

L'APNÉE

De la théorie

à la pratique



Sous la direction
de Frédéric Lemaitre

 **PURH**

Chapitre 2

L'entraînement à l'apnée : approche pratique

Éric CLUA

Résumé

Après avoir passé en revue les grands principes de l'entraînement, ce chapitre se penche sur les spécificités liées à l'apnée. Il présente les facteurs contribuant à la performance en apnée : les facteurs anatomo-physiques, physiologiques, psychologiques et techniques. Ces facteurs sont étudiés en même temps que sont évoqués les exercices permettant leur amélioration. La quatrième partie du chapitre présente les éléments permettant la structuration d'un entraînement à l'apnée, par le biais de nombreux exemples d'exercices. Après être revenu sur les composantes spécifiques à l'entraînement en apnée que sont la sécurité et les souffrances psychologiques et physiologiques, le chapitre propose ensuite une méthode d'entraînement répondant à toutes les contraintes évoquées au préalable. Cette méthode repose sur l'utilisation des « performances acquises » permettant de minimiser le stress chronique hypoxique imposé par l'apnée, en ne travaillant simultanément que sur certains facteurs de la performance. Cette méthode présente des intérêts annexes pour la mise en œuvre d'un entraînement collectif, avec des niveaux hétérogènes chez les élèves et une sécurité maximale. En conclusion, l'accent est mis sur les lacunes actuelles qui engagent à maintenir la sécurité comme une composante majeure de l'entraînement en apnée.

Mots-clés : Apnée – Entraînement – Approche pratique – Facteurs et amélioration des performances – Méthode des performances acquises.

1. Introduction

L'apnée peut certes être considérée comme un sport, mais un sport « à part ». Le mammifère terrestre qu'est l'homme a en effet évolué de façon à assurer ses fonctions vitales avec un accès permanent au composant chimique essentiel que constitue l'oxygène (O_2). La grande majorité des sports demandent et conduisent à des adaptations physiologiques et physiques qui reposent sur la maximisation de l'utilisation de cet O_2 afin d'alimenter le travail des muscles. Si ce concept de base reste vrai pour l'apnée, il faut rajouter à cette équation classique la nécessité pour l'organisme d'économiser ce gaz qui est de fait en quantité limité et ce, pour assurer la performance tout en protégeant l'organisme contre les effets néfastes de l'hypoxie, en particulier sur le système nerveux central (45). La performance en apnée va donc dépendre des qualités intrinsèques de l'athlète et des mécanismes physiologiques que le corps va mettre en place afin d'obtenir cet optimum d'utilisation de l' O_2 .

Ces constats font de l'apnée un sport à part et l'entraînement à l'apnée ne pourra être que spécifique, même si l'on y retrouve certaines constantes propres à tous les sports. Cette spécificité fait que les connaissances en terme d'entraînement dans ce sport marginal ne sont actuellement que peu développées. Ce chapitre entend contribuer à un état des lieux de ces connaissances et permettre aux intéressés de mieux dominer et construire leur entraînement à ce sport si particulier, en garantissant un maximum de sécurité aux pratiquants.

2. Principes fondamentaux de l'entraînement

Avant d'envisager les spécificités liées à l'apnée, nous proposons un rappel de quelques principes fondamentaux de l'entraînement.

2.1. Les différentes filières énergétiques

Dans l'organisme, toutes les fonctions biologiques nécessitent de l'énergie. Cette énergie provient de la dégradation des aliments et des réserves énergétiques (carburants) dégradés grâce à l'oxygène (métabolisme aérobie) ou sans oxygène (métabolisme anaérobie ; voir figure n° 1).

Il convient de distinguer les différentes filières énergétiques que le sportif va mobiliser en fonction du type d'efforts qu'il va produire. L'entraînement va permettre de potentialiser toutes ces filières (43).

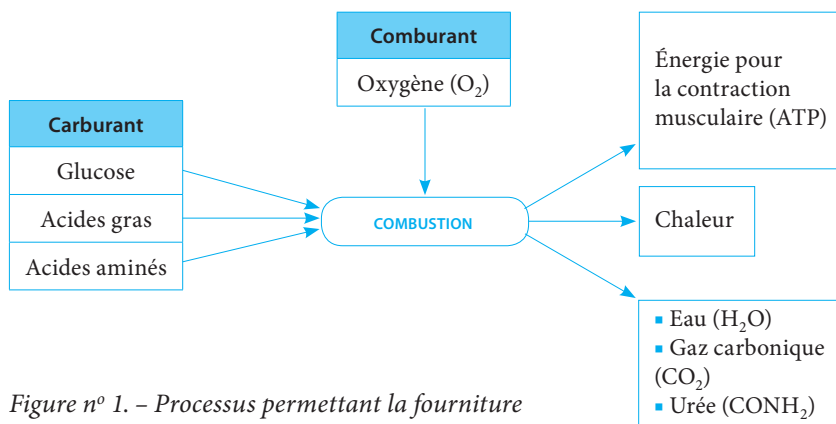


Figure n° 1. – Processus permettant la fourniture d'énergie dans l'organisme (en présence d'O₂).

Certains exercices vont permettre de favoriser des filières plus propices à l'accomplissement de performances spécifiques. D'un point de vue général, il est commun de différencier les filières anaérobies (qui n'utilisent pas l'O₂) des filières aérobies (qui utilisent l'O₂). Schématiquement, les premières sont mobilisées lors des efforts courts et intenses, les secondes lors des efforts longs et moins intenses (30).

- La *filière anaérobie alactique* : voie métabolique qui permet la mise à disposition immédiate (< 10 s) d'énergie en ayant recours aux réserves d'adénosine triphosphate (ATP) et de phospho-créatine (PC_R) présentes au niveau des muscles.

- La *filière anaérobie lactique* : voie métabolique qui permet la mise à disposition rapide (entre 30 s et 2 min) d'énergie en dégradant le glycogène sans apport d'oxygène, ce qui conduit à la production d'acide lactique, qui circule dans le sang sous forme de lactates. La lactatémie (taux de acide lactique dans le sang) est un facteur prépondérant d'émergence du point de rupture de l'apnée.

- La *filière aérobie* : voie métabolique qui permet la mise à disposition lente (supérieure à 2 min) d'énergie en dégradant les glucides et les lipides en présence d'oxygène. Cette dégradation permet la reconstitution des stocks d'ATP par phosphorylation oxydative. Elle dégage de la chaleur mais ne produit pas de déchets gênants (seulement du CO₂ et de l'eau facilement éliminés). La capacité de cette filière est communément évaluée par $\dot{V}O_2 \text{ max}^1$ qui dépend de la capacité de l'organisme à prélever, transporter et distribuer l'O₂ dans tous les points de l'organisme où sa présence est nécessaire pour les réactions d'oxydation.

1. $\dot{V}O_2 \text{ max}$ représente la quantité maximale d'O₂ (en ml) qu'un individu peut utiliser en 1 min rapportée à sa masse (en kg).

En fonction de leur durée, les exercices vont donc faire appel aux différentes filières énergétiques (figure n° 2).

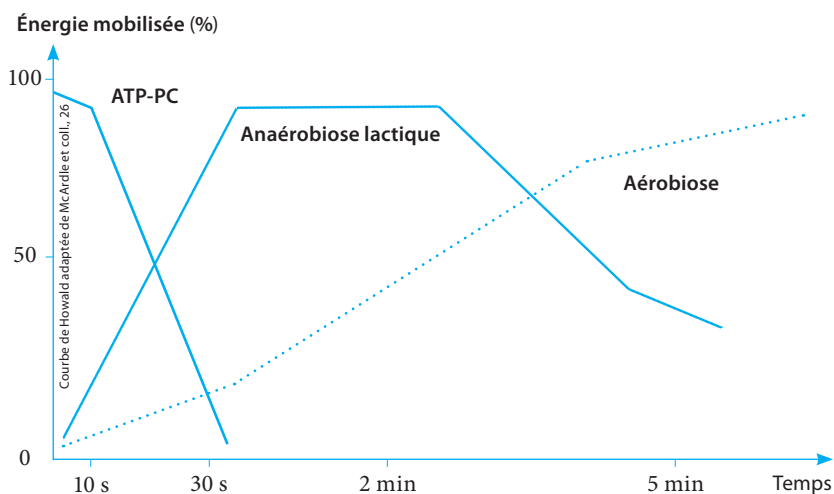


Figure n° 2. – Cinétique d'utilisation des différentes filières énergétiques lors d'un effort musculaire.

Il est important, à l'échelle d'un entraînement à longue échéance, de travailler la potentialisation de toutes ces filières. Il faut aussi signaler que ces trois filières ne se succèdent pas, mais qu'elles commencent toutes en même temps. Selon le type d'effort, l'une ou l'autre sera prépondérante. De plus, la filière anaérobie alactique est d'importance moindre en apnée, si ce n'est pour des performances courtes et rapides (course de relais, par exemple). En revanche, les filières aérobie et anaérobie lactique constituent la base de l'entraînement. La première est améliorée par un travail communément dénommé « foncier », la seconde par des exercices qualifiés de « fractionnés ». Pour finir, physiologiquement, il n'existe pas réellement de filière alactique *stricto sensu* car nous produisons des lactates dès le début de l'effort, ceux-ci étant métabolisés dans le muscle immédiatement. Il n'existe également pas de filière anaérobie puisque nous avons toujours des réserves en oxygène dans notre organisme, même lorsque nous retenons notre respiration. En revanche, il est possible d'envisager des filières avec des efforts de très courtes durées, de courtes durées ou de moyennes à longues durées.

2.2. Principes généraux régissant l'entraînement

L'objectif d'un entraînement est de soumettre l'organisme à des charges de travail dans le but de créer une adaptation qui se traduit par

une amélioration des performances (4). Cette adaptation se fait par bonds successifs, d'amplitudes de plus en plus faibles, avec l'amélioration de la performance (figure n° 3). En d'autres termes, à mesure que l'on avance dans les performances, le travail permettant un gain devra être plus important. Ces processus d'adaptation sont la conséquence du stress imposé par les exercices et leur mode de répétition. Ils sont le reflet fidèle des efforts réalisés. Selon Platonov (48), « l'entraînement moderne est caractérisé par une élévation progressive des charges imposées au sujet. Ceci permet à chaque étape d'imposer à l'organisme des sollicitations proches des limites de ses possibilités fonctionnelles. Ces conditions sont indispensables à une stimulation efficace de ses processus d'adaptations ».

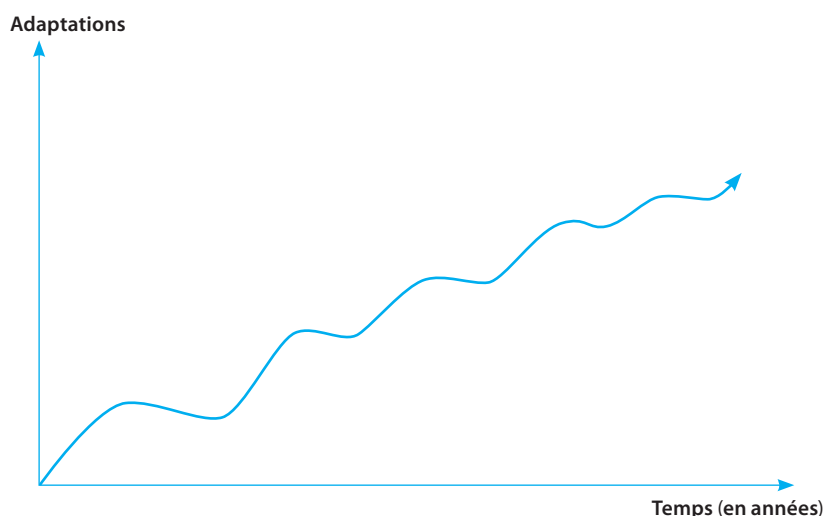


Figure n° 3. – Adaptations de l'organisme avec les années d'entraînements.

Un organisme est caractérisé à un instant donné par un état fonctionnel qui est en capacité de répondre à un effort spécifique. Cette capacité repose sur l'apport d'énergie servant à mobiliser les muscles, mais aussi sur la gestion des produits de dégradation liés à l'effort (CO_2 et acide lactique, par exemple).

Au cours d'un exercice trop important pour un état fonctionnel donné n , les capacités de réponse de l'organisme vont être dépassées en termes d'apport énergétique et de gestion des déchets liés à l'effort. C'est le principe de la *surcharge*. La fatigue se fait sentir, et l'organisme a besoin de récupérer en éliminant des déchets de type acide lactique et en reconstituant des stocks d'ATP, de PC_R et de glycogène. Une récupération correcte replace l'organisme à un état fonctionnel $n+1$ supérieur à celui d'origine n , c'est le principe de la *surcompensation* (figure n° 4).

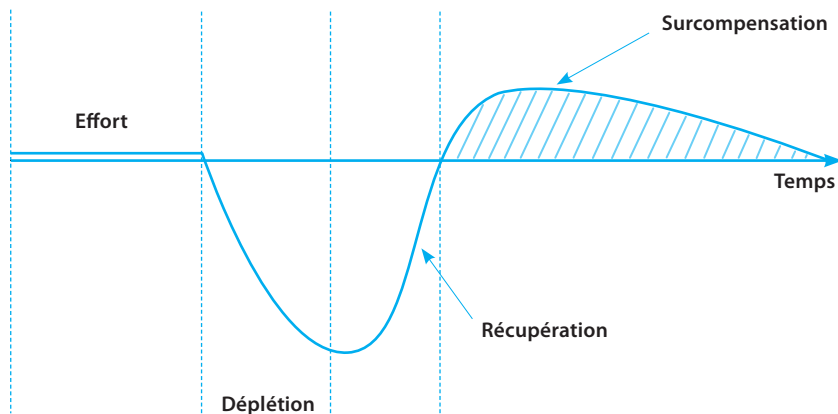


Figure n° 4. – Tout entraînement repose sur une contrainte (exercice) qui se traduit par un état de fatigue et une réaction de l'organisme (surcompensation).

Si la demande se répète suffisamment, l'organisme s'adapte de mieux en mieux. Les états de surcompensation tendent de plus en plus vers un état fonctionnel optimal en terme de capacité de l'organisme à répondre à des sollicitations particulières. C'est le principe de la *répétitivité*.

Le principe de l'entraînement repose donc sur l'image suivante : un organisme caractérisé par un état fonctionnel n s'adapte petit à petit à des demandes physiologiques qui se répètent, et il évolue vers des états fonctionnels $n+1$, $n+2$, ... $n+x$ mieux adaptés à des efforts donnés. La récupération complète à la suite des exercices de surcharge permet une surcompensation générale et aussi l'atteinte d'un état fonctionnel supérieur au niveau initial (figure n° 5).

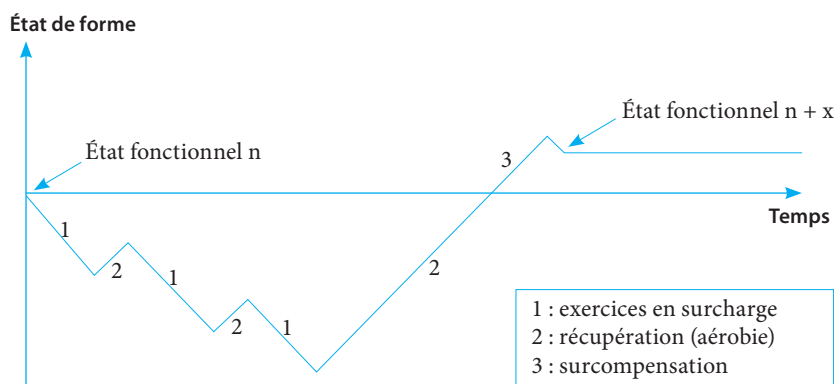


Figure n° 5. – Évolution temporelle à l'échelle d'une séance d'entraînement des niveaux d'état fonctionnel.

Les états fonctionnels optimaux atteints par l'entraînement ne sont évidemment pas acquis indéfiniment et ils doivent être entretenus. C'est le principe de la *réversibilité*. L'arrêt complet de l'entraînement pendant 21 jours provoque une diminution du niveau de performance d'environ 25 % de $\dot{V}O_2\text{max}$, ce qui revient à dire que la perte en niveau de performance est de l'ordre de 1 % par jour. À titre indicatif, nous pouvons considérer qu'une interruption de 3 mois de l'entraînement fait disparaître l'adaptation physiologique à l'apnée. Cette cinétique de diminution est la même, qu'il s'agisse de sportifs amateurs ou de haut niveau (figure n° 6).

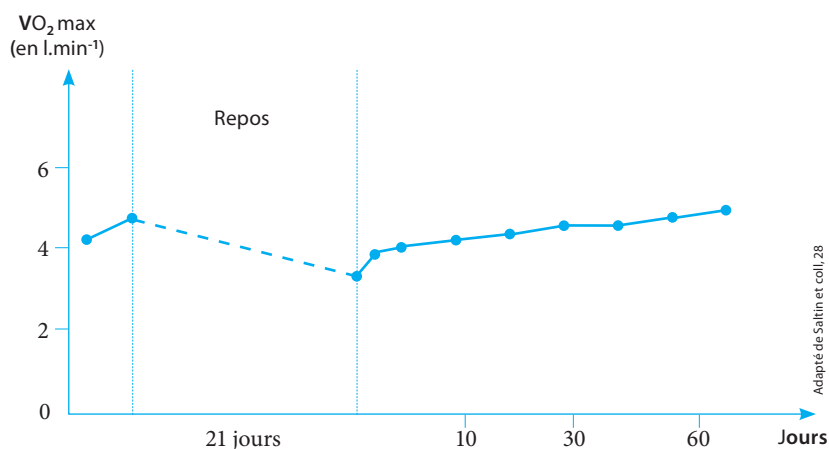


Figure n° 6. – Courbe de décroissance de $\dot{V}O_2\text{max}$ chez un sportif athlète de haut niveau.

2.3. Cycles d'entraînement

Les adaptations physiologiques découlant de l'entraînement présentent des cinétiques différentes. Concernant les filières énergétiques déjà décrites (III, 2, 2.1), les résultats issus d'un travail *foncier* sont plus longs à obtenir mais ils constituent un prérequis indispensable pour une amélioration significative des adaptations liées à un travail *fractionné*. Ce travail sur la condition physique doit souvent être couplé à l'amélioration de la technique.

Il est donc fréquent de devoir mener de front plusieurs objectifs, avec des priorités qui évoluent au cours du temps. Cet état de fait se traduit par la distinction de *cycles d'entraînement* à différentes échelles temporelles. On distingue communément les *macrocycles*, de l'ordre du trimestre, les *mésocycles*, de l'ordre du mois, et les *microcycles*, de l'ordre de la semaine. Au sein des microcycles, l'entité de base est constituée par la séance, de l'ordre de 1 à 3 h.

Les deux paramètres des exercices que sont le volume et l'intensité d'un effort permettent d'évoluer lentement d'un travail *fondier*, caractérisé par un volume important et une intensité faible, vers un travail plus *fractionné*, caractérisé par un volume faible et une intensité importante. En couplant cette évolution à la notion de cycles d'entraînement, il est possible de déboucher sur un plan général d'entraînement (tableaux n° 1 et n° 2).

Macrocycles	Phase 1		Phase 2	
Durée (en mois)	4		2	
Mésocycles	Préparation	Progression	Renforcement	Valorisation
Durée (en semaines)	10	6	5	3
Paramétrage des exercices	Volume : ++++ Intensité : +	Volume : +++ Intensité : ++	Volume : ++ Intensité : +++	Volume : + Intensité : ++++

Le nombre de + indique l'importance accordée au paramètre.

Tableau n° 1. – Exemple d'un plan d'entraînement général semestriel visant à l'amélioration de l'état fonctionnel d'un athlète.

		Novembre Décembre 15 janvier	16 janvier Février 15 mars	16 mars - 21 avril
Technique	Hydrodynamisme	+++	+++	+++
	Palmage	+++	++	+
	Coordination	+++	++	+
Physiologie	Hypercapnique	+++	++	+
	Hypoxique	+	++	+++
	Aérobie	+++	++	+
	Lactique	+	++	+++
Psychologie et musculature	Souplesse	+++	+++	+++
	Musculation spécifique	+++	++	+
	Musculation des muscles inspiratoires	+++	++	+
	Relâchement	+++	+++	+++

Ce tableau regroupe de manière non exhaustive les qualités à entretenir ou développer pour la performance en apnée. Le nombre de + représente l'importance à accorder à la capacité concernée en fonction de la période.

Tableau n° 2. – Exemple de programmation d'un entraînement effectué en vue de la préparation à une compétition.

3. Spécialités de l'entraînement en apnée : les facteurs de la performance

Bien qu'il ne soit pas un animal aquatique, l'homme est le siège de mécanismes adaptatifs facilitant l'apnée lorsqu'il se met en situation d'immersion sans apport d'O₂ ; ces mécanismes sont regroupés sous le concept de « réflexe de plongée² » (27). Ce concept englobe essentiellement une vasoconstriction périphérique, une bradycardie, une baisse du volume sanguin expulsé par le cœur, une augmentation de l'irrigation sanguine du cerveau et du cœur et une contraction splénique.

L'entraînement à l'apnée va d'abord consister à améliorer l'efficacité globale de ce corpus d'adaptations (à la fois dans sa rapidité et son intensité de mise en place). Il va aussi permettre d'améliorer les capacités intrinsèques (notamment anatomiques et physiques) de tout individu à pratiquer l'apnée, la maîtrise du mental et enfin, la maîtrise des facteurs techniques dans un but de mieux utiliser les réserves d'O₂. Tous ces notions peuvent être regroupées sous le concept général de « facteurs³ de la performance » en apnée (figure 7 ; 52, 53, 54).

Dans un souci de meilleure lisibilité, ces facteurs peuvent se répartir en quatre grands groupes :

- *Les facteurs anatomophysiques* concernent les aptitudes morphologiques ou anatomiques innées (volume pulmonaire, densité du corps par exemple) ou acquises (capacité à effectuer une insufflation glossopharyngienne⁴ (IGP), souplesse thoracique par exemple) d'un individu pour pratiquer l'apnée. Ils peuvent être améliorés par des exercices spécifiques soit de musculation, d'endurance ou de souplesse.

- *Les facteurs physiologiques* concernent l'état fonctionnel d'un organisme, c'est-à-dire sa capacité à faire face aux contraintes physiologiques

2. Traduction du terme anglo-saxon de « *diving reflex* ».

3. Nous restreignons notre approche aux facteurs intrinsèques à l'apnéiste qui peuvent être améliorés par l'entraînement sur le long terme. Il est important de préciser que certains facteurs « instantanés » peuvent avoir une influence importante sur la performance (tels que l'état de fatigue, l'état de digestion, la température de l'eau, les conditions météorologiques, la nature de l'encadrement, etc.), mais sortent du cadre strict de l'entraînement.

4. Insufflation glossopharyngienne (IGP), communément dénommée « technique de la carpe » (par analogie avec les mouvements de bouche du poisson lorsqu'il est en émergence) : consiste à mettre les poumons en surpression en imposant un surplus d'air par contraction glossopharyngienne (avec une ouverture et fermeture rapides de la glotte).

d'un effort en apnée. Leur amélioration réside, entre autres, dans une gestion optimisée de l'O₂ (tant le volume emmagasiné que son utilisation) et une augmentation de la tolérance aux stimuli déclenchant la rupture d'apnée, telle la chémosensibilité à l'O₂ et au CO₂ (12, 25).

- Les *facteurs psychologiques* concernent, entre autres et surtout, la capacité de l'apnéiste à maintenir un état de stress intellectuel minimal (quels que soient les stimuli internes ou externes). Leur amélioration passe par la répétition de mises en situation diverses et variées pour augmenter l'indépendance intellectuelle de l'apnéiste vis-à-vis du stress et pour accroître sa capacité à la concentration.

- Les *facteurs techniques* (ou *biomécaniques*) concernent la capacité d'un apnéiste à maîtriser les techniques liées à la préparation (ventilation par exemple) et à la gestion optimale de son effort (l'aquaticité⁵ par exemple) pour un objectif donné. Ils peuvent être sensiblement améliorés par l'entraînement.

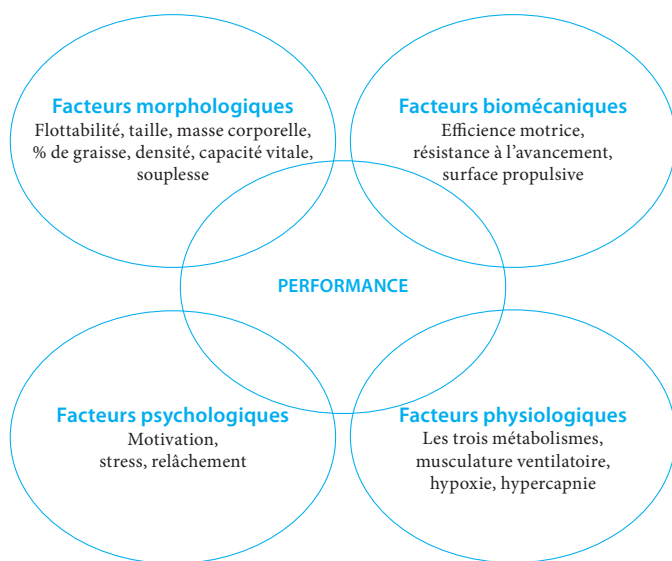


Figure n° 7. – Les facteurs de la performance en apnée.

5. Définie comme « une optimisation conjointe de l'hydrodynamisme (capacité de pénétration dans l'eau) et de la motricité aquatique (capacité à impulser un mouvement avec un minimum d'énergie) » (cf. www.wikipedia.org)

3.1. Amélioration des facteurs anatomophysiques

De tous les facteurs de la performance en apnée, les facteurs physiques sont indéniablement les plus difficiles à améliorer par l'entraînement. Cette caractéristique est liée au fait qu'ils sont pour la plupart inhérents à la morphologie de l'individu, elle-même inhérente à la génétique. Le gain de performance obtenu par leur amélioration restera généralement inférieur à celui obtenu par l'amélioration des autres facteurs (10). Il peut néanmoins s'avérer déterminant pour un athlète de haut niveau, qui ne doit rien négliger dans sa course à l'optimisation. Un entraînement spécifique peut permettre d'améliorer plusieurs points, à savoir :

- La *souplesse de la cage thoracique* : elle peut être obtenue par des exercices d'assouplissements spécifiques, en particulier des positions de *Hatha-yoga* (voir III, 3). Des positions particulières contraignent à ne mobiliser qu'une partie des poumons, favorisant leur fonctionnalité et la souplesse partielle et totale de la cage thoracique. Une souplesse accrue de la cage permet d'une part d'augmenter la capacité pulmonaire totale (CPT) et d'autre part de diminuer le volume résiduel (VR). Ces tendances contribuent à une amélioration notable du rapport CPT / VR. Ce rapport permet de calculer la profondeur maximale théorique de plongée (sans *blood shift*⁶), ce qui est un critère d'aisance pour les apnéistes devant compenser à de grandes profondeurs.

- La *puissance de la musculature ventilatoire* (diaphragme, muscles intercostaux, ceintures scapulaire et abdominale) : de nombreux sports contribuent indirectement à l'amélioration de ces groupes musculaires. Il en est qui permettent néanmoins de la travailler spécifiquement. C'est le cas des exercices de *Hatha-yoga* cités ci-dessus, de même que la pratique du *prânayâma* (exercices respiratoires spécifiques ; 58), ou celle de la natation, à condition de procéder à une expiration sous l'eau obligeant à un effort d'expulsion de l'air. La puissance de la musculature ventilatoire joue un rôle clef afin d'augmenter la CPT à l'inspiration et de favoriser le renouvellement du VR à l'expiration.

- La *souplesse du diaphragme et de la « chaîne postérieure »* : elle peut être obtenue par des exercices d'assouplissements spécifiques, en particulier issus du *prânayâma* pour le diaphragme ou du *Hatha-yoga* pour

6. Définition : phénomène faisant partie du « réflexe de plongée » chez les mammifères, en particulier lors d'une immersion verticale, et reposant sur une contraction des vaisseaux sanguins pulmonaires permettant une turgescence des capillaires. Cette turgescence diminue le volume résiduel et protège le parenchyme pulmonaire contre des lésions inhérentes aux contraintes physiques imposées par l'hyperbarie.

le cou et les épaules. Le diaphragme joue un rôle clef dans la ventilation. Sa mobilisation et son contrôle sont intimement liés à la souplesse des régions du corps adjacentes à ce dernier et constituant la « chaîne postérieure » (9).

- La *capacité à compenser par béance tubaire volontaire*⁷ (BTV) : elle dépend de l'anatomie interne, mais des exercices permettent de l'améliorer pour obtenir une béance complète qui permettra à l'apnéiste de ne pas avoir recours à une autre méthode de compensation, ou pour s'en rapprocher, ce qui est toujours un atout, même si l'on utilise d'autres techniques comme le Valsalva⁸. Le recours à la BTV permet un gain d'énergie et d'hydrodynamisme en évitant de mobiliser un bras pour la compensation.

- La *bradycardie* : le rythme cardiaque de base varie d'un individu à un autre ; il peut néanmoins être modulé, notamment à la baisse par la pratique sportive et des exercices dits « fonciers ». Un ralentissement du cœur est un facteur favorable à l'économie d'O₂ et contribue à la performance en apnée. Il fait partie du « réflexe de plongée » (27, 28).

3.2. Amélioration des facteurs physiologiques

Les facteurs physiologiques sont le groupe de facteurs qui seront directement et sensiblement modifiés par l'entraînement (34). Les modifications induites par l'entraînement seront néanmoins réversibles. Les principaux facteurs « physiologiques » sont :

- La *forme physique de base* : ce facteur est communément associé à la puissance aérobie, elle-même évaluée par $\dot{V}O_2\text{max}$. Cette variable rend compte de la capacité d'un athlète à mobiliser l'O₂ pour alimenter correctement les muscles et pour avoir préférentiellement recours à une production d'énergie aérobie (vis à vis d'une filière anaérobie productrice d'acide lactique). Il n'existe à l'heure actuelle que très peu d'études permettant de savoir dans quelle mesure un bon $\dot{V}O_2\text{max}$ est un atout pour la performance en apnée (55). Un meilleur $\dot{V}O_2\text{max}$ signifie une bonne utilisation de l'oxygène à l'effort. Or l'apnéiste par son entraîne-

7. Définition : manœuvre de rééquilibrage des pressions entre oreilles moyennes et externes, qui consiste à mobiliser les muscles peristaphylins pour ouvrir les trompes d'Eustache.

8. Définition : manœuvre de rééquilibrage des pressions entre oreilles moyennes et externes, qui consiste à créer au niveau des choanes une surpression en mimant l'expulsion d'air par les cavités nasales, tout en les obstruant manuellement. Cette surpression provoque l'ouverture des trompes d'Eustache.

ment recherche au contraire à économiser ses réserves en O_2 , et donc à ne pas les utiliser. Ce phénomène se traduit chez les apnéistes de haut niveau par une désaturation artérielle en oxygène moins importante que celle de sujets non entraînés (40). Mais certaines adaptations physiologiques liées au $\dot{V}O_2$ max apparaissent, elles, comme favorables à l'apnée : il s'agit de l'augmentation de la capacité vitale, de l'hématocrite, de la myoglobine, de la baisse de la fréquence cardiaque et surtout de la diminution de production des lactates (14, 29). Nous retiendrons de cette mise en perspective d'éléments contradictoires concernant l'intérêt d'une augmentation de $\dot{V}O_2$ max pour améliorer la performance en apnée que le bilan reste en faveur de cette dernière. Il est probable qu'un bon $\dot{V}O_2$ max, au-delà de son rôle pendant l'apnée, est un atout indéniable lors de la récupération. C'est pourquoi nous préconisons un travail aérobie en complément de l'entraînement spécifique à l'apnée. Ce travail pourra se faire par la natation ou d'autres sports tels que le vélo ou la course. Du point de vue temporel, ce travail précèdera les autres types d'exercices, qu'il s'agisse d'une simple séance ou d'un planning sur plusieurs mois.

- **La tolérance à l'hypoxie** : il est possible par l'entraînement d'abaisser le seuil de sensibilité des chémorécepteurs de la pression partielle en O_2 (PaO_2), situés dans les sinus carotidiens (19). La perte de connaissance anoxique est normalement déclenchée pour une valeur de la PaO_2 inférieure à 70 mmHg. En amont de ce phénomène, une PaO_2 inférieure à 90 mmHg contribue à l'envie de respirer, synonyme d'inconfort pour l'apnéiste et donc source de stress. Il est probable que l'entraînement permet d'abaisser ce seuil. En revanche, les effets répétés d'une hypoxie, notamment sur le système nerveux central, sont à ce jour mal connus et la plus grande prudence doit être de mise au sujet l'amélioration de la tolérance à l'hypoxie. Il est bon de rappeler que l'inhibition du réflexe respiratoire due à une hyperventilation expose à l'atteinte du seuil fatidique de déclenchement de la perte de connaissance, sans préavis (32). Les exercices favorisant l'amélioration de la tolérance à l'hypoxie reposent sur des durées d'apnée et de récupération longues, afin de se rapprocher des seuils de rupture tout en aidant l'organisme à récupérer correctement.

- **La tolérance à l'hypercapnie** : il est possible par l'entraînement d'abaisser le seuil de sensibilité de l'organisme aux chémorécepteurs de la pression partielle artérielle en CO_2 ($PaCO_2$), situés dans le bulbe rachidien (22). Une $PaCO_2$ supérieure à 40 mmHg déclenche l'envie de respirer, de façon plus efficace que la PaO_2 . Contrairement à une diminution artificielle de la $PaCO_2$ telle que le permettait l'hyperventilation, les techniques de préparation moderne préconisent le relâchement et le maintien

de la PaCO_2 à des niveaux normaux afin de ne pas inhiber le réflexe respiratoire. Cette approche n'est pas incompatible avec une recherche de tolérance à l'hypercapnie qui confèrera à l'apnéiste un confort propice à la performance. Le temps de récupération minimal afin d'éliminer l'excédent de CO_2 produit à l'issue d'une apnée de 3 min serait de l'ordre de 5 min. De ce fait, les exercices améliorant la tolérance à l'hypercapnie reposent sur le paramétrage suivant : des durées d'apnée et surtout des temps de récupérations courts, afin de conserver une PaCO_2 importante et d'habituer l'organisme. Il est important de remarquer que si la tolérance à l'hypercapnie est intéressante du point de vue de l'entraînement et de la performance, le système nerveux conserve une mauvaise tolérance à ce gaz (32) d'où la nécessité de gérer les exercices « hypercapniques » sous peine de provoquer des malaises souvent précédés de céphalées, sueurs et troubles neurologiques. Par ailleurs, certains auteurs pensent que ce facteur n'est que secondaire dans la performance en apnée (3).

- *La tolérance aux stimuli mécaniques* : il est possible par l'entraînement de baisser le seuil de sensibilité de l'organisme aux récepteurs mécaniques situés sur la cage thoracique. Ces derniers s'activent lorsque la cage thoracique reste immobile pendant une certaine durée et ils contribuent à activer la rupture de l'apnée. L'apnée statique, par sa durée supérieure aux apnées dynamiques permet d'améliorer la tolérance à ces stimuli. Ce travail peut être couplé à une maîtrise des techniques de transfert d'air entre les poumons et les autres cavités. Ces transferts ont pour effet de faire varier le volume à l'intérieur de la cage thoracique et de leurrer les récepteurs mécaniques.

- *La diminution de la production de lactates* : lors des apnées prolongées, l'environnement cellulaire pauvre en oxygène favorise la mobilisation des filières anaérobies et la production d'acide lactique. Les lactates libérés dans le sang sont un facteur d'apparition de la rupture de l'apnée. Un entraînement adapté peut diminuer leur production et retarder leur relargage dans le sang (14), comme des exercices courts, intenses et répétitifs permettent d'augmenter l'accoutumance de l'organisme à la lactatémie (44).

- *L'augmentation de l'hématocrite*⁹ : la capacité de stockage et transport de l' O_2 est directement corrélée à l'hématocrite. Une baisse du nombre de globules rouges fonctionnels, qui peut par exemple être liée à un

9. Définition : pourcentage relatif du volume des globules rouges sur le volume sanguin total. Ces globules servant au transport de l' O_2 , l'hématocrite influe directement sur la capacité de stockage de ce gaz.

phénomène de méthémoglobinisation¹⁰, est un lourd handicap pour la performance en apnée. À l'inverse, une légère augmentation de l'hématocrite, sans dépasser les normes, est un atout. Il peut être obtenu par un séjour en altitude ou des exercices en situation recréant artificiellement la rareté en O₂. À noter que le recours à l'EPO¹¹ conduit à une augmentation pathologique de l'hématocrite qui, outre son caractère antisportif, multiplie considérablement les dangers liés à un accroissement excessif du nombre d'hématies, notamment par l'augmentation de la viscosité sanguine propice aux athéromes¹² et infarcti¹³.

■ *L'amélioration de la contraction de la rate* : elle fait partie du « réflexe de plongée » et peut atteindre jusqu'à 13 % du volume de l'organe. Elle est accentuée par l'immersion de la face en eau froide (42, 47). Cette contraction provoque un relargage dans le circuit sanguin d'une réserve de globules rouges qui augmente temporairement l'hématocrite (51). En effet, en absence d'apnées répétées, le phénomène est réversible et la réserve splénique se reconstitue. L'entraînement peut accentuer la vitesse et l'intensité de mise en circulation des globules rouges.

3.3. Amélioration des facteurs psychiques

Les facteurs psychiques peuvent aussi être sensiblement améliorés par l'entraînement, surtout par des pratiques synergiques de l'apnée comme le yoga ou la sophrologie. Les principaux facteurs « psychiques » sont :

■ *La capacité à limiter l'activité cérébrale* : le fonctionnement du cerveau conduit à une consommation d'O₂ importante qu'il convient de limiter. La capacité à « faire le vide » n'est pas forcément innée, mais elle peut se travailler par des techniques telles que la sophrologie (18). Un compromis optimal entre veille cérébrale et vigilance doit être trouvé en apnée dynamique, au cours de laquelle l'apnéiste doit gérer des actions tout en étant au maximum relâché et en état de « veille cérébrale ». Cette

10. Définition : phénomène de neutralisation et altération de l'hémoglobine qui est le pigment permettant aux globules rouges de transporter l'O₂.

11. Érythropoïétine de synthèse couramment utilisée comme dopant, qui permet d'obtenir des hématocrites de l'ordre de 55 à 60 %.

12. Phénomène d'obstruction progressive ou massive d'un vaisseau sanguin (le plus souvent une artère) par un agrégat de cellules sanguines, de la graisse, des glucides, etc.

13. Pluriel de « infarctus » : phénomène pathologique lié à la mort des cellules d'un organe par manque d'O₂. Le plus connu est l'infarctus du myocarde (par obstruction des artères coronaires) mais d'autres organes, tels que les reins, peuvent aussi être le siège d'infarcti.

veille permettra un meilleur relâchement qui se traduira par une moins grande consommation en oxygène.

- *La résistance au stress* : les sources de stress sont synonymes d'utilisation de l'O₂, et il convient au cours de l'entraînement d'améliorer les capacités de l'apnéiste à se détacher d'un environnement hostile pour parvenir à une mise en condition optimale pour l'apnée, en particulier du point de vue du relâchement et de la maîtrise du mental. Il est important de prendre en compte cet aspect à l'entraînement en faisant varier et intervenir, y compris de façon inopinée, toutes les sources de stress possible (8).

- *La volonté* : au même titre que d'autres sports de résistance, la volonté peut être un facteur important de la performance, notamment en apnée statique. D'autres sports, tels que la course d'endurance, peuvent contribuer à améliorer cette qualité, en évitant évidemment toute interférence négative entre la volonté et la prise de risque inconsidérée.

- *La capacité à positiver* : elle fait référence à une démarche intellectuelle qui revient à se détacher du stress physiologique en se réfugiant dans une extase intellectuelle. Elle s'obtient en multipliant les situations d'apnée extatiques qui aident à développer un réflexe conditionné à la situation d'immersion en apnée. Ce réflexe est alors conservé, même en situation de malaise physiologique.

3.4. Amélioration des facteurs techniques

Ils sont propres à tous les types d'apnée, notamment concernant le stockage mécanique de l'air, mais indéniablement plus importants pour les apnées dynamiques mobilisant les muscles locomoteurs. À ce titre, ils offrent eux aussi une marge de progression importante. Les principaux sont :

- *L'amélioration de la ventilation préparatoire et le contrôle du souffle* : anciennement considérée comme primordiale dans la performance, la ventilation est, dans l'approche moderne de l'apnée, reléguée derrière l'importance du relâchement et de la maîtrise du mental (10). La ventilation doit néanmoins être optimisée, notamment par le développement de ses composantes que sont les ventilations abdominale, thoracique et scapulaire. Le recours au Prānāyāma (58) sera pour l'apnéiste un atout considérable.

- *La technique de la « carpe » (IGP)* : cette technique consiste à emmagasiner un surplus d'air par ingestion buccale forcée. Si elle procure une quantité additionnelle d'air, elle déclenche en revanche un sentiment

de malaise lié au réflexe de Herring-Breuer qui, par l'intermédiaire des barorécepteurs situés sur la cage thoracique, a tendance à provoquer une contraction réflexe de cette dernière lorsqu'elle est en surpression. Lors d'une apnée verticale, ce réflexe est vite inhibé par la pression ambiante qui comprime la cage thoracique, mais il persiste lors d'une apnée statique en surface. Il convient donc de limiter par l'entraînement ce réflexe si l'on veut recourir à la « technique de la carpe ». Par ailleurs, il a été démontré que, selon les individus, l'IGP pouvait constituer un risque important de syncope. La surpression thoracique peut comprimer les muscles cardiaques et provoquer une baisse de l'irrigation du cerveau conduisant à un malaise (2, 50). Parallèlement à cette hypothèse, la mobilisation du système nerveux sympathique a aussi été évoquée comme susceptible d'entraîner une perte de connaissance (16).

- *Le blocage de la respiration* : il s'effectue de façon innée chez le profane par contraction du diaphragme qu'il convient d'éviter car elle est très consommatrice en O₂. Le blocage de la respiration, obtenu par une mobilisation de la glotte qui demande une certaine maîtrise, peut s'améliorer par l'entraînement.

- *La technique de transfert d'air entre poumons et autres cavités* : cette technique permet d'inhiber la stimulation des récepteurs thoraciques qui se trouvent leurrés. Elle limite donc leur implication dans la rupture de l'apnée (14).

- *Le contrôle du tonus musculaire* : ce facteur joue un rôle essentiel dans la performance, non seulement en apnée statique mais aussi en apnée dynamique. Un relâchement optimal permet une économie d'O₂ conséquente. La faculté de l'apnéiste à ne mobiliser que les muscles strictement nécessaires à sa propulsion en maintenant le reste du corps le plus décontracté possible doit être un axe de travail important de l'entraînement « technique ». L'amélioration de ce facteur passe par la maîtrise de techniques telles que la relaxation, le training autogène de Schultz¹⁴ (TAS) ou l'eutonie¹⁵.

- *La coordination générale* : si cette notion semble moins importante pour l'apnée statique, elle s'avère primordiale pour les apnées dynamiques, pour lesquelles la gestion optimale des phases de contraction et de relâchement des muscles est primordiale.

14. Définition : discipline de développement personnel centrée sur la modulation permanente de la tonicité du corps, développée par Gerda Alexander.

15. Définition : discipline de relaxation thérapeutique visant à diminuer le stress et l'anxiété, développée par le Dr Johannes Schultz.

3.5. Facteurs propres aux différentes disciplines de l'apnée

3.5.1. Apnée statique

Deux facteurs propres à cette discipline peuvent être cités :

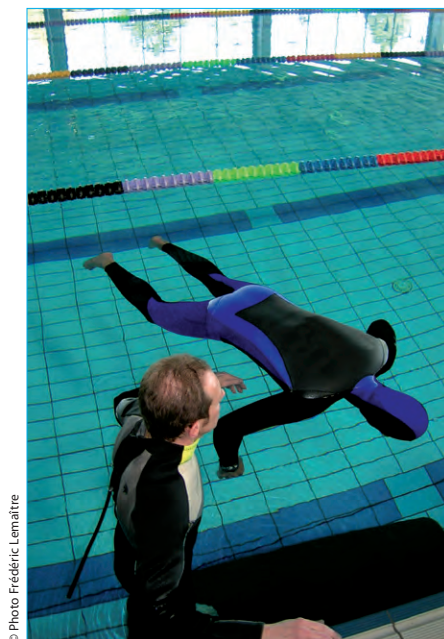
- La *capacité à faire le vide* : l'apnée statique est propice à une veille cérébrale maximale pour atteindre ce que les spécialistes appellent un état « d'endormissement », que l'on peut considérer comme un présommeil. L'atteinte d'un vrai sommeil n'est évidemment pas souhaitable, car il s'avérerait dangereux en empêchant l'apnéiste de gérer sa fin d'apnée (photo n° 1).



© Photo Philippe Joachim

Photo n° 1. – Concentration et relâchement pendant une apnée statique.

- La *position du corps* : elle doit être optimisée tant dans la phase préparatoire, sur le dos de préférence, que pendant l'apnée : position de la « méduse », bras et jambes ballants (photo n° 2).



© Photo Frédéric Lemaître

Photo n° 2. – Position classique adoptée en apnée statique.

3.5.2. Apnée dynamique horizontale et poids constant

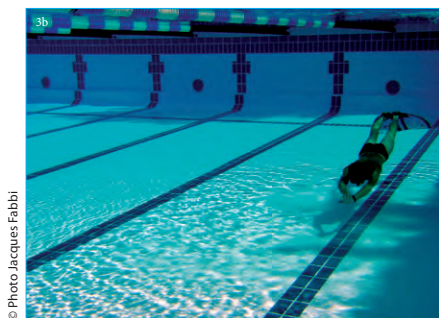
Une dizaine de facteurs propres à ces disciplines peuvent être cités (photos n°s 3a, 3b et 3c) :

- La *technique du canard* : elle doit être optimisée afin de limiter la dépense énergétique.
- La *compensation* : ce facteur primordial peut contribuer à l'échec complet d'une descente ou simplement à la dépense d'énergie excessive qui pénalise l'apnée. La technique du *Valsalva* entraîne un effort qui limite les effets du *diving reflex* (34) qu'il convient de limiter. Un travail d'entraînement spécifique s'impose. Il peut reposer sur des exercices de la BTV à l'air libre favorisant la souplesse des trompes d'Eustache, sur des exercices sous-marins de *Valsalva* avec les poumons vides ou demi-pleins. Il est primordial d'intégrer le fait qu'en marge de la technique, la compensation en situation hyperbare est intimement liée à la capacité de relâchement de la sphère anatomique concernée. À noter néanmoins que l'immersion avec un déficit de remplissage des poumons, même à

quelques mètres de profondeur, peut être source de lésions pulmonaires graves (œdème et hémoptysis ; 40). Elle doit être effectuée avec beaucoup de précautions.



© Photo Jacques Fabbri



© Photo Jacques Fabbri



© Photo Frédéric Buyle

Photos n^{os} 3a, 3b et 3c. – Positions en apnée dynamique avec bipalmes (a), en monopalme (b), et en poids constant (c).

- Les *barrières psychologiques* : ce sont des facteurs à ne pas négliger, différents des facteurs psychologiques déjà évoqués (tels que la gestion générale du stress, la capacité à faire le vide). Consciemment ou inconsciemment, l'apnéiste développe des appréhensions liées aux limites matérielles situées en fin de performance (par exemple le mur en apnée horizontale ou le plomb en poids constant). Il conviendra de prendre en compte ces facteurs lors des entraînements. Des départs décalés permettent par exemple de s'affranchir de la présence d'un mur en fin d'apnée dynamique. Le recours au poids variable permet de franchir des caps liés à la profondeur en poids constant.

- Le *palmage* : il peut être affiné par la technique afin de trouver le meilleur compromis entre dépense d'énergie et puissance produite. Ce travail sur le palmage est postérieur au choix des palmes et autres matériaux qui doivent être optimisés en fonction de la puissance et de la morphologie de l'apnéiste. La progression de ce travail technique peut

être évaluée par le calcul de l'indice d'efficacité propulsive avec palmes (IEPP ; 9)¹⁶.

- *L'hydrodynamisme et la gestion de la propulsion-glisce* : l'hydrodynamisme est un facteur pouvant s'améliorer par la technique (position des bras, de la tête, orientation du corps par rapport à la propulsion, etc.). On regroupe ces paramètres sous le terme « d'aquacité », déjà mentionné. Cette notion est indissociable de la gestion des phases de propulsion et de glisse qui doivent s'effectuer de la façon la plus harmonieuse possible.

- *La technique du virage* (mur, plomb) : elle aussi doit être optimisée afin de limiter la dépense énergétique.

- *La gestion de la vitesse* : elle doit être optimisée afin de trouver le compromis idéal entre vitesse obtenue et dépense énergétique.

- *La force musculaire des jambes* : la mobilisation de longues voilures, qu'il s'agisse de palmes conventionnelles ou de monopalmes, demande une musculature adaptée qu'il convient de développer. À noter que ce travail de musculation devra éviter de déboucher sur des muscles volumineux dont la demande importante en O₂ serait antagoniste de la performance en apnée. En poids constant, le décollage du fond demande une puissance particulière qu'il est possible d'améliorer par des exercices de sprint en apnée ou des détentes verticales à l'air libre.

- *La souplesse de la « chaîne longitudinale »* (cou, épaule, dos, bassin, chevilles) : elle contribue de façon prépondérante à l'aquaticité dans la technique d'ondulation.

3.5.3. Poids variable (photo n° 4)

Quatre facteurs propres à cette discipline peuvent être cités :

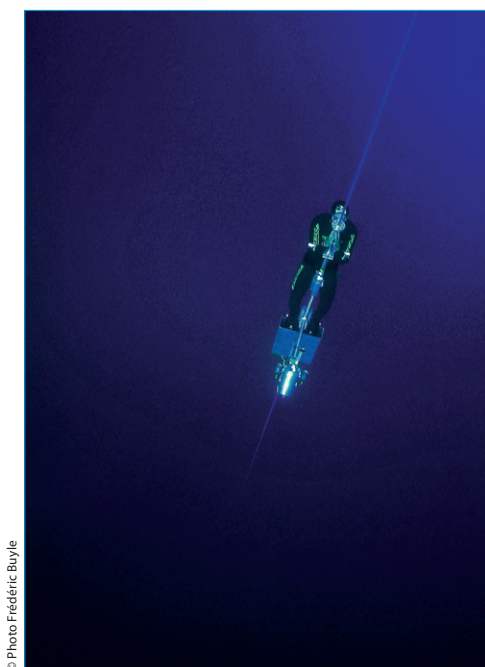
- *La position à la descente* : la position tête haute, favorable à une compensation facilitée, n'est pas naturelle chez l'apnéiste et elle requiert un travail spécifique.

- *La gestion de la compensation* : elle est primordiale et doit être optimisée. Ce travail passe par une amélioration de la vigilance et de la perception des sensations liées à la profondeur.

16. Le calcul de cet indice revient à comptabiliser le nombre de coups de palmes nécessaires pour effectuer une distance donnée. En divisant ce nombre par la distance vous obtenez un indice qui deviendra d'autant meilleur que le nombre de coups de palmes diminuera.

- La *gestion de la vitesse de remontée* : elle doit être optimisée afin de limiter le risque de perte de connaissance.

- La *puissance musculaire des bras* : la traction sur le câble à la remontée peut déboucher sur un travail de musculation spécifique à l'air libre ou sous l'eau afin d'améliorer cette phase de la performance. Ce travail se fera préférentiellement à des profondeurs largement inférieures à la performance en pénalisant l'apnéiste par une surcharge pondérale qui recréera l'effet de la pression.



© Photo Frédéric Buyle

Photo n° 4. – Pierre Frolla lors de son record en poids variable (AIDA) pendant la descente.

Conclusion : Le schéma en annexe récapitule les principaux facteurs de la performance en apnée dynamique. La performance record en apnée est la conjugaison d'une multitude de facteurs que l'apnéiste ne peut rechercher à maximiser tous ensemble qu'en de rares occasions, tel le marathonien qui ne court un vrai marathon qu'une fois de temps en temps. L'entraînement doit permettre de travailler séparément ou de façon conjointe un ou plusieurs des facteurs influençant la performance. L'exemple de la progression de Pierre Frolla au cours de sa préparation

pour son record en poids variable (juillet 2004, 123 m) en est une illustration (voir figure n° 8).

Nous pouvons constater que la vitesse de descente augmente au fur et à mesure qu'on gagne en profondeur, mais cela s'effectue néanmoins par paliers. Une fois qu'une profondeur est maîtrisée, la vitesse de descente est améliorée (tableau n° 3), notamment par une meilleure maîtrise de la compensation. La progression s'effectue en modifiant un nombre limité de paramètres à la fois et non en changeant et maîtrisant tous les paramètres en même temps comme l'exige la performance maximale.

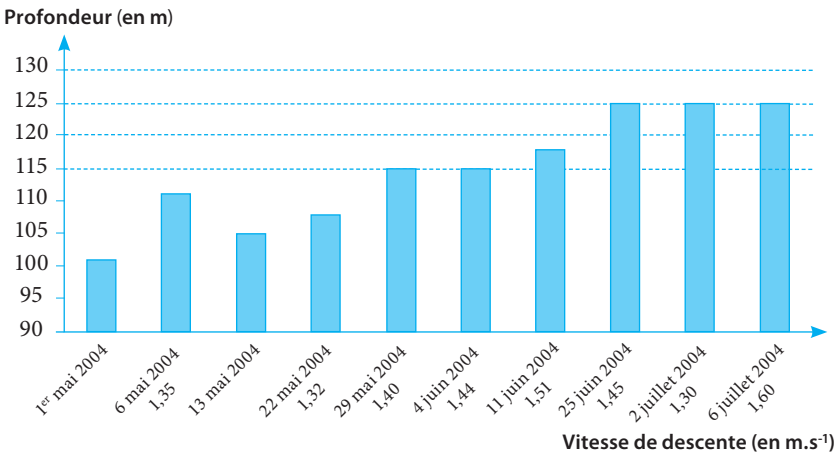


Figure n° 8. – Progression des entraînements de Pierre Frolla pour son record AIDA en poids variable (juillet 2004, 123 m).

Dates	Profondeur	Durée totale	Temps de descente	Vitesse de descente
1 ^{er} mai 2004	101	2,49	–	–
6 mai 2004	111	3	82	1,35
13 mai 2004	105	2,38	–	–
22 mai 2004	108	3,02	82	1,32
29 mai 2004	115	3,08	82	1,40
4 juin 2004	115	2,56	80	1,44
11 juin 2004	118	3,04	78	1,51
25 juin 2004	125	3,22	86	1,45
2 juillet 2004	125	3,32	96	1,30
6 juillet 2004	125	3,04	78	1,60

Tableau n° 3. – Paramètres des performances de Pierre Frolla lors de sa préparation au record (juillet 2004, 123 m).

4. Éléments de structuration de l'entraînement en apnée

Nous évoquerons dans cette section des principes d'entraînement qui ont successivement trait à la dynamique d'entraînement (progression, évaluation), à la performance elle-même (exercices spécifiques et planification) et à la spécificité de ce sport (sécurité et souffrance), avant de proposer un outil d'entraînement qui, loin d'être unique, répond à tous ces principes de façon intéressante. Nous restreindrons notre champ descriptif à celui de *l'entraînement en piscine*, qui reste prépondérant par rapport à l'entraînement en milieu naturel, plus difficile à mettre en œuvre. Nombre de notions restent néanmoins applicables à ce deuxième cas, dont les spécificités demanderaient un chapitre à part entière.

4.1. Progression et évaluation

En matière d'entraînement, la notion de *progression* prend le dessus sur celle de *performance*. Du point de vue dialectique, c'est plus le « chemin parcouru » qui est intéressant que « l'endroit où l'on se trouve à l'arrivée ». Cette approche suppose deux choses : que l'on puisse tout d'abord savoir d'où l'on part (point zéro) et où l'on arrive, et ensuite que l'on puisse maîtriser une progression.

4.1.1. L'hétérogénéité des niveaux

Le concepteur d'un entraînement en apnée, sauf à s'adresser à un seul individu tel un champion, va continuellement se retrouver confronté au problème de l'hétérogénéité des niveaux d'expertise de ses élèves. Tant pour des raisons de sécurité que de sémantique, il est recommandé de définir des niveaux qui permettent de rationaliser un entraînement, en homogénéisant les groupes et en différenciant les exercices. L'estimation

Niveaux	Apnée statique	Distance horizontale	Poids constant vertical
Niveau I	0 s à 40 s	0 à 25 m	0 à 5 m
Niveau II	40 s à 2 min	25 à 40 m	5 à 15 m
Niveau III	2 min à 3 min	40 à 60 m	15 à 25 m
Niveau IV	3 min à 5 min	60 à 90 m	25 à 40 m
Niveau V	> 5 min	> 90 m	> 40 m

Tableau n° 4. – Description des niveaux d'apnée.

de ces niveaux peut être laissé à l'appréciation de l'entraîneur qui est en mesure de les adapter à un public particulier. Il existe néanmoins des niveaux (de 1 à 4), définis par les structures fédérales françaises, sur lesquels un entraîneur peut s'appuyer. Sans être parfaits, ces niveaux n'en sont pas moins utiles. Les progrès dans les performances des apnéistes enregistrés au cours de la dernière décennie nous ont engagés à rajouter un 5^e niveau qui permet de séparer les apnéistes performants de ceux qui le sont moins (tableau n° 4).

L'intégration de nouveaux venus dans un groupe doit faire l'objet d'une attention particulière. Une évaluation fine doit être faite afin de déterminer le statut du ou des nouveaux venus. Cette évaluation doit être objective et doit intégrer avec prudence les informations orales fournies par le nouvel élève. Ces informations sont surtout intéressantes en ce qui concerne les motivations de l'individu, moins en ce qui concerne son statut d'apnéiste. Il conviendra de distinguer le niveau physique (état fonctionnel lié à la pratique d'autres sports, en particulier connexes comme la natation) de l'expertise préexistante en apnée (maîtrise des techniques propres à l'apnée, entraînement préalable). Ces deux paramètres seront jugés à travers des exercices réels. À noter qu'au-delà de l'amélioration de la performance, ce sont les notions de sécurité qui devront être considérées comme prioritaires en début d'entraînement.

4.1.2. L'évaluation et le passage des paliers

La forme physique de base, découlant d'un travail foncier, est souvent négligée par les apnéistes qui ont le sentiment de stagner à un niveau de performance donné, malgré un entraînement régulier. Il est important d'évaluer régulièrement cette forme grâce à des tests faciles à mettre en œuvre. Nous citerons à titre d'exemple le test de 5 min de Brikci et Dekkar (7) (voir encart) et le test de Léger et coll. (33).

Concernant l'évaluation des progrès en apnée pure, il existe globalement deux approches : soit réaliser un exercice d'une certaine durée qui va permettre de tester la capacité de l'organisme à répondre à des sollicitations répétées, soit réaliser une *performance* dans une spécialité donnée (statique, dynamique). Pour le premier cas, les exercices d'évaluation de la progression en apnée sont nombreux et variés. Un exercice, quel qu'il soit, reste un outil d'évaluation de la progression dès lors qu'il est effectué à deux instants donnés, séparés par une période d'entraînement, et qu'il est réalisé strictement dans les mêmes conditions. C'est le cas des *séries-repères*, dont certaines sont déjà utilisées en fonction des niveaux prédéfinis (tableau n° 5), ou qui constituent des épreuves de

Niveaux	Distance maximale	Volume	Vitesse	Récupération	Durée
1	25 m	10 x 15 m	20 s	40 s	10 min
2	40 m	10 x 25 m	35 s	40 s	12 min 30 s
3	60 m	20 x 25 m	35 s	25 s	20 min
4	80 m	10 x 50 m	60 s	60 s	20 min
5	100 m	20 x 50 m	60 s	30 s	30 min

Adapté de Fèvre, 20

Tableau n° 5. – Exemple de séries repères permettant à l'apnéiste d'évaluer son confort et sa progression.

Test de 5 min de Brikci et Dekkar (7)

Il s'agit d'une épreuve continue de 5 min qui consiste à parcourir la plus grande distance possible pendant ce laps de temps. Ces 5 min représentent la durée limite qui permet à un sujet de maintenir une activité à une intensité très proche de $\dot{V}O_2$ max. Cette épreuve est donc principalement limitée par $\dot{V}O_2$ max, ce qui autorise sa prévision à partir de la distance totale parcourue en 5 min.

Protocole : Le sujet doit courir sur une piste de 400 m la plus grande distance possible en 5 min. La vitesse de course doit être maximale mais également régulière. La distance peut être étalonnée avec des plots disposés tous les 50 m. Une période d'échauffement de 10 à 20 min est nécessaire avant la réalisation de cette épreuve. À l'issue de l'échauffement, le sujet dispose d'une minute pour se rendre au départ à l'un des 4 coins de la piste de 400 m. Au coup de sifflet, il s'élance pour couvrir un maximum de distance en 5 min. Il sera informé verbalement du temps écoulé à 1 min, 2 min, 3 min, 4 min, 30 s et 10 s avant la fin de l'épreuve.

$\dot{V}O_2$ max est estimé à partir de la vitesse moyenne de course (en km.h⁻¹), grâce à l'équation suivante :

$$\dot{V}O_2 \text{ max (ml.min}^{-1}\text{.kg}^{-1}\text{)} = 8,67 \times V \text{ (km.h}^{-1}\text{)} - 113$$

Selon Brikci et Dekkar (3), les résultats de l'épreuve de 5 min sont étroitement liés aux performances sur des distances comprises entre 800 et 10 000 m ($p < 0,01$) et sur celles du marathon ($p < 0,05$).

compétition (tableau n° 5, l'exemple du 16 × 50 m). Dans le cadre de ces exercices, c'est l'*aisance* qui va déterminer s'il y a eu progression ou non. Devant une aisance accrue, l'élève pourra envisager de changer de niveau.

Il est recommandé de baser le *passage des paliers* et le changement de groupe de niveau sur l'aisance objectivement ressentie lors d'une série-repère plutôt que sur une performance. La *performance*, sans forcément être record, est certes un moyen de tester la progression, mais elle n'est pas en soi un bon indicateur de la charge d'entraînement. Elle est simplement le résultat d'un entraînement, sans y être strictement corrélée dans la mesure où d'autres facteurs instantanés jouent un rôle non négligeable. L'évaluation de la progression en apnée ne peut guère s'envisager sans attendre la fin d'un entraînement sur un mésocycle (de l'ordre du mois). En deçà, la performance dépendra de façon trop importante de facteurs instantanés (état de forme et état de stress du jour, etc.), déconnectés de l'entraînement pur.

Exemple : le 16 × 50 m. Cette épreuve consiste à enchaîner 16 × 50 m en un minimum de temps, c'est-à-dire en minimisant les temps de récupération. Elle est très éprouvante et est réservée à des apnéistes performants. Elle présente l'avantage d'être peu dangereuse car le seuil d'alerte en CO₂ reste toujours actif. Elle permet de juger à la fois de la condition physique, de la technique de nage et de la capacité de récupération. À titre indicatif, le record est détenu par Brice Lequette avec un temps de 10 min et 49 s (en mars 2012).

4.2. Amélioration des performances

Le principe de ce chapitre est d'indiquer comment adapter à l'apnée les principes généraux de l'entraînement précédemment définis. Il faut pour cela parvenir entre autre à maîtriser le *volume* et l'*intensité* des exercices.

4.2.1. Paramètres des exercices

Les paramètres d'un exercice d'apnée en piscine sont les suivants :

- La *vitesse de nage* : c'est un facteur prépondérant de l'intensité d'un exercice par l'effort musculaire qu'elle engendre. Une vitesse de nage élevée trouvera naturellement sa place dans des exercices fractionnés, avec une Fc élevée (> 160 bpm). Il est recommandé pour un entraîneur de spécifier le calibrage et la dénomination des vitesses de nage utilisées lors des exercices. Un exemple est donné dans le tableau n° 6.

Vitesse de nage	Bipalmes longues	Monopalmes	Effort déployé (en % du maximum)
Ultra-rapide	Moins de 35 s	Moins de 28 s	Plus de 90 %
Très rapide	De 35 s à 45 s	De 28 s à 35 s	75 à 90 %
Rapide	De 45 s à 55 s	De 35 s à 50 s	50 à 75 %
Moyenne	De 55 s à 1 min 5 s	De 50 s à 60 s	40 à 50 %
Lente	De 1 min 5 s à 1 min 20 s	De 60 s à 1 min 20 s	25 à 40 %
Ultra-lente	Plus de 1 min 20 s	Plus de 1 min 20 s	Moins de 25 %

Adapté de Fèvre, 20

Tableau n° 6. – Exemple de calibrage des vitesses de nages sur 50 m.

■ La *durée de récupération* : elle permet de moduler l'état physiologique de départ dans lequel se trouve un apnéiste avant un exercice. Son raccourcissement empêche l'élimination du CO₂ circulant et sera particulièrement de mise dans les exercices d'accoutumance à l'hypercapnie. La durée de récupération peut être évaluée en temps (minutes ou secondes) ou en « inspirations », qui sont en réalité des cycles inspiratoires. L'équivalence entre les deux est donnée par la relation : 1 cycle ≈ 8 s. L'avantage des cycles repose sur l'affranchissement d'une horloge ou d'une montre pour conduire un exercice où seule la récupération est contrôlée. De la même façon que pour la vitesse de nage, un calibrage et une dénomination peuvent faire l'objet d'une formalisation. Un exemple est donné dans le tableau n° 7.

Libellé	Ultra-court	Court	Moyen	Long
Équivalence	< 30 % du temps d'apnée	50 % du temps d'apnée	100 % du temps d'apnée	200 % du temps d'apnée
Durée	Moins de 20 s	30 s	60 s	2 min

Adapté de Fèvre, 20

Tableau n° 7. – Exemple de calibrage des temps de récupération sur 50 m avec une durée d'apnée de 60 s.

■ La *durée d'apnée* : elle peut être considérée comme un facteur de volume d'entraînement. Elle s'avère un facteur prépondérant des exercices d'accoutumance à l'hypoxie, étant donné la relation étroite entre niveau

d'O₂ circulant et durée d'apnée. Si elle est souvent positivement reliée à la distance, il est néanmoins possible et fréquent de coupler une longue durée d'apnée avec une courte distance.

- La *distance d'apnée* : elle peut être considérée comme un facteur de volume d'entraînement. Elle s'avère aussi un facteur prépondérant des exercices d'accoutumance à l'hypoxie, avec des durées d'apnées généralement longues.

Le *volume* d'une séance ou d'un entraînement repose sur l'accumulation des séries : durées et distances cumulées d'apnée. L'intensité repose essentiellement sur la vitesse de nage et, à un degré moindre, sur les durées de récupération et d'apnée. Concrètement, l'utilisation de ces paramètres débouche sur une progression en trois étapes :

- étape n° 1 : augmentation progressive du volume (durées et distances) ;
- étape n° 2 : maintien du volume et augmentation de l'intensité par augmentation des vitesses de nage ;
- étape n° 3 : diminution du volume et augmentation de l'intensité par diminution des temps de récupération.

N.B. : le vélo est un excellent moyen d'entraînement. Il permet de contrôler avec précision trois paramètres essentiels de l'effort : l'intensité (puissance de pédalage), la durée des apnées et les temps de récupération active. Le monitoring cardiaque est par ailleurs facilité par rapport à la situation d'immersion.

4.2.2. Les exercices « types »

L'entraînement doit comporter des exercices en *surcharge spécifique* afin de travailler selon des objectifs différents. Les plus classiques sont :

- Les *exercices d'amélioration de $\dot{V}O_2 \max$* : le principe de ces exercices est d'effectuer un effort prolongé avec une intensité modérée en condition d'aérobie. Il s'agit de travail foncier, encore dénommé *cardio-training*. Il est possible d'effectuer ces exercices en dehors des séances d'entraînement spécifiques à l'apnée, notamment en pratiquant la course à pied ou le vélo. En piscine ou à la mer, la natation remplacera ces pratiques. Au cours de ces exercices, la Fc doit être maintenue entre 140 et 160 bpm et la durée de l'effort doit avoisiner l'heure pour être efficace.

Exemple : 2 km nage = 8 km course = 15 km vélo. Il est également important de noter que des exercices de type intermittent permettent de générer une adaptation plus importante que des exercices de type continu (9). On préférera donc réaliser 1 km de nage en exécutant un 10 × 100 m départ toutes les 1 min 45 s, chaque 100 m étant nagé en 1 min 30 s.

N.B. : ne pas négliger la nage, car elle permet de lutter contre une régression musculaire ; mais attention à ne pas développer à outrance la masse musculaire, ce qui s'avérerait un handicap.

■ *Exercices d'accoutumance à l'hypercapnie et à la lactatémie* : le principe de ces exercices est d'effectuer des apnées de longueurs et durées moyennes, avec des temps de récupération moyens et un effort musculaire important. Il s'agit de travail fractionné, encore dénommé *cardio-tonique*. Ces exercices sont composés de phases intenses ($Fc > 160$ bpm), alternant avec des phases de récupération active ($Fc > 100$ bpm).

Exemple : l'exercice de *Fartlek*. Le principe consiste à effectuer un nombre important de longueurs (pendant au moins 20 s), en alternant nage en apnée (sous l'eau, avec ondulations ou dissocié) et nage avec respiration (crawl en surface généralement) sans discontinuer (pas de récupération passive). L'idéal est de pratiquer cet exercice en piscine de 50 m en effectuant 25 m en apnée suivis de 25 m en surface permettant une récupération jusqu'au mur. L'objectif de l'exercice est de nager le plus rapidement possible à la fois sous l'eau et sur l'eau, en maintenant avec assiduité les distances d'apnées, le rythme de nage et ce, sans jamais s'arrêter. La difficulté de l'exercice peut être accrue en allongeant progressivement les distances accordées à l'apnée et en diminuant celles dévolues à la nage de récupération (tableau n° 8). L'exercice devient extrêmement difficile au-delà de 35 m d'apnée pour 15 m de récupération, si le rythme de nage reste constant. Les avantages de l'exercice de *Fartlek* sont les suivants :

- la gestion de l'espace : la noria¹⁷ permet d'avoir une densité importante d'apnéiste dans le bassin sans gêne réelle ;
- un risque de perte de connaissance réduit : l'hypercapnie provoque des ruptures d'apnée bien avant que le risque d'hypoxie n'apparaisse ;
- un risque d'effets secondaires de l'hypercapnie importants : surveiller les prémices de céphalées ;
- une surveillance réciproque efficace ;
- la connaissance de soi : excellent exercice pour prendre conscience de ses limites ;
- la volonté : excellent pour améliorer la gestion du stress physiologique et pour gérer la souffrance ;
- les effets : excellent pour l'accoutumance à l'hypercapnie et l'amélioration de la récupération.

Son inconvénient réside dans la perception négative de l'apnée par la sensation obsédante d'asphyxie.

17. La noria est un mouvement ininterrompu des apnéistes qui ne s'arrêtent pas au mur, optimisant l'occupation de l'espace.

Difficulté	Apnée	Nage	Vitesses moyennes au 50 m
Facile	10 m	40 m	1 min
	15 m	35 m	1 min 10 s
Moyen	15 m	35 m	1 min
	20 m	30 m	1 min 10 s
Normal	20 m	30 m	50 s
	25 m	25 m	1 min
Difficile	25 m	25 m	45 s
	30 m	20 m	50 s
Très difficile	30 m	20 m	45 s
	35 m	15 m	50 s

Tableau n° 8. – Exemple de paramétrages de l'exercice de Fartlek.

■ *Exercices d'accoutumance à l'hypoxie* : le principe de ces exercices est d'effectuer des apnées longues, avec des temps de récupération complets et un effort musculaire faible.

Exemple n° 1 : les exercices combinant apnée dynamique et apnée statique. Le principe est d'inclure une phase statique en début, en cours ou en fin d'apnée dynamique. La difficulté est fonction de la durée du statique, mais aussi du moment auquel il est effectué. Un statique en début permet un relâchement initial, plus difficile à obtenir en cours ou *a fortiori* en fin d'apnée.

Exemple n° 2 : les séries « longues distances ». Le principe est d'effectuer des séries longues avec des récupérations complètes. Un exemple de calibrage en fonction des niveaux est donné dans le tableau n° 9.

Niveaux	Séries	Vitesse	Récupération
2	10 x 25 m	35 s à 1 min 15 s	1 min
3	10 x 50 m	60 s à 2 min	2 min
4	10 x 75 m	1 min 20 s à 2 min	2 min 30 s
5	10 x 90 m	1 min 30 s à 2 min 30 s	3 min

Adapté de Fèvre, 20

Tableau n° 9. – Exemple de séries « longues distances ».

■ *Exercices d'amélioration de la technique* : ces exercices concernent tous les facteurs techniques comme l'hydrodynamisme, le palmage, le virage, etc.

Exemple n° 1 : les séries de palmage décroissant. Elles consistent à compter un nombre d'ondulations ou de battements de palmes nécessaires pour parcourir une distance donnée. L'objectif est de maintenir la même distance en diminuant progressivement ces mouvements. Elles permettent d'améliorer l'IEPP ainsi que l'aquaticité.

Exemple n° 2 : les séries « tourniquet ». Elles reviennent à effectuer des apnées dans le sens de la largeur d'une piscine afin d'augmenter le nombre de virages et d'améliorer la technique.

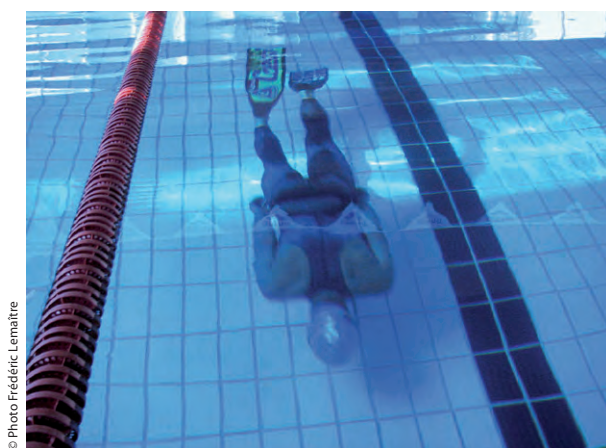
- *La récupération :* ces exercices permettent de récupérer après un effort intense et d'effectuer des apnées « plaisir » qui contribuent à entretenir un réflexe conditionné positif à la situation d'immersion en apnée.

Exemple n° 1 : la nage inversée. Elle consiste à nager sur le dos en regardant la surface. Cet exercice améliore la maîtrise des trajectoires et le repérage en trois dimensions.

Exemple n° 2 : la chauve-souris. Elle consiste à effectuer une apnée statique la tête en bas avec les jambes à l'extérieur de la piscine à partir du genou. Une fois le statique effectué, l'apnéiste se laisse glisser et nage dans un état extatique qui pourrait être lié à une hypervascularisation du cerveau.

4.2.3. Les séries types

Dans la suite logique des exercices types, viennent les séries-types qui jouent à la fois sur la spécificité des exercices et leur répétitivité (voir III, 2, 4.2).



© Photo Frédéric Lemaitre

Photo n° 5. – Stéphane Mifsud lors d'une apnée dynamique (Piscine Guy Boissière, Rouen).

■ *Séries droites* (photo n° 5) : elles jouent sur la simple répétitivité des exercices, sans augmentation de la difficulté, et elles permettent une adaptation physiologique douce aux contraintes de l'apnée. Il est fréquent que l'apnéiste ressente des adaptations progressives de l'organisme, avec des débuts d'exercices désagréables et laborieux qui laissent peu à peu place à l'aisance et au plaisir. Les *séries droites* sont intéressantes en début d'année, afin de créer un renforcement psychologique positif chez l'apnéiste qui prend du plaisir avant d'affronter les *séries progressives*, plus exigeantes physiologiquement et mentalement.

■ *Séries progressives dynamiques en fonction des niveaux* : elles jouent sur la répétitivité et sur la progressivité des exercices. Il faut les réserver pour des phases d'intensification de l'entraînement, lorsque l'organisme peut répondre à l'effort demandé. La difficulté de l'exercice augmentant, il est rare que l'aisance et le plaisir aient leur place dans ce genre d'effort. Du point de vue psychologique, elles s'adressent à des apnéistes au moral solide. Elles ne sont pas, à ce titre, recommandées pour les débutants.

Niveau	Séries	Départs	Vitesse	Récupération	Volume	Durée
2	6 x 25 m	1 min 15 s	35 s	40 s	300 m	15 min
	6 x 25 m	1 min 15 s	45 s	30 s		
3	6 x 25 m	1 min 15 s	40 s	35 s	500 m	25 min
	6 x 25 m	1 min 15 s	45 s	30 s		
	8 x 25 m	1 min 15 s	50 s	25 s		
4	5 x 50 m	2 min	60 s	60 s	500 m	20 min
	5 x 50 m	2 min	1 min 10 s	50 s		
5	6 x 50 m	1 min 30 s	50 s	40 s	1 000 m	30 min
	8 x 50 m	1 min 30 s	60 s	30 s		
	6 x 50 m	1 min 30 s	1 min 10 s	20 s		

Adapté de Fèvre, 20

Tableau n° 10. – *Séries progressives avec départs réguliers, augmentation de la durée des apnées et réduction du temps de récupération.*

Il est possible de faire varier plusieurs paramètres, dont la durée de l'apnée (tableau n° 10) ou les intervalles de départ (tableau n° 11).

Niveau	Séries	Départs	Vitesse	Récupération	Volume	Durée
2	8 x 25 m	1 min 15 s	35 s	40 s	300 m	14 min
	4 x 25 m	1 min	35 s	25 s		
3	6 x 25 m	1 min 15 s	40 s	35 s	500 m	25 min
	6 x 25 m	1 min	35 s	20 s		
	8 x 25 m	45 s	30 s	15 s		
4	6 x 50 m	2 min	60 s	60 s	500 m	19 min
	4 x 50 m	1 min 45 s	55 s	50 s		
5	6 x 50 m	1 min 45 s	55 s	50 s	1 000 m	30 min
	8 x 50 m	1 min 30 s	50 s	40 s		
	6 x 50 m	1 min 15 s	45 s	30 s		

Adapté de Fèvre, 20

Tableau n° 11. – Séries progressives avec départs de plus en plus rapides et réduction du temps de récupération.

■ *Séries progressives en statique* : le statique se prête aussi bien que le dynamique à la mise en œuvre d'exercices visant à une accoutumance à l'hypoxie ou à l'hypercapnie. Dans le premier cas, le principe consistera à maintenir une récupération totale tout en augmentant les durées d'apnées. Dans le second cas, il visera à maintenir une durée d'apnée fixe, tout en diminuant le temps de récupération (tableau n° 12).

Travail hypoxique	Récupération	Apnée	Travail hypercapnique	Récupération	Apnée
	2 min	2 min 30 s		2 min	2 min
	2 min	2 min 45 s		1 min 45 s	2 min
	2 min	3 min		1 min 30 s	2 min
	2 min	3 min 15 s		1 min 15 s	2 min
	2 min	3 min 30 s		1 min	2 min
	2 min	3 min 45 s		45 s	2 min
	2 min	4 min		30 s	2 min
	2 min	4 min 15 s		15 s	2 min

Tableau n° 12. – Exemple de paramétrage de progressions hypoxique et hypercapnique en apnée statique.

4.2.4. Planification d'un entraînement

Le choix, la répétitivité et la progressivité des exercices doivent faire l'objet d'une planification à diverses échelles temporelles.

■ *Planification sur une longue période* : sur une période de l'ordre de plusieurs mois, il est opportun de distinguer trois phases au cours desquelles l'accent sera successivement mis sur : 1° des exercices d'amélioration de $\dot{V}O_2 \text{ max}$; 2° des exercices permettant d'améliorer l'accoutumance à l'hypercapnie et à la lactatémie ; 3° des exercices améliorant la résistance à l'hypoxie. Un exemple de transition entre ces trois types d'exercices et leur prépondérance est donné dans la figure n° 9.

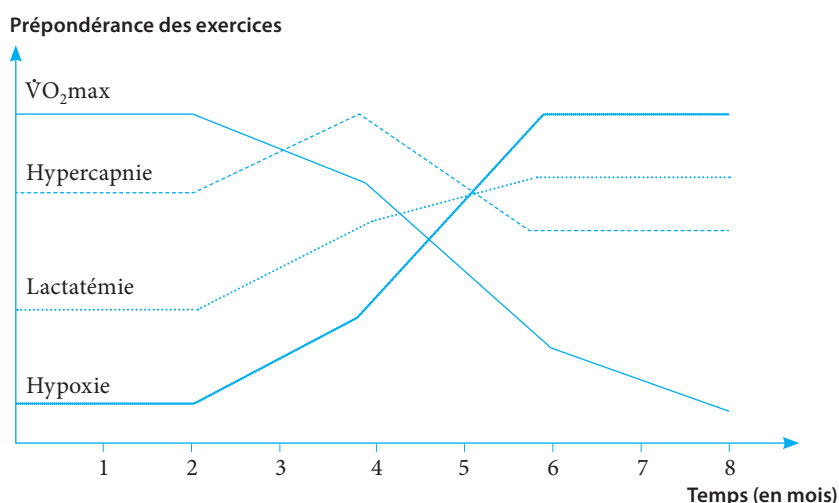


Figure n° 9. – Variations temporelles de la prédominance des exercices permettant respectivement une amélioration de $\dot{V}O_2 \text{ max}$, de la tolérance à l'hypercapnie, à l'hypoxie et à la lactatémie.

■ *Planification à l'échelle de la séance* : les principes définis sur une longue période sont applicables à l'échelle d'une séance, avec un travail long et peu intense qui précédera le travail court et intense, suivi de la récupération. Un entraînement classique comportera cinq composantes : exercices d'apnée statique (placés indifféremment en début ou fin de séance), un échauffement aérobie (qui peut faire office de « foncier »), des exercices de surcharge spécifique (hypercapnie, lactatémie, hypoxie), des exercices techniques, souvent couplés avec une récupération aérobie (tableau n° 13).

Phases	Durée	Exemples de contenu
Apnée statique	45 min	Échauffement : 10 min Travail spécifique : 30 min Prānayāma : 5 min
Échauffement aérobie	15 min	Nage avec palmes, planche
Surcharges spécifiques	30 min	Séries hypoxiques, séries hypercapniques
Technique	15 min	Palmage, virages
Récupération	15 min	Nage lente en surface, chauve-souris, nage sous-marine inversée

Tableau n° 13. – Éléments structurants
d’une séance d’entraînement à l’apnée (2 h).

Il faut souligner l’intérêt de conserver la dualité des entraînements statique-dynamique, dans la mesure où cela contribue à des bénéfices réciproques, même si, d’après ce qu’il a pour l’instant été prouvé, seule l’apnée dynamique semblerait permettre une amélioration de l’apnée statique (23).

4.3. Le problème de la motivation

Le manque de volonté est un facteur de rupture instantané de l’apnée et un facteur pénalisant de l’entraînement (incapacité à respecter les paramètres des exercices) dans la mesure où l’envie de respirer induit une souffrance physiologique mais aussi psychologique. La motivation dépend des objectifs généraux de l’apnéiste dans sa démarche de progression qui peut aller d’une approche purement hédonique à la recherche de performances « record ». Cette donnée de base est à considérer en priorité dans la structuration d’un entraînement, en clarifiant dans l’esprit des élèves la dose de volonté qu’ils devront investir dans les exercices en fonction de leurs objectifs propres. Un sportif coutumier de l’effort aura une capacité bien supérieure à celle de l’apnéiste amateur à rentrer et demeurer dans le « puits de souffrance » propice à sa progression (20). Quelle que soit cette capacité, il conviendra dans la structuration d’un entraînement de ne pas négliger un renforcement positif permanent afin de limiter la souffrance psychologique induite par l’effort. Différents axes peuvent être distingués :

- association de la *notion de plaisir* à celle de l'apnée, qui n'est pas évidente sans un effort intellectuel spécifique. Le recours à des exercices permettant des moments extatiques contribue à cette démarche (par exemple la chauve-souris).
- renforcement de la *sensation de progression* afin de s'inscrire dans un contexte global de réussite. Le recours à des exercices permettant d'évaluer cette progression contribue à cette démarche (par exemple les séries-type d'évaluation).
- culture de la *confiance* dans l'encadrement entretenue par un soutien moral récurrent et la création d'un environnement de bonne humeur.
- renforcement de la *capacité individuelle à positiver* afin d'optimiser les facteurs psychiques de la performance.

5. Gestion du risque lié à l'entraînement pour l'apnée

Les adaptations de l'homme à l'apnée restent très limitées si on les compare à celles d'autres mammifères (26, 29). Cet état de fait induit l'existence de nombreux risques à pratiquer l'apnée de façon intensive (15). L'hypoxie induit obligatoirement une souffrance physiologique qui reste acceptable à condition de ne pas dépasser certaines limites. En deçà de la perte de connaissance, les effets chroniques de l'hypoxie sont mal connus, en particulier sur le système nerveux, premier compartiment à souffrir du manque d'O₂. La dégénérescence des neurones étant quasi-irréversible, un principe de précaution s'impose quant au risque d'effets importants liés à une pratique intensive de l'apnée. La performance induit une souffrance accrue, aussi semble-t-il logique de préconiser des modalités d'entraînement qui permettent de travailler dans une zone à risque minime, à la fois pour un problème de sécurité immédiate (perte de connaissance aiguë) mais aussi de risque chronique (effets chroniques de l'hypoxie) et d'optimisation de la progression. Ce dernier point tient au fait qu'un organisme mis en situation de stress physiologique intense met beaucoup de temps à récupérer et risque de se retrouver en situation de « fatigue » en cas de reprise prématurée de l'effort. Dans les deux cas, la progression n'est pas optimisée mais ralentie. Cette logique conduit à éviter de travailler dans des zones de stress intense afin d'optimiser la progressivité.

Dans ce chapitre, nous revenons rapidement sur l'état actuel des connaissances concernant les risques aigus et chroniques liés à l'apnée et nous proposons une méthode d'entraînement originale afin de mieux les maîtriser.

N.B. : nous ne traiterons pas ici du sujet controversé des accidents par embolie gazeuse due à la dissolution d'azote dans le sang. Il semble néanmoins que ce type d'accident soit à prendre en considération au-delà de 100 m de profondeur (21).

5.1 Description des risques aigus et chroniques

5.1.1 Le risque de perte de connaissance anoxique

La perte de connaissance anoxique (32) intervient lorsque la PaO_2 passe en dessous du seuil physiologique moyen de 70 mmHg ; elle est subite et n'est précédée d'aucun signe physiologique, si ce n'est la sensation de « besoin de respirer » chez l'apnéiste, qui dépend quant à elle de la $PaCO_2$. Ce type d'accident est souvent lié à la recherche de performance, notamment lors des compétitions (38). Ils peuvent certes avoir des conséquences dramatiques, mais l'encadrement et la pratique collective en minimisent grandement la probabilité. Cette perte de connaissance s'avérera bénigne dans la majorité des cas, lorsque l'apnéiste reprend connaissance à l'air libre. Un danger de mort existe si la reprise ventilatoire automatique s'effectue en situation d'immersion, conduisant à la noyade. Il est donc opportun de distinguer *deux niveaux de sécurité* : le premier est inhérent à la limitation des risques de perte de connaissance anoxique, le second à la mise en place d'un système permettant une surveillance des apnéistes autorisant une intervention immédiate afin de réduire le temps d'immersion qui suit la perte de connaissance.

- *Le premier niveau de sécurité* est inhérent à l'entraînement lui-même et à la nécessité d'adapter de façon optimale cet entraînement au niveau et à l'état de forme des apnéistes. Certains exercices sont potentiellement beaucoup plus propices à la perte de connaissance anoxique, notamment les exercices d'accoutumance à l'hypoxie. Il est aussi possible d'imposer une approche minimisant les risques d'apnée par un travail restant bien en amont des situations à risque (voir III, 2.4). La collectivisation de la sécurité est un passage obligé. Elle permet de limiter les risques d'initiatives personnelles dangereuses en maintenant une pression permanente sur les apnéistes à risque qui ont des réticences à se marginaliser.

- *Le deuxième niveau de sécurité* peut s'obtenir de diverses manières :
 - soit en bénéficiant d'une *surveillance spécifique* par une personne agréée (titulaire du BEESAN par exemple) qui reste à l'extérieur du bassin et dont la seule fonction consiste à identifier un problème et intervenir dans les meilleurs délais. Cette option avantageuse d'un point de vue sécurité présente l'inconvénient de coûter cher.

- soit en imposant une *surveillance mutuelle* des apnéistes. La solution la plus classique consiste à travailler par binômes. Tous les apnéistes doivent être formés aux gestes de base en cas de perte de connaissance d'un partenaire et le relais est pris par le cadre fédéral ou le responsable agréé de l'entraînement. Des procédures conventionnelles sont décidées à l'avance et mise en œuvre par les apnéistes au cours des exercices. Par exemple le pincement réciproque de doigts toutes les 15 s en fin d'apnée statique afin d'évaluer l'état de conscience de l'apnéiste ou l'accompagnement en surface de l'apnéiste en fin d'apnée dynamique longue.

Quel que soit la fiabilité des procédures de sécurité en place, certaines règles de base doivent systématiquement être appliquées. Nous citerons à titre d'exemple la nécessité de ne pas effectuer d'apnée longue à froid, de prendre en compte un état de fatigue instantané qui engage à éviter la recherche de performances habituelles, ou encore l'interdiction de l'hyperventilation. Un choix fondamental en terme de structuration de l'entraînement repose sur le fait de mettre en œuvre un *entraînement collectif* ou un entraînement individuel, qui s'effectue *en binôme*. Chacun des deux présentent des avantages résumés dans le tableau n° 14. Les inconvénients de chaque option correspondent aux avantages procurés par l'autre.

Types d'entraînement	Avantages
Individuel / binôme	> possibilité de moduler l'intensité de l'entraînement selon l'état de fatigue > possibilité d'appliquer un programme « personnalisé » > limitation du risque d'aller au-delà de ses possibilités > limitation du stress imposé par le caractère « commando » du collectif
Collectif	> meilleure gestion de l'espace > respect des paramètres des exercices imposés par un leader > effet d'entraînement collectif positif > sécurité car performances réduites et observation rapprochée > meilleure progression individuelle

Tableau n° 14. – Avantages des options d'entraînement en apnée en piscine.

5.1.2. Les souffrances physiologiques

Nous nous bornons ici à rappeler les dernières données concernant les diverses fonctions potentiellement affectées par l'apnée.

Fonction pulmonaire

L'immersion et surtout l'apnée verticale peuvent être à l'origine d'œdèmes pulmonaires (migration de liquides du sang vers les alvéoles) liés à la surpression. Liner et Anderson (41) ont trouvé des fonctions pulmonaires amoindries chez des apnéistes évoluant autour de 75 m de profondeur. Sans atteindre ces profondeurs, la répétitivité intense d'immersions à faibles profondeurs peut aussi aboutir à ce type de pathologie, comme l'ont montré Boussuges et coll. (6) à la suite d'une compétition de chasse sous-marine de 5 heures qui a débouché sur la présence de signes d'obstructions pulmonaires chez 10 % des athlètes. Enfin, même l'immersion en surface peut aboutir à ce type de pathologie, comme l'ont démontré Lambrechts et coll. (31).

Fonction cérébrale

Le cerveau est très sensible à l'hypoxie et peu d'informations existent à ce jour sur les séquelles possibles d'apnées répétées. Il est certes connu que l'organisme met en place un corpus d'adaptations afin de maintenir l'irrigation du cerveau, au détriment du reste du corps ; mais Anderson et coll. (2) ont détecté la présence d'un marqueur (S100B) signe de souffrance cérébrale dans le sang d'apnéistes entraînés. Bien que ce marqueur ne soit pas synonyme de séquelles cérébrales, ces données engagent à la plus grande prudence. Cette précaution est confirmée par des scanners récents d'apnéistes montrant des zones d'hypo-perfusion dans les lobes frontaux et temporaux des hémisphères cérébelleux (49).

Fonction cardiaque

La bradycardie liée au « réflexe de plongée » est un mécanisme de lutte contre les effets de l'hypoxie, notamment sur le cœur ou le cerveau (1). Ceci étant, en plus d'un syndrome de déshydratation et réduction du volume plasmatique, l'hyperactivité parasympathique provoque des arythmies cardiaques lors d'un effort prolongé d'apnées successives (24).

Autres risques

En marge des souffrances liées à l'hypoxie, certains exercices peuvent induire des symptômes aigus d'hypercapnie (céphalées, troubles visuels, etc.) ou de crampes, vis à vis desquels il convient aussi de rester vigilant.

À noter que la pratique de la IGP pose un certain nombre de problèmes déjà évoqués précédemment (2). Même si Tetzlaff et coll. (57) n'ont pas réussi à prouver sa nocivité à long terme, notamment sur l'élasticité du parenchyme pulmonaire ; cette pratique est donc à gérer avec vigilance. À noter aussi que selon Schiffer and Lindholm (56), la pratique de l'IGP peut induire des embolies gazeuses avec une augmentation significative des risques d'ischémies dans le cerveau et le cœur.

Enfin, une mauvaise alimentation peut aussi être à l'origine de souffrances physiologiques. Lindholm et coll. (39) ont montré que la performance en apnée pouvait être améliorée d'environ 10 % par la prise de carbohydrates (sucres) et qu'elle pouvait s'avérer dangereuse en situation de jeûne. Toujours dans le chapitre alimentaire, Engan et coll. (17) ont montré que la prise de Nitrates (cf. jus de betterave) augmente de 10 % la performance en apnée statique.

5.2. La notion de performance acquise comme base de l'entraînement collectif individualisé en apnée

5.2.1. Postulats de base

La synthèse des différentes contraintes d'ordre physiologique, organisationnelle ou liées à la sécurité concourt à rechercher une structuration des entraînements permettant :

- de réduire le risque de perte de connaissance aiguë ;
- de limiter la souffrance physiologique potentielle liée à un stress hypoxique chronique ou aigu et trop élevé ;
- de répondre efficacement du point de vue sémantique à des publics d'apnéistes souvent hétérogènes ;
- de permettre aux apnéistes une perception optimale des étapes de progression et une évaluation objective des acquis.

Ces objectifs peuvent être obtenus par le recours à la notion de « performances acquises », tel que cela a été mis en place dans certaines écoles d'apnée, dont celle de Nouméa (Nouvelle-Calédonie) entre 2003 et 2008 (6).

5.2.2. La progression par les performances acquises

La nouveauté de ce concept réside dans la différenciation entre une *performance acquise* (PA) qu'un élève est capable de reproduire régulièrement et sa *performance maximale*, qu'il ne peut produire qu'exceptionnellement mais à laquelle il a tendance à se référer systématiquement.

La notion de PA se décline sous trois valeurs :

- *temps acquis* (TA) pour l'apnée statique ;

- *distance acquise* (DA) pour l'apnée dynamique ;
- *profondeur acquise* (PrA) pour la descente en poids constant.

Ces PA correspondent aux performances que l'apnéiste est capable de reproduire plusieurs fois d'affilée dans des conditions de sécurité acceptables. Elles sont propres à chaque apnéiste et elles fluctuent en fonction du temps : vers le haut si l'apnéiste a progressé ou s'il est en forme, vers le bas si l'apnéiste a régressé par manque d'entraînement ou s'il baisse de forme physique. Les performances acquises sont donc régulièrement réévaluées individuellement selon des protocoles précis (tableau n° 15).

Performance acquise	Nombre de performances consécutives	Temps de récupération
TA – Statique	3	3 min
DA – Dynamique horizontal	3	2 min
PrA – Vertical	3	2 min

Tableau n° 15. – Protocole de calcul des performances acquises.

L'objectif de cette approche consiste à évincer de l'entraînement toute recherche de performance instantanée et à travailler séparément sur les différents facteurs de la performance. À titre indicatif, deux facteurs de la performance au maximum seront mobilisés au cours d'un même exercice, et trois facteurs au cours d'une même séance. En revanche, à l'échelle d'un meso-cycle, tous les facteurs pourront être mobilisés à tour de rôle, certains pouvant néanmoins être prépondérant par rapport à d'autres. À l'échelle d'un macro-cycle, tous les facteurs auront été mobilisés (tableaux n° 1 et 2).

C'est par la *répétitivité et par la progressivité lente* des exercices que l'apnéiste améliore son statut, *plus que par la souffrance et par l'effort violent*. Une distinction claire est faite entre les séances d'entraînement et la séance de test des performances. Pratiquement, trois séances d'entraînement précèdent une séance de test, encore dénommée séance des *max* (sous-entendu « performances maximales ») pour constituer un « cycle ».

Du point de vue sécurité, le principe des PA et des cycles permet la mise en place pendant les trois premières semaines d'une sécurité de base minimale, reposant sur la démarche pédagogique et sur l'implication des élèves, ainsi que sur la mise en place d'une sécurité accrue lors de la

4^e semaine au cours de laquelle des performances maximales peuvent être tentées.

Du point de vue sémantique, le recours aux PA conforte l'élève dans l'idée que la progression doit être lente mais sûre, faite de souffrance mais aussi de plaisir. Pour donner une image, un marathonien ne court pas 42 km tous les jours ou toutes les semaines pour s'entraîner. Il ne va mettre toutes ses qualités physiques, psychologiques et physiologiques en œuvre qu'une fois de temps en temps, lors d'une compétition par exemple. Le corps ne supporterait d'ailleurs pas de tels efforts répétés.

Du point de vue pédagogique, le recours aux « performances acquises » permet d'homogénéiser un programme d'entraînement destiné à des publics divers. Les exercices ne se déclinent plus sous la forme de performances « absolues » mais « relatives ». Les exercices sont donnés en *pourcentage des PA* et chaque élève effectue le calcul lui-même.

Exemple 1 : admettons que l'on propose à des apnéistes avec des niveaux hétérogènes, un exercice visant à travailler la résistance à l'hypoxie et la technique de palmage ; au lieu d'imposer une seule et même longueur à des apnéistes dont certains seront en surcharge et d'autres en sous-charge, il suffira de proposer par exemple 10 longueurs à 90 % de la DA avec 2 min de récupération. Chaque apnéiste adaptera ainsi la longueur à ses capacités et travaillera dans le bon intervalle de charge.

Exemple 2 : en dynamique horizontale, un 16 × 50 m pratiqué régulièrement en piscine (sachant qu'un 50 m peut être très facile pour un apnéiste niveau 4 mais très difficile pour un apnéiste niveau 3) deviendra un 16 × [60 % de la DA]. Le principe de l'exercice et les temps de récupération peuvent en revanche rester les mêmes pour tous.

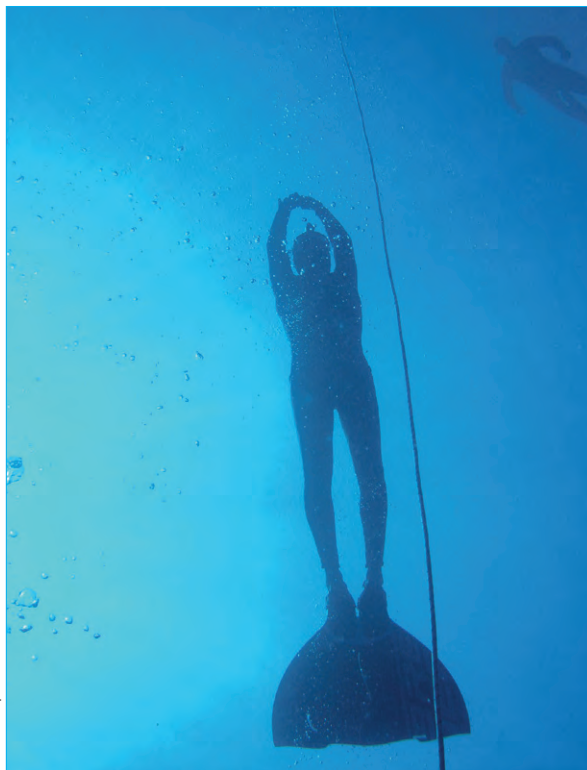
6. Conclusions

Même si ce chapitre peut sembler étoffé en terme de recommandations et de types d'exercices en mesure d'améliorer les performances en apnée, il est bon d'insister une nouvelle fois sur la faiblesse des données actuelles en matière d'entraînement à ce sport spécifique. Les spécialistes sont unanimes pour reconnaître que si l'on progresse dans la connaissance des paramètres physiologiques influençant la performance, tel que le *diving reflex*, la maîtrise de leur développement par l'entraînement contient encore aujourd'hui de grandes zones d'ombre (9). Cet état de fait engage à une certaine prudence et à la nécessité de conserver la sécurité comme une composante majeure de l'entraînement, notamment vis-à-vis de l'hétérogénéité du public à qui il peut s'adresser. L'encadrement technique, en particulier fédéral (FFESSM), doit à ce titre jouer un rôle critique en

optimisant l'adéquation entre le public concerné et l'entraînement préconisé, en prenant le recul nécessaire et en mettant au deuxième plan le savoir technique qu'a pu lui apporter ce chapitre.

Ceci étant, l'entraînement à l'apnée est porteur de promesses très attractives. Comme l'ont montré Lemaître et coll. (35), l'entraînement à l'apnée diminue l'acidose lactique, le stress oxydatif et le métabolisme de base; il augmente l'hématocrite, la concentration érythropoïétique, en hémoglobine et la plupart des volumes pulmonaires (46). Il peut à ce titre constituer une forme d'entraînement recommandé pour tous les autres sports et ce, en vue d'augmenter les performances en situations aérobie ou anaérobie. Il constitue un domaine d'application et de recherche particulièrement attractif pour les décennies à venir.

© Photo Jacques Fabbri



Annexe

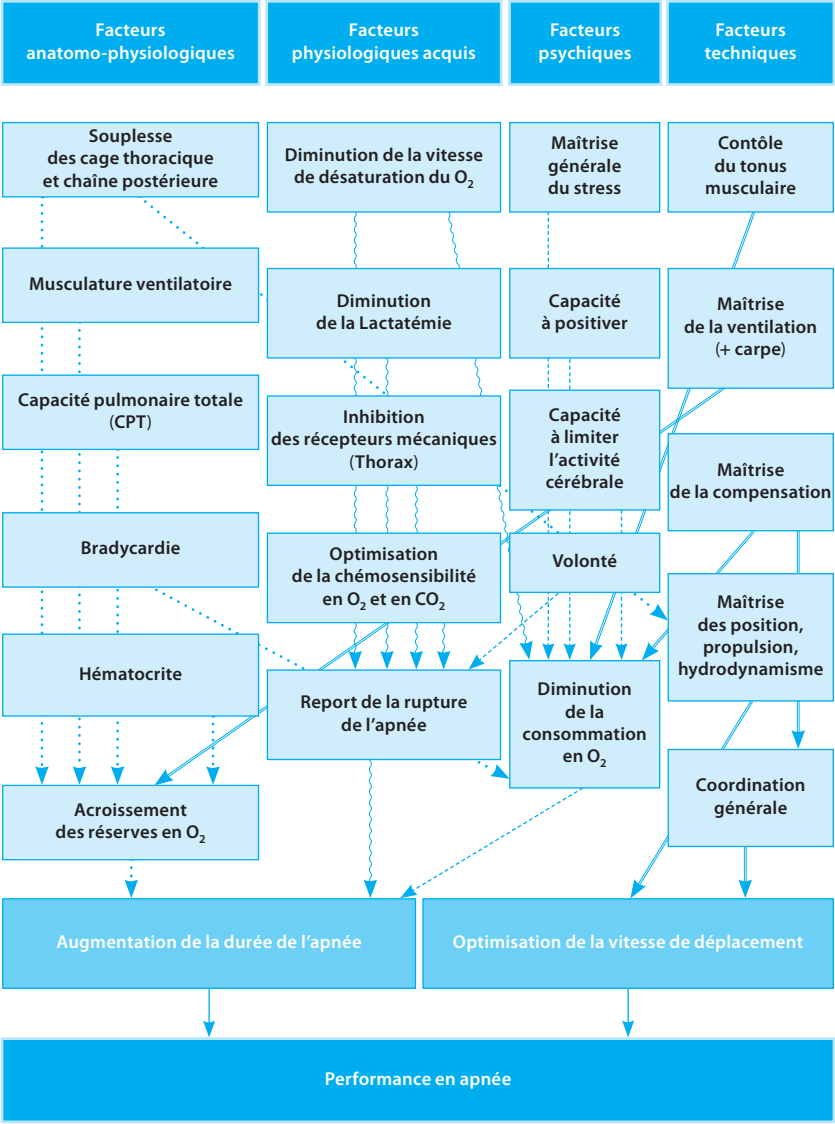


Schéma récapitulatif des principaux facteurs de la performance en apnée dynamique.

Remerciements

L'auteur tient à remercier tout particulièrement Bernard Andréani du club d'apnée de Nouméa, avec qui beaucoup de concepts évoqués dans cette section ont pu être formalisés et mis en pratique en Nouvelle-Calédonie. Il tient aussi à adresser ses plus vifs remerciements à Frédéric Lemaître pour lui avoir confié la rédaction de cette partie épineuse sur un domaine en plein devenir, pour ses précieux apports et corrections. L'auteur témoigne aussi sa reconnaissance à tous les apnéistes, en particulier Pierre Frolla et Guillaume Néry, qu'il a pu côtoyer au cours de ces dernières années et qui ont contribué à l'élaboration de cette approche pratique de l'entraînement, pour une avancée collective dans le domaine.

Références bibliographiques

1. ALBONI P., ALBONI M., GIANFRANCHI L., « Diving bradycardia: a mechanism of defence against hypoxic damage », *Journal of Cardiovascular Medicine*, 2011, n° 12, p. 422-427.
2. ANDERSSON J. P., LINER M. H., JONSSON H., « Increased serum levels of the brain damage marker S100B after apnea in trained breath-hold divers: a study including respiratory and cardiovascular observations », *Journal of Applied Physiology*, 2009, n° 107, p. 809-815.
3. BINKS A. P., VOVK A., FERRIGNO M., BANZETT R. B., « The air hunger response of four elite breath-hold divers », *Respiratory, Physiology and Neurobiology*, 2007, n° 159, p. 171-177.
4. BILLAT V., *Physiologie et méthodologie de l'entraînement : de la théorie à la Pratique*, De Boek Université, 2003, 193 p.
5. BILLAT V., « Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle and long-distance running. Part I: Aerobic interval training », *Sports Medicine*, 2001 a, vol. 31, n° 1, p. 13-31.
6. BOUSSUGES A., COULANGE M., BESSEREAU J., GARGNE O., AYME K., GAVARRY O., FONTANARI P., JOULIA F., « Ultrasound lung comets induced by repeated breath-hold diving, a study in underwater fishermen », *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, article first published online, Apr. 2011 (Digital Object Identifier: 10.1111/j.1600-0838.2011.01319.x).

7. BRICKI A., DEKKAR N., « Validité de la course de 5 min pour l'estimation de VO_2 max chez le coureur à pied », *Science et Motricité*, 1989, n° 8, p. 31-37.
8. CHAPUIS C., « Entraînement et sécurité : le grand débat », *Revue Française de Plongée*, 2003, n° 3, p. 59-67.
9. CHAPUIS C., LEFERME L., « Comment s'entraîner ? », Document pédagogique préparatoire à la rédaction du Manuel du moniteur d'apnée (FFESSM), 2001, 5 p.
10. CLUA E., ANDRÉANI B., FÈVRE F., LEMAÎTRE F., LEROUX J. P., XIFRO J., « Manuel de préparation à l'examen de moniteur fédéral d'apnée », Document pédagogique édité par la Fédération française des études et sports sous-marins (FFESSM), 2004, 65 p.
11. CORRIOL J.-H., *La Plongée en apnée. Physiologie et médecine*, Paris, Masson, 1996, 2^e éd., 154 p.
12. COURTEIX D., LAMENDIN H., « Facteurs déterminants de la rupture d'apnée volontaire (évolution et modèles) », *Sciences et Sports*, 1992, n° 7, p. 235-244.
13. DELAHOCHÉ J., LEMAÎTRE F., DELAPILLE P., « Influence du réflexe de plongée sur la saturation artérielle en oxygène selon la vitesse de nage subaquatique et l'expertise des plongeurs », *Revue Française de Plongée*, 2003, n° 3, p. 3-9.
14. DELAPILLE P., TOURNY CHOLLET C., « Influence de l'entraînement sur la cinétique de la lactatémie lors d'apnées courtes et dynamiques en piscine chez des plongeurs experts et débutants », *Revue Française de Plongée*, 2001, n° 1, p. 2-10.
15. DUJIK Z., BRESKOVIC T., « Impact of Breath Holding on Cardiovascular Respiratory and Cerebrovascular Health », *Sports Medicine*, 2012, vol. 42, n° 6, p. 459-472.
16. DZAMONJA G., TANK J., HEUSSER K., *et al.*, « Glossopharyngeal insufflation induces cardioinhibitory syncope in apnea divers », *Clinical Autonomic Research*, 2010, vol. 20, n° 6, p. 381-384.
17. ENGAN H. K., JONES A. M., EHRENBERG F., SCHAGATAY E., « Acute dietary nitrate supplementation improves dry static apnea performance », *Respiratory Physiology and Neurobiology*, 2012, n° 182, p. 53-59.
18. ETCHELECOU B., *Manuel de sophrologie pédagogique et thérapeutique*, Paris, Maloine, 1990.
19. FERRETTI G., « Extreme human breath-hold diving », *European Journal of Applied Physiology*, 2001, n° 84, p. 254-271.
20. FÈVRE F., *L'apnée glisse en monopalme*, Chiron, 1998, 142 p.
21. FITZ-CLARKE J. R., « Risk of decompression sickness in extreme human breath-hold diving », *Undersea and Hyperbaric Medical Journal*, 2009, vol. 36, n° 2, p. 1-9.
22. FLORIO J. T., MORRISON J. B., BUTT W. S., « Breathing pattern and ventilatory response to carbon dioxide in divers », *Journal of Applied Physiology*, 1979, n° 46, p. 1076-1080.
23. FONTANARI P., JOULIA F., BARTHÉLEMY P., « Débits circulatoires en apnée. Effets d'un entraînement spécifique », *Revue Française de Plongée*, 2003, n° 3, p. 44-54.

24. GARGNE O., JOULIA F., GOLE Y., COULANGE M., BESSEREAU J., FONTANARI P., DESRUELLE A. V., GAVARRY O., BOUSSUGES A., « Cardiac alterations induced by a fish-catching diving competition », *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, article first published online, Aug. 2010 (Digital Object Identifier: 10.1111/j.1600-0838.2010.01169.x).
25. GODFREY S., CAMPBELL E. J. M., « The control of breath holding », *Respiratory Physiology*, 1968, n° 5, p. 385-400.
26. HOCHACHKA P. W., « Pinniped diving response mechanism and evolution: a window on the paradigm of comparative biochemistry and physiology », *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2000, n° 126, p. 435-458.
27. IRVING L., « On the ability of warm-blooded animals to survive without breathing », *The Christian Science Monitor*, 1934, n° 38, p. 422-428.
28. IRVING L., « Bradycardia in human divers », *Journal of Applied Physiology*, 1963, n° 18, p. 489-491.
29. JOULIA F., ULMER C., JAMIN T., FONTANARI P., JAMMES Y., « Effets d'un entraînement spécifique à l'apnée sur les variables métaboliques et l'activité musculaire », *Revue Française de Plongée*, 2003, n° 3, p. 21-40.
30. LACOUR J. R. et coll., *Biologie de l'exercice musculaire*, Paris, Masson. 1992, 236 p.
31. LAMBRECHTS K., GERMONPRE P., CHARBEL B., CIALONI D., MUSIMU P., SPONSIELLO N., MARRONI A., PASTOURET F., BALESTRA C., « Ultrasound lung "comets" increase after breath-hold diving », *European Journal of Applied Physiology*, 2011, n° 111, p. 707-713.
32. LANDSBERG P. G., « Hyperventilation: an unpredictable danger to the sports diver », in LUNDGREN C. E., FERRIGNO M. (dir.), « The physiology of breath-hold diving », Bethesda (M. D.), *Undersea and Hyperbaric Medical Journal*, 1987, p. 256-267.
33. LÉGER L., LAMBERT J. A., « Maximal multistage 20 m shuttle run test to predict VO₂ max », *European Journal of Applied Physiology*, 1982, n° 49, p. 1-12.
34. LEMAÎTRE F., « Entraînement et apnée », Document pédagogique vulgarisé dans le cadre du collège des instructeurs de la commission nationale d'apnée (FFESSM), 2003, 10 p.
35. LEMAÎTRE F., CLUA E., ANDREANI B., CASTRES I., CHOLLET D., « Ventilatory function in breath-hold divers: effect of glossopharyngeal insufflation », *European Journal of Applied Physiology*, 2010, n° 108, p. 741-747.
36. LEMAÎTRE F., JOULIA J., CHOLLET D., « Apnea: a new training method in sport? », *Medical Hypothese*, 2010, n° 74, p. 413-415.
37. LINDHOLM P., CONNIFF M., GENNSER M., PENDERGAST D., LUNDGREN C., « Effects of fasting and carbohydrate consumption on voluntary resting apnea duration », *European Journal of Applied Physiology*, 2007, n° 100, p. 417-425.
38. LINDHOLM P., EKBORN A., OBERG D., *et al.*, « Pulmonary edema and hemoptysis after breath-hold diving at residual volume », *Journal of Applied Physiology*, 2008, n° 104, p. 912-917.

39. LINDHOLM P., LUNDGREN C. E., « Alveolar gas composition before and after maximal breath-holds in competitive divers », *Undersea and Hyperbaric Medical Journal*, 2006, n° 33, p. 463-467.
40. LINDHOLM P., SUNDBLAD P., LINNARSSON D., « Oxygen conserving effects of apnea in exercising men », *Journal of Applied Physiology*, 1999, n° 54, p. 166-171.
41. LINER M. H., ANDERSSON J. P., « Pulmonary edema after competitive breath-hold diving », *Journal of Applied Physiology*, 2008, n° 104, p. 986-990.
42. LODIN-SUNDSTRÖM A., SHAGATAY E., « Spleen Contraction during 20 min Normobaric Hypoxia and 2 min Apnea in Humans », *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 2010, n° 81, p. 545-549.
43. MCARDLE W., KATCH F., KATCH V., *Physiologie de l'activité physique : énergie, nutrition et performance*, Paris, Maloine, 2001, 4^e éd., 711 p.
44. MACIA P., « Étude sur un groupe de plongeurs en apnée : du débutant au champion », dans Thèse, Aix Marseille, Université Aix-Marseille 2, 1994.
45. OSTROWSKI A., STRZAŁA M., STANULA A., JUSZKIEWICZ M., PILCH W., MASZCZYK A., « The Role of Training in the Development of Adaptive Mechanisms in Freedivers », *Journal of Human Kinetics*, 2012, n° 32, p. 197-210.
46. OVERGAARD K., FRIIS S., PEDERSEN R. B., *et al.*, « Influence of lung volume, glossopharyngeal inhalation and P(ET) O₂ and P(ET) CO₂ on apnea performance in trained breath-hold divers », *European Journal of Applied Physiology*, 2006, n° 97, p. 158-164.
47. PALADA I., ETEROVIC D., OBAD A., *et al.*, « Spleen and cardiovascular function during short apneas in divers », *Journal of Applied Physiology*, 2007, n° 103, p. 1958-1963.
48. PLATONOV V. N., « Adaptation des sportifs aux charges d'entraînement et de compétition », *Dossier EPS*, 1987, n° 5.
49. POTKIN R., CHENG V., SIEGEL R., « Effects of glossopharyngeal insufflation on cardiac function: an echocardiographic study in elite breath-hold », *Journal of Applied Physiology*, 2007, n° 103, p. 823-827.
50. POTKIN R., USZLER J. M., « Brain function imaging in asymptomatic elite breath-hold divers », dans LINDHOLM P., POLLOCK N. W., LUNDGREN C. E. (dir.), *Breath-hold diving, proceedings of the Undersea and Hyperbaric Medical Society / Divers Alert Network*, 2006 Jun. 20-21, Workshop, Durham (N. C.), p. 135-137.
51. RICHARDSON M. X., DE BRUIJN R., SCHAGATAY E., « Hypoxia augments apnea-induced increase in hemoglobin concentration and hematocrit », *European Journal of Applied Physiology*, 2009, n° 105, p. 63-68.
52. SCHAGATAY E., « Review: predicting performance in competitive apnea diving. Part I: static apnea », *Diving and Hyperbaric Medicine Journal*, 2009, n° 39, p. 88-99.
53. SCHAGATAY E., « Review: predicting performance in compétitive apnea diving. Part II: dynamic apnea », *Diving and Hyperbaric Medicine Journal*, 2010, n° 40, p. 11-22.

54. SCHAGATAY E., « Review: predicting performance in competitive apnea diving. Part III: depth », *Diving and Hyperbaric Medicine Journal*, 2011, n° 41, p. 216-228.
55. SCHAGATAY E., ANDERSSON J. P. A., HALLEN M., PALSSON B., « Physiological consequences of intermittent hypoxia, selected contribution: Role of spleen emptying in prolonging apneas in humans », *Journal of Applied Physiology*, 2001, n° 90, p. 1623-1629.
56. SCHIFFER T. A., LINDHOLM P., « Transient ischemic attacks from arterial gas embolism induced by glossopharyngeal insufflation and a possible method to identify individuals at risk », *European Journal of Applied Physiology*, 2013, n° 113, p. 803-810.
57. TETZLA K. V., SCHOLZ T., WALTERSPACHER S., MUTH C. M., METZGER J., ROECKER K., SORICHTER S., « Characteristics of the respiratory mechanical and muscle function of competitive breath-hold divers », *European Journal of Applied Physiology*, 2008, n° 103, p. 469-475.
58. VAN LYSEBETH A., *Prānayāma. La dynamique du souffle*, Paris, Flammarion, 1990.
59. WASSERMAN *et al*, « The anaerobic threshold measurement to evaluate exercise performance », *American Review of Respiratory Disease Journal*, 1984, n° 124, p. 535-540.