus fragile que le joint en néoprène et son diamètre doit être parfaitement ajusté sous peine de ressentir une impression d'étranglement.

Les figures A et B représentent les deux manières de le placer.

La manière A est très difficile à exécuter, on lui préfère la manière B qui présente en outre l'avantage de laisser passer l'air en cas de blow-up.



La plongée en combinaison étanche

Joint en silicone



Figure 26 - Joint silicone

Source : Si-Tech

Il est similaire au joint en feuilles anglaise, ce joint hypoallergénique s'utilise de la même manière. Etant donné que le silicone ne peut pas être collé, ce joint est clamé sur la combinaison. Un anneau spécial (B) est collé sur la combinaison, le joint (A) est pris entre cet anneau et une clame amovible (C). Le joint possède des repères (D) pour faciliter l'ajustage du tour de cou. Ce système présente l'avantage de pouvoir être monté sur les combinaisons en

néoprène ainsi que sur les combinaisons à paroi mince et de pouvoir être rapidement remplacé sur le site même de la plongée. En contrepartie il est couteux.

Joint latex Viking pro-turbo

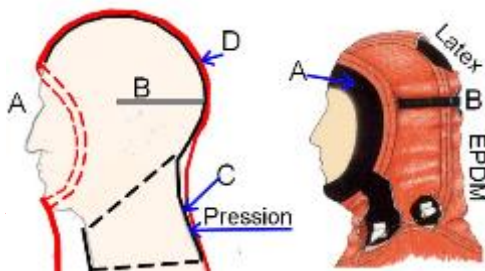


Figure 27 - Viking pro Turbo

A : Joint facial B : Strap C : Joint
D : Bourrage anti-squeeze

Idéal pour les eaux très froides, cette solution combine astucieusement un joint de cou en latex et un capuchon isolant garni d'un bourrage anti-squeeze. La cagoule est pourvue d'un joint facial qui limite l'entrée d'eau et d'un strap qui empêche la circulation de celle-ci.

Le principal inconvénient de cette solution réside dans son prix, et est en général réservé



La plongée en combinaison étanche

à des professionnels. Ce système est décrit en détail dans le chapitre traitant des cagoules.

Yoke et joint biconique amovible

Dans ce système le joint du cou est remplacé par un joint amovible d'une part et des joints fixes sur la cagoule et le costume d'autre part. Le Yoke est la pièce d'étanchéité fixée sur le costume. Le joint biconique est la pièce qui assure l'étanchéité au niveau du cou. Le joint en U est le joint fixé sur la cagoule.

Ce système présente les plus grandes garanties d'étanchéité et de confort. Le joint biconique qui est la seule pièce à ajuster en fonction de l'encolure du plongeur est séparé du reste du costume. Un même costume peut donc servir à des plongeurs ayant des encolures fort différentes, ce qui peut présenter des avantages sur un chantier. Il suffit pour cela que chaque plongeur ait son propre joint biconique.

Il est réalisé en latex très souple qui moule parfaitement le cou, sans avoir une impression d'étranglement. Comme son nom l'indique il présente deux cônes en opposition par la base, le cône court assure l'étanchéité autour de l'anneau et le cône long l'assure autour du cou du plongeur. C'est bien le long cône qui doit être ajusté en diamètre pour chaque plongeur.

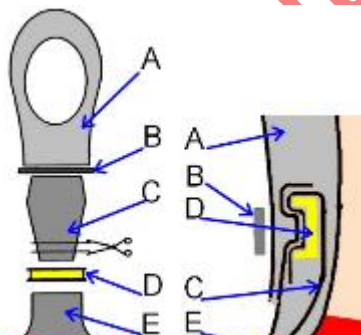


Figure 28 - Yoke et joint biconique

- A : Cagoule.
- B : Clame.
- C : Joint biconique.
- D : Anneau.
- E : Yoke.



La plongée en combinaison étanche

Le joint biconique est une pièce relativement fragile mais peu coûteuse par rapport au prix d'ensemble du système d'étanchéité, on peut facilement en garder quelques-uns en réserve. Ce système permet d'adapter plusieurs types de cagoules ou de casques différents sur le même costume. Les cagoules doivent cependant présenter à leur partie inférieure un joint en forme de U destiné à recevoir la clame. Elles seront décrites au chapitre traitant des cagoules. Le Yoke qui est la pièce d'étanchéité collée sur le costume est réalisée en latex épais, ce qui le rend particulièrement résistant et peu enclin à se déchirer. L'augmentation d'épaisseur rend ce joint plus rigide, pour assurer l'étanchéité la pression d'assise devra donc être plus forte, ce qui n'est pas une gêne pour le plongeur car l'étanchéité est réalisée non pas directement sur le cou mais par l'intermédiaire d'un anneau rigide.



Figure 29 - Anneau et clame Viking

La pression d'assise pour rendre étanche le système est obtenu par une clame à ouverture et serrage rapide. L'étanchéité globale est obtenue en serrant sur le même anneau, le Yoke (étanchéité vers le costume), le joint biconique (étanchéité au niveau du cou) et le joint de la cagoule. L'anneau est une pièce en PVC rigide, fendue transversalement pour permettre le passage du cou. Il existe deux diamètres d'anneau sur le marché. Le petit diamètre pour les combinaisons Viking et Nokia et le grand diamètre pour les combinaisons Drager.

Ce système particulièrement efficace présente cependant pour le plongeur récréatif deux inconvénients majeurs. Son prix est très élevé



La plongée en combinaison étanche

et l'habillage est long, difficile, presque impossible à réaliser seul. Pour ces raisons, ce système est exclusivement réservé à des professionnels.

Technique d'habillage.

1. Lubrifier le joint biconique.
2. Enfiler le joint biconique autour du cou, cône court vers le haut.
3. Passer l'anneau autour du cou.
4. Retourner le cône court du joint biconique autour de l'anneau, qui doit être entièrement recouvert par le joint pour assurer un montage correct.
5. Enfiler le costume par-dessus l'ensemble.
6. Enfiler la cagoule.
7. Serrer l'ensemble des joints avec la clame en veillant à ne pas serrer sous la clame le tissu de la combinaison ou de la cagoule.

Comparaisons entre les types de joint de cou

Type	Néoprène	Latex	Pro-Turbo	Yoke	Silicone
Récréatif	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Sportif	Oui	Oui	Non	Non	Oui
TEK	Non	Oui	Non	Non	Oui
Semi-Pro	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Pro	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Eau contaminée	Non	Non	Voir note	Oui	Non
Etanchéité	++	+++	+++	++++	+++
Confort	+++	++	+++	++++	+++
Prix	++	+	+++	++++	+++
Habillage	Facile	Facile	Facile	Facile	Difficile
Hypoallergénique	Non	Non	Non	Non	Oui

Note : Dépend du type et de la concentration des contaminants.



Cagoules

Les cagoules sont un élément essentiel dans la protection thermique. La plupart des déperditions calorifiques se font au niveau de la tête, qui est la partie du corps la moins bien protégée et la plus vascularisée. Il faut être particulièrement attentif à la protection de la nuque, qui est la partie la plus sensible. Une bonne cagoule doit être bien ajustée et empêcher toute circulation d'eau, au niveau de la nuque. Lors de l'équipement il faut veiller à ce que la cagoule recouvre bien la nuque sans plis ni bourrelets. Les cagoules peuvent être séparées du costume ou attenantes à celui-ci.



Figure 30 - cagoule Aqualung

Les cagoules séparées présentent l'avantage de faciliter l'équipement et l'ajustage du joint de cou. Mais elles présentent le risque de voir de l'eau s'infiltrer par le bas et réduire ainsi la protection thermique. Pour limiter ce risque il faut que la cagoule descende au moins jusqu'aux épaules et recouvre parfaitement la nuque. Les cagoules séparées doivent être utilisées, de préférence, si le costume est pourvu d'un joint de cou qui nécessite la formation d'un « col ». Dans le cas d'une étanchéité de cou assurée par un système de joint biconique, yoke et clame elle est toujours séparée. La jonction et l'étanchéité entre le costume et la cagoule sont parfaitement réalisées par le système de calmage. Les meilleures cagoules sont pourvues d'un joint facial, afin de limiter l'entrée d'eau.

Les cagoules attenantes aux costumes présentent l'avantage d'assurer une liaison parfaite avec le costume, mais la formation d'un « col »



La plongée en combinaison étanche

sur le joint du cou devient avec ce type de cagoule une opération fort délicate à assurer correctement.

Elles doivent aussi présenter des bonnes qualités anti-squeeze, pour éviter les barotraumatismes de l'oreille. Ces qualités peuvent être intrinsèques aux types de matériaux utilisés pour sa fabrication ou être obtenues par l'adjonction d'un bourrage compressible. Pour les plongeurs récréatifs, dont le profil de plongée est bien souvent en « dents de scie », avec des variations de pression importantes et fréquentes, les qualités anti-squeeze d'une cagoule sont largement à prendre en compte.

Cagoule en néoprène semi-étanche

Ces cagoules sont fabriquées en néoprène d'une épaisseur de 7 à 8 mm. Elles sont assemblées par couture et collage. Les meilleures possèdent un joint facial en néoprène de 3 mm ayant la face intérieure lisse ce qui limite l'entrée d'eau. Elles peuvent être séparées du costume ou attenantes à celui-ci. Les modèles séparées présentent l'avantage de faciliter la mise en place du joint de cou. L'isothermie de ce type de cagoule diminue en fonction de la profondeur, cette diminution est liée à l'écrasement du néoprène et à sa diminution d'épaisseur. Pour réduire cet inconvénient il faut choisir un bon néoprène cellulaire, cellules nombreuses mais de faibles dimensions. Ce type de matériau présente l'avantage de conserver sa souplesse sans s'écraser exagérément. La souplesse du néoprène favorise les qualités anti-squeeze de la cagoule qui n'engendrent pas, ou peu, le phénomène de squeeze, ce qui les rendent très intéressantes pour les plongeurs récréatifs et TEK.



La plongée en combinaison étanche

Cagoule néoprène pour système à clame et yoke

Elles sont identiques aux cagoules en néoprène semi-étanche mais présentent à la base du cou un joint en forme de U destiné à contenir la clame. Ce type présente tous les avantages d'une cagoule séparée en néoprène classique. Avec en plus une jonction et une étanchéité parfaites réalisées par le système de clame décrit au paragraphe traitant des joints du cou. Ce matériel est surtout utilisé par des professionnels ou semi-professionnels, passant plus d'une heure dans l'eau par plongée. Le prix du système de clame est loin d'être à la portée de toutes les bourses.

Cagoule en latex

Ce sont des cagoules en latex de faible épaisseur, ne dépassant guère 2 à 3 mm. Elles assurent une très bonne étanchéité au niveau du visage, mais n'ont aucun confort thermique. Les qualités anti-squeeze sont nulles. Il faut utiliser ces cagoules avec un bonnet néoprène ou en une autre matière compressible pour diminuer ce risque et assurer un minimum de confort thermique. Ce type de cagoule est très fragile, son principal avantage est un prix de revient très bas. Elle est exclusivement destinée à être fixée sur des combinaisons à usage récréatif. De nos jours elles sont de moins en moins utilisées.

Cagoule Viking pro turbo

La cagoule Viking pro turbo est la cagoule pour eaux froides par excellence. Elle réunit toutes les qualités pour un usage extrême, malheureusement son prix est très élevé surtout en combinaison avec le système de clame et yoke. Elle est particulièrement résistante et peu sensible à la pénétration de l'eau, son intérieur est garni d'un latex mou isolant et anti-squeeze, qui protège particulièrement bien la nuque. Sa taille est ajustable à l'aide d'un strap en velcro se trouvant



La plongée en combinaison étanche



Figure 31
Cagoule pro turbo
Source : Viking

à l'arrière de la tête. Ce qui permet un ajustement aisé, pouvant se faire sans l'aide d'un tiers, même lorsque le plongeur est équipé. La cagoule est équipée d'un bord en feuille anglaise qui assure une étanchéité remarquable au niveau du visage. Ce type de matériel est exclusivement destiné à être fixé sur des costumes à usage professionnel, ou pour des plongeurs récréatifs qui passent beaucoup de temps dans une eau froide. L'utilisation d'un masque facial accroît encore le confort. Elle a la même inertie chimique que la combinaison. Elle possède une doublure intérieure en latex et un joint de cou créant une couche d'air isolante supplémentaire. La cagoule est fabriquée dans le

même matériau que la combinaison, afin d'offrir la même degré de protection contre, les perforations, l'abrasion.

Cagoule Viking pro turbo pour système à clame

Elles sont identiques aux cagoules viking pro turbo mais présentent à la base du cou un joint en forme de U destiné à contenir la clame. Ce type présente les avantages combinés de la cagoule séparée et de la Viking pro turbo. Avec en plus une jonction et une étanchéité parfaites. Cette jonction est parfaitement réalisée par le système de clame décrit au paragraphe traitant des joints du cou. Ce type de cagoule est surtout utilisé par des professionnels et associé à un masque facial elle assure un confort incomparable mais est très loin d'être à la portée de toutes les bourses.



La plongée en combinaison étanche

Casques et masques faciaux

Les casques sont exclusivement réservés aux OTS, on peut citer pour mémoire les plus utilisés : RATCLIFFE - MILLER - AQUADYNE - DIVEX COMEX PRO - SUPERLITE 17B - HELIOX 18B

Pour augmenter le confort thermique, le plongeur récréatif peut utiliser un masque facial. Ce type de masque permet de protéger totalement le visage du froid. La cuve du masque est automatiquement équilibrée, il n'y a aucun risque de placage. De nombreuses agences proposent des formations pour l'usage des masques faciaux, le prix de ces masques devenant petit à petit compétitif !



Figure 32 - Facial Ocean Reef



*Figure 33 - Facial Exo26
(Kirby-Morgan)*



*Figure 34 - Casque Surperlite 17B
(Kirby-Morgan)*



Comparaisons entre les types de cagoules

Type	Néoprène	Néoprène Yoke	Latex	Turbo Yoke	Turbo	Casque
Récréatif	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non
Sportif	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
TEK	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non
Semi-Pro	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Non
Pro	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Eau contaminée	Non	Non	Non	Note	Note	Oui
Anti squeeze	++	++	----	+++	+++	++++++
Isothermie	++	++	+	+++	++++	+++++
Habillage	Facile	Facile	Facile	Facile	Facile	Difficile
Prix	++	+++	+	+++	++++	+++++

Note. Dépend du type et de la concentration des contaminants.

Manchettes

Les manchettes ont pour fonction d'empêcher l'eau d'entrer à l'intérieur de la combinaison au niveau des poignets. Pour que cette fonction soit réalisée, il faut assurer une bonne tenue des manchettes. Celle-ci n'est efficace que si la pression à l'intérieur de la combinaison est légèrement supérieure à la pression ambiante. Pour avoir une pression interne dans la combinaison supérieure à la pression ambiante, il doit toujours y avoir de l'air dans la combinaison. Le lestage doit être légèrement excédentaire (+/-1kg) et la purge bien réglée.

La tenue de la manchette peut être affectée par plusieurs facteurs extérieurs, présence de poils, saletés, tendons proéminents, pli ou mauvais ajustement. Pour favoriser la mise en place, il est conseillé de les talquer avant l'habillement, de façon à éviter les plis et surtout les déchirures.



La plongée en combinaison étanche

Les manchettes de qualité sont coniques pour permettre un ajustement du diamètre en fonction de l'épaisseur du poignet du plongeur. Le premier ajustement peut se faire à l'essayage et se peaufiner par la suite. Il faut éviter de trop réduire la manchette lors des 10 à 20 premières plongées, car les matériaux qui composent les manchettes ont une tendance à se distendre et on risque de se retrouver avec une manchette trop large, totalement inefficace. Une manchette trop serrante sera bien étanche mais très inconfortable. Un serrage trop vigoureux risque de ralentir la circulation du sang dans les mains, engendrer une sensation de froid et favoriser les ADD. En revanche une manchette trop peu serrante laissera inmanquablement passer de l'eau.

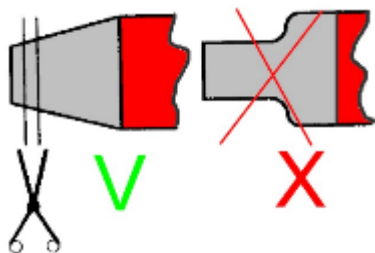


Figure 35 - Ajustement manchettes

Il existe deux grandes catégories présentant chacune des avantages et des inconvénients. Le néoprène surtout utilisées sur des costumes en néoprène, Le latex et le silicone principalement utilisées sur les costumes membrane. Sauf pour le silicone, elles sont généralement collées sur la combinaison. Le silicone, incollable, impose une manchette amovible.

Manchettes en latex

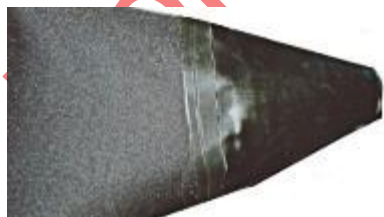


Figure 36 - manchette latex

Ce type de manchette s'utilise principalement sur des costumes en tissu mince. Il se présente sous la forme d'une feuille en latex de faible épaisseur. L'avantage de ce type de manchette est de mouler parfaitement le poignet et d'assurer ainsi une parfaite



La plongée en combinaison étanche

étanchéité. Elle est néanmoins plus fragile que celle en néoprène. Elles doivent être conique pour faciliter l'ajustage qui se fait de la même manière que pour le joint du cou. Dans la plupart des costumes les manchettes en latex sont collées sur le costume. Certains fabricants ont conçu des manchettes amovibles qui sont maintenues en place sur le costume par un «O» ring s'appuyant dans une gorge demi-ronde. On peut, de ce fait remplacer, rapidement et à peu de frais les manchettes qui peuvent aussi être remplacées par des gants étanches.

Manchettes amovible latex ou silicone

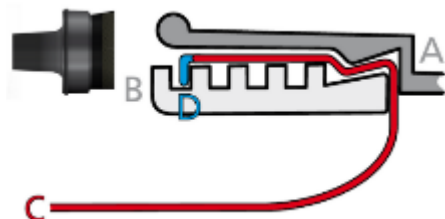


Figure 37 - Manchette amovible silicone
Source : Si Tech

- A : Anneau de poignet
- B : Clame
- C : Position finale manchette
- D : Bride sécurité manchette

Les manchettes amovibles sont similaires aux manchettes collées sur la combinaison et remplissent la même fonction. Elles présentent l'avantage de pouvoir être rapidement remplacée sur le site même de la plongée, ou par des gants étanches. En contrepartie elles sont coupeuses. Les manchettes en silicone présentent un avantage supplémentaire, elles sont hypoallergéniques.

Un anneau spécial (A) est monté sur la combinaison, la manchette (C) est prise entre cet anneau et la clame (C). La bride (D) assure la sécurité du système en empêchant l'arrachement de la manchette.

Manchettes en néoprène

Les manchettes en néoprène sont d'une épaisseur de plus ou moins 3 mm et présentent un face lisse qui assure l'étanchéité généralement



La plongée en combinaison étanche

moins bon qu'avec les manchettes en latex ou silicone. Ce type de manchette est exclusivement réservé au costume en néoprène. Elles sont fixées sur le costume par couture et collage et ne sont jamais amovibles. Ce type de manchette est très solide, mais peu flexible. Des irrégularités, comme des tendons fort prononcés, peuvent engendrer des fuites. Il est impératif que la pression à l'intérieur de la combinaison soit supérieure à la pression ambiante.

Manchettes doubles en néoprène

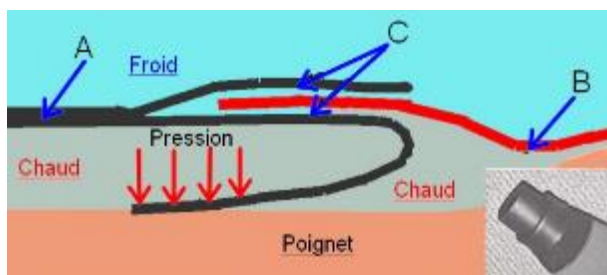


Figure 38 - Manchette double néoprène

A : Manchette
B : Gant
C : Surface lisse

La manchette est composée d'un double rabat en néoprène, un des rabats présente une partie lisse, qu'il faut placer sur le poignet et qui assure l'étanchéité suivant le même principe que le joint de cou.

L'autre se rabat sur le gant pour éviter une forte circulation d'eau. Ce système possède l'avantage d'assurer une étanchéité parfaite. L'association de ce matériel avec des gants étanches est peu coûteuse. Il est possible d'utiliser plusieurs types de gants. Elles présentent néanmoins deux inconvénients :

- L'air s'échappe difficilement de la manchette en cas de blow-up.
- Ces manchettes sont plus fragiles et leur remplacement plus coûteux.



La plongée en combinaison étanche

Comparaison entre les types de manchette

Type	Latex	Néoprène	Double néoprène	Latex amovible
Récréatif	Oui	Oui	Oui	Non
Sportif	Oui	Oui	Oui	Oui
TEK	Non	Non	Non	Oui
Semi-Pro	Oui	Non	Non	Oui
Pro	Oui	Non	Non	Oui
Isothermie	+	+++	++++	+
Habillage	Facile	Facile	Facile	Facile
Prix	+	++	+++	+++++

Bottes et chaussons

La fonction des bottes est triple, elles doivent garder les pieds au sec, éviter les pertes de chaleur et assurer une marche facile. Elles doivent avoir une semelle épaisse et striée, de préférence garnie d'une surface antidérapante. Le talon doit être renforcé pour éviter l'usure engendrée par le frottement de la sangle de palme et présenter un bossage pour maintenir la palme en place.



Figure 39 – Botte

A : Joint de finition

B : Bossage et renfort de talon

C : Semelle antidérapante

Sur les costumes de qualité, elles doivent faire partie intégrante de celui-ci. Les bottes des costumes étanches sont plus volumineuses que les chaussons de plongée classique. Lors de l'achat du costume, il faut vérifier si vos palmes conviennent encore. La botte doit s'enfoncer à fond dans la palme, sous peine de voir la puissance du palmage diminuer et des crampes apparaître.



La plongée en combinaison étanche

Sur les combinaisons néoprène de premier prix, les bottes sont souvent remplacées par des chaussons sans semelle. Cela ne convient absolument pas s'il faut marcher sur des cailloux ou pire des huîtres ! Les chaussons seront très rapidement percés.



Figure 40 – Rockboots

Source : Scubapro

Les combinaisons haut de gamme peuvent aussi être proposées avec des chaussons minces, n'assurant que l'étanchéité. Ce type de combinaison va de pair avec l'utilisation de bottines (Rockboots) et de chaussettes isolantes. Les Rockboots présentent

l'avantage d'être très solide, d'avoir une semelle résistante à pratiquement tout, d'être facilement remplaçable et de faciliter l'habillage par la présence de lacets. C'est idéal pour marcher au-dessus des cailloux et huîtres !

Comparaison entre les bottes et chaussons.

Type	Bottes	Chaussons	Rockboots
Récréatif	Oui	Oui	Non
Sportif	Oui	Non	Non
TEK	Oui	Non	Oui
Semi-Pro	Oui	Non	Oui
Pro	Oui	Non	Oui
Longue marche	+++	+	+++++
Habillage	+	++	++++
Prix	++	+	+++++

Tuyau d'inflateur

Les tuyaux utilisés pour la fabrication des inflateurs sont des flexibles du type « hydraulique moyenne pression ». Ils sont prévus pour une



La plongée en combinaison étanche

pression de service de maximum 15 bars. Ils sont pourvus à une extrémité d'un connecteur mâle (1/8" BSP en général) à raccorder à la sortie basse pression du premier étage du détendeur. Si on possède deux détendeurs, On raccorde l'inflateur de la combinaison sur le détendeur principal et l'inflateur de la stab (BCD) sur le détendeur de secours.



Figure 41 - Raccord rapide

L'autre extrémité est dotée d'un raccord rapide femelle destiné à se brancher sur la vanne d'entrée d'air. Il faut veiller à ce que le raccordement sur la vanne s'effectue avec des courbes amples et coplanaires, le rayon de courbure minimum de ce genre de flexible est limité à 4 cm. Il faut tenir compte de ces paramètres pour placer la vanne d'entrée d'air et assurer

une bonne durée de vie au flexible.

Il faut veiller tout particulièrement à la propreté du raccord rapide. Des crasses ou des incrustations créent inmanquablement des fuites ou une mauvaise fixation au niveau du raccord qui risque d'engendrer la déconnexion de l'inflateur en cours de plongée. Une déconnexion intempestive de l'inflateur est un incident sérieux qui peut mettre la vie du plongeur en danger.

Les raccords rapides ne font pas l'objet d'une standardisation rigoureuse, il faut vérifier lors de l'achat d'un inflateur, si celui se connecte normalement à la vanne d'entrée d'air. Pour la facilité de connexion, avec les mains froides, il est préférable d'opter pour un raccord rapide avec une ailette de manipulation. La connexion sur le détendeur est plus ou moins standardisée, des adaptateurs sont disponibles.



La plongée en combinaison étanche

Si le tuyau d'inflateur présente un renflement, des coupures, des boulinages ou une jonction avec les pièces de raccords suspecte, il faut le remplacer immédiatement, celui-ci risque de se rompre.

Tirette

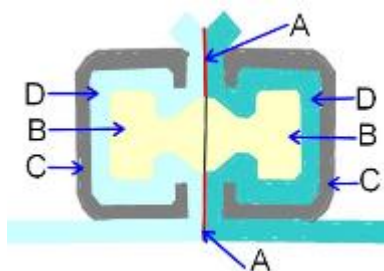


Figure 42 - Tirette principe

A : Zone de compression
B : Élément métallique interne
C : Élément métallique externe
D : Lamelle en EPDM

Le principe de la tirette étanche est fort simple, il consiste à plaquer mécaniquement deux lamelles en latex l'une contre l'autre suffisamment fermement pour qu'elles forment un joint. Si le principe est simple la réalisation mécanique de la tirette demande la plus grande précision. D'une part il faut pouvoir réaliser un effort de pression sur les lamelles suffisant pour garantir l'étanchéité et d'autre part la force qu'il faut exercer pour la fermeture ou l'ouverture doit être humainement possible. Le système de fermeture doit aussi être mécaniquement irréversible, c'est à dire que la tirette ne peut pas s'ouvrir « toute seule » sous l'action d'une force parasite extérieure, des tractions dues aux mouvements du plongeur par exemple.

La fermeture et l'ouverture de la tirette sont grandement facilitées par la lubrification. La paraffine est excellente et protège la tirette contre la corrosion. L'utilisation de bombes en aérosol est absolument à proscrire, le gaz propulseur risque d'endommager les lamelles de la tirette. Lors de la



Figure 43 - Tirette étanche



La plongée en combinaison étanche

fermeture ou de l'ouverture le curseur doit être manipulé lentement pour éviter de brûler les lamelles de latex par frottement.

La position dorsale de la tirette est la plus classique. Néanmoins la tendance actuelle est de placer la tirette frontalement, afin que le plongeur puisse facilement la fermer seul. Cette configuration implique une tirette plus longue, plus fragile et plus susceptible d'être « croquée ». Lors du transport contrairement à la configuration tirette dorsale, la combinaison doit être pliée et non roulée.



*Figure 44 - Tirette frontale
Source : Santi*

Quel que soit la configuration, la combinaison doit toujours être rangée tirette ouverte, pour éviter des contraintes inutiles sur celle-ci. La tirette est l'élément le plus délicat et plus coûteux dans la combinaison, elle nécessite donc un soin et un entretien particulièrement attentif.

Entretien de la tirette

Après chaque plongée il convient de vérifier l'état de la tirette, de la rincer et de passer sur les parties en métal d'une couche de paraffine ou de cire d'abeille.

Attention : sous peine de détériorations il est défendu d'utiliser des bombes de lubrifiant en aérosol. L'idéal et le moins coûteux consiste à utiliser la paraffine en bloc, vendue dans les drogueries, elle sert habituellement à clore les pots de confitures (à la rigueur on peut se dépanner avec de la bougie sans colorant).



La plongée en combinaison étanche

Comparaison entre les tirettes dorsale et frontale

Type	Dorsale	Frontale
Récréatif	Oui	Oui
Sportif	Oui/Non	Oui
TEK	Non	Oui
Semi-Pro	Oui	Oui/Non
Pro	Oui	Non
Habillage / déshabillage	++++	++
Fermeture de la tirette seul	Non	Oui
Transport combinaison roulée	Oui	Non
Transport combinaison pliée	Non	Oui
Facilité de remplacement	++++	++
Prix	++	++++

Valves

Les valvessont des éléments primordiaux dans un costume étanche, car elles permettent le contrôle de la flottabilité. Ce qui implique qu'à chaque instant on doit pouvoir ajouter ou retirer de l'air de la combinaison. A la descente il faudra ajouter de l'air, pour éviter une descente trop rapide et un plaquage du costume. Cette fonction est réalisée par la vanne d'entrée d'air, qui lors de la descente devra être actionnée fréquemment par petites touches successives, afin de laisser l'air entrer progressivement dans la combinaison. En revanche lors de la remontée il faudra évacuer l'air en excès, cette fonction est assurée par la soupape de purge. L'air dans la combinaison se dilate en permanence lors de la remontée (loi de Boy-le-Mariotte), il faudra retirer de l'air en permanence de la combinaison. Cette opération est grandement facilitée par une purge automatique. Les valves, et plus particulièrement la soupape de purge, sont des éléments mécaniques particulièrement sensibles qui demandent un entretien rigoureux.



La plongée en combinaison étanche

Vanne d'entrée d'air

Cette vanne est utilisée pour admettre de l'air dans la combinaison en actionnant le bouton poussoir qui libère le siège. La fermeture de la vanne est assurée par un ressort de rappel. Elle permet d'assurer l'équilibre du plongeur quelle que soit sa profondeur et éviter le plaquage de la combinaison. Il faut prendre l'habitude de travailler avec cette



Figure 46 - Vanne entrée d'air

vanne dès les premiers mètres de la descente, même si on ne constate aucun phénomène de plaquage. Cela permet d'assurer une pression suffisante dans le costume afin de garantir une bonne étanchéité des joints et éviter ainsi les entrées d'eau. Il faut veiller tout particulièrement lors de l'équipement à laisser cette vanne toujours libre d'accès. Cette vanne est raccordée au premier étage du détendeur par l'intermédiaire de l'inflateur. Des exécutions spéciales permettent l'introduction d'un câble électrique pour gilet chauffant.

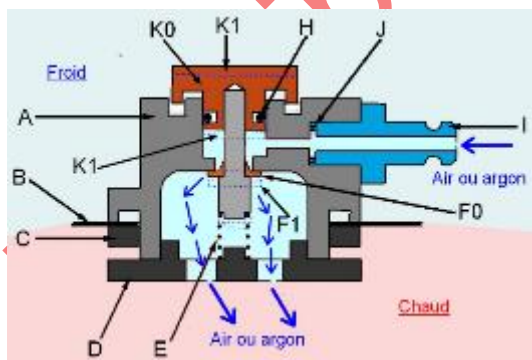


Figure 45 - Schéma vanne entrée air

- A : Boîtier
- B : Combinaison
- C : Ecrou
- D : Couvercle de boîtier avec déflecteur
- E : Ressort de rappel
- F0 : Siège fermé
- F1 : Siège ouvert (pointillé bleu)
- I : Raccord rapide mâle
- J : Joint torique
- H : Joint torique
- K0 : Bouton poussoir
- K1 : Bouton poussoir enfoncé (pointillé bleu)



La plongée en combinaison étanche

Qualités d'une bonne vanne d'entrée d'air

- Bouton poussoir large et facile à manœuvrer.
- Présence de chicane qui brisent le jet d'air à l'entrée de la combinaison pour éviter la sensation de froid.
- Facile à enlever du costume.
- Facile à démonter sans outillage spécial.
- Facile à entretenir.

Problèmes et remèdes

L'eau entre dans la combinaison

- Vérifier si la soupape est bien vissée sur le costume.
- Vérifier le joint torique du bouton poussoir.

L'air rentre en permanence dans la combinaison.

- Remplacer le siège.

Entretien

- Après chaque plongée : rincer abondamment à l'eau douce.
- Tous les ans : Démonter, rincer, détartrer à fond la vanne et graisser les joints toriques.

Soupape de purge

L'objectif de cette soupape est double, elle permet de purger manuellement ou automatiquement l'air présent dans le costume lors de la remontée. Elle doit être capable d'un débit important pour éviter un blow-up éventuel. Elle permet aussi d'assurer l'équilibre du plongeur à une profondeur déterminée.



Figure 47- Soupape de purge - Apeks, version haute



La plongée en combinaison étanche

Les caractéristiques de débits sont primordiales pour les combinaisons membrane qui contiennent plus d'air que les combinaisons en néoprène. Les combinaisons membrane doivent toujours être équipés d'une soupape de purge qui peut être commandée manuellement. Pour les costumes en néoprène ou peut éventuellement se contenter, pour des raisons budgétaires, d'une soupape « Full automatique ». Cette solution, moins coûteuse ne représente pas des bonnes garanties de sécurité en cas de blow-up. De nos jours ce type de soupapes est abandonné par les fabricants sérieux. Pour assurer une sécurité et un confort maximum il importe que le débit de la soupape soit réglable. Ce réglage doit être facilement accessible à chaque instant. Dans les soupapes de qualité, il s'effectue en vissant le boîtier extérieur qui sert également de commande pour l'ouverture manuelle de la soupape.

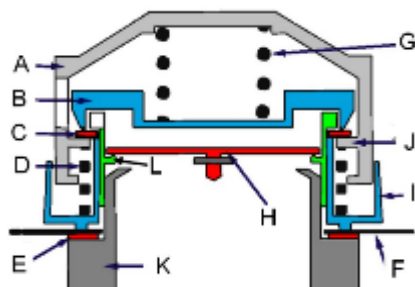


Figure 48 - Schéma de la purge

- A : Boîtier extérieur, poussoir
- B : Piston
- C : Membrane
- D : Ressort de rappel
- E : Joint
- F : Combinaison
- G : Ressort de tarage réglable de la purge automatique
- H : Clapet anti-retour
- I : Couvercle
- J : Poussoir
- K : Carter
- L : Couvercle

Elle doit pouvoir laisser passer l'air vers l'extérieur tout en empêchant les entrées d'eau. A cet effet, elle est munie obligatoirement d'un clapet anti-retour. Placée généralement sur le bras gauche près de l'épaule elle doit être facilement accessible. Aucune autre pièce de l'équipement du plongeur ne peut la recouvrir.



La plongée en combinaison étanche

Qualités d'une bonne soupape de purge

- Débit facilement réglable.
- Plage de réglage étendue et progressive.
- Possibilité d'ouvrir la soupape manuellement.
- Large bouton de commande manuel.
- Bouton de commande pouvant être éventuellement actionné par le menton.
- Débit important lors de l'ouverture manuelle.
- Facile à démonter du costume.
- Facile à démonter et à entretenir sans outillage spécial.

Commande manuelle.

L'ouverture de la soupape s'obtient en appuyant sur le boîtier extérieur (A) avec la paume de la main. Par cette action le poussoir descend libérant la membrane (C) qui assurait la fermeture. L'air, dont la pression est légèrement supérieure à la pression ambiante, peut s'échapper au travers du clapet anti-retour (H) par les orifices du couvercle et du boîtier extérieur. La fermeture de la vanne, lorsque la purge est terminée, est assurée par le ressort de rappel (D). Le clapet anti-retour (H) empêche l'eau de rentrer dans la combinaison.

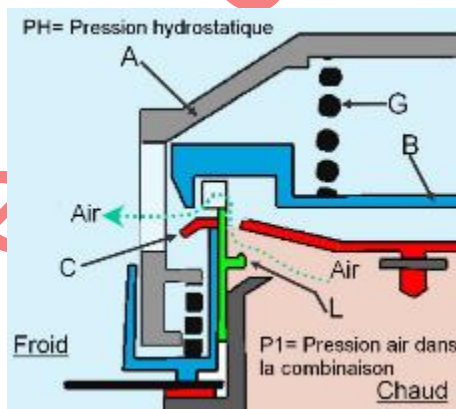


Figure 49 - Purge - Commande manuelle

Commande automatique.

L'air agissant sur la face interne du piston (B) soulève celui-ci en comprimant le ressort de tarage (G). En se soulevant le piston libère la membrane (C) et l'air peut s'échapper par les ouvertures du boîtier



La plongée en combinaison étanche

extérieur (A) et du couvercle (L). Le clapet anti-retour empêche l'eau de rentrer dans la combinaison.

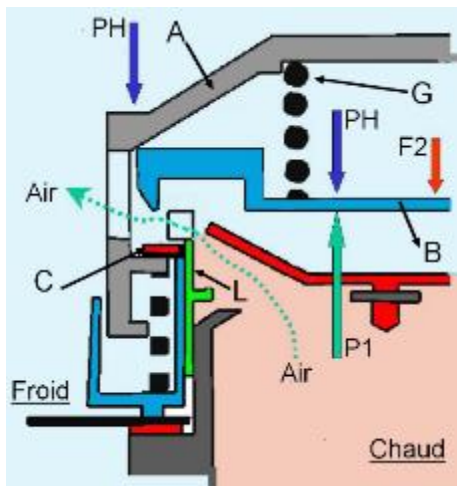


Figure 50 - Purge commande automatique

P1 : Pression air dans la combinaison.

PH : Pression hydrostatique.

F2 : Force due au tarage du ressort de réglage de la purge (G).

S1 : Surfaces inférieures du piston (B).

S2 : Surfaces supérieures du piston (B).

La purge s'ouvre si :
 $P1 S1 > PH S2 + P2$

La purge se ferme si :
 $P1 S1 < PH S2 + P2$

Le réglage de la pression d'ouverture de la soupape s'obtient en vissant le boîtier ce qui occasionne une précharge plus ou moins forte sur le ressort de tarage (G). Si on dévisse le boîtier on diminue cette pression. La pression d'ouverture de la soupape est en général réglable entre 2 et 40 cmH₂O. La pression à l'intérieur du costume est donc supérieure de cette valeur à la pression hydrostatique. Cette surpression est nécessaire pour l'étanchéité des joints et pour éviter le plaquage du vêtement.

Indirectement, le ressort de tarage (G) permet de régler le débit d'évacuation d'air de la soupape en modifiant la section de passage de l'air. Les ouvertures dans le couvercle (L) seront plus ou moins ouvertes en fonction de la pression liée à la force de tarage du ressort (F2). Plus cette force de tarage sera im-

portante, moins grande sera la section de passage de l'air et moins grand sera le débit. Au contraire si cette force de tarage est faible le débit sera important. Le tarage du ressort est ajustable en plongée en



La plongée en combinaison étanche

vissant le boîtier extérieur, ce qui permet d'obtenir à tout moment un réglage optimal et un équilibre parfait quelle que soit la profondeur et les erreurs de lestage.

Problèmes et remèdes

L'eau rentre dans la combinaison

- Vérifier si la soupape est bien vissée sur la combinaison.
- Clapet non étanche : Vérifier, nettoyer, et au besoin remplacer le clapet.
- Corps gras sur le clapet : Dégraisser.

L'air s'échappe de la combinaison en permanence

- Vérifier le réglage de la soupape.
- Nettoyer et au besoin remplacer la membrane.
- Vérifier l'état du piston et des ressorts.
- Vérifier si le piston n'est pas coincé.

Entretien

- Après chaque plongée rincer abondamment à l'eau douce.
- Tous les ans, démonter, rincer, détartrer à fond la soupape.

Attention : il faut veiller à ne jamais graisser les membranes et clapet anti-retour. L'utilisation de bombes en aérosol est absolument à proscrire, le gaz propulseur risque de les endommager.



Configuration du scaphandre



Figure 51 - Configuration des détendeurs

La configuration du scaphandre n'est pas une science exacte. J'estime, sans rentrer dans le dogmatisme que l'approche « Hogarthienne⁹ » est la plus rationnelle pour plonger dans des eaux glaciales et même les eaux tempérées de nos régions. A notre époque, il n'est plus concevable de plonger avec un seul détendeur.

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)

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• Long hose

⁹ William "Bill" Hogarth Main: plongeur souterrain américain



La plongée en combinaison étanche

Sur la figure 51 on remarque que le détendeur principal est équipé d'un « free flow control » et d'une soupape de surpression sur le premier étage. Ce système n'est pas Hogarthien. En cas de givrage, il permet de bloquer sans fermer le robinet et sans risque d'éclatement du flexible MP le circuit d'air principal.

Pourquoi l'inflateur de la stab est monté sur le détendeur de réserve ?

Le détendeur de réserve et la stab sont des systèmes de secours. En cas de givrage et fermeture du robinet qui alimente le détendeur principal, il est inconcevable de se priver du moyen le plus sûr de rejoindre la surface en position verticale, la tête vers le haut. Ce moyen le plus sûr, c'est la stab ou la wing. Il en va de même pour le manomètre.

La fermeture du robinet principal est un incident grave, qui met fin à la plongée et qui occasionne, immédiatement, la procédure de remontée vers la surface. L'air dans la combinaison va se dilater avec la diminution de la pression hydrostatique (Boyle-Mariotte), il n'y aura donc pas de risque de plaquage de la combinaison malgré la fermeture du circuit d'injection d'air dans la combinaison.



CHAPITRE 5

PROTECTIONS ISOTHERMIQUES

- Rappel de la thermodynamique
 - Les échanges thermiques
- Isothermie, indices de résistance thermique vestimentaire.
- Principe de la protection contre le froid
 - Principe des trois couches
 - Le confort thermique
 - Bilan thermique et
 - Résistance thermique minimum
- Protections thermiques
 - La souris
 - Les tissus intelligents
 - Gilet chauffant
 - Les gants
 - Gants humides
 - Gants étanches
 - Sous-gants chauffants

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 !



Rappel de la thermodynamique

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.

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.

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



La plongée en combinaison étanche

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.

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.

L'évaporation

Pour combattre la chaleur, l'évaporation de la sueur est un puissant moyen. Il faut une quantité d'énergie importante pour évaporer¹⁰ 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.

¹⁰ 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)



Isothermie et indices R, CLO, TOG

L'isothermie est la propriété que possèdent les combinaisons à conserver la chaleur du corps. L'unité de comparaison des qualités isothermiques la plus généralement utilisée est le « CLO » qui a été adopté par le laboratoire l'US Navy. Il représente l'inverse de la déperdition calorifique qui est exprimé en $1/(Kcal/h.m^2)$. La mesure standard est effectuée sur une surface de $0,18 m^2$, à la température ambiante de $21^{\circ}C$, avec une production calorifique de $50 kcal/h.m^2$ à la température de $37^{\circ}C$. Les mesures sont effectuées dans de l'air immobile à $21^{\circ}C$. Pratiquement, plus l'indice CLO est élevé meilleures seront les qualités isothermiques des combinaisons.

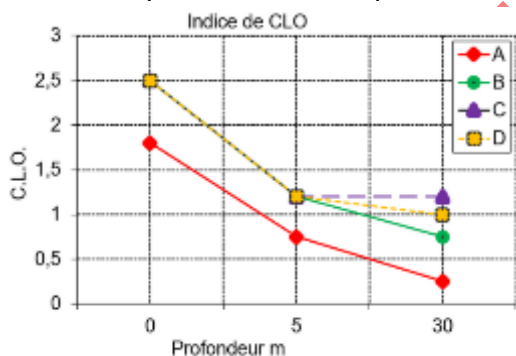


Figure 52 - Indice CLO

- A : Combinaison humide 7 mm
- B : Combinaison néoprène de 6,5 mm, sans souris mais avec un lainage.
- C : Combinaison membrane avec une souris moyenne épaisseur.
- D : Combinaison néoprène compressé 4 mm

Le graphique nous apprend que les qualités isothermiques des combinaisons en néoprène et membrane sont semblables au niveau des paliers effectués couramment par les plongeurs récréatifs. A partir de 9m de profondeur, le rapport devient plus favorable aux combinaisons membrane à condition d'utiliser ceux-ci avec une souris de bonne qualité. Les combinaisons néoprène compressé représentent un très bon compromis entre

le néoprène traditionnel et la combinaison membrane. Au niveau des paliers, ils ont un indice CLO légèrement inférieur au néoprène



La plongée en combinaison étanche

traditionnel en revanche, cet indice reste nettement plus constant en fonction de la profondeur à partir de la profondeur de 9 m.

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 $^{\circ}\text{C.m}^2/\text{W}$. 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 et principalement dans l'UE, le TOG.

	R ($^{\circ}\text{C.m}^2/\text{W}$)	CLO	TOG
1R	1	6.452	10
1CLO	0.155	1	1.55
1TOG	0.1	0.645	1

Principe de la protection contre le froid

Les trois couches

Ce ne sont pas les vêtements qui réchauffent le corps, mais la chaleur produite par notre métabolisme.

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 ».



La plongée en combinaison étanche

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.

Confort thermique

La notion de confort thermique 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 CLO. 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 :

$$T = 31 - (0,155 W CLO) \quad (8)$$

T = Température de confort en °C

W = Puissance métabolique de (production de chaleur) en W/m^2 (100 à 180 W/m^2 en plongée)

CLO = Indice CLO

Exemple :

Quel est la température de confort pour un plongeur ayant une production métabolique de 125 W/m^2 (effort moyen en plongée) et une combinaison possédant un indice CLO global de 1,4 ?

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



La plongée en combinaison étanche

Estimation rapide de la température de confort

Les tableaux suivants donnent une idée de la température pour quelques catégories de personnes en fonction de leur poids.

Poids (Kg)	—	—	45	52	60	67	75	82	90	100	105	110	120
I	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
II	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	—
III		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L

CLO 1,8

Indice	AE	AM	AF
A	—	—	—
B	—	—	—
C	7	14	20
D	6	14	20
E	4	12	19
F	3	11	18
G	2	10	17
H	1	9	16
I	0	8	15
J	-1	7	13
K	-1	6	12
L	-4	4	11
M	-2	3	10

CLO 1-1,2

AE	AM	AF
—	—	—
—	—	—
18	22	25
17	22	25
15	20	24
14	19	23
13	18	22
12	17	21
11	16	20
10	15	18
10	14	17
7	12	16
9	11	15

I : personne moyenne
 II : personne qui a chaud dans une pièce alors que la moyenne des occupants est en situation de confort.
 III : personne qui a froid dans une pièce alors que la moyenne des occupants est en situation de confort.

AF : activité faible, photographie...

AM : activité moyenne, promenade sans effort

AE : activité énergétique, travail, palmage violent

En vert valeur médiane de la population



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. Il est possible de l'estimer grossièrement en fonction du débit ventilatoire. Suivant 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 :

$$\Delta T = \frac{Wt \times t}{Mc} \quad TH = \frac{Cons \times 100}{8} \quad (9) \quad (10)$$

ΔT = Chute de la température centrale (°C)

Wt = Dette thermique (W)

Mc = Masse corporelle du plongeur (Kg)

t = Temps d'exposition au froid (h)

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 et quelle est sa dette thermique si elle pèse 85 kg pour une plongée de 30 minutes ?

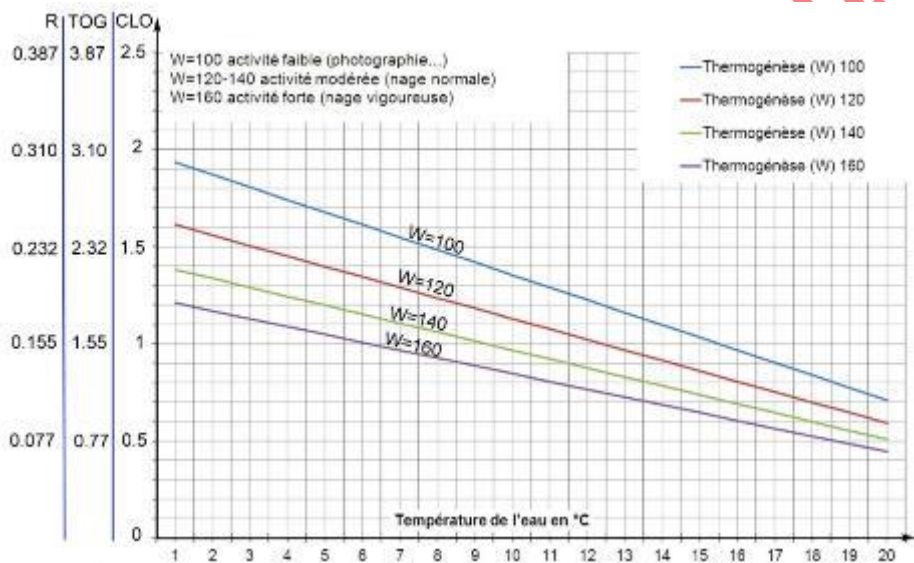
$$TH = \frac{10 \times 100}{8} = 125 \text{ W} \quad \Delta T = \frac{125 \times 0,5}{85} = 0,73^\circ\text{C}$$



La plongée en combinaison étanche

Résistance thermique minimum

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 R de 0,232 °C.m²/W



Les protections thermiques

Les sous-vêtements ou « souris »



Figure 53 - Souris Weezle

La « souris » qui peut aussi être appelée « wooly bear » est un sous-vêtement qui permet de conserver une couche d'air chaud entre la peau du plongeur et l'enveloppe de la combinaison refroidie par l'élément liquide. Le nom de souris vient des premiers sous-vêtements, qui par leurs couleurs et leurs coupes faisaient inmanquablement songer à ces rongeurs.

Différentes matières peuvent être utilisées pour sa confection, la mousse, le coton molletonné, le polypropylène et le thinsulate. Le thinsulate est le matériau le plus moderne et le plus fréquemment utilisé de nos jours. Les

souris en thinsulate de haut de gamme comprennent quatre couches. Une couche extérieure en nylon imperméable, puis une couche d'isolation thermique en polyuréthane suivie de la couche de thinsulate qui retient l'air. L'épaisseur de cette couche varie en fonction du degré d'isothermie désiré. Et pour terminer une toile en polyester anti-allergique.

L'utilisation d'une souris est obligatoire avec les combinaisons membrane. Pour ce type de combinaison c'est en effet la souris, et pratiquement elle seule, qui déterminera l'isothermie. On peut choisir son épaisseur en fonction de la température de l'eau, une souris plus mince sera moins isothermique, mais nécessitera l'utilisation de moins de lestage. Si on s'équipe souvent à l'extérieur, sans le secours d'un confortable vestiaire, on peut choisir une souris avec une



La plongée en combinaison étanche

enveloppe extérieure imperméable. Il serait en effet dommage d'avoir un costume de qualité, et d'être mouillé, avant de plonger, par la... pluie. Quelques poches avec tirettes, qui empêchent la pluie de pénétrer, sont un petit plus qu'il ne faut pas négliger, mais il ne faut pas oublier de vider ses poches des objets contondants. Durant la plongée les objets durs peuvent occasionner des hématomes en cas de plaquage de la combinaison.

Une souris de qualité doit également conserver de bonnes propriétés isothermiques si elle venait à se mouiller, présenter un niveau antiallergique important, absorber facilement la transpiration et être d'un entretien facile. Un 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

Le Thinsulate®

Le thinsulate est une matière composée de microfibres de polyoléfine. Cette fibre synthétique est développée par la firme 3M. Elle possède des caractéristiques intéressantes pour la fabrication de souris. Les fibres sont légères, hydrophobes et absorbent moins de 1% d'eau. Une épaisseur de 10mm à un indice CLO de 1,8. Au contact de cette matière, l'eau se fragmente en microgouttelettes qui ne se touchent pas. Ce qui réduit drastiquement le transfert de chaleur vers le milieu extérieur. De ce fait le thinsulate, même mouillé, conserve une bonne isolation thermique.

Le Polartec®

Fibre à base de polyester développé par Malden Mills. Ces propriétés sont similaires au thinsulate



Laine synthétique – Polyester

Sous-vêtement pour combinaison néoprène

Tableau de sélection de la souris

Le tableau permet de faire une première sélection du type de souris à utiliser en fonction de la température de l'eau. Pour des plongées plus engagées qui dépassent une heure, il conviendra de faire une évaluation plus précise avec un bilan thermique.

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	



T-Shirts en tissus intelligents

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

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.

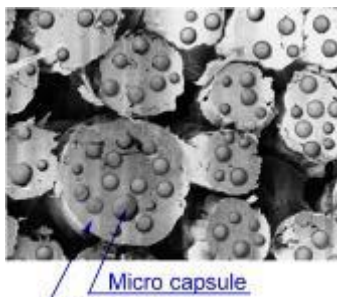


Figure 54 - Tissus Outlast

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



La plongée en combinaison étanche

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.

Le Gilet chauffant

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.



La plongée en combinaison étanche



Figure 55 - Gilets Chauffants

A : Thermalution

B : Santi

C : Adaptateur pour vanne air

D : Vanne air Santi

térieur 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.

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'air¹¹. Certains modèles ont les batteries à l'intérieur de la combi, avec une commande à distance sans fil fixé au poignet¹². 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.

Il ne faut pas perdre de vue qu'en cas de noyade 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 mélange est explosif. Dans tous les cas de figure, le circuit électrique à l'extérieur comme à l'in-

¹¹ 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.

¹² 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.



La plongée en combinaison étanche

Durée d'utilisation, capacité des batteries

Les fabricants ont une tendance à exagérer la durée d'utilisation ! Le froid diminue la capacité théorique de la batterie. Pour conserver une batterie en bon état sans restreindre sa durée de vie, il convient de ne pas la charger à plus de 80% et de ne pas la décharger à moins de 10%. On n'utilisera donc que 70% de la capacité théorique de la batterie.

$$I = \frac{P}{U} \quad t = \frac{60 \times 0,7 \times C}{I} \quad (11)$$

t = temps d'utilisation en minutes

C = Capacité de la batterie (Ah)

P = Puissance de chauffe (W)

U = Tension de la batterie – 12v

I = Intensité (A)

	Batteries			C=6Ah	C=28Ah
	P	U	I	t	t
Gilet chauffant	55	12	4,6	55	255
Combinaison chauffante	110	12	9,2	27	128

Gants

Les gants constituent un élément indispensable pour envisager la plongée dans les eaux froides, la déperdition calorifique serait trop importante. Au bout de quelques minutes les doigts seraient tellement engourdis qu'ils refuseraient tous services. Actionner les commandes de son équipement deviendrait alors une tâche totalement impossible. Plonger dans des eaux froides avec des gants conçus pour des régions tropicales qui n'assurent aucune protection thermique est tout à fait irresponsable et risque d'entraîner des accidents graves. Ceux-ci, doivent bien sûr, être passé au-dessus des manches de la



La plongée en combinaison étanche

combinaison en veillant à ne pas retourner les manchettes. Les gants étanches doivent être utilisés avec des sous-gants pour assurer l'isothermie.

Gants humides en Néoprène



Figure 56 - Source Aqualung

Les gants humides en néoprène doivent avoir une épaisseur de minimum 5 mm. On peut utiliser des moufles ou des gants à 5 doigts. Si on utilise des moufles, il faut de préférence utiliser les modèles longs qui couvrent largement les avant-bras. Pour les gants à 5 doigts, utiliser de préférence les modèles qui possèdent un système de fermeture à Velcro, ce système empêche l'eau de circuler dans le gant. On peut limiter les entrées d'eau en posant un cordon de colle pour néoprène sur les coutures à l'intérieur du gant.

Gants étanches avec joint conique

Ces gants doivent être enfilés avant de mettre la combinaison. Ce sont des gants en latex qu'il faut utiliser avec des sous-gants en laine, qui conviennent bien aux combinaisons en néoprène. L'étanchéité se réalise entre la surface lisse de la manchette et le côté extérieur du cône latex du gant. Ils présentent l'avantage d'assurer un bon confort thermique tout en conservant une bonne dextérité permettant de manipuler de petits objets. Ils présentent l'inconvénient d'avoir une tendance au plaquage. Solution idéale pour les photographes qui opèrent à faible profondeur.

Figure 57 - Gant étanche avec joint conique





La plongée en combinaison étanche

Gants étanches, damage par joint torique

Les manchettes amovibles de la combinaison sont remplacées par des gants étanches maintenus en place par des joints toriques. Les mains sont parfaitement maintenues au sec et le plaquage du gant est très faible. Le clamage du gant est particulièrement efficace, ce système empêche la perte du gant si celui-ci se gonfle. Ce système convient parfaitement pour effectuer un travail qui demande de la précision tel que le réglage d'un l'appareil. Pour éviter une perte de dextérité, due au gonflement il faut maintenir les mains en dessous du niveau de la soupape de purge. D'un prix assez raisonnable, ce mode de fixation présente un inconvénient sérieux, en cas de percement du gant, l'eau envahi la combinaison et pas seulement le gant !

- A. Manche de combinaison.
- B. Joint torique
- C. Anneau de maintien rigide
- D. Gant latex et sous-gant



Figure 58 - gant étanche avec joint torique

Gants étanches, damage « Viking »

Le must en matière de gant Ce système permet de clamer des gants étanches sur une manchette en latex ordinaire. Le damage se réalise à l'aide de deux anneaux. Le premier en PVC rigide se place à l'intérieur de la manchette afin d'assurer une forme et une dimension de manche qui permet le serrage de l'anneau externe. Serrage indispensable pour assurer une bonne tenue du deuxième anneau en caoutchouc, qui se place au-dessus de la manchette au droit de l'anneau



La plongée en combinaison étanche

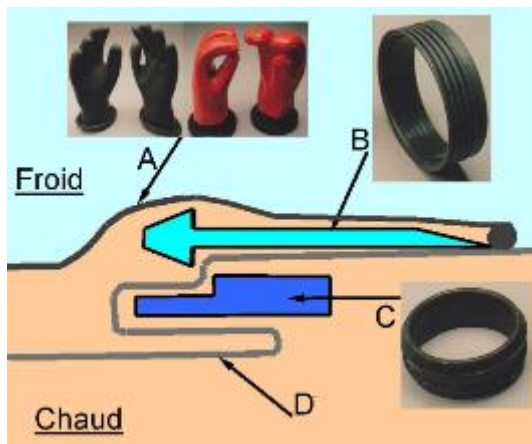


Figure 59 - Clamage Viking

- A. Gants et moufles
- B. Anneau externe
- C. Anneau interne
- D. Manchette

interne rigide. Le gant étanche s'enfile au-dessus de cet anneau externe profilé pour retenir le gant si par malheur celui-ci venait à se gonfler exagérément. Il faut veiller à ne pas se tromper de sens lors du montage de l'anneau externe, la denture doit se trouver du côté des doigts. Dans le cas contraire le gant risque d'être éjecté dans les premières

minutes de plongée. Ce damage assure une étanchéité à toute épreuve s'il est monté correctement. Ce système fort coûteux, réservé à des professionnels, donne une bonne garantie d'étanchéité. L'absence d'angle vif (baïonnette visée...) facilite la décontamination pour les OTS travaillant dans un milieu contaminé ou en centrale nucléaire.

La mise en place doit se faire avec une aide extérieure, donc ce système ne convient pas aux plongeurs récréatifs.

Gants étanche à « baïonnette »

De nombreux fabricants proposent des systèmes à « baïonnette » qui sont tous basés sur des principes similaires. Le plus connu est le système « Quick Gloves » de SiTech. Il se compose d'un anneau externe qui coince la manchette du costume par l'intermédiaire d'une clame.



La plongée en combinaison étanche

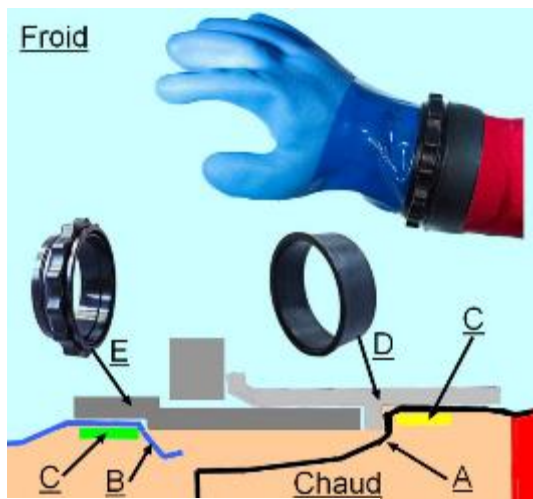


Figure 60 - Gant étanche Si Tech

- A. Manchette combinaison
- B. Gant
- C. Clame
- D. Anneau externe
- E. Anneau avec écrou

de la manchette et du gant.

Celle-ci se monte à l'intérieur de la manchette latex de la combinaison.

L'anneau muni d'un écrou se fixe de la même manière, à l'aide d'une clame, sur le gant. Le maintien du gant sur la combinaison se fait par simple serrage dur entre les anneaux. L'écrou sert à dégager le gant. Ce système présente l'avantage d'être simple, le plongeur peut s'équiper et se déséquiper seul.

Il est facile de changer un gant percé par de nombreux gants du commerce. Diverses tailles de clames sont livrées pour s'adapter à l'épaisseur du latex

Comme la manchette est conservée, il y a une étanchéité entre la combinaison et le gant, qui peut engendrer un placage du gant. La solution consiste à placer un petit tube sous la manchette afin de laisser passer un peu d'air, sans laisser passer une quantité importante d'eau si le gant est percé. Il ne convient pas pour les manchettes en néoprène, sauf si on colle¹³ l'anneau externe sur la combinaison !

¹³ Note de l'auteur : Je ne suis pas partisan de cette solution, car trop définitive.



La plongée en combinaison étanche

Sous-gants chauffants

Ils se mettent sous les gants étanches et sont destinés à des plongées très longues dans une eau glaciale. Pour des raisons de sécurité, la batterie (12V) est à l'extérieur de la combinaison. Le raccordement se fait par l'intermédiaire d'un câble qui passe par la vanne d'air de la combinaison. Il existe des adaptateurs qui permettent de conserver la vanne air d'origine.



Figure 61 - Sous gants Santi

La puissance de chauffe est de l'ordre de 2x18W ce qui produit un courant de 3A et donne une autonomie de 85 minutes avec une batterie de 6 Ah, en tenant compte qu'on ne décharge pas la batterie à moins de 10% de sa capacité et qu'on ne la charge pas à plus 80% de sa capacité.



CHAPITRE 6

LES ACCESSOIRES

- La ceinture de lest
- Les plombs de chevilles
- Les systèmes de flottabilité
- Les renforts de coude et de genou
- Les poches
- La tirette pipi
- La purge pipi (Pee valve)

Les accessoires, parfois indispensable, parfois utile, parfois superflu... mais toujours coûteux ! Pour éviter de se ruiner, le plongeur responsable dresse une liste de ce dont il a réellement besoin pour son style de plongée.



Le Lestage

La ceinture de lest

La perte du lestage est un problème majeur lorsqu'on plonge en étanche. Une perte accidentelle du lestage est inenvisageable, donc on oublie la boucle à largage rapide et les poches largables dans la stab. La caractéristique de ces poches est de se perdre un peu trop facilement. Avec la stab, il y a redondance dans le matériel de flottabilité. De ce fait, le largage en immersion de la ceinture, pour des raisons de sécurité, est obsolète.

Figure 62- Baudrier Northern Diver



La ceinture classique est avantageusement remplacée par un baudrier réglable avec trois points de fixation. Les plombs peuvent être fixés ou insérés dans des pochettes. Il est aussi possible d'utiliser une ceinture classique à pochettes en la munissant de bretelles.

Plombs de chevilles

Indispensable pour des combinaisons en néoprène ayant une forte flottabilité et très utile pour les combinaisons membrane, surtout si on utilise des palmes légères (Force Fin...). Généralement 0,5 à 1 kg par cheville sont suffisant. Il est préférable d'opter pour un modèle à grenaille, muni d'une sangle réglable et de clips.



Figure 63 - plombs de chevilles

Les systèmes de flottabilité



La plongée en combinaison étanche

Pour des raisons évidentes de sécurité, il est indispensable d'avoir un système de flottabilité indépendant de la combinaison étanche. La plupart des plongeurs utilisent une stab, avec des sangles larges et réglables.

La tendance actuelle consiste à abandonner la stab au profit de la bouée dorsale (wing), avec plaque en acier inox et harnais réglable. La wing étant plus modulaire et possède une capacité de levage supérieure à celle de la stab. Certaines pouvant contenir jusqu'à 33 litres d'air. La stab et de la wing ne sont pas conçues pour garantir le maintien de la tête hors de l'eau en surface. Ce ne sont pas de vrais gilets de sauvetage, contrairement à la bouée collerette qui maintient la tête du plongeur hors de l'eau en surface.

Les renforts de coude et de genou

Une bonne combinaison étanche doit au minimum être pourvue de renforts au niveau de genoux et également, si possible, au niveau des coudes. Ces renforts doivent avoir une très bonne résistance à l'abrasion et à la pénétration. Les meilleures sont en Cordura ou en kevlar.

Les poches

Figure 64 - Poche DUI

Elles ne sont pas indispensables, mais bien utiles pour y mettre un masque de réserve, parachute, spool et autres bricoles ou quelques plombs. Il est préférable d'avoir deux vraies poches sur les cuisses et pas une poche plaquée. En dehors d'une table de plongée on ne peut pas mettre grand-chose dans une poche plaquée. Êtres doivent être facilement accessible et pouvoir se fermer et s'ouvrir aisément même avec des gants étanches.





La tirette pipi

Cet accessoire purement masculin peut être d'une grande utilisée, après une longue plongée. L'inconvénient c'est que cet accessoire accroît le prix de la combinaison d'une manière non négligeable.



Figure 65 - Tirette pipi DUI

La purge pipi (Pee Valve)

On aime ou on n'aime pas... question de choix ! Il n'empêche que cela remplace efficacement la couche culotte pour incontinent. Les couches étaient régulièrement utilisées par les plongeurs TEK avant que cette invention vienne tout changer.



Figure 66 - Pee Valve - Si Tech

Cette valve permet d'évacuer l'urine vers l'extérieur sans faire rentrer de l'eau dans la combinaison. En plus de la version masculine, une version féminine est mise en vente (en bleu sur la photo). Elle est un peu plus délicate à utiliser et la dame doit être rasée afin d'éviter les fuites le long de la coquille. Ce matériel demande un nettoyage et une désinfection rigoureuse.



CHAPITRE 7

UTILISATION DES COMBINAISONS ETANCHES

- Préparation
- Transport
- Habillage
- Plongée
 - Immersion et descente
 - Flottabilité horizontale
 - Remontée
- Déshabillage
- Entretien
- Rangement
- Réparations
 - Néoprène
 - EPDM – Trilaminé

L'utilisation d'une combinaison étanche peut se résumer en cinq points, la préparation, le transport, la plongée, l'entretien et éventuellement... les réparations !



La plongée en combinaison étanche

Préparation

La préparation avant plongée, ne diffère pas fondamentalement de la plongée en combinaison humide. Néanmoins il faut porter une attention particulière à la combinaison étanche. Elle doit être vérifiée, la purge et la vanne d'air testée, le joint du cou et les manchettes taillée et la tirette graissée. Pour les combinaisons équipées d'une purge pipi, il ne faut pas oublier de la nettoyer et de la désinfecter.

Il ne faut pas oublier d'emporter la souris, les chaussettes chaudes, des boissons chaudes pour l'après plongée, le cas échéant les Rock-boots. Et surtout ne pas omettre d'ajuster le lestage et d'emporter quelques kilos de plomb supplémentaire.

Ajustement du lestage.

C'est un point capital, toutes choses restants égales, lorsque vous passer de la combinaison humide à une combinaison étanche il faudra augmenter le lestage. Le lestage varie en fonction des sous-vêtement que vous mettez sous la combinaison. Il faudra procéder à des tests et noter les résultats en fonction de l'équipement.

En première approximation, par rapport à une combinaison humide monopiece de 7mm avec un scaphandre identique, il faudra ajouter entre 0,5 et 1 kg de plomb à chaque cheville et pour une combinaison étanche membrane correctement ajustée utilisé avec une souris d'épaisseur moyenne (200 gr/m²) ajouter du poids à la ceinture, suivant le tableau ci-dessous. En vert :valeur médiane

Poids du plongeur (Kg)	<55	55-70	70-85	85-100	>100
Lestage supplémentaire (Kg)	2	3	4	5	6

Transport



La plongée en combinaison étanche

La combinaison étanche doit être transportée, roulée pour les versions à tirette dorsale et pliée pour les versions à tirette frontale dans le sac de transport. La tirette doit être placée à la partie supérieure du sac.



Figure 67 - Combinaison roulée

Pour éviter de percer la combinaison, il faut veiller à l'isoler totalement du reste de l'équipement. Le sac contenant le costume doit être placé au-dessus du reste de l'équipement, pour éviter le risque l'écrasement de la tirette.

La technique d'habillage

Il est très important de développer rapidement une technique d'habillage fiable pour éviter les oublis, les erreurs et une dépense d'énergie inconsidérée. Nous proposons une méthode rationnelle que chaque plongeur peut adapter en fonction de sa personnalité. Cette technique a été développée avec le souci de laisser le costume ouvert le plus longtemps possible avant la plongée afin d'assurer une certaine ventilation, de faciliter l'évacuation de la transpiration et d'éviter une forte augmentation de la température corporelle avant d'entamer la plongée. Il est important de ne pas couvrir les soupapes avec une pièce d'équipement.

Ne jamais oublier d'enlever sa montre avant de s'habiller



La plongée en combinaison étanche

1. Mettre la souris, complètement s'il fait froid ou jusqu'à la taille s'il fait chaud.
2. Dérouler le costume et vérifier si la tirette est bien lubrifiée.
3. Enfiler le costume jusqu'à mi-taille en évitant les plis.
4. Mettre du talc sur tous les joints si cela n'a pas encore été fait.
5. Mettre les protections de genoux puis les plombs de chevilles.
6. Enfiler le costume jusqu'aux aisselles.
7. Enfiler le bras gauche.
8. Enfiler le bras droit.
9. Fixer les instruments.
10. Enfiler l'autre bras.
 - Pour les costumes équipés d'un latex yoke uniquement :
 - 10.1. Lubrifier le joint biconique.
 - 10.2. Passer le joint biconique autour du cou.
 - 10.3. Placer l'anneau autour du cou.
 - 10.4. Rabattre le joint biconique autour de l'anneau en veillant à recouvrir entièrement celui-ci.
 - 10.5. Enfiler la combinaison par-dessus l'ensemble.
 - 10.6. Enfiler la cagoule.
 - 10.7. Serrer l'ensemble des joints à l'aide de la clame.
 10. Pour les costumes sans latex yoke (cas général), enfiler la tête en écartant le joint des deux mains.
11. Ajuster le joint du cou en vérifiant, l'absence de plis et de cheveux sous le joint.
12. Fermer la tirette lentement pour éviter l'échauffement de celle-ci par friction et en veillant à ne pas la coincer avec la souris.
13. S'accroupir et purger le costume à fond. Soit par la purge, soit en écartant légèrement le joint du cou.
14. Fermer la purge, puis l'ouvrir d'un tour.
- 15 - Mettre son lestage.
- 16 - Capeler les bouteilles.
17. Raccorder l'inflateur en passant le tuyau sous le bras en veillant à ce que les courbes du flexible soient amples et coplanaires.



La plongée en combinaison étanche

18. Enfiler la cagoule en évitant de laisser des cheveux sous le joint facial. Pour le costume Viking pro turbo ne pas oublier de serrer le strap.
19. Mettre le masque en plaçant la jupe sous le joint facial de la cagoule.

La plongée et le contrôle de la flottabilité

La procédure de contrôle de la flottabilité de la combinaison étanche est totalement différente du costume humide. En immersion il se fera uniquement avec le vêtement. Le gilet ne représente plus dans la plongée en étanche qu'un élément de sécurité, il ne joue aucun rôle actif dans l'équilibrage. Il se limitera à un moyen de sauvetage ou à une utilisation en surface où il vous donnera un meilleur confort, pour prendre des points de repère et pour attendre votre « tour » avant de remonter sur le bateau.

Si une déchirure se produit dans la combinaison, votre gilet vous permettra de remonter plus facilement en contrôlant votre vitesse. Le contrôle de flottabilité est grandement simplifié si on n'utilise que le costume pour s'équilibrer. Lors de la remontée il serait en effet particulièrement difficile de gérer simultanément le gilet, la combinaison, la profondeur et la vitesse. Il faudrait trois mains, une pour le gilet, une pour le costume, une troisième pour tenir la console et peut-être une quatrième pour l'éclairage.

Immersion et descente

L'immersion doit toujours se faire les pieds vers le bas. Il suffit de dégonfler le costume en appuyant sur la purge. Il est tout à fait déconseillé de s'immerger la tête la première, en « canard », ce qui provoque un reflux d'air dans les bottes, qui se gonflent. La purge se trouvant sur l'épaule, il est tout à fait impossible d'évacuer l'excédent



La plongée en combinaison étanche

d'air les pieds en l'air. Dans cette situation il est très difficile de se redresser, les pieds jouent le rôle inattendu de flotteur, tandis que les bouteilles servent de lest. Mais les difficultés ne s'arrêtent pas là, en se gonflant, les bottes distendent les sangles des palmes, qui peuvent glisser des talons. En tentant cette immersion, vous risquez bêtement de vous retrouver gesticulant, les pieds en l'air sans palmes.

Il est conseillé d'avoir un très léger sur lestage (+/-1 kg), ce qui permet d'avoir toujours un petit peu d'air dans le costume, même en amorçant la descente. Cette pratique évite les petites entrées d'eau au niveau du cou et une amorce de plaquage. Lors de la descente il faut ajouter de l'air dans le costume pour régler sa vitesse de descente et éviter le plaquage du costume. En ce qui concerne le masque et la cagoule pensez à souffler de l'air par le nez. Si la jupe du masque a été placée convenablement, sous le rebord de la cagoule, de l'air va s'infiltrer sous celle-ci et va combattre non seulement le squeeze, mais également les entrées d'eau sous la cagoule.

Flottabilité horizontale

L'introduction de l'air dans le costume doit se faire progressivement par petites pressions successives sur la vanne d'entrée d'air tout au long de la descente. Avec un peu d'entraînement, la flottabilité horizontale est facile à obtenir, surtout si on utilise des plombs de chevilles. Il faut éviter que les pieds s'élèvent exagérément, si cela ce produit, roulez vous en boule. L'air sera chassé vers le tronc et les épaules où il pourra facilement être purgé.

Remontée

La remontée, se fera en position verticale, tête vers le haut. Cette position permet de contrôler très facilement la purge et la vitesse de remontée. La répartition du lestage sur la ceinture et l'utilisation des plombs de chevilles, facilitent le contrôle de la flottabilité. Certains



La plongée en combinaison étanche

constructeurs proposent des harnais munis de poches dans lesquelles on peut glisser le lestage. Ce système très pratique permet un parfait maintien du lest. Pour éviter que les bretelles du harnais ne glissent le long des épaules il faut qu'elles soient croisées dans le dos.

Déséquipement

Avant tout il ne faut pas oublier de déconnecter l'inflateur avant d'enlever les bouteilles. En cas d'oubli, le poids des bouteilles peut exercer sur la vanne d'entrée d'air une traction importante qui peut endommager le costume. Le déséquipement se fait en ordre inverse de l'équipement. Il faut être particulièrement attentif à l'extraction des mains. Eviter d'exercer une traction importante, pour le néoprène le plus facile consiste à retourner les manchettes. Le latex demande encore plus d'attention afin de ne pas occasionner de déchirures avec les ongles. On peut faciliter le dégagement de la main, en écartant très légèrement la manchette à l'aide de l'autre main et en plaçant ses doigts comme pour faire le signe « je n'ai pas compris ». Pour sortir la tête, il faut écarter délicatement le joint à l'aide des deux mains, les doigts glissés à l'intérieur et les pouces à l'extérieur. Les mains seront placées de part et d'autre du cou. Il faut être particulièrement attentif aux longs ongles et aux boucles d'oreilles.



Entretien

Les entretiens, la qualité des réparations et le rangement sont primordiaux pour la durée de vie des combinaisons. Un bon entretien régulier et méticuleux accompagné d'un rangement correct peut doubler la durée de vie. L'entretien doit se faire à deux niveaux : un entretien quotidien après chaque plongée et un entretien annuel. Pour l'entretien annuel nous vous conseillons de vous adresser à un spécialiste.

Après chaque plongée

Il convient de rincer abondamment, à l'eau douce, le costume en insistant sur la tirette et les soupapes. Après séchage il faut talquer les joints et les manchettes et ne pas oublier de paraffiner la tirette. Attention sous peine de détériorations il ne faut pas utiliser des bombes de lubrifiant en aérosol. L'idéal et le moins coûteux consiste à utiliser de la cire d'abeille ou de la paraffine en bloc. Elle est vendue dans les drogueries et sert habituellement à clore les pots de confitures (à la rigueur on peut se dépanner avec de la bougie sans colorant). Après chaque plongée vérifier l'état de l'inflateur. Si le tuyau présente un renflement, des coupures, des boudinages ou une jonction avec les pièces de raccords suspects, il faut remplacer immédiatement l'inflateur. Celui-ci étant susceptible de se rompre.

Entretien annuel

En plus de l'entretien quotidien, il faut faire un entretien complet de la vanne et de la soupape de purge. Il faut démonter, rincer, détartrer à fond la vanne et la soupape de purge et graisser les joints toriques. Attention : il faut veiller à ne jamais graisser les membranes et clapet anti-retour de la purge. L'utilisation de bombes en aérosol est absolument à proscrire, le gaz propulseur risque d'endommager les membranes.



Rangement

En règle générale les costumes doivent toujours être rangés à l'abri de la lumière. Les UV détériorent le néoprène, le latex et l'EPDM. Surtout ne pas laisser sécher sa combinaison au soleil. Le rangement peut être de courte ou de longue durée. Pour un rangement de courte durée le costume doit réintégrer son sac d'origine.

Pour éviter de « croquer » la tirette les combinaisons à tirette doivent être roulées en commençant par les pieds, les manches vers l'extérieur. Les combinaisons à tirette frontale doivent être pliées. La tirette doit rester ouverte.

Un rangement de longue durée doit toujours être précédé d'un entretien complet. La combinaison après talcage des éléments en latex, doit être pendue à l'abri de la lumière. Elle sera de préférence placée sur un cintre, la tirette ouverte. On peut facilement se confectionner un cintre de grande taille à l'aide d'un manche de brosse coupé à longueur (+/- 1,5 m).

Réparations

Les réparations doivent garantir d'une part l'étanchéité parfaite et d'autre part une résistance mécanique au moins égale à celle existant avant la déchirure. Pour réaliser complètement cette deuxième condition la seule façon de procéder est de coller une rustine ou un empiècement de matière appropriée à l'endroit de la déchirure. Ce qui est difficilement réalisable avec un costume en néoprène cellulaire ou compressé.

1. Avant d'entamer les réparations il faut, bien sûr, détecter les fuites. Procéder de la façon suivante :



La plongée en combinaison étanche

2. Obstruer les manchettes avec des bouteilles ou des cônes en bois.
3. Boucher le cou avec un ballon.
4. Gonfler le costume et pulvériser de l'eau savonneuse à l'endroit probable de la fuite.
5. Marquer l'endroit où apparaissent les petites bulles.
6. Rincer pour enlever les traces de savon.
7. Faire sécher avant d'effectuer les réparations.

Réparation des combinaisons néoprène

Après avoir bien rincé et parfaitement séché la combinaison, bourrer le trou avec de la colle pour néoprène ou de préférence de l'Aquashure qui donne une résistance mécanique supérieure à la colle classique, mais néanmoins inférieure à la résistance d'une rustine. Il faut un délai de 24 heures pour effectuer une nouvelle plongée avec la combinaison ainsi réparé. On peut réduire ce délai à +/- 4 heures si on utilise de l'Aquashure mélangé à 30-40 % de Catol.

Réparation des costumes membrane

EPDM

1. Frotter l'endroit à réparer avec un morceau de toile émeri jusqu'à ce que la surface ne soit plus brillante.
2. Enlever le papier argenté de la rustine.
3. Enduire la rustine et l'endroit à réparer avec de la colle de vulcanisation à froid.
4. Attendre 2 à 3 minutes.
5. Recommencer l'opération 3 une nouvelle fois.
6. Appliquer la rustine et appuyer vigoureusement à l'aide d'un rouleau dur du type pâtissier.
7. Enlever le cellophane de la rustine.



La plongée en combinaison étanche

8. Attendre 10 à 15 minutes avant de plonger.

Trilaminate

Pour des petites réparations utiliser de l'Aqua-shure. Pour des réparations plus conséquentes, il faut coller un empiècement avec une colle adaptée à la couche extérieure du trilaminé.

Non libre de droit



CHAPITRE 8

UTILISATION DE L'ARGON

- L'argon c'est quoi ?
- Le matériel
- Remplissage des bouteilles

***P**ar rapport à l'air l'injection d'argon dans la combinaison présente des avantages non négligeables pour des plongées dans des eaux très froides, à fortiori pour des plongées sous la glace. Il est sec et présente de meilleures caractéristiques d'isothermie.*



L'argon c'est quoi ?

L'argon est un gaz rare monoatomique, incolore, inodore, non toxique et chimiquement très stable. Il est présent à 0,9% dans l'atmosphère.

Caractéristiques thermodynamiques							
Gaz		μ	λ	R	Chaleurs massiques		k
Nom	Symb.				Cp	Cv	
Argon	Ar	39,95	0,018	2081	520	312	1,667
Air sec	---	28,96	0,024	287	1004	717	1,401

μ = Masse molaire (atomique) du gaz (g/mol) (en gramme par mole)

R = (J/Kg K)

Cp = Chaleur massique¹⁴ à pression constante (J/Kg K)

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

k = Cp/Cv Constante adiabatique

λ = Conductivité thermique (W/m K)

Avantages

L'argon a une conductivité thermique 30% inférieure à celle de l'air sec, ce qui en fait un meilleur isolant. De plus, il est sec ce qui élimine la condensation, due au phénomène de paroi froide.

Inconvénients

L'argon est couteux, il faut du matériel supplémentaire et donc du poids supplémentaire. Le remplissage de la bouteille nécessite une procédure spécifique.

¹⁴ La chaleur massique est la quantité d'énergie calorifique qu'il faut fournir à une masse de 1kg de gaz pour augmenter sa température de 1°C. Elle peut être mesurée en maintenant la pression du gaz constante (Cp) ou en maintenant son volume constant (Cv)



Le matériel



Figure 68 - Kit argon

- A : Bouteille.
- B : Sangle de portage.
- C : Mousqueton.
- D : Inflateur.
- E : 1^{er} étage détendeur.
- F : manomètre bouton.
- G : Soupape surpression.

Le matériel se compose d'une bouteille en aluminium d'une capacité de 1,5 à 3 litres ayant une pression nominale de 200 bar. D'un premier étage de détendeur muni d'une soupape

de suppression, d'un manomètre bouton et d'un inflateur. La soupape de surpression sert à protéger le flexible de l'inflateur contre une pression excessive et le risque d'éclatement. Le risque de givrage étant totalement absent, on peut se contenter d'un premier étage « bas de game ». Pour porter la bouteille, le plus simple consiste à la

pendre aux perforations de la plaque dorsale de la wing à l'aide de mousquetons cavaliers double.

Remplissage de la bouteille

L'idéal est d'utiliser un booster mais il est aussi possible de faire passer l'argon au travers d'un simple compression à piston, moyennant quelques précautions. L'injection d'argon se fait à débit constant dans une machine qui agit alternativement. Il faudra limiter le débit et la pression tout en alimentant le compresseur sans perdre trop du précieux gaz. Un compresseur qui tourne sans remplissage correct des cylindres va caviter et causer des dégâts au niveau des soupapes. Dans la ligne d'alimentation du compresseur, il convient de ne pas dépasser 3 bar et d'utiliser un ballon pour réguler le débit. On règle le débit du manodétendeur de manière à maintenir le ballon gonflé.



La plongée en combinaison étanche

Une ancienne stab, joue parfaitement le rôle de ballon et elle à une soupape de sécurité, qui va empêcher l'éclatement. Eventuellement l'argon peut passer au travers des sticks.

L'argon a tendance de faire chauffer le compresseur, l'idéal est d'interrompre le gonflage durant un quart d'heure toutes les 30 à 45 minutes, ce qui n'est pas un problème étant donné la taille de la bouteille.

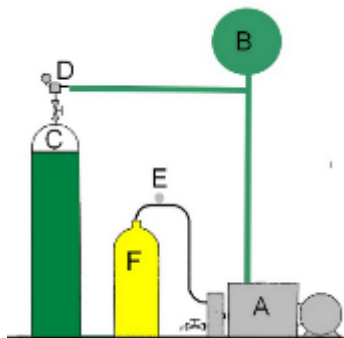


Figure 69 - Schéma remplissage argon

Lorsqu'on commande de l'argon chez le gazier, il faut être attentif à avoir de l'argon pur (2.2) et pas de l'Argonal soude qui contient de CO₂. Avec la transpiration, celui-ci peut occasionner des démangeaisons.

- A : Compresseur 200bar.
B : Ballon.
C : B50/B30 Argon (nourrice).
D : Mano-détendeur argon.
E : manomètre.

Procédure

1. Ouvrir la bouteille d'argon, et régler le débit de manière à gonfler le ballon.
2. Démarrer le compresseur.
3. Chasser l'air en gonflant / dégonflant légèrement le ballon 2 à 3 fois. Puis régler le débit de manière à maintenir un ballon gonflé (100 l/min pour un compresseur Coltri MCH 6).
4. Connecter la bouteille.
5. Dès que le compresseur atteint 200 bars ouvrir la bouteille de plongée.
6. Surveiller le manomètre et le ballon qui doit rester gonfler.
7. A la pression de 200 bar, fermer la bouteille d'argon.



La plongée en combinaison étanche

8. Fermer la bouteille d'argon
9. Rincer le compresseur en le laissant tourner à vide deux trois minutes avec de l'air (pour éviter d'injecter de l'argon dans les bouteilles de plongée).

Non libre de droit



CHAPITRE 9

LES EAUX CONTAMINEES

- Les objectifs de ce chapitre
- Type de contamination
- Effet de la contamination
- Analyse de risques
- Composition de l'équipe de plongée
- Type de combinaison à utiliser
- Décontamination
- Critères de réussite

La plongée dans des eaux contaminées est réservée à des professionnels spécialement formés pour ce type d'intervention. Un plongeur récréatif sans connaissance des dangers spécifiques et sans équipements adéquats qui exécute ce type d'incursion prend des risques très importants pour sa santé ou sa vie. Les dégâts causés par les polluants sur la santé peuvent ne pas être visible immédiatement. Des lésions peuvent apparaître des années après les expositions. Le type d'équipement doit être étudié au cas par cas. Le choix de l'équipement sera fonction du type de contaminant, de sa concentration, de la température et de la durée de plongée prévue.



Objectif de ce chapitre

L'objectif de ce chapitre n'est évidemment pas de former des spécialistes de l'intervention sur des sites chimiques, nucléaires ou biologiques. Mais d'attirer l'attention sur les dangers que représentent ce genre d'intervention pour des plongeurs non formés et incorrectement équipés.

Type de contamination

Les contaminants peuvent être chimiques, biologiques ou nucléaires. Chaque plongée doit être préparée avec le plus grand soin et avec une extrême rigueur et faire l'objet d'une analyse de risque spécifique. Il importe de savoir avant chaque immersion le type ou les types de contaminants, leurs concentrations, les interactions éventuelles entre elles, la température de l'eau et son PH, le niveau et les types de radiations. Avec ces informations le fabricant pourra déterminer les meilleurs matériaux à utiliser, ainsi que sa durée maximale d'exposition aux contaminants. Ces informations détermineront la durée d'exposition du plongeur, un protocole de plongée et de décontamination ainsi qu'une composition optimale de l'équipe d'intervention. En cas de doute il ne faut jamais hésiter à faire effectuer des tests sur les composants et les joints.

Effet de la contamination

Les effets de l'exposition aux contaminants peuvent être immédiats, diarrhée, nausées, vomissements, vertiges, irritations, maux de tête, perte de conscience. Certains agents chimiques ou biologiques peuvent entraîner la mort même avec des expositions de très courte durée. Certains notamment chimique ou nucléaire peuvent engendrer des répercussions à long terme et augmenter le risque de cancer. Les



La plongée en combinaison étanche

plongeurs habilités à travailler dans ces conditions nocives doivent se soumettre à un suivi médical particulièrement sévère.

Analyse de risques

Dans l'UE, c'est une obligation légale pour protéger les travailleurs. Elle est effectuée par une équipe qui comprends ingénieurs, techniciens, OTS et le Responsable de la sécurité. La méthode matricielle, est la plus souvent utilisée pour évaluer le risque.

Exemple d'une matrice d'analyse de risque

Probabilité (P)		Gravité (G)				
		Négligable	Léger	Modéré	Elevé	Très élevé
		1	2	3	4	5
Très improbable	0	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Improbable	1	Faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen
Possible	2	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Elevé
Probable	3	Faible	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé
Très probable	4	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé	Elevé

La « Probabilité » (P)

Dénomination	Valeur	Probabilité (P) / Cause
Très improbable	0	Ne se produit jamais / Combinaison de facteurs imprévisibles.
Improbable	1	Se produit rarement / Combinaison de facteurs.
Possible	2	Possible / Si un évènement additionnel se produit.
Probable	3	Pas certain, mais probable / Risque fort de survenir si une circonstance additionnelle survient.
Très probable	4	Pratiquement inévitable, si des mesures ne sont pas prises



La plongée en combinaison étanche

La « Gravité » (G)

Effets	Valeur	Dommages
Négligeable	1	Lésions limitées bénignes traitables in situ.
Léger	2	Blessure légère qui peut engendrer un petit arrêt de travail. Pas de séquelle permanente.
Modéré	3	Blessure sérieuse, hospitalisation de plusieurs jours.
Elevé	4	Un mort, blessures graves, séquelles permanentes.
Très élevé	5	Plusieurs morts.

Composition de l'équipe de plongée

L'équipe doit être cohérente et parfaitement préparée à sa mission. Les temps d'intervention sont généralement courts. Il ne faut pas hésiter à effectuer des simulations pour augmenter la cohésion et l'efficacité. L'improvisation, les hésitations, les incompréhensions pourront mettre la vie des plongeurs en danger.

Composition type d'une équipe de plongée

Cette liste ci-dessous est un strict minimum

- Un directeur de plongée
- Un superviseur de système de plongée
- Un superviseur « Incidents, accident »
- Un responsable du matériel
- Un plongeur principal
- Un plongeur de secours
- Un tender (aide) plongeur principal
- Un tender (aide) plongeur de secours



La plongée en combinaison étanche

- Une équipe de décontamination primaire minimum deux personnes
- Une équipe de décontamination secondaire minimum deux personnes
- Une équipe de décontamination définitive minimum deux personnes
- Une équipe de vérification de décontamination et le personnel médical.

Type de combinaison à utiliser

La combinaison étanche est une pièce maîtresse de l'équipement. Elle a pour but d'isoler complètement (isolation classe A) le plongeur du milieu ambiant. Elle doit être surgonflée pour éviter toutes intrusions de liquide, équipée de gants étanches et de bottes solides. Les chaussons en latex présentent des risques de perforation trop importants pour être acceptables dans ce milieu. Les gants doivent être résistants et très solidement attachés au costume, il est inadmissible de perdre un gant à la suite d'une suppression du costume. Le système de fixation le plus généralement adopté est le système de clame Viking. Le système d'étanchéité du cou généralement choisi est le « yoke ». La séparation aisée des pièces permet une très bonne décontamination. Il permet l'usage du casque qui est obligatoire. Sa souplesse, élimine tous les interstices entre le joint et le cou, l'eau ne s'infiltrer donc pas. Les masques faciaux sont à proscrire, car ils n'assurent pas une protection complète. Ils ne peuvent être utilisés que dans des eaux peu polluées.

Avant toute plongée dans une eau contaminée il faut effectuer un test d'étanchéité dans de l'eau pure. Pour la plongée dans des eaux polluées le NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et l'EPA (Environmental Protection Agency) des USA préconisent l'utilisation de costumes en EPDM (caoutchouc vulcanisé) de minimum



La plongée en combinaison étanche

1000 gr/m² (1500 gr/m² conseillé). Ces choix ont été dictés par les raisons suivantes :

- Faible absorption d'eau
- Très bonne inertie chimique (toujours à vérifier)
- Facile à décontaminer.
- Très bonne élimination des bactéries à la surface de l'EPDM. Des tests ont démontré la présence à la surface du nylon (tri-laminate) d'importantes colonies bactériennes après décontamination.

Dans l'UE, les tests de résistance chimique sont précisée dans la norme EN 14255-2, et ISO 16603, 16604, 22610 pour la résistance à la pénétration de bactéries et de germes pathogènes. Deux index de protection sont prévus :

- Indice de protection faible : Résistance de 20 à 60 minutes.
- Indice de protection élevé : Résistance supérieure à 60 minutes.

A titre d'exemple, le tableau ci-après reprends la résistances aux hydrocarbures de la combinaison Viking HDS (casque, gants Viking).

Contaminant	Suivant EN 14255-2		
	Matière	Coutures	Tirette
Liquide B	Elevée	Elevée	Faible
Liquide F	Elevée	Elevée	Elevée
<ul style="list-style-type: none">• Liquide B - 70 % d'isooctane / 30 % de toluène (pétrole)• Liquide F - 80 % d'huile de paraffine / 20 % de 1-méthylnaphtalène (diesel, essence d'aviation)			



Décontamination

La décontamination est prépondérante pour la sécurité du plongeur et de son entourage. Elle doit être menée avec le plus grand soin. Les procédures devront être étudiées cas par cas, et devront être appliquées avec la plus grande rigueur. Le personnel de décontamination devra être protégé du contact avec les contaminants (protection classe B et C). Elle se fait généralement en quatre étapes dans des zones parfaitement délimitées et isolées les unes des autres. Primaire, secondaire pour éliminer le gros des matières polluantes, puis définitive servant à éliminer toutes traces du polluant et enfin une vérification du matériel et de la qualité de la décontamination. Il ne faut pas perdre de vue que les eaux de rinçage ainsi que les produits utilisés pour la neutralisation des contaminants chimiques devront faire l'objet d'un stockage et d'une élimination car ils seront devenus à leur tour des contaminants. Un soin tout particulier doit être apporté aux soupapes et aux joints du costume, ainsi qu'à toutes les autres pièces mécaniques de l'équipement.

Critères de réussite

Le succès de ces opérations repose sur une organisation rigoureuse en trois zones :

- **Évaluation des risques** : Identification préalable des contaminants pour choisir les matériaux de protection adéquats.
- **Interruption immédiate** : Toute rupture de l'étanchéité de l'équipement (déchirure, entrée d'eau) doit entraîner l'arrêt immédiat de la plongée.
- **Décontamination (Decon)** : Dès la sortie de l'eau, le plongeur subit un nettoyage approfondi (douche de



La plongée en combinaison étanche

décontamination, solutions neutralisantes comme l'eau de Javel diluée) avant de retirer son équipement pour éviter toute contamination secondaire.

Pour les interventions en milieux critiques, les professionnels privilégient de plus en plus l'utilisation de **ROV (véhicules télécommandés)** afin de supprimer totalement le risque humain.

Chapitre V



CHAPITRE 10

QUELQUES CRITERES DE SELECTIONS

- Quelques réflexions de base
- Analyse des coûts

Choisir un costume n'est pas chose facile, surtout s'il s'agit du premier achat. L'importance de l'investissement et l'étendue du marché rend ce choix d'autant plus difficile. Le but de ce chapitre n'est pas de sélectionner un costume à la place du lecteur, mais d'ouvrir un chemin de réflexion qui devra permettre à tout un chacun d'opter pour un matériel au mieux de ses intérêts. Choisir le prix comme seul critère me semble fort peu opportun. Dans le choix de son costume il faudra tenir compte des conditions de plongées. Plonge-t-on régulièrement en hiver ? Nos plongées se font-elles plutôt en carrière, avec un bon vestiaire chauffé, ou au contraire en mer, à partir du bord, sous la pluie et le blizzard ? Lors de nos plongées le risque de petites déchirures est-il important ou pas ?



Quelques réflexions de base

- Si on effectue moins de 15-20 plongées par an, il ne nous paraît pas utile d'investir dans du matériel coûteux et à fortiori dans une combinaison étanche.
- Si on effectue un grand nombre de plongées par an en des lieux où il n'y a pas de vestiaire disponible (Zélande par exemple), il nous paraît intéressant d'avoir une souris pour la protection contre le froid et/ou la pluie lors de l'équipement.
- Pour de nombreuses plongées dans des endroits où le risque de petites déchirures est important (moules, huîtres...), il nous paraît judicieux d'accorder une attention particulière aux facilités de réparation des combinaisons membranes EPDM ou trilaminé.
- Si en revanche on plonge habituellement dans des endroits pourvus d'un vestiaire et où le risque de petites déchirures est moins important (carrières), notre choix se portera plutôt sur une combinaison néoprène. A cause de leur confort et de leur prix généralement plus modique.
- Si on effectue de très nombreuses plongées en étanche (+ de 90 en période hivernale), notre choix se portera incontestablement vers une combinaison de très grande qualité. Combinaison ayant une très bonne résistance à l'abrasion et dont la période de chômage après réparation est de courte durée. Par exemple EPDM de minimum 1 000 gr/m² ou trilaminé avec souris très isothermique et bien rembourrée.
- Si le nombre de plongées hivernales dépasse 130, notre choix se portera incontestablement vers un costume « pro » ayant une très bonne résistance à l'abrasion, dont la période de chômage après une petite réparation est très courte (max 40') et dont le matériau a une absorption d'eau négligeable. Par exemple un costume en EPDM de minimum 100 gr/m² ou un trilaminé ayant



La plongée en combinaison étanche

des bons renforts au genoux et aux coudes associé à une souris bien rembourrée, très épaisse et très isothermique.

Ces quelques réflexions ont permis la construction d'un diagramme afin de mieux guider le lecteur dans sa démarche de sélection.

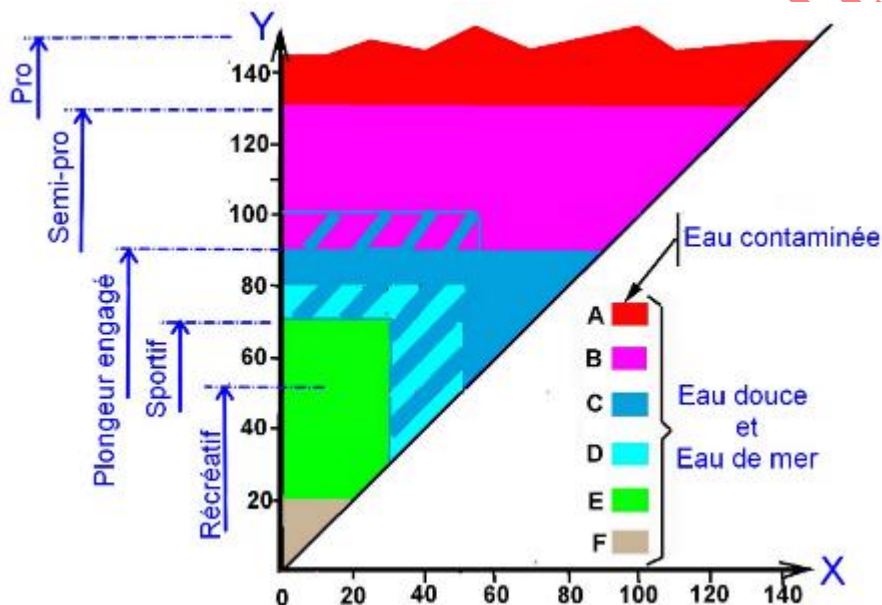


Figure 70 - Sélection combinaison

- A : EPDM 1500 gr/m² pour les OTS, Trilaminé haut de gamme pour les instructeurs
 B : EPDM 1000 gr/m² pour les OTS, Trilaminé haut de gamme pour les instructeurs
 C : EPDM 750 gr/m², Trilaminé
 D : Limite néoprène et néoprène compressé
 E : Néoprène et néoprène compressé
 F : Combinaison étanche non rentable

X : Représente le nombre de plongées par an en mer

Y : Représente le nombre de total plongée par an (mer + eau douce).



Analyse des coûts

Pour les plongeurs récréatifs déterminer le coût d'amortissement du matériel a peu d'importance. En revanche pour les plongeurs professionnels, le coût d'amortissement est une composante non négligeable du coût horaire, principalement en plongée TP.

Les prix indiqués dans les tableaux sont donnés à titre indicatif, TVA comprise. Ils représentent les prix moyens, en Belgique, pour des combinaisons ayant des qualités identiques. La fréquence de remplacement des accessoires comme les joints, manchettes et tirette est fondée sur l'expérience. Ce ne sont pas des valeurs rigoureuses mais des estimations pour des plongées effectuées dans l'eau de mer et non dans de l'eau contaminé.

Prix d'achat des combinaisons						
Type		Prix	DV	RT	RM	RC
EPDM 1500 gr/m ²	A	3000	1500	1	3	3
Trilaminé et EPDM 1000 gr/m ²	B	1900	1000	1	2	1
Néoprène	C	1000	300	0	0	0
DV : Durée de vie en nombre de plongée. RT : Nombre de remplacement de tirette sur la durée de vie. RM : Nombre de remplacement de manchettes sur la durée de vie. RC : Nombre de remplacement de joint de cou sur la durée de vie.						

Fournitures	Prix	DV	Prix des pièces de rechange, main d'œuvre comprise. DV : Durée de vie en nombre de plongée
Tirette HD	600	800	
Tirette	350	500	
Manchettes	70	300	
Joint de cou	150	500	



La plongée en combinaison étanche

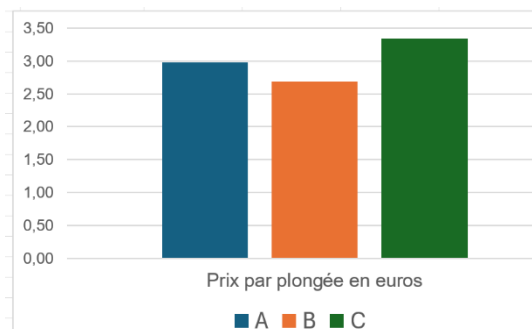


Figure 71 - Prix par plongée

A : EPDM 1500 gr/m²

B : Trilaminé et EPDM 1000 gr/m²

C : Néoprène

Le graphique représente le prix de revient par plongée des combinaisons utilisés jusqu'à usure complète en tenant compte des réparations normales. Nous avons uniquement tenu compte dans le calcul du prix de revient des réparations normales. Ces graphiques représentent une première approche d'un calcul d'amortissement. Il n'a pas été tenu compte, ni du prix de revente ni d'un financement éventuel. Les prix représentés sur les diagrammes sont calculés en tenant compte des réparations à effectuer pour un usage et une usure normale. Pour les combinaisons membranes, les prix indiqués comprennent le prix d'achat de la souris.



CHAPITRE 11

CALCUL DU BILAN THERMIQUE

- Evaluation des pertes thermiques

Au chapitre cinq, nous avons vu les principes de l'isothermie, des échanges thermiques, de la protection contre le froid, du confort thermique... Ce chapitre sera consacré à chiffrer de la manière la plus précise possible les pertes de chaleur et à en dresser un bilan.



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...).

$$Pt = Pcut + Presp \quad (11)$$

Pt = Pertes thermiques totales (W)

Pcut = Pertes cutanées (W)

Presp = Pertes respiratoires (W)

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 thermique¹⁵.

¹⁵ Pour faire simple : la couche limite thermique est la zone dans laquelle les échanges thermiques se produisent.



La plongée en combinaison étanche

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.

$$P_{cut} = \frac{(37 - T_{ext})}{\sum_1^n \frac{1}{C_n}} \quad (12)$$

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 :

$$\sum_1^n \frac{1}{C_n} = \frac{1}{C_{cor}} + \frac{1}{C_{cli}} + \frac{1}{C_{cle}} + \sum_1^i \frac{1}{C_{cvi}} \quad (13)$$

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

C_{cli} = Conductance couche limite thermique intérieure (W/°C)

C_{cle} = Conductance couche limite thermique extérieure (W/°C)

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

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

$$\sum_1^i \frac{1}{C_{cvi}} = \frac{1}{C_{vs}} + \frac{1}{\xi C_{vc}} \quad (14)$$

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



La plongée en combinaison étanche

Cvs = Conductance de la souris (W/°C)

Cvc = Conductance de la combinaison (W/°C)

Quelques valeurs moyennes de conductance

	W/°C	Remarques
Cor	15	Plongeur à forte stature (embonpoint).
	30	Plongeur à stature moyenne.
	40	Plongeur à faible stature (maigreur).
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.

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



La plongée en combinaison étanche

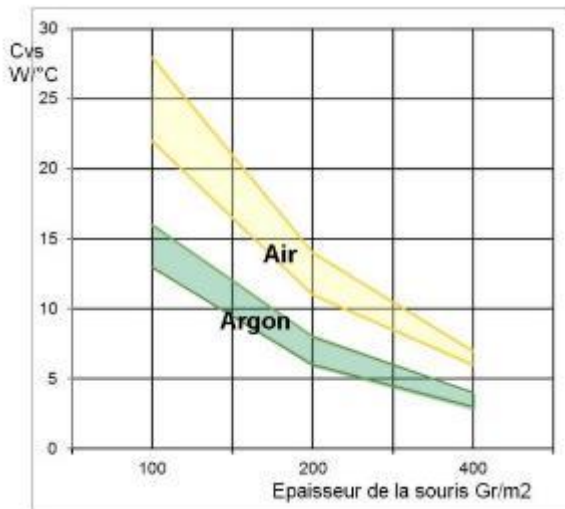


Figure 72 – Conductance souris

Ce graphique indique la variation de la conductance de la souris en fonction de son épaisseur et du type de gaz injecté dans la combinaison (air ou argon)

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

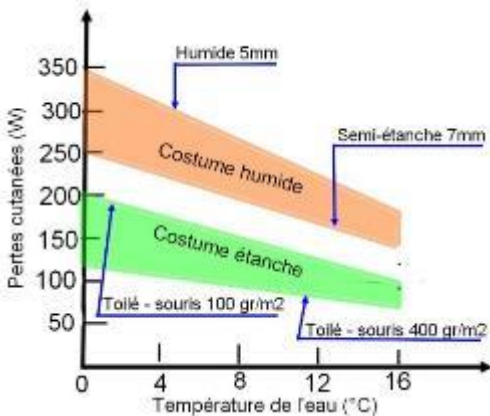


Figure 73 - Pertes cutanées



La plongée en combinaison étanche

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 une combinaison semi-étanche 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 une combinaison membrane est trop peu isolante : il faut au minimum une souris de 200 gr/m².

Influence de la corpulence sur les pertes cutanées

Le graphique 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 :

- La corpulence n'a pratiquement aucune importance si les plongeurs utilisent une combinaison étanche.
- En combinaison humide la corpulence du plongeur joue un rôle fondamental

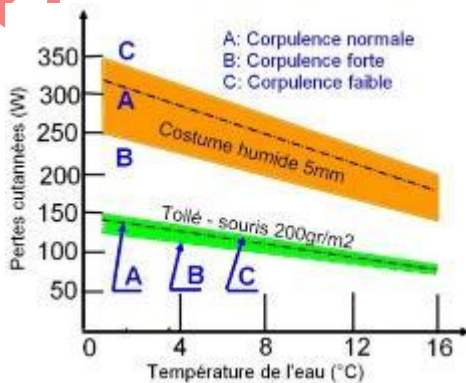


Figure 74 - Influence de la corpulence



La plongée en combinaison étanche

- 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.
- En termes de 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 combinaison humide.
- En termes de 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 combinaison humide.

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.

$$Presp = \left[0,35 (37 - Ti) \left(\frac{Pr+10}{10} \right) \right] + H \quad (15)$$

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)

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



La plongée en combinaison étanche

Pertes respiratoires (W)										
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



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 :

$$Bt = TH - Pt \quad Rtc = \frac{Bt}{Mp} \quad Tpm = \frac{60}{Rtc}$$

(16)(17)(18)

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



La plongée en combinaison étanche

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.

Bilant thermique, exemple numérique

Deux plongeurs de stature moyenne (80kg) équipé l'un d'une combinaison membrane 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. Estimer pour les deux plongeurs :

- Les pertes thermiques cutanées ?
- Les pertes thermiques dues à la respiration ?
- Les pertes thermiques totales ?
- Déterminer les bilans thermiques ?
- La durée maximum d'immersion ?
- Quels sont les conclusions que l'on peut tirer de cette estimation ?



La plongée en combinaison étanche

Les 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

Les paramètres et hypothèses de calcul

	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

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



La plongée en combinaison étanche

Le calcul

Thermogénèse :

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

Pertes thermiques cutanées :

$$\sum_1^i \frac{1}{Cvi} = \frac{1}{3 \times 20} = 0,0167$$

Plongeur 1

$$\sum_1^i \frac{1}{Cvi} = \frac{1}{12} + \frac{1}{300} = 0,0867$$

Plongeur 2 (souris sèche)

$$\sum_1^i \frac{1}{Cvi} = \frac{1}{100} + \frac{1}{300} = 0,0133$$

Plongeur 2 (souris mouillée)

$$\sum_1^n \frac{1}{Cn} = \frac{1}{30} + \frac{1}{60} + \frac{1}{70} + 0,0167 = 0,0810$$

Plongeur 1

$$\sum_1^n \frac{1}{Cn} = \frac{1}{30} + \frac{1}{8} + \frac{1}{70} + 0,0867 = 0,2593$$

Plongeur 2 (souris sèche)

$$\sum_1^n \frac{1}{Cn} = \frac{1}{30} + \frac{1}{8} + \frac{1}{70} + 0,0133 = 0,1859$$

Plongeur 2 (souris mouillée)

$$Pcut = \frac{(37-6)}{0,0810} = 383W$$

Plongeur 1

$$Pcut = \frac{(37-6)}{0,2593} = 120W$$

Plongeur 2 (souris sèche)

$$Pcut = \frac{(37-6)}{0,1859} = 167W$$

Plongeur 2 (souris mouillé)



La plongée en combinaison étanche

Pertes thermiques dues à la respiration

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

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

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.

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

Conclusions

Dans nos conditions de plongée en mer du Nord et 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 :



La plongée en combinaison étanche

- 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.

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

Bibliographie

Manuel d'utilisation

Northern Diver; Viking; Dui; Bare; Apeks; Santi; Otter, Océanic ; Aqualung ; Dive System ; Si-Tech ; Trigon ; Outlast ; 3M ; Fourth Element.

Livres

- La Plongée de Guy Poulet et Robert Barincou - Ed. Denoel 1977
- Syllabus UWS 109 Seneca Collège of applied arts and technology Ontario university
- US Navy Diving Manual
- NAVSEA 1980 Best Publishing Co, California
- Préparation au cours de secouriste plongeur. Ed. Van Der Schueren 93
- PADI Rescue Diver Manual — Editeur Padi EU Services 1989µ
- PADI Adventures In Diving — Editeur Padi EU Services 1994
- Dry Suit Diving de Barsky, Long, Stinton - Watersport Publ. Inc California
- NOAA Diving Manual : Diving for Sciences and Technology Miller, James W.-US Government Printing Office Washington, D.C.
- Jacques Vettier -- Nitrox Trimix, ed Ulmer 2003
- André Houberechts -- La Thermodynamique Technique, ed Vander 1975
- Diving in High-Risk Environments - Steve Barsky



La plongée en combinaison étanche

- Dive Rescue International, Inc - Ft Collins, Colorado -1990
- Chemical Compatability Testing of Diving Related Materials. Glowe, D- Texas Research Institute - Austin TX -1983

Articles

- Onderwatersport-janvier 1991 article de J. Regtien
- Onderwatersport-octobre 1989 article de W. Hurtak
- Onderwatersport-avril 1991
- Le monde de la mer janvier 1988
- Le monde de la mer novembre 1986 article de P. Mouton.
- Fun plongée - mars 1997 article des Drs Balestra et Rezette.
- Fun plongée - novembre 1997 article de F. Deguisne.

Normes

- ISO 5081 : Résistance à l'usure des supports textiles
- ISO 5081 Force de rupture et élongation des tissus par traction
- ISO 1817 Détermination de l'action des liquides sur les tissus
- Autres normes : EN 14255-2 ; ISO 16603, 16604, 22610