Plongée : notions sur l’équilibre des gaz en milieu liquide

Pourquoi ce cours ?

- Rappeler, préciser et quantifier des notions vues au N2 sur la dissolution
- Clarifier le vocabulaire utilisé
- Introduire (ou rappeler ?) la loi physique correspondante et comprendre les implications de cette loi pour la pratique de l'activité plongée
- Constituer une étape initiale dans la compréhension de l'élaboration des procédures de décompression

Rappel sur les propriétés des gaz

Un gaz c'est quoi ?

Un gaz est un ensemble d'atomes ou de molécules très faiblement liés et quasi indépendants ayant des propriétés propres. (wikipédia)

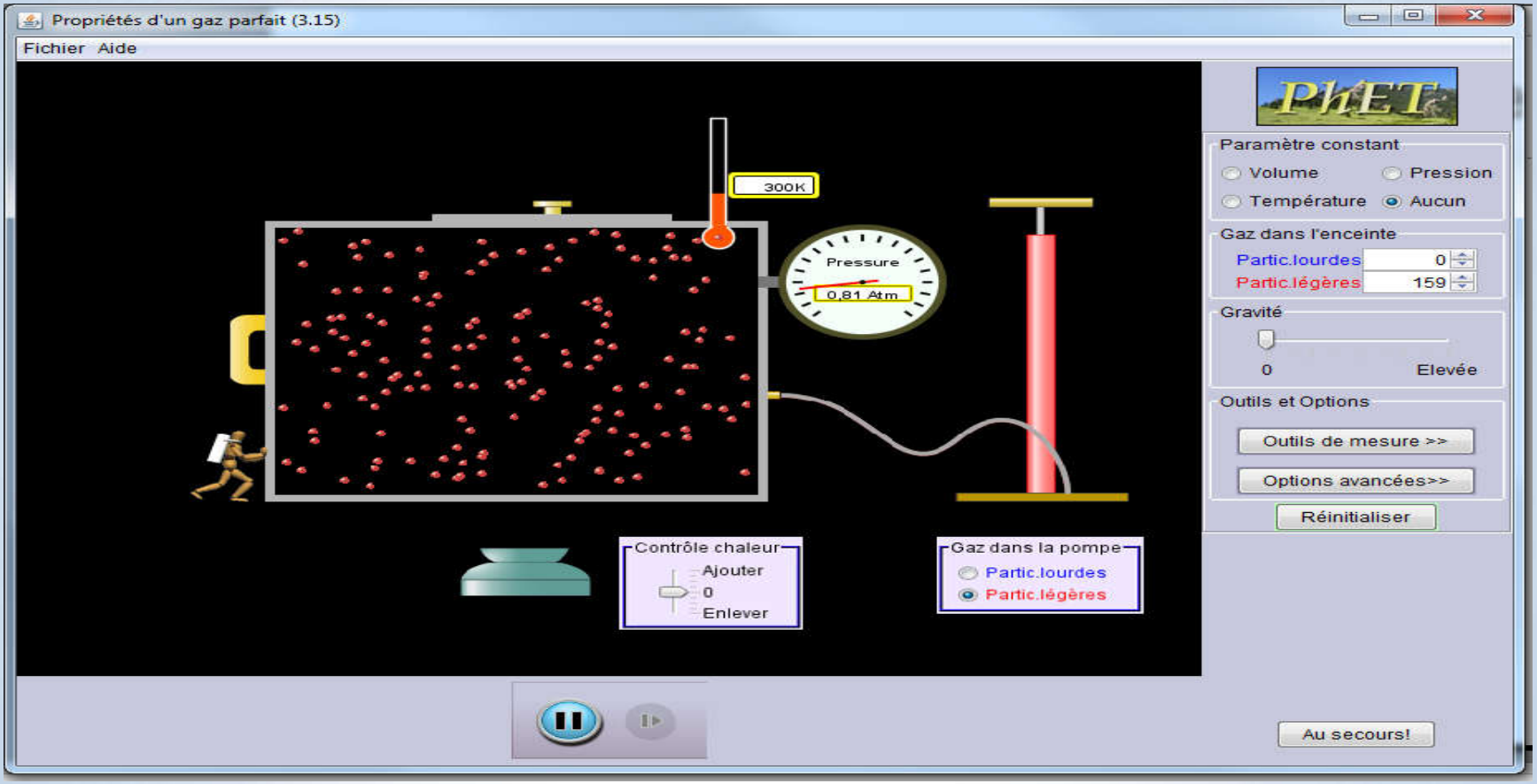
- N'a pas de forme propre
- Occupe le volume qu'on lui donne
- Exerce une pression
- Compressible et expansible
- Se dilate sous l'effet de la température
- **Soluble dans un liquide**

=> Gonflage

=> Problématique des variations de pression

=> Problématique de la décompression

Animation sur les propriétés des gaz



Mise en évidence du rapport entre nombre de molécules, pression et concentration d'un gaz

Rappels et constats

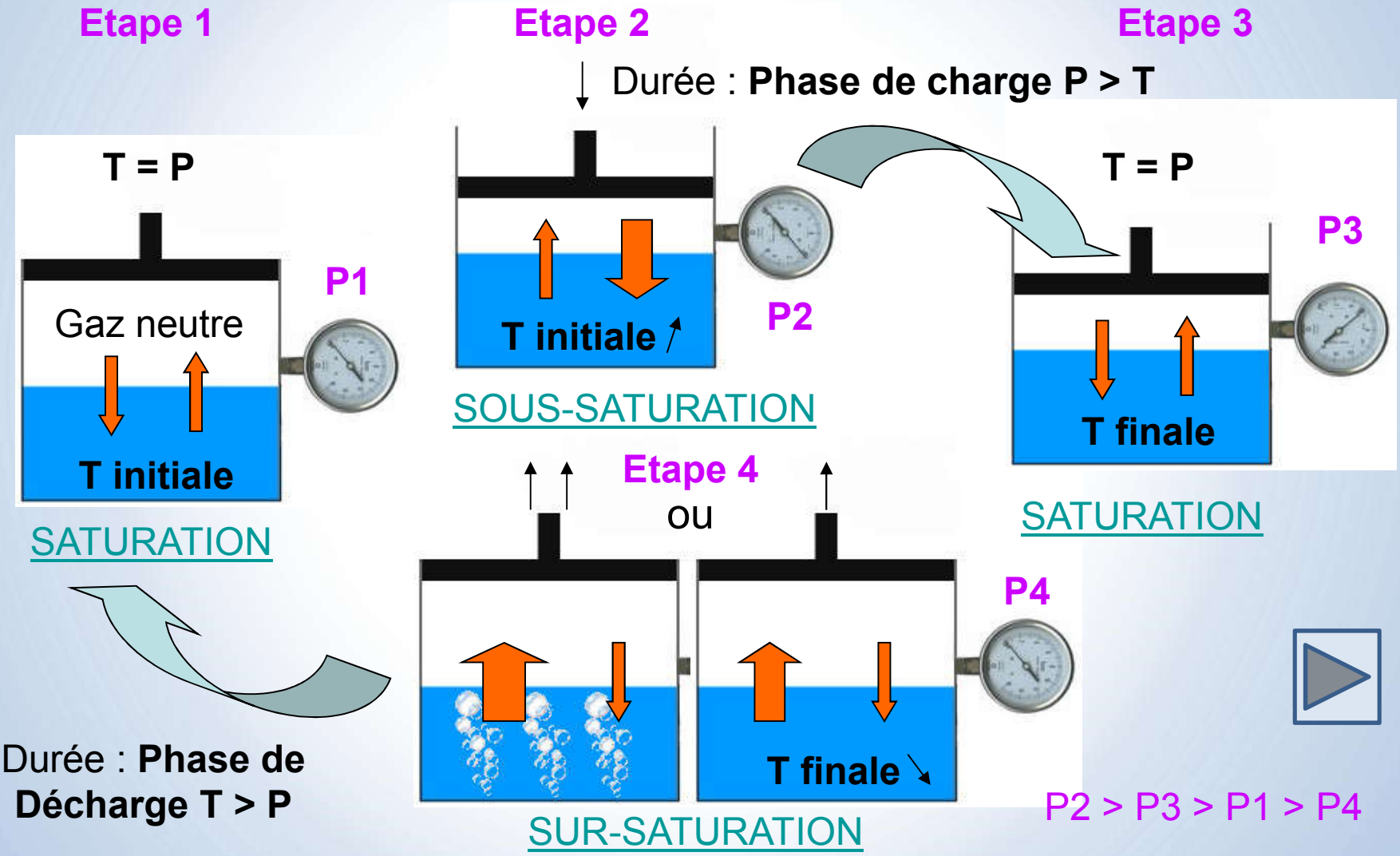
- Dans un mélange gazeux, chaque gaz se comporte comme s'il était seul : Pmélange = PpGaz1 + PpGaz2

- À température constante : si V⇘ , P⇗ et inversement
  (loi de Mariotte : P x V = Cste)

- À volume constant : si P⇗ , Temp⇗ et inversement
  (loi de Charles : P / T = Cste => voir utilisation des appareils sous pression)

- À pression constante : si Temp⇗ ,V⇗ et inversement
  (loi de Gay-Lussac : V / T = Cste => peu d'application en plongée)

Expérience physique



Commentaires sur l'expérience

- La pression du gaz dissous dans le liquide est appelée la **Tension (T)** du gaz

- Les échanges entre un gaz et la surface d'un liquide se font en permanence. Gaz neutre pour le liquide (inerte)

Étape 1 : état initial stable d'équilibre
Étape 3 : nouvel état stable d'équilibre

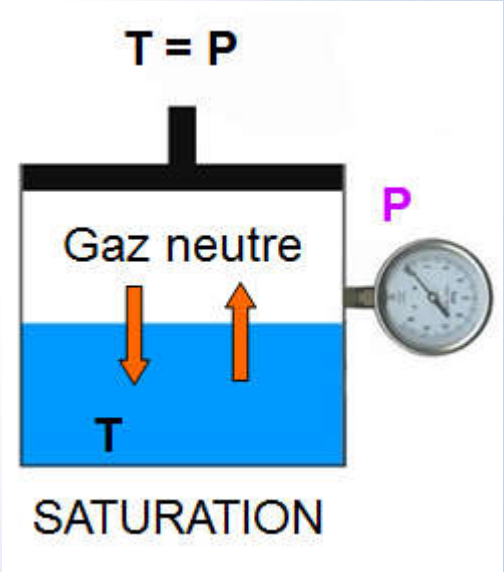
Si les conditions extérieures restent stables, il s'établit (au bout d'un certain temps) entre la pression du gaz au dessus du liquide (P) et la tension du gaz dans ce liquide (T)

un état d'équilibre appelé **saturation** : **P = T**

Bilan des échanges : nul

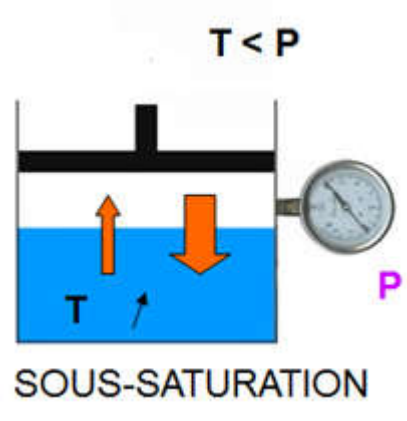
La quantité de gaz dissoute est fonction de la **solubilité** du gaz dans le liquide (capacité d'absorption en gaz du liquide) et de P

Remarque: P-T = 0
T/P = 1



Étape de diffusion du gaz: **Dissolution**

Étape 2 : Compression du gaz : **Phase de charge du liquide P > T**



Le liquide passe à un état de **sous-saturation**

Bilan des échanges : des molécules de gaz entrent dans le liquide jusqu'à atteindre un nouvel état de saturation

Remarque: P-T > 0
T/P < 1

Le temps mis pour atteindre un nouvel état de saturation dépend des caractéristiques du gaz et du liquide et des conditions du milieu ⇔ **facteurs de dissolution**

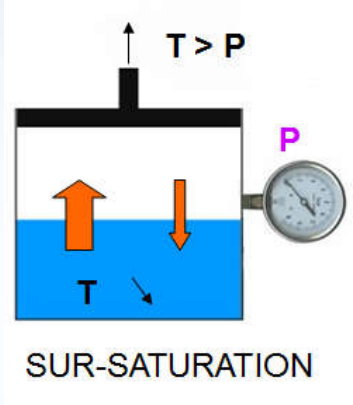
Étape de diffusion du gaz: **Désaturation**

Étape 4 : Décompression du gaz : **Phase de décharge du liquide P < T**

- Si la pression du gaz diminue le liquide passe en **sur-saturation**

Des molécules de gaz sous forme dissoute ou de microbulles vont alors s'échapper du liquide jusqu'à ce qu'il retrouve un nouvel état de saturation.

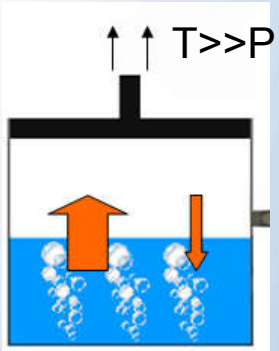
Remarque: P-T < 0
T/P > 1



- Si la pression du gaz diminue fortement (P << T) le liquide passe en **sur-saturation critique**

Si **l'écart T – P** ou si le **rapport T/P sont trop important**, de nombreuses bulles apparaissent au sein du liquide. ⇨ **dégazage anarchique**

Analogie : ouverture « maitrisée » ou « au sabre » d'une bouteille de champagne (dans laquelle T= P = ~ 5 bar)



SUR-SATURATION critique

Exemple : Azote dans l'eau
En laboratoire, matériel « propre » : bulles apparaissent pour T/P > 100
Liquide physiologique : bulles apparaissent pour T/P = ~ 2

Quelques mots clés à l'usage du plongeur

- **Pression** : La pression qu'un gaz exerce sur une surface est due aux chocs de ses molécules sur cette surface.

- **Dissolution** (d'un gaz dans un liquide): Processus par lequel un gaz mis au contact d'un liquide passe à l'état de solution.

- **Solubilité** (d'un gaz dans un liquide): faculté d'un gaz à se dissoudre dans un liquide. Désigne la quantité maximale de gaz qu'un liquide peut dissoudre à température donnée (qu'on peut appeler « **capacité d'absorption** »)

  exemple: 1 litre de plasma (à 37°C) peut dissoudre 13,4 ml d'Azote

  1 litre de plasma (à 37°C) peut dissoudre 8,7 ml d'Hélium

- **Saturation** (d'un liquide par un gaz):

  état d'un **liquide** ayant dissout la quantité maximale de **gaz** possible dans des conditions déterminées de température et de pression.

- **Désaturation:** fait d'enlever des atomes de gaz à un liquide saturé

- **Concentration** (d'un gaz dans un liquide): exprime le nombre de molécule de gaz par unité de volume du liquide.

- **Diffusion** : Au sens large la diffusion d'un gaz désigne un transfert de ce gaz d'un milieu où il est plus concentré vers un milieu où il est moins concentré afin de tendre vers un équilibre des concentrations. Pour nous plongeur: caractérise un échange par différence de pression

D'autres mots clés pour aller plus loin…

- Principe de la **Diffusion** : Un gaz diffuse toujours
  - d'une zone de pression élevée vers une zone de pression plus basse
  - jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint

- L'écart (P – T) « force motrice des échanges » est appelé **Gradient** de pression

- Le rapport T/P est appelé **Rapport de sursaturation**
  - ⇨ Doit être surveillé pendant la décompression
  - ⇨ Doit être maintenu < valeur critique pour éviter le dégazage anarchique

- Pendant les phases de **charge** et de **décharge**, la **vitesse de diffusion** est proportionnelle au **gradient** de pression (importante au départ puis nulle à l'équilibre) et dépend du gaz, du liquide et des conditions du milieu.

La loi de Henry

William Henry (1775 - 1836) physicien et chimiste britannique.

En 1803, il énonce la loi sur la dissolution des gaz dans les liquides, appelée Loi de Henry.

A saturation et à température constante, la concentration de gaz dissout dans un liquide est proportionnelle à la pression qu'exerce ce gaz sur le liquide.

$$C = s \times P$$

$$\underbrace{C/s}_{\text{Tension}} = P$$

Le rapport C/s représente la pression de gaz dissous appelée **Tension**

C: concentration du gaz dans le liquide
S: solubilité gaz / liquide à température donnée

Remarques :

- cette loi s'applique aux étapes de l'expérience pour lesquelles l'état d'équilibre (saturation) est atteint
- cette loi ne s'applique pas aux phases de charge (dissolution) et de décharge (désaturation) du liquide
- la capacité d'absorption d'un gaz par un liquide est liée à la pression absolue subie par le liquide
- la quantité réellement absorbée par le liquide est limitée par la pression partielle du gaz

Les facteurs de dissolution

Facteur
Température
Nature du gaz
Nature du liquide
Pression du gaz
Durée (jusqu'à saturation)
Surface d'échange
Agitation

Inclus dans la loi

Exemples de gaz : Azote – Hélium (gaz inertes dits parfaits: ne se combinent pas)

Exemples de liquide : Eau – Huile

Constats :

• eau chauffée (avant ébullition) : des bulles apparaissent : Temp. ⇗ Dissolution ⇘

• dans l'eau : Azote plus soluble que Hélium
(Mais l'hélium diffuse plus rapidement car plus léger)
exemples: 1 L d'eau à 25°C peut dissoudre:
15 ml d'azote ou 9 ml d'hélium ou 843 ml de gaz carbonique

• dans l'huile : solubilité du gaz augmente
exemples: 1 L d'huile à 37°C peut dissoudre:
67 ml d'azote ou 16,8 ml d'hélium

• Agitation: analogie avec le sucre dans l'eau : plus on « touille » plus la dissolution est rapide

Et la plongée ?!

- Grace à son détendeur, le plongeur respire de l'air (en général !) à pression ambiante

- L'air est un mélange gazeux – Composition ?

Composition de l'air

Azote	(N_2)	78,084%
Oxygène	(O_2)	20,946%
Argon		0,934%
Gaz carbonique	(CO_2)	0,033%
Gaz rares:		0,003%
néon		
hélium		
krypton		
Hydrogène		
xénon		
Radon		
Oxyde de carbone		
méthane		

Utilisation Simplifiée :

N_2 ⇔ 80% ou **79%**

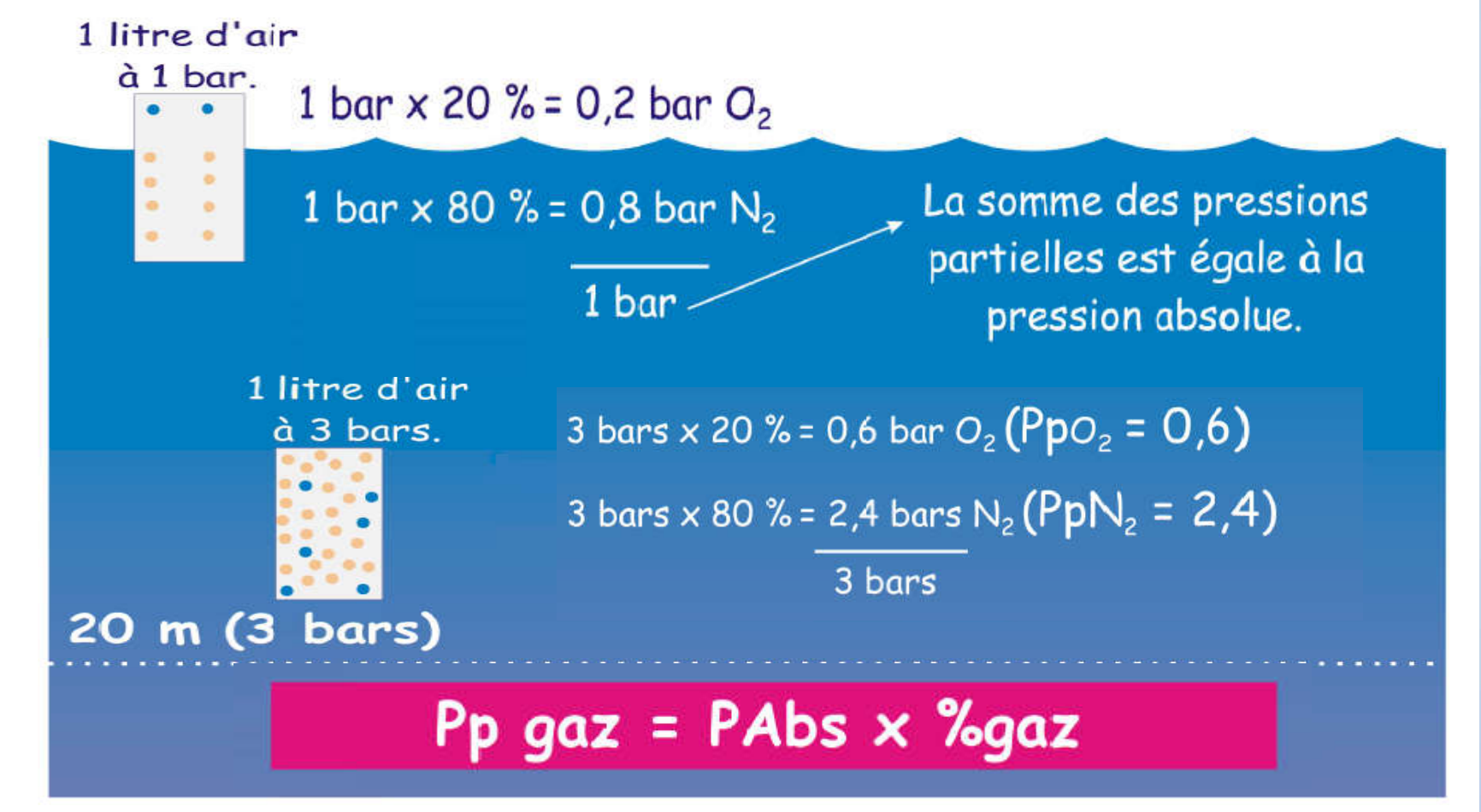
O_2 ⇔ 20% **21%**

Dissolution du mélange Air :

N_2 ⇔ gaz inerte dissous dans l'organisme

O_2 ⇔ utilisé par l'organisme
Très peu dissous (combiné) :
non pris en compte

Quelques rappels: calcul d'une pression partielle



Applications numériques

- 1- Quelle est la tension de N_2 dissoute dans notre corps en ce moment (nous n'avons pas plongé aujourd'hui!)?

- 2- Un plongeur vit à saturation dans une maison sous la mer à une profondeur de 25 m : quelle est la tension de N_2 dissoute dans son corps?

Corrections

Hypothèses: Patm = 1 bar – AIR: 20% O_2 + 80% N_2

Rappel : Règle de Dalton : PpN_2 inspirée = Pabs x $\%N_2$

1- : PpN_2 inspirée = 1 x 80/100 = 0,8 bar

État d'équilibre : $TN_2 = PpN_2$ => TN_2 = 0,8 bar

2- : à 25 m Pabs = 3,5 bar

PpN_2 inspirée = 3,5 x 80/100 = 2,8 bar

État d'équilibre : $TN_2 = PpN_2$ => TN_2 = 2,8 bar

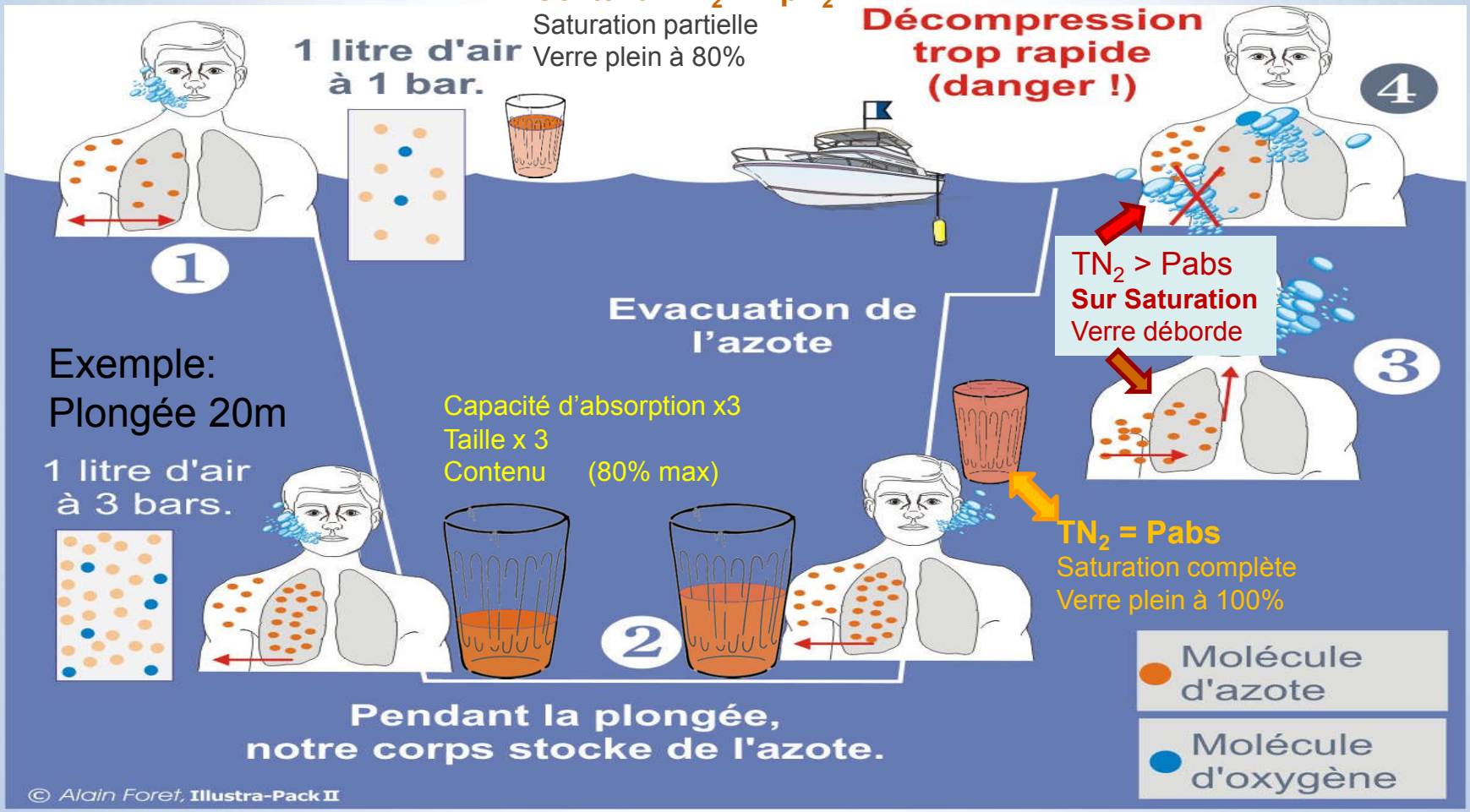
Dissolution et plongée

Taille verre = capacité d'absorption à Pabs = 1b

Contenu: **TN_2 = PpN_2**

Saturation partielle

Verre plein à 80%

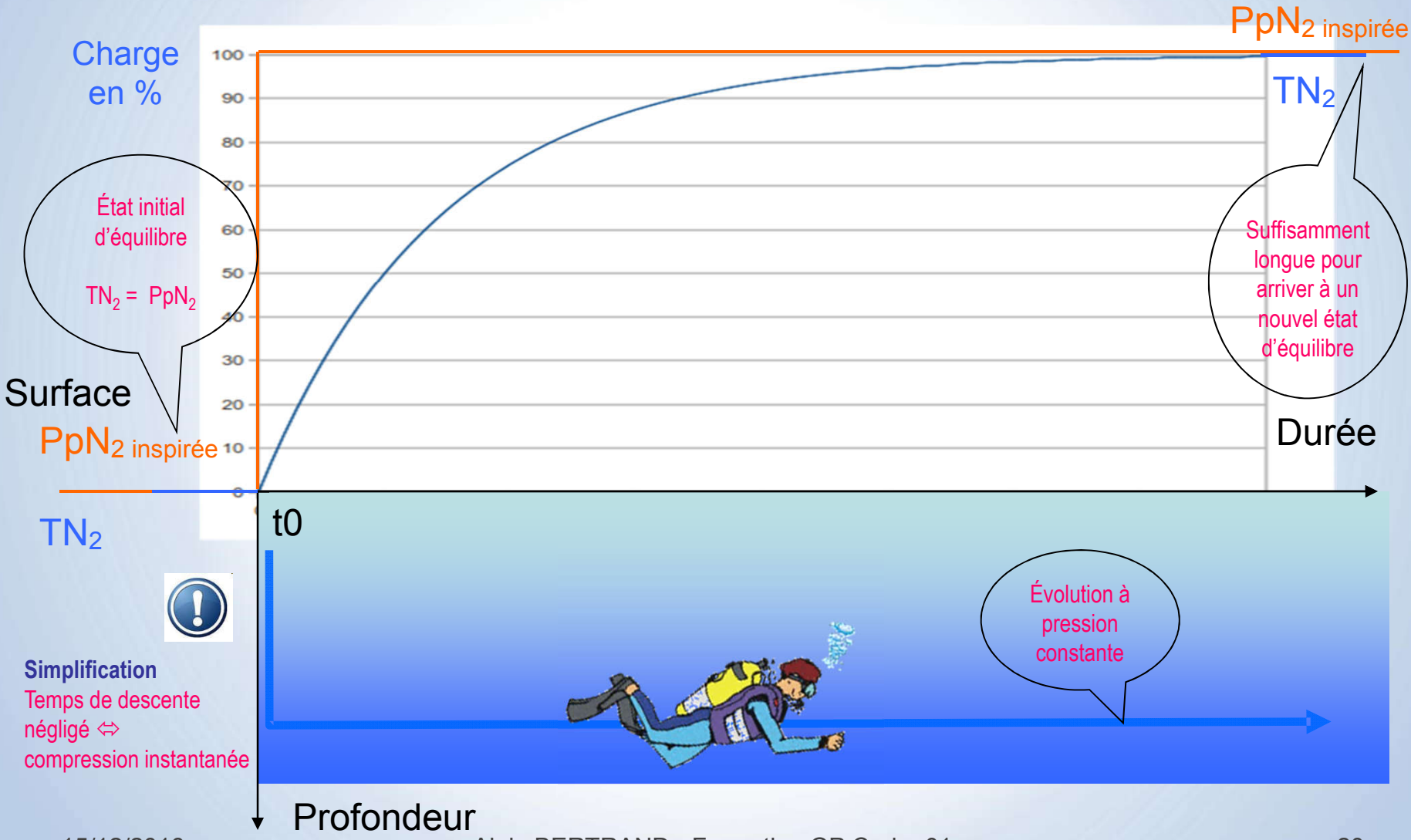


Les facteurs de dissolution appliqués au plongeur

Facteur	En plongée	La dissolution augmente si :
Température	Température corps humain (régulée à ~37°C)	La température diminue (hypothermie)
Nature du gaz	Gaz dissous = diluant = Azote (+ Hélium si trimix)	La solubilité : celle de l'azote est supérieure à celle de l'hélium (corrélation avec l'effet narcotique)
Nature du liquide	Le corps humain est composé à ~ 65% d'eau – la répartition diffère selon les organes & tissus	la solubilité de l'azote n'est pas identique dans tous les tissus
Pression du gaz	Profondeur	La profondeur
Durée (jusqu'à saturation)	Durée d'immersion – en plongée sportive l'état de saturation totale n'est jamais atteint	Temps de plongée
Surface de contact	Poumon – tissus physiologiques à travers la vascularisation	La vitesse de diffusion pour les tissus mieux vascularisés
Agitation	effort : Palmage, courant…	Augmentation rythme respiratoire Débit sanguin, perfusion

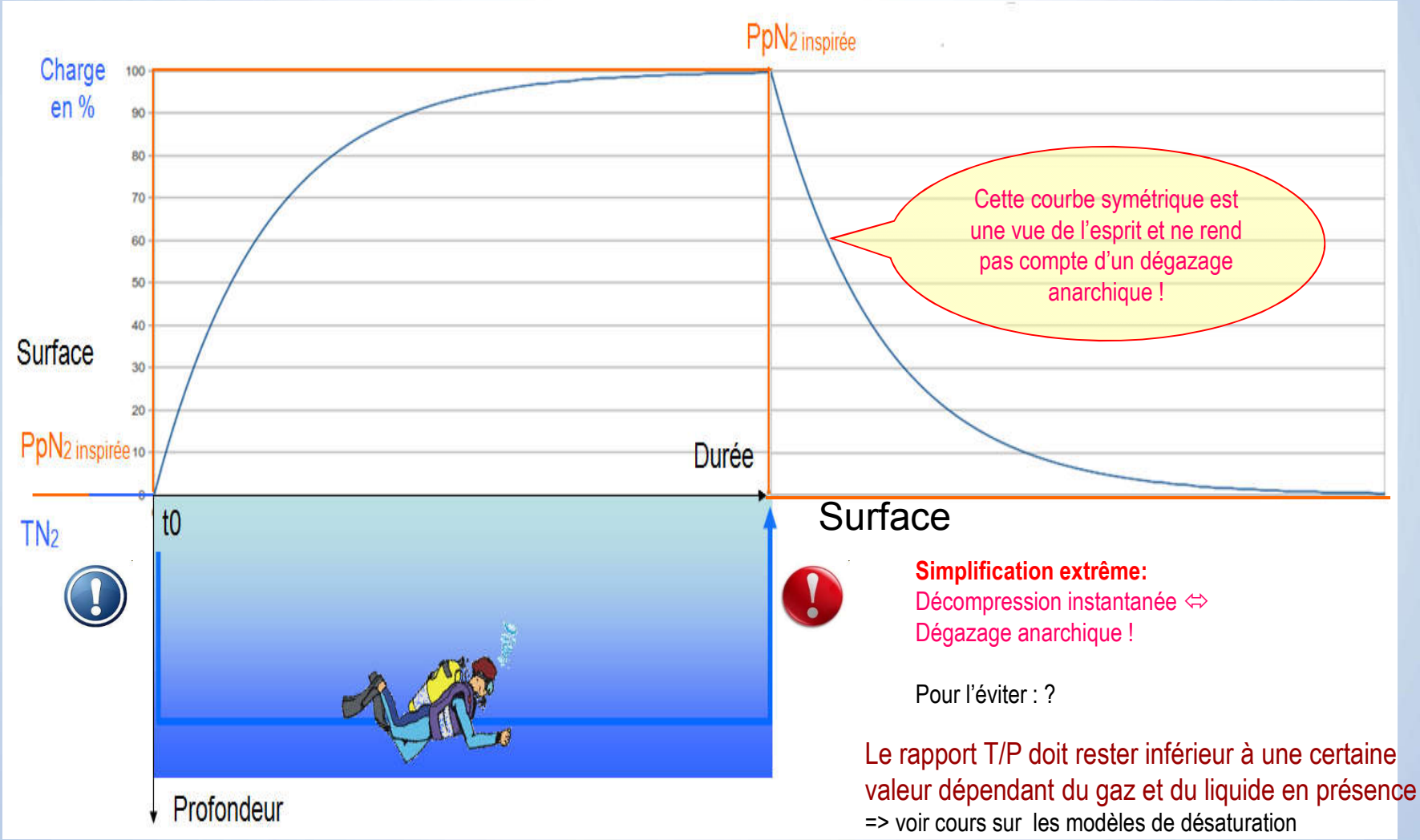
Surligné jaune : les facteurs variables

Courbes: Dissolution



Simplification
Temps de descente négligé ⇔ compression instantanée

Courbes : Dissolution + désaturation



Simplification extrême:
Décompression instantanée ⇔
Dégazage anarchique !

Pour l'éviter : ?

Le rapport T/P doit rester inférieur à une certaine valeur dépendant du gaz et du liquide en présence
=> voir cours sur les modèles de désaturation

Remarques

- La **désaturation** commence pendant la décompression et continue bien **au-delà du retour surface** (prise en compte de l'azote résiduel pour les plongées successives).

- Révision: combien de temps faut-il pour revenir à une plongée simple selon les MN90 ?

- La respiration d'O_2 pur
  - Dès le palier de 6m à la remontée
  - Ou en surface après la plongée

  améliore la désaturation de l'azote (dénitrogénation) puisque PpN_2 inspirée = 0.

  (application: Oxygénothérapie et cours sur l'utilisation particulière des tables)

Conclusion et perspectives

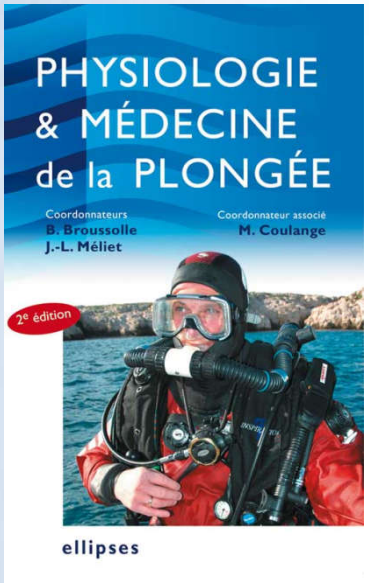
La loi de Henry joue un rôle primordial en plongée :

- Elle permet de déterminer quelle serait la tension de gaz dissous dans les liquides à l'état de saturation et donc de déterminer un état initial et un état final à atteindre.

- La dissolution et la désaturation : phases de charge et de décharge entre deux états de saturation sont directement liées au gradient de pression subi (sera vu avec la loi de Haldane qui s'appuie sur la loi de Henry lors du cours sur les modèles de désaturation).

- Pour compléter notre compréhension des phénomènes de dissolution, il faudra appréhender les mécanismes liés aux échanges gazeux au travers du système respiratoire et du système cardio-vasculaire du plongeur, … et s'atteler à la prévention des risques liés à la décompression objet des prochains cours.

Bibliographie



Les dessous de la décompression

Par jean-marc Belin, juin 2002
jmbelin@ifrance.com

mise à jour du 6 novembre 2002

Les rudiments de décompression enseignés pour la pratique de la plongée à l'air sont généralement suffisants pour la pratique de l'activité.

Mais lorsqu'on pratique la plongée aux mélanges, la plongée souterraine ou lorsqu'on est tout simplement curieux, la recherche d'informations concernant la décompression n'est pas une quête facile. L'information est très disséminée, les ouvrages de références ne sont plus édités et, lorsqu'on les trouve, ils sont principalement l'œuvre d'auteurs Anglophones.

Il est vrai que dans ce domaine, la France vit sur des acquis rassurants mais le temps des pionniers comme Paul Bert est révolu et les travaux des prestigieuses sociétés industrielles comme CG Doris ou Comex ne sont guère transposables à la plongée loisir. Il est d'ailleurs étonnant de voir que les progrès accomplis dans ce domaine sont dus à des individualités hors du commun comme la plongeur Spéléo Jochen Hassenmayer qui, avec deux plongées à –140m et à –202m à Fontaine de Vaucluse au début des années 1980, montrait à la communauté des plongeurs profonds la possibilité d'utiliser des mélanges ternaires à l'hélium pour la plongée "loisir".

Actuellement, l'information la plus récente en terme de technique et d'expérience se trouve de l'autre coté du Channel ou de l'Atlantique.

Ce document débute avec des explications de base. Viennent ensuite des informations beaucoup plus détaillées s'appuyant sur une compilation de différents articles issus de traductions. Certains de ces articles élémentaires ont d'ailleurs déjà été diffusés dans le passé. Les sources sont citées sur chaque traduction.

Il est évident qu'aucun document, aussi épais soit-il, ne peut prétendre à résumer toute la connaissance actuelle sur la décompression. Mais je pense que le lecteur trouvera ici l'essentiel de l'information pratique disponible actuellement.