

FICHE 53

Les risques d'accidents de désaturation (ADD)

Les études 1 et évaluations sur les ADD montrent un risque relativement faible, de l'ordre de 1 à 5 pour 10 000 avec une rémission complète, après traitement hyperbare, dans la plupart des cas. Si la rapidité de l'alerte et de l'intervention (oxygène, évacuation vers un caisson hyperbare) est cruciale, **la prévention est essentielle.**

A l'origine : la formation de bulles

Durant la désaturation, l'azote dissous au cours de la plongée peut reprendre sa forme gazeuse et former des microbulles. Celles-ci ne causent pas d'accident lorsqu'elles restent de petite taille et peu nombreuses : elles sont éliminées par le filtre pulmonaire à l'expiration. On parle de « bulles silencieuses » (voir encadré page suivante).

Mais ces microbulles peuvent aussi grossir lors de la remontée ou s'associer entre elles pour former des embolies ou des manchons gazeux qui deviennent alors pathogènes. Les risques sont d'autant plus importants que le nombre de bulles créées l'est aussi. Les signes dépendent de leur localisation : **troubles neurologiques** (paralysies, perturbation de la vision, du toucher...) et **atteintes de l'oreille interne** (équilibre, audition) en particulier.

COMPOSITION DES BULLES

Dans un souci de simplification, il est souvent indiqué que les bulles ne contiennent que de l'azote. En réalité, elles contiendraient également du CO₂, de la vapeur d'eau et de l'O₂.

Prévention des risques : une question de probabilités

Si, comme déjà dit, les risques sont relativement faibles, les études 2 récentes montrent que 70 % à 80 % des ADD surviennent malgré le respect des procédures (ordinateurs, tables). Cela signifie que l'amélioration constante des modèles permet de bénéficier désormais d'une désaturation sûre, mais que les cas qui persistent se situent majoritairement en dehors du domaine de validité des protocoles (ordinateur, tables).

Pour plonger en sécurité, il faut donc non seulement :

- 1) respecter un protocole de désaturation ;
- mais également prendre en compte :
- 2) l'existence de facteurs individuels de risque ;
- 3) les profils de plongée dangereux ;
- 4) les comportements à risque.

Ces 4 points sont détaillés dans les pages suivantes.

1. a) Peter B. BENNETT, *Epidemiology of decompression illness and fatalities in recreational divers*, in Proceeding of the 1st european consensus conference on hyperbaric medicine, Lille, septembre 1994 ; 28 - 34.
 - b) Enquête CROSSMED, 2003.
 - c) BLATTEAU J.-E., GUIGUES J.-M., HUGON M., GALLAND -F.-M., *Bilan de 12 années d'utilisation de la table MN 90 par la Marine nationale. Analyse rétrospective de 61 accidents de désaturation*, MedSubHyp ; communication présentée lors de la réunion scientifique d'automne de septembre 2004.
 - d) B. GRANDJEAN, *Epidémiologie des accidents de la plongée sous-marine autonome de loisir*, in *Traité de médecine hyperbare*, Ellipse éditions 2002 ; 153 - 159.
2. Enquête annuelle FFESSM, Commission Médicale et de Prévention Nationale (www.ffessm.fr).

BULLES SILENCIEUSES

Ce terme désigne des bulles de gaz inerte (azote, hélium...) qui, bien que présentes dans la **circulation veineuse**, sont tolérées par l'organisme à la condition qu'elles restent de très petite taille et en faible quantité. Elles sont alors évacuées par le filtre pulmonaire, lors de l'expiration.

Des bulles silencieuses apparaissent à la **remontée**. Leur nombre est d'autant plus important que :

- la **vitesse** de remontée est rapide ;
- la **saturation** élevée (temps de plongée important, effort, froid, plongées profondes, successives avec faible intervalle en surface, profils atypiques tels que les yo-yo, etc.).

Bien entendu, elles représentent un risque d'accident de désaturation potentiel, si elles viennent à passer dans la grande circulation.

Cela peut se produire principalement en cas de shunt* cardiaque (voir foramen ovale perméable) ou pulmonaire.

A titre préventif, retenons que la vitesse de remontée ne doit pas trop s'éloigner de 9 à 12 m/min et qu'entre chaque palier ainsi qu'entre le dernier palier et la surface, cette **vitesse** doit encore être ralentie. De même, au-delà des **profils** à risque, certains **comportements** sont à éviter : effort (ancrer), Valsalva à la remontée, gilet gonflé à la bouche, etc.

Enfin, les facteurs individuels de risque (fatigue, manque d'entraînement, âge...) doivent inciter à la prudence.

Une bonne désaturation réunit donc quatre composantes : une vitesse de remontée lente et des paliers lorsque nécessaire ; prise en compte des facteurs individuels de risque ; éviter les comportements et profils à risque.

Notons enfin que tous les individus ne sont pas égaux face à la désaturation, certains produisent plus de bulles que d'autres ou les éliminent plus facilement. C'est une donnée physiologique incontournable.

* Shunt : terme anglais signifiant dérivation, court-circuit.

En médecine, il désigne l'ouverture de passages normalement fermés, soit au niveau du cœur (foramen ovale), soit au niveau des poumons. Cela peut, par exemple, faire passer du sang veineux directement dans le circuit artériel, sans passer par le filtre pulmonaire.

DÉTECTION DE BULLES (effet Doppler)

Christian Doppler a découvert, en 1842, que la fréquence, et donc la longueur d'onde de certains sons, était modifiée lorsque le récepteur qui les recevait était en mouvement.

Ces résultats sont d'une utilisation aujourd'hui courante en physique et en astronomie.

En plongée, cette particularité acoustique a été utilisée pour détecter, à l'aide d'ultrasons, des bulles circulant dans l'organisme. Des appareils spécifiques (appelés communément Doppler) ont été construits, permettant d'écouter le déplacement des bulles d'azote à l'aide d'une sonde transcutanée.

Avec cet appareillage, Spencer a mis en évidence en 1968 que la désaturation génère des bulles dites « silencieuses », tolérées jusqu'à un certain stade. La détection Doppler permet ainsi de valider ou de corriger certaines procédures de désaturation (vitesse de remontée, temps et profondeur des paliers) en mesurant la quantité de bulles produites pendant la désaturation.

1. Respect du protocole et quantité d'azote accumulée

Plus la quantité d'azote accumulée est importante, plus la probabilité de risque d'ADD augmente. Les principaux facteurs à prendre en compte sont :

- Le temps de plongée.
- La profondeur.
- La consommation d'air ¹. **Effort, froid, essoufflement, stress** augmentent cette consommation et donc le niveau de saturation en azote. De plus, certains individus consomment plus d'air que d'autres ou éliminent moins bien l'azote lors de la désaturation (efficacité du filtre pulmonaire). Julien Hugon, dans sa thèse soutenue en 2010 à Marseille sur la *Modélisation biophysique de la décompression* (<http://www.theses.fr/2010AIX20691>), résume parfaitement la situation : « Le fait de pratiquer des efforts lors d'une exposition augmente le risque de générer un accident de décompression (Vann et Thalmann 1993). Ceci tient au fait qu'une activation de la circulation augmente la vitesse de saturation de certains tissus (muscles squelettiques, peau, tendons...). Aussi, pour un même type d'exposition, la quantité de gaz que l'on peut dissoudre dans l'organisme peut être nettement supérieure si des exercices sont pratiqués, ce en comparaison d'une situation au repos. Pour se prémunir contre l'accident de décompression de manière efficace, les durées des décompressions doivent alors être majorées (Vann et Thalmann 1993) ». Sont également à considérer :
 - L'intervalle de surface entre deux plongées. Plus il est court, moins l'organisme a le temps d'éliminer l'azote en excès issu de la précédente plongée.
 - Le nombre de plongées réalisées dans la journée, sur la semaine...

Tout plongeur doit avoir à l'esprit que son niveau de saturation en azote et donc le risque d'ADD dépendent non seulement de la profondeur et du temps de plongée, mais également de la consommation d'air et des réactions de l'organisme. Si les modèles de désaturation sont fiables, ils ne peuvent pas pour autant offrir une garantie absolue à 100 % des plongeurs dans 100 % des plongées. **Il ne faut donc pas faire une confiance aveugle à un ordinateur ou à des tables de désaturation.**

BONNES PRATIQUES

- Respecter une vitesse de remontée **lente et régulière**, de l'ordre de 9 à 12 m/min.
- **Réduire** cette vitesse à 6 m/min à l'approche de la surface (zone des 10 m), entre les paliers et entre le dernier palier et la surface (remontée main sur main le long du mouillage). Une des erreurs le plus souvent constatées consiste à remonter rapidement, comme un bouchon, entre 3 m et la surface dès le dernier palier achevé.
- Respecter les temps et profondeur de palier indiqués par vos instruments.
- Accroître les paliers lorsqu'un événement intervenu au cours de la plongée le nécessite (froid, effort, essoufflement, stress...). Si vous utilisez un ordinateur, paramétrez-le pour qu'il adapte la désaturation ou bien faute de mieux, appliquez la procédure préconisée par Fructus et Sciarli : augmentez d'au moins 5 minutes les temps des paliers à 3 ou 6 m, fournis par l'instrument ^[28]. Avec des tables, il est conseillé d'utiliser la procédure en vigueur dans le monde professionnel ^[27] : prendre le temps de plongée immédiatement supérieur.

1. Les modèles de désaturation considèrent une valeur moyenne (ex. 20 l/min) afin d'évaluer la quantité d'azote accumulé dans l'organisme. Tout plongeur ayant une consommation au-delà de cette valeur se situe alors « hors modèle ». Récemment, des ordinateurs intégrant une gestion d'air tentent de prendre en compte la consommation réelle du plongeur, ce qui va dans le sens de la sécurité, sans offrir de garantie absolue.

QUELLE PROBABILITÉ DE RISQUE D'ADD ?

Selon Bernard Gardette (*Comex 50 ans de recherches et d'innovations*, 2012, pp. 140-142), « On sait depuis quelques années, grâce aux statistiques COMEX que toutes les plongées ne comportent pas le même risque de produire un ADD. Cette probabilité de faire un accident augmente avec la charge en gaz contenue dans l'organisme, en fonction de la profondeur de la plongée et du temps passé au fond. A une charge en gaz Q (profondeur, en mètres, multipliée par la racine carrée du temps au fond, en minutes), va correspondre un risque d'ADD. »

Facteur Q	Risque d'ADD
130	1/1 000 000
180	1/100 000
240	1/10 000
320	1/1 000
420	1/100 (1%)
560	1/10 (10%)
750	1/1 (100%).

Risques d'ADD en respectant un protocole de désaturation et hors prise en compte des facteurs de risques individuels (facteurs favorisant), du comportement et du profil adopté par le plongeur.

Exemples de calcul du facteur Q en fonction de couples temps/profondeur

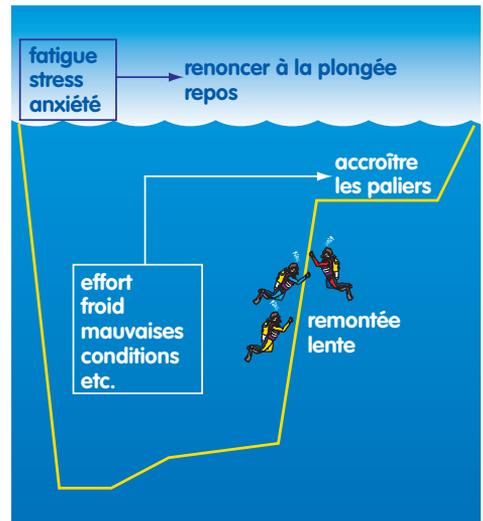
Prof.	Temps	Q	Risque statistique (global)	Facteurs individuels, comportement, profil	Risque individuel (1 à 5 p. 10 000)
20	10	63	< 1/1 000 000	Chacun des facteurs augmente le risque d'ADD.	Différent pour chacun et selon les conditions du moment. Actions possibles : limiter la profondeur et/ou le temps de plongée, utiliser du Nitrox, paramétrer son ordinateur en conséquence, etc.
30	10	95	< 1/1 000 000		
40	10	126	< 1/1 000 000		
50	10	158	< 1/100 000		
60	10	190	< 1/10 000		
20	30	110	< 1/ 1 000 000		
30	30	164	< 1/ 100 000		
40	30	219	< 1/10 000		
50	30	274	< 1/ 1 000		
60	30	329	< 1/100 (1%)		
20	60	155	< 1/100 000		
30	60	232	< 1/ 10 000		
40	60	310	< 1/1 000		
50	60	387	< 1/100 (1%)		
60	60	465	< 1/10 (10%)		

2. Facteurs individuels de risque (facteurs favorisants)

Les facteurs individuels de risque sont des facteurs favorisant les risques ADD. Par définition, ils ne sont **pas pris en compte par les modèles de désaturation car non généralisables**. A titre d'illustration, en voici une liste inspirée librement de celle de la Comex et qui ne l'engage pas :

1. Mauvaise forme physique, longs trajets pour aller plonger, manque de sommeil, fatigue excessive y compris sur le plan psychique : stress au travail, problèmes familiaux ou professionnels durables, perte d'emploi, situation de divorce, etc. ;
2. Mauvaise hygiène de vie : tabac (cela augmenterait la viscosité sanguine par 3 ou 4 selon BONNIN J.-P. et coll., La plongée sous-marine sportive, Masson, 1999, p. 28), alcool, nourriture trop riche... ;
3. Age > 40 ans ;
4. Poids ;
5. Antécédent de maladie grave, prise régulière de médicaments ;
6. Manque de pratique récente : plongées précédentes remontant à plusieurs semaines. Pour les plongeurs de loisir français de Métropole, le cas typique est celui des plongées du mois de mai, à l'ouverture de la saison. C'est la période où le CROSS constate le plus d'accidents graves de plongée car de nombreux plongeurs sédentaires durant l'hiver, plutôt que de prévoir une **phase de réadaptation progressive à la profondeur**, en profitent pour plonger à la limite de leurs prérogatives. Le bon sens voudrait pourtant que l'on soit prudent et qu'après une interruption de quelques semaines ou mois, on reprenne l'activité **progressivement**, à l'image de ce qui se pratique en alpinisme ou en aéronautisme par exemple.

En cas de facteurs favorisants : remontée lente et majoration des paliers (voire renoncer à la plongée).



RÉSUMÉ DES FACTEURS FAVORISANTS	Cocher
1. Méforme, sédentarité, stress, anxiété, long trajet, manque de sommeil...	<input type="checkbox"/>
2. Mauvaise hygiène de vie : alcool, tabac, nourriture trop riche...	<input type="checkbox"/>
3. Age > 40 ans	<input type="checkbox"/>
4. Poids	<input type="checkbox"/>
5. Antécédent de maladie grave, prise régulière de médicaments...	<input type="checkbox"/>
6. Manque de pratique récente	<input type="checkbox"/>

BONNES PRATIQUES

Selon que vous cumulez 2, 3, 4, ou plus de ces facteurs favorisants, il vous faut :

- limiter la profondeur (ex. 20 m) ;
- limiter le temps de plongée ;
- utiliser du nitrox ;
- respecter un intervalle entre deux plongées d'au moins 3 à 4 h ;
- accroître les paliers (par exemple en utilisant le mode « personnalisation » de votre ordinateur) ;
- ne faire qu'une plongée par jour ;
- voire même renoncer temporairement à plonger lorsque trop de facteurs sont réunis.

3. Profils à risque

Il est aujourd'hui avéré que certains profils de plongée comportent des risques, par l'augmentation du nombre de bulles qu'ils occasionnent. Ce sont :

- les plongées yo-yo ou en « dents de scie » (même si la vitesse de remontée est lente) ;
- les plongées consécutives, et les plongées successives rapprochées.

L'étude de DAN Europe ^[30] sur le sujet a montré que la quantité de bulles détectables par effet Doppler était près de deux fois plus importante dans le cadre de plongées successives que pour des plongées unitaires. Afin de limiter ce phénomène, il est recommandé de respecter un délai d'au moins 3 ou 4 heures entre deux plongées.

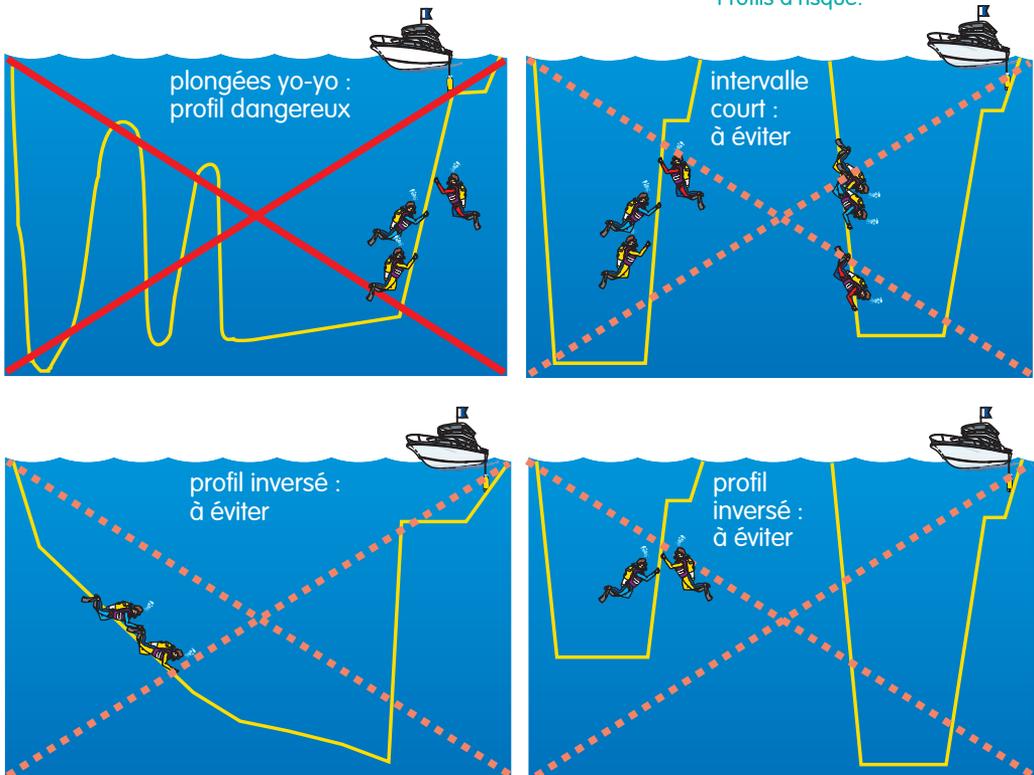
Le cas des profils inversés est plus controversé. Lors d'une plongée simple, cela consiste à atteindre la plus grande profondeur en fin de plongée, puis à remonter en surface (exemple, plongée le long d'un tombant). En plongée successive, cela revient à descendre plus profond que lors de la première plongée.

Hamilton et Thalmann indiquent à ce sujet: *aucune preuve convaincante n'a montré que les profils inversés en plongée sans décompression entraînent une augmentation des risques d'accidents de décompression [...] pour les plongées sans décompression à moins de 40 mètres et dont le différentiel de profondeur est inférieur à 12 mètres* ^[31].

La dangerosité de ce type de profil dépend donc de la profondeur, du temps de plongée et de la différence de profondeur entre les deux plongées.

En l'absence de certitudes sur ce point, nous ne saurions trop recommander aux directeurs de plongée et aux guides de palanquées de rester prudents.

Profils à risque.



Comportements à éviter

Pas de Valsalva à la remontée ou au palier



Avion (12 à 24 h)



Apnée (6 h)



Pas d'effort dans l'eau



Altitude (6 à 12 h)



Efforts, sport (2 h)



4. Comportements à risque

Au-delà du respect des **procédures** et **profils** de plongée corrects, le **comportement** individuel est aussi un élément clef de la prévention des accidents.

Voici quelques règles de bonne pratique :

- Éviter les **hyperpressions thoraciques**, elles peuvent provoquer l'ouverture de shunts cardiaques (foramen ovale perméable) ou pulmonaires, ce qui autorise le passage de bulles veineuses dans le circuit artériel. Il faut **donc proscrire les manœuvres de Valsalva à la remontée ou au palier**, ainsi que les efforts violents (exemple, relever une ancre à la main, remonter une bouteille en force à bord d'un pneumatique...).
- Éviter de faire du sport, et de manière générale, tout **effort violent** (exemple, remonter un mouillage conséquent), dans les 2 heures ^[85] qui suivent une plongée. Dans un organisme sursaturé en azote, cela ne peut que favoriser la création de bulles.
- Éviter aussi de pratiquer de **l'apnée** moins de 6 heures ^[86] après une plongée en scaphandre. Cela entrave l'élimination naturelle de l'azote, avec des conséquences non mesurées sur les plongées successives. De plus, les multiples phases de descentes et remontées, souvent rapides, augmentent les risques d'apparition de bulles.
- Monter en **altitude** ou prendre l'avion après une plongée peut favoriser l'apparition d'un accident de désaturation (voir encadré page suivante).

NOMBRE DE PLONGÉES

Généralement, il est conseillé de ne pas effectuer plus de 2 plongées par 24 heures, avec une pause tous les 6 ou 7 jours.

Cependant, l'utilisation désormais très répandue des ordinateurs et le développement du tourisme sur de courtes périodes (1 à 2 semaines) font que les pratiquants souhaitent plonger 3 ou 4 fois par jour, afin de profiter pleinement de leurs vacances.

Face à cette réalité, rappelons qu'un ordinateur calcule un profil de désaturation à partir d'un modèle mathématique valable pour 2 plongées par 24 h, successives ou non. Au-delà, un ordinateur effectue tout de même les calculs mais rien n'indique actuellement que les données affichées sont fiables. Dans ces conditions, l'emploi d'un ordinateur ne dispense pas de respecter la « règle des 2 plongées par jour ».

Avion, altitude et plongée

Nous savons qu'après une plongée, l'azote résiduel met 12 à 24 heures pour être évacué quasiment en totalité. Durant cet intervalle, toute baisse de la pression ambiante peut favoriser un dégazage anarchique de l'azote en excès et augmenter les risques d'accident de désaturation.



Pour se prémunir contre ce risque, il suffit d'appliquer des consignes simples :

Ne pas prendre l'avion dans les **heures** qui suivent une plongée. Les cabines étant pressurisées à 0,8 bar environ, les passagers passent en quelques minutes d'une pression atmosphérique de 1 bar au niveau de la mer à 0,8 bar, ce qui équivaut à une altitude de 2 000 m. Sur les ordinateurs de plongée un pictogramme s'affiche indiquant le temps minimum avant de pouvoir prendre l'avion.



Pour des vols à une altitude inférieure à quelques centaines de mètres (300 ou 500 m) à bord d'avions non pressurisés – c'est le cas pour certaines liaisons interîles – cette question ne se pose pas.

Selon les organismes ou modèles de désaturation, les recommandations concernant le délai minimum avant envol varient :

CMAS	US-Navy	Tables Deco 2 000 (Hahn)	Tables Bühlmann 1989	Comex, Ministère du travail (France)
24 h	6 h (pour 40 min entre 10 et 15 m) à 12 h (plongée au-delà de 40 m ou conditions difficiles : froid, effort...).	4 h à 24 h selon le groupe de plongées.	2 h à 24 h selon le groupe de plongées.	12 h (ramené à 4 h pour une plongée sans palier).

Ne pas monter en altitude dans les 12 heures qui suivent une plongée, par exemple pour skier. Il faut être d'autant plus vigilant que la phase de montée est rapide (exemple téléphériques). Ce délai standard peut être raccourci, soit en utilisant des tables de plongée spécifiques (exemple, Bühlmann, Hahn), soit en utilisant un ordinateur de plongée indiquant l'altitude maximum autorisée après une plongée.





Prévention des risques d'accident de désaturation

1. RESPECT DU PROTOCOLE

- Vitesse de remontée
- Temps de palier
- Profondeur de palier

**Ordinateurs/tables :
taux de risque
« théorique »**

2. FACTEURS INDIVIDUELS

1. Fatigue physique et psychique, manque de sommeil, sédentarité,
2. Mauvaise hygiène de vie (tabac, alcool, nourriture trop riche, ...)
3. Âge > 40 ans
4. Poids
5. Antécédents médicaux, prise régulière de médicaments
6. Manque de pratique récente (dernière plongée en milieu naturel remontant à plusieurs semaines).

3. COMPORTEMENTS À RISQUE

- Pas de mise en surpression du thorax en fin de plongée (pas de Valsalva au palier, pas d'efforts glotte bloquée, ...)
- Limitez les efforts en plongée
- Pas d'efforts violent après la plongée (2h)
- Pas d'apnée après une plongée (6h)
- Pas d'avion dans les 12 à 24 h
- Deux plongées par 24h max. (conseillé)
- Pas de montée en altitude dans les heures qui suivent une plongée

4. PROFILS À RISQUE

- Pas de plongées yo-yo
- Pas de plongées en « dents de scie » (1 bar de variation de pression suffit à générer des bulles, ex. 40 à 30 m)
- Pas de plongées consécutives
- Évitez les plongées successives rapprochées (3 à 4 h min.)
- Évitez les profils inversés

Consommation d'air excessive :
effort, froid,
essoufflement,
stress, ...

Évitez les
comportements et
profils à risque

SELON QUE VOUS CUMULEZ 2, 3, 4 OU PLUS DE CES FACTEURS INDIVIDUELS DE RISQUE :

Augmentez les temps de paliers au-delà de ce que proposent les ordinateurs ou les tables

- LIMITEZ LA PROFONDEUR DE PLONGÉE
- LIMITEZ LE TEMPS DE PLONGÉE
- UTILISEZ DU NITROX
- RESPECTEZ UN INTERVALLE D'AU MOINS 3 À 4 H ENTRE 2 PLONGÉES
- AUGMENTEZ LES TEMPS DE PALIERS (MODE PERSONNALISATION DES ORDINATEURS)
- LIMITEZ-VOUS À UNE SEULE PLONGÉE PAR JOUR
- RENONCEZ TEMPORAIREMENT À PLONGER