La physiologie de l'immersion : aspects hydrominéral et thermique

O. Castagna[a], A.-V. Desruelle[a], B. Schmid[a], R. Chopard[b], J.-É. Blatteau[a], J. Regnard[b]

a Équipe résidente de recherche subaquatique opérationnelle (ERRSO), Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA), BP 600 – 83800 Toulon Cedex 9.
b Département de physiopathologie cardiovasculaire et prévention, Université de Franche Comté (EA3920), Service de Physiologie – Explorations Fonctionnelles CHU de Besançon, 2 boulevard Fleming – 25030 Besançon.

Résumé

Le simple fait de s'immerger provoque chez le plongeur des modifications physiologiques importantes qui sont parfois mal appréciées et sous-estimées. Certains plongeurs militaires, et en particulier les nageurs de combat, sont amenés à effectuer des immersions dont la durée dépasse plusieurs heures. Or, les conséquences physiologiques de telles immersions restent assez mal connues. Il est cependant admis que l'immersion modifie les fonctions cardio-circulatoires, rénales, endocrines et thermiques. Dans cet article, nous rappellerons, dans un premier temps, les grandes adaptations physiologiques de l'organisme à l'immersion. Nous verrons que la déshydratation, par augmentation de la diurèse est l'une des conséquences majeures de l'immersion. Cette hypovolémie est bien tolérée tant que le plongeur reste immergé, mais dès la sortie de l'eau, la déshydratation est démasquée et une baisse majeure du débit cardiaque est observée. Ces notions sont illustrées dans une seconde partie, par quelques résultats d'une expérimentation récente au cours de laquelle des plongeurs militaires ont réalisé des immersions de 12 heures. Alors que les sujets avaient pour consigne de boire 200mL d'eau toutes les heures, en moyenne, les sujets ont perdu 2,13 ± 0,45 kg malgré les ingesta, ont produit 4,36 ± 0,90 L d'urine, et ont présenté une baisse du volume plasmatique de -18,71 ± 9,31 %. L'objectif de cet article est de sensibiliser les médecins d'unité aux hypovolémies induites par l'immersion et de formuler quelques recommandations concernant sur la qualité de l'hydratation des plongeurs au cours des plongées prolongées.

Mots-clés : Bilan hydrique. Immersion. Diurèse. Thermophysiologie. Volume plasmatique.

Abstract

THE PHYSIOLOGY OF IMMERSION: THE HYDROMINERAL AND THERMAL ASPECTS.

Immersion causes important physiological changes which are sometimes poorly appreciated and underestimated. Some military divers and particularly combat swimmers are required to carry out dives which last several hours. However, the physiological consequences of such immersions are not well known. It is accepted that immersion modifies cardio-circulatory, renal, endocrine and thermal functions. In this article, we will first recall, the major physiological adaptations to immersion. We will see that dehydration induced by diuresis is one of the major consequences of immersion. This hypovolemia is tolerated as long as the divers are submerged, but as soon as they are out of the water, their dehydration is unmasked and a major decrease in cardiac output can be observed. These concepts are illustrated in a second part with some results of a recent experiment in which military divers carry out a twelve-hour immersion. Although the subjects were instructed to drink 200 ml of water every hour, they lost 2.13 ± 0.45 kg on average, produced 4.36 ± 0.90L of urine, and had a decrease in plasma volume of -18.71 ± 9.31 %. The purpose of this article is to educate physicians about hypovolaemia induced by immersion and make some recommendations on the quality of the divers' hydration during long dives.

Keywords : Diuresis. Immersion. Plasma volume. Thermophysiology. Water balance.

Introduction

De récentes modifications techniques et l'évolution du contexte géopolitique conduisent certains plongeurs militaires (nageurs de combat de la Marine nationale et de l'armée de Terre) à vouloir augmenter, de manière significative, la durée des immersions. Les situations

O. CASTAGNA, médecin principal, praticien certifié. A.-V. DESRUELLE, ingénieur d'études et de fabrications. B. SCHMID, technicien supérieur d'études et de fabrications, R. CHOPARD, cardiologue, J.-E. BLATTEAU, médecin en chef, praticien certifié. J. REGNARD, professeur.
Correspondance : Monsieur le médecin principal O. CASTAGNA, Équipe résidente de recherche subaquatique opérationnelle (ERRSO), Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA), BP 600 – 83800 Toulon Cedex 9.
E-mail : castagna.olivier@gmail.com

opérationnelles, auxquelles ces nageurs sont confrontés, rassemblent plusieurs contraintes simultanées : variations de pression hydrostatique, utilisation d'un mélange gazeux suroxygéné, alternance de phases statiques et dynamiques de palmage, et température de l'eau.

En souhaitant augmenter de manière significative la durée des immersions, les nageurs de combat sollicitent des phénomènes physiologiques dont les effets restent mal connus. En effet, si les risques médicaux liés à l'augmentation de la pression hydrostatique environnante (barotraumatisme, toxicité des gaz, accident de désaturation…) sont bien documentés, les conséquences physiologiques de l'immersion sur plusieurs fonctions de l'organisme sont souvent ignorées ou sous-estimées. Elles conduisent rarement à exposer le plongeur à un risque vital, mais peuvent tout de même entraîner des dégradations majeures de la performance opérationnelle.

Pour répondre aux demandes des forces, l'ensemble des contraintes subies par les plongeurs militaires fait l'objet d'études par l'Équipe résidente de recherche subaquatique opérationnelle (ERRSO) (palmage prolongé en eau chaude, exercice physique en cours de plongée, etc.). Mais une attention toute particulière est portée aux immersions de longue durée. En effet, la connaissance des réponses physiologiques, pendant ces expositions et à leur décours, est indispensable pour :

– évaluer les impacts de ces missions sur la santé et les capacités opérationnelles des nageurs de combat pendant les missions ;

– proposer des moyens de protection et d'aide nécessaires à l'accomplissement des missions qui leur sont confiées.

Après un bref rappel des adaptations physiologiques de l'organisme à l'immersion, nous verrons successivement comment les statuts hydrominéral et thermique sont modifiés lors de telles immersions.

Effets physiologiques de l'immersion et conséquences sur le statut hydro-minéral

Lorsque le plongeur s'immerge, la pression hydrostatique ambiante est pour l'essentiel transmise aux tissus. Il en résulte qu'une partie du contenu sanguin des vaisseaux des membres est refoulé vers le cœur droit et s'accumule dans la circulation pulmonaire et le territoire vasculaire abdominal (fig. 1). L'immersion d'un homme jusqu'au cou en position verticale produit un déplacement sanguin de plus d'un demi-litre. Cette redistribution sanguine liée à l'effet compressif de l'immersion n'augmente pas avec la profondeur, car l'écart de pression ne varie pas dans les membres entre la pression interstitielle et périvasculaire d'une part et d'autre part la pression veineuse proche de la pression atriale droite et largement gouvernée par la pression des espaces gazeux pulmonaires.

Étape N° 1 : Augmentation du remplissage cardiaque

Cette redistribution vasculaire, immédiate (« Blood Shift » en langue anglaise) augmente la précharge cardiaque, le Volume d'éjection systolique (VES) et tend à augmenter le débit cardiaque. Simultanément, dans cette situation d'hypervolémie fonctionnelle, les résistances vasculaires périphériques diminuent de l'ordre de 15 à 45 % du fait d'une part de l'inhibition de tonus sympathique vasculaire qui résulte de l'augmentation de la précharge, et d'autre part, de l'auto-régulation vasculaire.

Étape N° 2 : adaptations précoces de l'organisme (30 min à 120 min)

Les modifications neuro-hormonales

Cette situation d'hypervolémie relative entraîne la mise en jeu de mécanismes neuro-endocriniens dont le but est de rétablir un contenu adapté au contenant (autrement dit une volémie adaptée à la capacité vasculaire). La distension des cavités cardiaques, des veines caves et des artères pulmonaires stimule les barorécepteurs cardiopulmonaires à basse pression (1, 2), modifie très rapidement (quelques secondes à quelques minutes) l'équilibre neurovégétatif en augmentant l'activité nerveuse parasympathique (3, 4) et en réduisant l'activité nerveuse orthosympathique (diminution de la concentration plasmatique en noradrénaline) (5, 6).

Avec une latence un peu plus grande, l'équilibre des actions hormonales qui contribuent au bilan hydrominéral est également modifié. Les concentrations plasmatiques de rénine et d'hormone antidiurétique (ADH ou vasopressine) diminuent (7) en réponse à la distension des cavités cardiaques et à l'hémodilution (8) (cf. infra), ainsi que la sécrétion d'aldostérone (9-11). Le peptide natriurétique auriculaire (PNA) est libéré par la déformation des cavités cardiaques (10, 12, 13), plus grande qu'au sec.

Sous l'effet de l'écart entre pression des espaces interstitiels et pression capillaire dans les membres, un flux de liquide interstitiel vers le plasma s'instaure (14-16) et tend à augmenter le volume plasmatique indépendamment de la redistribution sanguine immédiate (17). Cette augmentation de volume plasmatique contribue à la stimulation de diurèse qui apparaît après 15 à 30 min d'immersion.

L'augmentation de la diurèse

L'augmentation du débit sanguin rénal, l'inhibition des hormones impliquées dans la préservation de l'eau et du sodium au niveau rénal (arginine vasopressine, système rénine-angiotensine-aldostérone) et (pour une faible part) la libération des peptides natriurétiques conduisent à une augmentation de la diurèse pendant l'immersion (12, 18). Le débit urinaire est le plus élevé pendant les deux premières heures et peut atteindre 6 $ml.min^{-1}$ contre 1,5 $ml.min^{-1}$ au sec (18, 19). Ainsi, lors des deux premières heures d'immersion les plongeurs urinent entre 600 ml et 1 500 ml en fonction de la température de l'eau (17).

Cette diurèse traduit les réponses adaptatives à l'hypervolémie relative. Le volume plasmatique (VP) est donc rapidement modifié lors de l'immersion, mais l'eau éliminée par diurèse provient plus largement des liquides interstitiels (et intra-cellulaire) que du plasma.

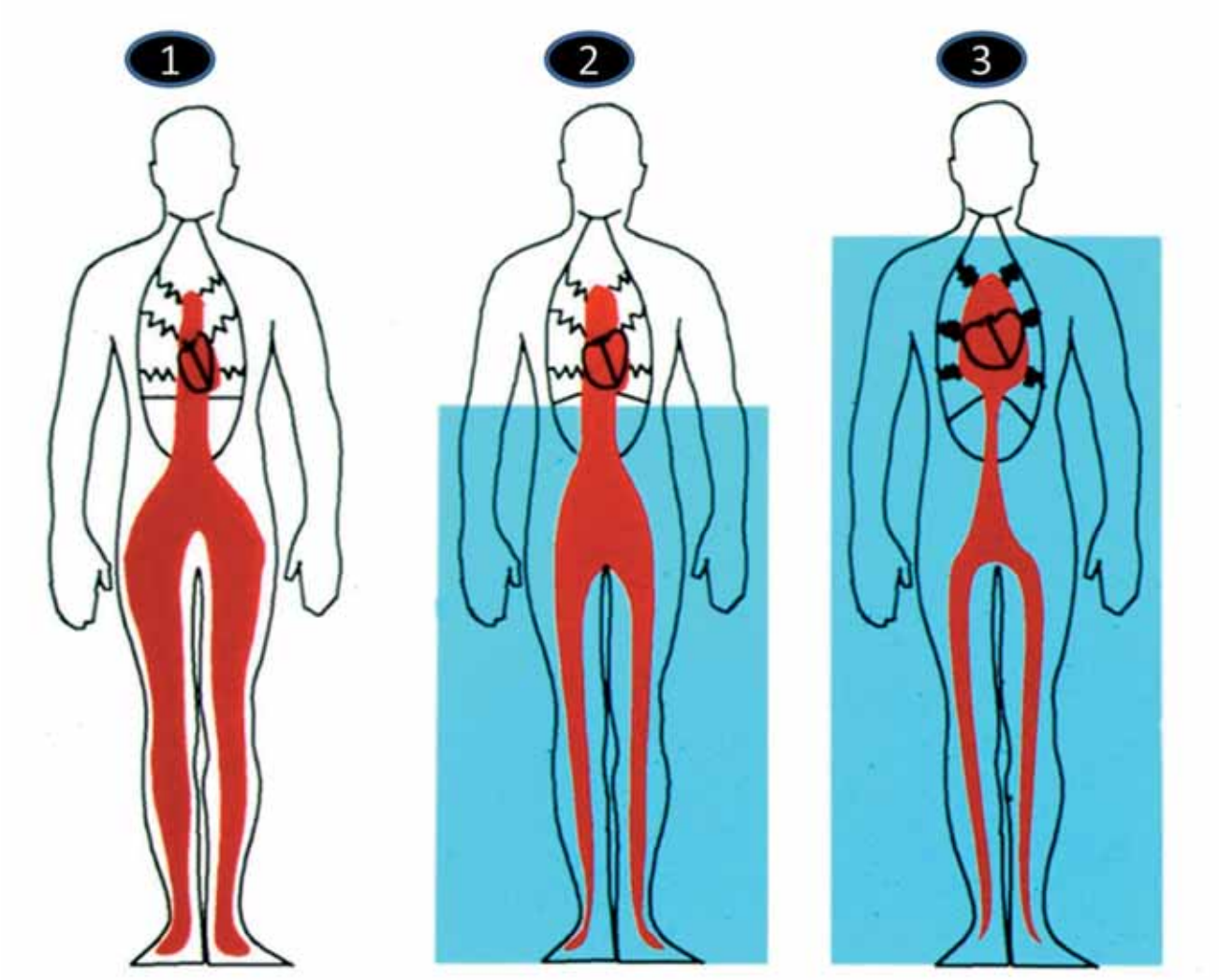


Figure 1. Conséquences de l'immersion sur le système vasculaire.

L'arrivée continue de liquide interstitiel alimente le volume plasmatique que le débit urinaire tend à réduire.

La baisse du volume plasmatique

Les différents mécanismes neuro-hormonaux qui répondent à l'hypervolémie relative et la diurèse qui en résulte, entraînent une réduction du volume plasmatique qui correspond à environ 30 % du volume urinaire (ou de la perte d'eau totale en condition de thermoneutralité) (17). En ambiance chaude ou du fait de l'hyperthermie d'exercice, la perte d'eau totale et plasmatique est accrue par le débit de sudation, ce qui réduit aussi la diurèse d'immersion (20, 21). L'augmentation de pression par un vêtement compressif épais (adapté à l'eau froide) et la vasoconstriction causée par le froid majorent et accélèrent très sensiblement la diminution de volume plasmatique.

Il a été observé une diminution de 8 à 15 % en deux heures, largement par extravasation vasculaire dans le réseau non vasoconstricté (splanchnique) et par majoration (mineure) de la diurèse (22, 23). Pour un homme de corpulence moyenne, une chute de 15 % du VP représente une perte de 450 ml de plasma selon l'équation proposée par Sawka et al. (24, 25). Les mécanismes qui contribuent à modifier le bilan hydrique peuvent être mis en œuvre de façon concomitante et leurs effets sont souvent intriqués, intégrés (fig. 1, 2).

Lors de l'immersion sans effet notable du froid, la réduction de VP respecte la composition électrolytique plasmatique, c'est-à-dire que les éliminations rénales de sodium et de potassium et des osmoles sont proportionnées à celle du volume hydrique. Avec exposition au froid, l'hémoconcentration peut apparaître. Ainsi, alors que l'exposition à la chaleur peut induire une hypovolémie hyper-osmotique (26), l'immersion induit en règle générale une hypovolémie iso-osmolaire (27, 28). Cette différence n'est pas sans conséquence puisqu'elle ne stimule pas la soif, sensation nécessaire à la correction des pertes hydriques (29).

Les conséquences hémodynamiques cardiaques

Les modifications de bilan hydrique dues à l'immersion engendrent des pertes hydriques à l'origine d'une hypovolémie et d'une déshydratation qui concernent les secteurs interstitiels et intracellulaires autant que plasmatiques. Par conséquent, si l'immersion s'accompagne de façon quasi immédiate d'une augmentation du remplissage cardiaque et d'une élévation du débit cardiaque, la baisse du VP s'accompagne dans un second temps de signes échocardiographiques évocateurs d'une baisse de la précharge ventriculaire gauche (30). Il est notamment observé une baisse des dimensions de l'oreillette gauche et du diamètre télé diastolique du ventricule gauche. Les profils de remplissage de l'oreillette gauche et du ventricule gauche traduisent la diminution des gradients de pression intra-cavitaires.

Cette modification progressive du statut hydrominéral du plongeur qui peut devenir importante ne semble pas avoir de conséquence sensible sur la performance cardiovasculaire et l'aptitude physique des plongeurs pendant l'immersion. Il en va tout autrement au moment de la sortie de l'eau.

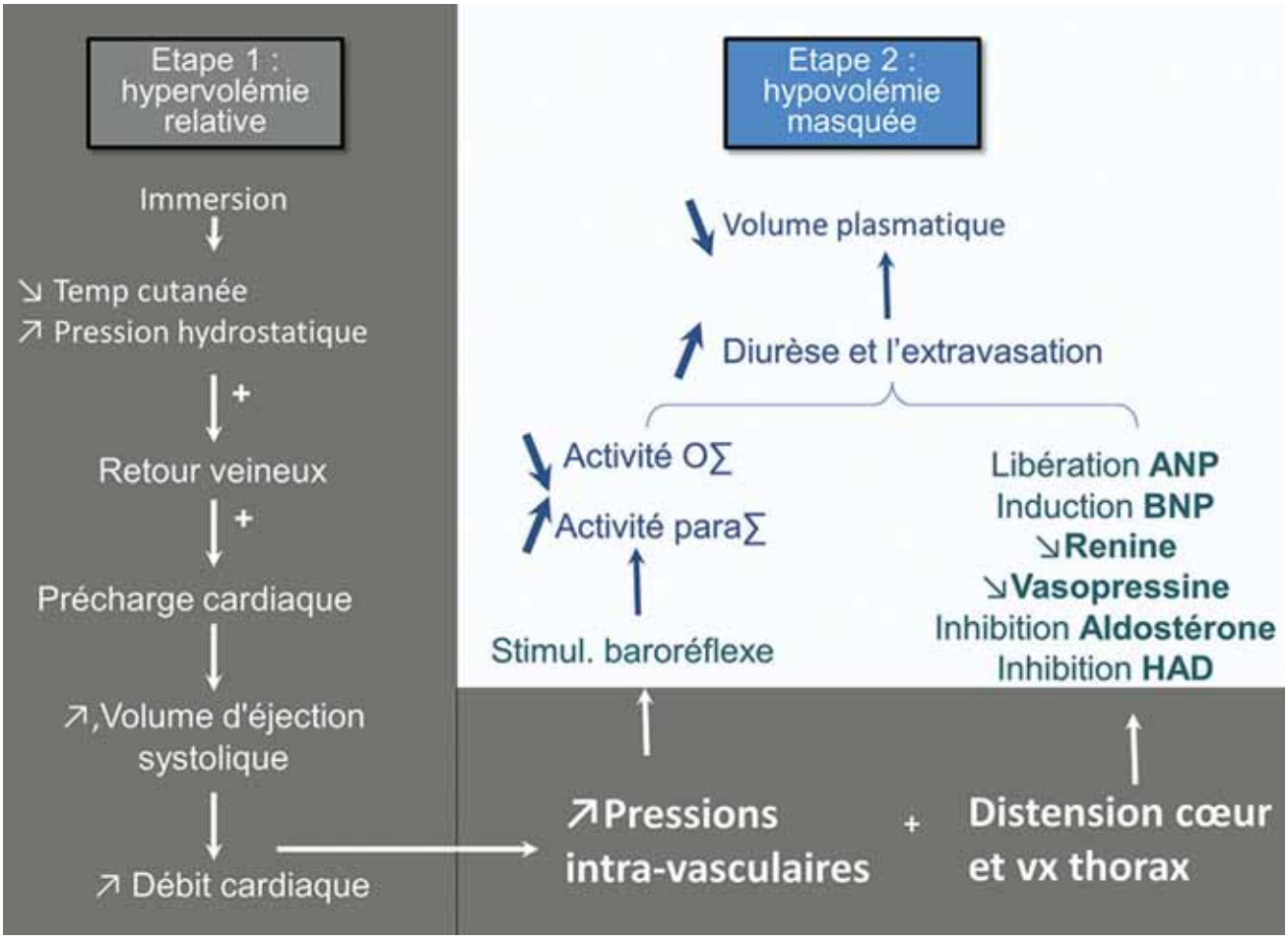


Figure 2. Conséquences physiologiques sur le statut hydrominéral (Étapes 1 et 2).

Étape N° 3 : Les conséquences de ces adaptations à la sortie de l'eau (fig. 3)

En sortant de l'eau, l'atmosphère n'exerce plus le même effet compressif que l'eau. Le lit vasculaire périphérique s'ouvre et chez le sujet debout ou assis, la gravité déplace le volume sanguin vers les membres inférieurs. La diminution du VP qui était masquée par la réduction du lit vasculaire lors de l'immersion, est donc brutalement démasquée dès que le sujet sort de l'eau. Elle est associée à une baisse immédiate de la précharge cardiaque.

En médecine et physiologie du sport, de nombreux travaux ont démontré qu'une baisse du VP s'accompagne systématiquement d'une baisse des performances physiques (31-35). Tous les critères de la performance physique sont modifiés lorsque le sujet est déshydraté : la force, l'endurance et la puissance (33).

Par expérience, il arrive parfois d'observer, dans les minutes qui suivent la fin d'une plongée, des plongeurs présentant des étourdissements semblables à des malaises hypotensifs. Des « Tilt Tests » réalisés dans les minutes suivant une immersion prolongée ont montré qu'environ 50 % des plongeurs présentaient une hypotension orthostatique (36).

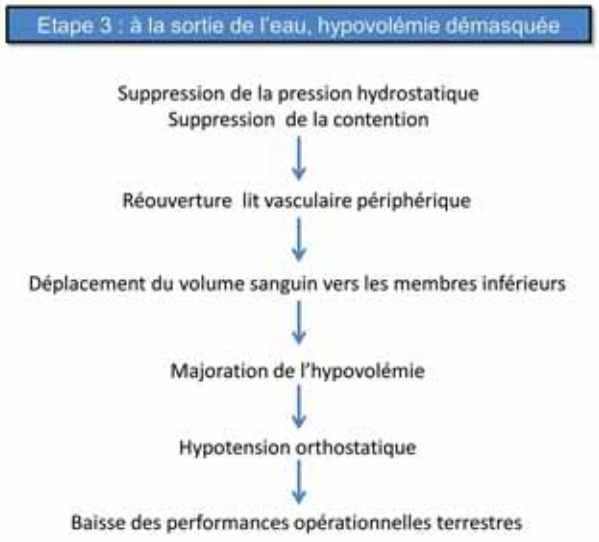


Figure 3. Conséquences physiologiques sur le statut hydrominéral pendant et au décours de l'immersion (Étape 3).

Aspects Thermiques

Malgré l'amélioration des matériels de plongée, le statut thermique des plongeurs reste un paramètre dimensionnant pour plonger en toute sécurité mais aussi à la sortie de l'eau. Il modifie la performance opérationnelle du nageur mais augmente également les risques d'accidents. Malheureusement, il n'existe pas encore de solutions techniques totalement efficaces pour permettre au plongeur autonome de maintenir son bilan thermique dans la zone de neutralité thermique quelles que soient les conditions environnantes et l'activité réalisée.

Spécificités du milieu aquatique

L'eau possède des caractéristiques physiques qui influencent les transferts de chaleur entre le corps et le milieu extérieur : l'eau est un bon conducteur de la chaleur et l'augmentation de pression hydrostatique avec la profondeur réduit l'isolement de la tenue (37).

Dans l'eau, les échanges thermiques au niveau de la peau ne se font plus que par convection. Au niveau respiratoire, les échanges peuvent être importants en plongée du fait de l'utilisation d'un gaz détendu (faible humidité) ou de certains mélanges de gaz (hélium notamment) présentant une meilleure conductivité.

Évolution des températures corporelles en immersion

Dans la majorité des cas, le contact thermique de l'eau sur la peau et la pression hydrostatique entraînent une vasoconstriction périphérique qui provoque une redistribution du sang de la périphérie vers le noyau central. Ce phénomène produit une diminution rapide des températures cutanées associée à une augmentation légère et temporaire de la température centrale. Au repos, alors que la baisse rapide des températures cutanées se maintient, la courbe de température centrale s'inverse et commence à chuter. C'est alors le signe qu'un refroidissement central se met en place. Puis, la diminution des températures cutanées ralentit et se stabilise. Les zones distales présentent des températures plus basses, 1 à 2 degrés au-dessus de la température de l'eau pour les mains et les pieds. Dans la majorité des cas, la température centrale continue de décroître, traduisant un bilan thermique négatif où les réponses physiologiques ne sont pas suffisantes pour limiter la perte de chaleur corporelle. Lorsque la perte devient trop importante, le frisson thermique est activé pour générer de la chaleur et ainsi lutter contre la chute de la température centrale. La production de chaleur métabolique est modulable en fonction des besoins du corps. L'activation des différentes réponses physiologiques, tant dans le seuil de déclenchement que dans l'intensité, sera différente d'un plongeur à un autre (38) et dépend de très nombreux facteurs individuels (surface corporelle, pourcentage de masse grasse, exposition quotidienne au froid, etc.), et de l'état physiologique avant et pendant la plongée. L'acclimatement va jouer un rôle important en modifiant les réponses physiologiques à la contrainte thermique (vitesse de mise en œuvre des réponses, niveau des réponses, adaptations morphologiques et métaboliques).

Température de l'eau

Plus la température de l'eau sera basse, plus les pertes de chaleur seront importantes. Les capacités physiologiques d'isolation périphérique étant limitées,

c'est donc une augmentation de l'isolation vestimentaire ou de la production de chaleur métabolique qui pourra pallier les pertes importantes de chaleur. Plus le frisson sera fréquent et intense, plus l'énergie consommée sera importante et le coût physiologique du maintien des températures sera élevé. De plus, il sera plus compliqué de protéger les mains et les pieds, qui pourront alors passer sous le seuil minimal acceptable de 15 °C (39).

À l'inverse, plus la température de l'eau est chaude, plus les échanges thermiques seront réduits aux échanges respiratoires. Toute production de chaleur corporelle (liée à une activité musculaire) sera alors impossible à éliminer.

Activité physique

L'activité physique entraîne aussi une augmentation des températures corporelles. En eau froide, le réchauffement est plutôt généralisé à l'ensemble du corps et dure plus longtemps que celui observé lors des frissons. Cet effet s'explique par la levée de la vasoconstriction périphérique sur les zones au travail puis sur le reste du corps et par une accélération de la circulation sanguine. Il y a donc un effet bénéfique de l'exercice. Mais, il entraîne aussi une augmentation des pertes de chaleur corporelle, par diminution de l'isolation périphérique apportée par la vasoconstriction liée au froid. En eau chaude, l'activité physique augmente le risque d'hyperthermie car la thermolyse est totalement inefficace.

Durée de l'immersion

En eau froide, le bilan thermique correspond à un déséquilibre où les pertes de chaleur sont supérieures aux gains. Lorsque l'immersion se prolonge, la lutte contre le froid et la baisse des températures corporelles consomme de l'énergie. La durée pendant laquelle le corps pourra maintenir ses températures dépendra alors de la quantité d'énergie dont il dispose et de la vitesse à laquelle il la consomme. Il faut donc que les plongeurs soient au mieux de leurs capacités physiques avant de plonger. Au cours des plongées longues, il faut aussi qu'ils puissent restaurer leurs réserves hydriques et énergétiques pour maintenir le plus longtemps possible leurs capacités de thermorégulation.

Équipement de protection thermique

Si dans l'air, la tenue vestimentaire peut facilement être modulée en fonction de l'environnement et de l'activité physique réalisée, il n'en va pas de même en plongée où il semble difficile d'ajouter ou de retirer des couches vestimentaires en fonction des besoins de thermorégulation. Le plongeur doit faire un choix avant la mission concernant l'isolement thermique de sa tenue. Et dans la majorité des cas, ce choix est fait en fonction de la température de l'eau, sans prise en compte des modifications de l'activité physique. Si l'activité varie au cours de la plongée, l'isolement peut être alors surdimensionné et provoquer une hyperthermie. Chaque type de tenue de plongée possède des avantages et des inconvénients à connaître pour un choix le mieux adapté à la plongée à réaliser. Les systèmes de réchauffement des tenues de plongée n'ont pas prouvé jusqu'à présent leur efficacité pour le maintien des températures corporelles. Tout au plus, ils apportent une amélioration du confort thermique des plongeurs, parfois au détriment de leur sécurité. En effet, la sensation de froid n'étant plus présente, les plongeurs pourraient être tentés de rester plus longtemps immergés.

Immersions de 8, 10 et 12 h : expérimentations conduites par l'IRBA et la Marine nationale.

Afin de faire évoluer la réglementation de la plongée militaire, des expérimentations ont été menées par l'ERRSO (IRBA) en collaboration avec la Marine nationale dans l'objectif de prolonger de 6 à 12 heures la durée maximale autorisée des plongées militaires. Ces plongées de très longues durées correspondent au contexte d'emploi spécifique des propulseurs sous-marins pilotés par les nageurs de combat (fig. 4).

Ces expérimentations se sont déroulées selon la réglementation en vigueur dans la recherche biomédicale. Les sujets ont été informés des risques encourus et ont donné leur consentement écrit. La sélection a été faite après une visite médicale. Les plongeurs ont réalisé leur immersion, en binôme, à l'intérieur du caisson hyperbare CH500 de la CEPHISMER à Toulon. Par sécurité, le passage de 6 à 12 heures d'immersion a été réalisé par étapes successives (8, 10 et 12 heures).

Trois groupes de six nageurs de combat, équipés d'une tenue en néoprène refendu de 7,5 mm d'épaisseur, ont réalisé chacun une immersion dans une eau à 18 °C, dans un caisson hyperbare, pendant 8h (ITLD8), 10h (ITLD10), ou 12h (ITLD12). La profondeur d'immersion variait de 7 à 20 m. Les plongeurs utilisaient un appareil Oxymixgers (au mélange Nitrox 50 % ou à l'oxygène 100 %). Ils alternaient des périodes statiques (position assise) et dynamiques (palmage). Ils devaient boire toutes les heures 200 ml d'eau (contenant 240 mg de sel et 10 g de sucre) et ingérer un tube de gel énergétique contenant 10 mg de sel et 35 g de sucre.

Des examens médicaux (épreuves fonctionnelles respiratoires, bilans ophtalmologiques et échographies cardiaques) ont été pratiqués avant et après l'immersion, tandis qu'un suivi de variables physiologiques et biologiques a été réalisé lors de l'immersion (températures corporelles, bilan hydrique, fréquence cardiaque, glycémie et kaliémie). Une évaluation des capacités cognitives des nageurs (tâche de Simon) a aussi été menée lors de l'immersion (fig. 5).

Résultats

En moyenne sur l'ensemble des immersions, les sujets ont perdu 2,4 kg de masse corporelle (bilan total avant et après plongée et ingesta non déduits) et produit 4,4 l d'urine. L'hydratation de 200 ml/h ne compense donc pas totalement les fuites urinaires.



Figure 4. Binôme de nageurs de combat dans leur propulseur sous-marin lorsqu'il est en surface.

Le volume plasmatique (VP)

Le VP baisse en moyenne de 18 % durant l'immersion, quelle que soit sa durée (8h, 10h ou 12h). Une heure après la fin de la plongée, le VP est encore réduit de 13 %. Il faut attendre plusieurs heures avant que la volémie se normalise.

Électrolytes plasmatiques

Quelle que soit la durée de l'immersion, la natrémie et la kaliémie restaient constantes, dans la plage de la normalité (respectivement 140,13 ± 2,64 et 3,94 ± 0,4 mmol.l^{-1}). Ces résultats suggèrent que, malgré une fuite urinaire importante, l'organisme parvient à réguler les valeurs de natrémie et de kaliémie.



Figure 5. Réalisation de tests cognitifs en immersion.

L'hémodynamique cardiaque

D'une manière générale, l'ampleur des modifications échographiques constatées est du même ordre pour les trois durées d'immersion. Les échographies cardiaques réalisées à l'issue des immersions montraient une baisse des capacités du cœur à se remplir (-18 %) et à éjecter le sang (-20 %). Le lendemain matin, le retour à la normale n'était toujours pas réalisé (hypovolémie rémanente). Les concentrations de peptides cardiaques (ANP et BNP) augmentent sensiblement au cours des plongées, avec des cinétiques propres à chaque peptide. L'ensemble des valeurs observées reste très inférieur aux seuils pathologiques (souffrance ou incapacité fonctionnelle myocardique), mais témoigne de contraintes et de travail myocardique qui nécessitent l'intégrité fonctionnelle et une bonne aptitude cardiaque à l'activité physique soutenue et prolongée.

Le statut thermique

Le risque d'hypothermie est faible lors de 8, 10 et 12 heures d'immersion dans l'eau à 18 °C. Quelle que soit la durée d'immersion, les températures corporelles évoluent de la même façon, sans passer sous le seuil critique (en moyenne, 36,6 °C ± 0,4 de température interne et 28,0 ± 1,2 °C de température cutanée moyenne). La tenue portée lors de ces immersions assure une protection minimale. Le maintien des températures corporelles se fait alors au prix d'une augmentation de l'intensité et de la durée des frissons thermiques au cours

de l'immersion mais aussi grâce à la période de palmage en milieu de plongée. De grandes différences existent entre les nageurs et induisent des coûts énergétiques variables d'un plongeur à l'autre. Ils doivent être pris en compte pour la bonne réalisation de l'ensemble de la mission.

Synthèse et recommandations

En s'immergeant, l'organisme des nageurs passe brutalement dans un environnement qui modifie grandement la physiologie. L'adaptation à ces conditions fonctionnelles nouvelles modifie sensiblement les états hydrique et énergétique, et un nouvel état stable semble atteint après 3-4 heures. Cet état stable est maintenu sans modifications apparentes des grandes fonctions physiologiques jusqu'à la fin de l'immersion. Cependant, ce maintien a un coût pour l'organisme, coût qu'il est difficile d'apprécier. Les réserves physiologiques des nageurs ne leur permettront pas de maintenir cet équilibre physiologique indéfiniment, et un risque réel pour leur intégrité physique pourrait alors apparaître. Cette rupture surviendra d'autant plus rapidement que l'environnement sera exigeant (en particulier la température de l'eau) et que l'état initial du nageur n'est pas optimal (fatigue, privation de sommeil, statut hydrique, plongées successives etc..). En effet, de grandes variations inter individuelles sont apparues. Chaque nageur de combat met en œuvre des réponses physiologiques avec des intensités de réponse qui lui sont propres pour lutter contre les contraintes de l'immersion de très longue durée.

Dans un avenir proche, de nouvelles expérimentations seront menées afin d'étudier l'adaptation de l'organisme à des températures d'eau plus exigeantes (10 °C et 30 °C) et à des « changements de milieu » (exercices physiques terrestres au cours d'immersion de très longue durée) ; ceci dans le cadre de la mise en œuvre du propulseur sous-marin de 3e génération.

Pour réaliser les prochaines immersions en toute sécurité, on peut d'ores et déjà faire quelques recommandations.

Hydratation avant immersion

Pour toute plongée de plus de 4 heures, les sujets ne doivent pas être déshydratés avant l'immersion. Une quantité suffisante d'eau doit être consommée pendant les 24 heures précédant la plongée. En général, l'apport hydrique peut être considéré comme suffisant si l'urine est claire et de couleur jaune pâle. Le volume de liquide nécessaire pour assurer une hydratation adéquate dépendra, en partie, de la température ambiante.

L'hydratation en cours d'immersion

L'ingestion de 200 ml d'eau par heure d'immersion semble faire consensus. La boisson ingérée doit contenir des glucides pour maintenir une glycémie normale, et être légèrement hypo-osmotique (par exemple, < 260 mOsm). La plupart des boissons sucrées disponibles dans le commerce sont hyperosmolaires et doivent donc être diluées avec de l'eau. Toute boisson doit être testée avant la plongée pour s'assurer que le nageur sera capable de tolérer la solution dans la quantité recommandée. L'hydratation devant être réalisée sans interruption de la plongée, un système de tubulure étanche fixé sur l'embout buccal de l'appareil respiratoire des plongeurs a été mis au point par les chercheurs de l'ERSSO, avec l'aide de la Mission innovation partitive le Cavadhyst® (fig. 6).



Figure 6. Dispositif Cavadhyst® d'hydratation orale en plongée.

Réhydratation après plongée

Un moyen simple pour déterminer la quantité de liquide perdu par un plongeur est de mesurer sa masse corporelle avant et après la plongée. La différence de poids correspond à la quantité d'eau que le nageur doit boire à l'issue de son immersion. S'il n'est pas possible de peser le nageur, nous recommandons de boire un litre d'eau par heure, jusqu'à ce que les urines soient claires ou pâles. L'ingestion de boissons alcoolisées ou contenant de la caféine n'est pas appropriée car, outre leurs effets spécifiques bien connus, ces boissons augmentent artificiellement la production d'urine. Ces recommandations sont d'autant plus importantes, qu'à l'issue de la plongée, la sensation de soif n'est jamais présente malgré une baisse majeure du volume plasmatique.

Les auteurs ne déclarent pas de conflit d'intérêt concernant les données présentées dans cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Epstein M. Renal effects of head-out water immersion in humans : a 15-year update. Physiol Rev 1992 ; 72 : 563-621.
2. Regolisti G, Coghi P, Bruschi G, et al. Effects of water immersion on forearm vascular resistance in normotensive subjects. J Hypertens Suppl 1993 ; 11 : S178-9.
3. Miwa C, Sugiyama Y, Mano T, et al. Spectral characteristics of heart rate and blood pressure variabilities during head-out water immersion. Environ Med 1996 ; 40 : 91-4.
4. Miwa C, Sugiyama Y, Mano T, et al. Sympatho-vagal responses in humans to thermoneutral head-out water immersion. Aviat Space Environ Med 1997 ; 68 : 1109-14.
5. Gabrielsen A, Videbaek R, Johansen LB, et al. Immediate baroreflex-neuroendocrine interactions in humans during graded water immersion. J Gravit Physiol 1996 ; 3:22-3.
6. Norsk P, Bonde-Petersen F, Christensen NJ. Catecholamines, circulation, and the kidney during water immersion in humans. J Appl Physiol 1990 ; 69 : 479-84.
7. Larsen AS, Johansen LB, Stadeager C, et al. Volume-homeostatic mechanisms in humans during graded water immersion. J Appl Physiol 1994 ; 77 : 2832-9.
8. Gabrielsen A, Pump B, Bie P, et al. Atrial distension, haemodilution, and acute control of renin release during water immersion in humans. Acta Physiol Scand 2002 ; 174 : 91-9.
9. Epstein M, Pins DS, Miller M. Suppression of ADH during water immersion in normal man. J Appl Physiol 1975 ; 38 : 1038-44.
10. Stadeager C, Johansen LB, Warberg J, et al. Circulation, kidney function, and volume-regulating hormones during prolonged water immersion in humans. J Appl Physiol 1992 ; 73 : 530-8.
11. Gabrielsen A, Videbaek R, Johansen LB, et al. Forearm vascular and neuroendocrine responses to graded water immersion in humans. Acta Physiol Scand 2000 ; 169 : 87-94.
12. Epstein M, Norsk P, Loutzenhiser R. Effects of water immersion on atrial natriuretic peptide release in humans. Am J Nephrol 1989 ; 9:1-24.
13. Wolf JP, Nguyen NU, Baulay A, et al. The role of posture on the changes in plasma atrial natriuretic factor and arginine vasopressin levels during immersion. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1990 ; 61 : 284-8.
14. Khosla SS, DuBois AB. Fluid shifts during initial phase of immersion diuresis in man. J Appl Physiol 1979 ; 46 : 703-8.
15. Gordon CJ, Fogarty AL, Greenleaf JE, et al. Direct and indirect methods for determining plasma volume during thermoneutral and cold-water immersion. Eur J Appl Physiol 2003 ; 89 : 471-4.
16. Stocks JM, Patterson MJ, Hyde DE, et al. Effects of immersion water temperature on whole-body fluid distribution in humans. Acta Physiol Scand 2004 ; 182 : 3-10.
17. Castagna O, Blatteau JE, Vallee N, et al. The underestimated compression effect of neoprene wetsuit on divers hydromineral homeostasis. Int J Sports Med 2013 ; 34 : 1043-50.
18. Rim H, Yun YM, Lee KM, et al. Effect of physical exercise on renal response to head-out water immersion. Appl Human Sci 1997 ; 16:35-43.
19. Watenpaugh DE, Pump B, Bie P, et al. Does gender influence human cardiovascular and renal responses to water immersion ? J Appl Physiol 2000 ; 89 : 621-8.
20. Hope A, Aanderud L, Aakvaag A. Dehydration and body fluid-regulating hormones during sweating in warm (38 degrees C) fresh- and seawater immersion. J Appl Physiol 2001 ; 91 : 1529-34.
21. Castagna O, Desruelle AV, Blatteau JE, et al. hazardous thermal and fluid burdens during scuba finning in 29 °C. 38th EUBS annual scientific meeting 2012 ; belgrad.
22. Greenleaf JE. Physiology of fluid and electrolyte responses during inactivity : water immersion and bed rest. Med Sci Sports Exerc 1984 ; 16:20-5.
23. Johansen LB, Foldager N, Stadeager C, et al. Plasma volume, fluid shifts, and renal responses in humans during 12 h of head-out water immersion. J Appl Physiol 1992 ; 73 : 539-44.
24. Sawka MN, Gonzalez RR, Young AJ, et al. Polycythemia and hydration : effects on thermoregulation and blood volume during exercise-heat stress. Am J Physiol 1988 ; 255 : R456-63.
25. Sawka MN, Young AJ, Pandolf KB, et al. Erythrocyte, plasma, and blood volume of healthy young men. Med Sci Sports Exerc 1992 ; 24 : 447-53.
26. Jimenez C, Melin B, Koulmann N, et al. Plasma volume changes during and after acute variations of body hydration level in humans. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1999 ; 80 : 1-8.
27. Melin B, Jimenez C, Chennaoui M. immersion de longue durée à la neutrolité thermique. comparaison avec des données obtenues à 10°C et 18°C sur l'homeostasie hydrominérale et energétique. Étude N°2 du contrat d'objectif : 06 CO 025 rattaché au PEA n°01 08 09 Sécurité des plongeurs 2007.
28. Melin B, Jimenez C, denis J, et al. Immersion de longue durée. Étude des conséqunces sur l'homéostasie hydrominérale et énergétique. Étude n°3 du contrat d'objectif : 01 CO 012 Rattaché au PEA n° 98 08 09 « Sécurité des plongeurs » 2004.
29. Melin B, Cure M, Jimenez C, et al. Effect of ingestion pattern on rehydration and exercise performance subsequent to passive dehydration. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1994 ; 68 : 281-4.
30. Boussuges A, Gole Y, Mourot L, et al. Haemodynamic changes after prolonged water immersion. J Sports Sci 2009 ; 27 : 641-9.
31. Rothenberg JA, Panagos A. Musculoskeletal performance and hydration status. Curr Rev Musculoskelet Med 2008 ; 1 : 131-6.
32. Murray B. Hydration and physical performance. J Am Coll Nutr 2007 ; 26 : 542S-548S.
33. Judelson DA, Maresh CM, Farrell MJ, et al. Effect of hydration state on strength, power, and resistance exercise performance. Med Sci Sports Exerc 2007 ; 39 : 1817-24.
34. Judelson DA, Maresh CM, Anderson JM, et al. Hydration and muscular performance : does fluid balance affect strength, power and high-intensity endurance ? Sports Med 2007 ; 37 : 907-921
35. Shirreffs SM. The importance of good hydration for work and exercise performance. Nutr Rev 2005 ; 63 : S14-21.
36. Mourot L, Bouhaddi M, Gandelin E, et al. Cardiovascular autonomic control during short-term thermoneutral and cool head-out immersion. Aviat Space Environ Med 2008 ; 79 : 14-20.
37. Bradner H. Guidelines for predicting heat loss of SEAL team members in SDV and free swimming operations General Physics Corporation, San Diego, CA. 1985:12-5.
38. Maeda T. Perspectives on environmental adaptability and physiological polymorphism in thermoregulation. J Physiol Anthropol Appl Human Sci 2005 ; 24 : 237-40.
39. Weinberg RP, Ackerman MJ, Bradley ME. Proposed thermal limits for divers. Naval Medical Research Institute, Bethesda 1984 ; NMRI 84-38.



© Marine nationale.