

TRAVAUX HYPERBARES SANS IMMERSION

Jean-Claude Le Péchon
Ingénieur Conseil
hyperbaricjp@orange.fr
<http://jclp-hyperbarie.fr>



Tunnelier pour le Tram de Strasbourg -1992-

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

1

TRAVAUX HYPERBARES SANS IMMERSION

- 1 - L'hyperbarie, Généralités, Histoire
- 2 - Évaluation des risques et sécurité
- 3 - Quelques conséquences réglementaires
- 4 - Conclusions

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

2

Travaux hyperbares sans immersion

1 - L'hyperbarie : Généralités et Histoire

- Les mesures de pression sont en bars relatifs (manomètre)
- Les pressions partielles sont exprimées en bar
- Les pressions absolues sont notées $bar_{(a)}$

Le vocabulaire de plongée est proscriit

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

3

1 - L'hyperbarie : Généralités et Histoire (suite...)

1.1 - Qui sont les professionnels concernés ?

Les Scaphandriers et les plongeurs professionnels



CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

4

Qui sont les professionnels concernés ? (suite...)

Les Scaphandriers et les plongeurs professionnels
Les tubistes (tunnels, avions, centrales nucléaires)

Qui ne sont pas des plongeurs !



Groenehart - The Netherlands



Changement d'outil - BPNL - Lyon


CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

5

Qui sont les professionnels concernés ? (suite...)

Les Scaphandriers et les plongeurs professionnels
Les tubistes (tunnels, avions, centrales nucléaires)
Les hyperbaristes domaine de la santé (OHB)

Ils interviennent notamment pour traiter les accidents de décompression



CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

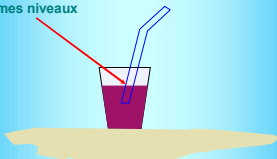
6

1 - L'hyperbarie : Généralités et Histoire (suite...)

1.2 - Travaux souterrains hyperbares
Comment cela fonctionne-t-il ?

Principe de la paille et du verre de vin

Mêmes niveaux



CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

7

1.2 - Comment cela fonctionne-t-il ? (suite...)

Principe de la paille et du verre de vin

La pression règle le niveau d'eau



CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

8

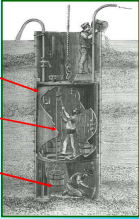
1 - L'hyperbarie : Généralités et Histoire (suite...)

1.3 - Machine de Triger (1841)

Tube

Sas d'accès

Zone de travail pressurisée au sec



CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

9

1.3 - Machine de Tiger (1841) (suite...)

Applications (1850 - 1910)

- Mines de charbon (3,15 bars - Douchy)
- Piles de ponts (3 bars - Bayonne)
- Tunnels

Conséquences sur la santé catastrophiques !

Interdit aux femmes - Moralité

1887 1905

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

10

1 - L'hyperbarie : Généralités et Histoire (suite...)

1.4 - Les sources du progrès

Les réponses de Paul BERT (1878)

- La compression
- Le séjour sous pression
- La décompression

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

11

1.4 - Les sources du progrès (suite...)

Haldane (1908) Décompression

Modélisation « Haldanienne »

Première vraie table de décompression

Bornstein A. et A. (1910 - 1921)

Tunnel de l'Elbe 3,4 bars - 1907-1910

Propose la décompression à l'**oxygène**

Recompression d'urgence avec **oxygène**

Description de la **nécrose osseuse dysbarique**

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

12

Bornstein A. et A. (suite...)

Abb. 18: Vortrieb einer Tunnelröhre

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

13

1.4 - Les sources du progrès (suite...)

Évolution dans le monde au XXème siècle

- Toujours beaucoup (trop) de « bends » (de 1 à 5%)
- Nécrose osseuse fréquente (Registry au Royaume Uni)
- Hempleman publie les tables de Blackpool - UK (1972)
- Susbielle et Cabarrou publient des tables tubistes en 1974 pour le RER - Décret 1974
- Décret de 1990, Nouveau jeu de tables Min. Trav. 92

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

14

1 - L'hyperbarie : Généralités et Histoire (suite...)

1.5 - Les techniques possibles

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

15

1.5 - Les techniques possibles (suite...)

Tunnelier à pression d'air

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

16

1.5 - Les techniques possibles (suite...)

Roue de coupe Bulle d'air Sas de transfert

Air comprimé

Bentonite

TBM

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

17

1 - L'hyperbarie : Généralités et Histoire (suite...)

1.6 - Qu'est-ce qu'un tunnelier (TBM)

Tunnelier à pression de terre

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

18

1 - L'hyperbarie : Généralités et Histoire (suite...)

1.2 – Pourquoi travailler sous pression en tunnelier ?

Inspecter et changer les outils de coupe ou même réparer la roue

Tunnelier à pression de boue

CODEP 67 - Travaux hyperbares – 20 janvier 2024

19

1 - L'hyperbarie : Généralités et Histoire (suite...)

1.7 – Comment accéder à la roue de coupe ?

Remplacer le terrain ou la bentonite par de l'air comprimé
Utiliser un sas pour comprimer les techniciens tubistes

CODEP 67 - Travaux hyperbares – 20 janvier 2024

20

Travaux hyperbares sans immersion

1 - L'hyperbarie : Généralités et Histoire

2 - Évaluation des risques et sécurité

CODEP 67 - Travaux hyperbares – 20 janvier 2024

21

2 - Évaluation des risques et sécurité (suite...)

2.1 - La situation hyperbare est exceptionnelle !

DANGER → ACCIDENT → HOMME

PREVENTION PAR PROCEDURES PREVENTION PAR BARRIERES

PRESSION L'HOMME EST DIRECTEMENT EXPOSE → ZERO ACCIDENT ? → RECOURS → ZERO DOMMAGES

CODEP 67 - Travaux hyperbares – 20 janvier 2024

22

2 - Évaluation des risques et sécurité (suite...)

2.2 - Risques hyperbares liés à la physiologie

MARIOTTE (CHANGEMENT VOLUME) → BAROTRAUMATISMES (Drilles, Sinus, Estomac, Surpression) → Presque comme en plongée

RESPIRATION EQUIPRESSION → Pas de boisson gazeuse

CODEP 67 - Travaux hyperbares – 20 janvier 2024

23

2 - Risques hyperbares liés à la physiologie (suite...)

BOYLE-MARIOTTE (CHANGEMENT VOLUME) → BAROTRAUMATISMES (Aptitude, Formation, Procédure)

MASSE VOLUMIQUE → Hélium

RESPIRATION EQUIPRESSION → L'augmentation de masse volumique diminue la capacité respiratoire, et limite la capacité physique. Jusqu'à vers 1.8 bar, pratiquement pas de problèmes.

Pour les fortes pressions on change le gaz en introduisant de l'hélium (au-delà de 3.5 bars ! ?)
Recommandation AITES
Réglementation Française 5 bars !

CODEP 67 - Travaux hyperbares – 20 janvier 2024

24

2 - Risques hyperbares liés à la physiologie (suite...)

BOYLE-MARIOTTE (CHANGEMENT VOLUME) → BAROTRAUMATISMES (Drilles, Sinus, Estomac, Surpression)

MASSE VOLUMIQUE → Hélium

RESPIRATION EQUIPRESSION

PRESSIONS PARTIELLES

DALTON

CODEP 67 - Travaux hyperbares – 20 janvier 2024

25

2 - Risques hyperbares liés à la physiologie (suite...)

LOI DE DALTON

$F/S = P(a) = P + 1$

$P_1 + P_2 = P(a)$

Concentration de [I] : $C_{(i)} = P_i / P(a)$
et $P_i = P(a) \times C_{(i)}$

DALTON

CODEP 67 - Travaux hyperbares – 20 janvier 2024

26

Loi de Dalton (suite...)

Triangle magique

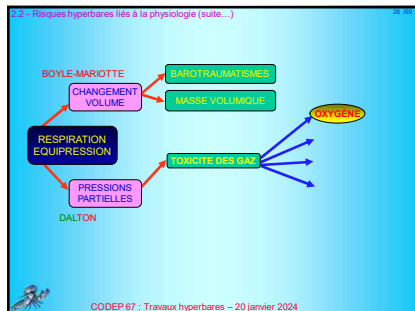
$\frac{PO_2}{P} = [O_2]$

[O₂] = Concentration décimale ou fraction

Ce sont les pressions partielles qui conditionnent la physiologie des gaz respirés

CODEP 67 - Travaux hyperbares – 20 janvier 2024

27



28

TOXICITES DE L'OXYGENE

Les fortes pressions partielles d'oxygène sont toxiques pour toutes les cellules vivantes (Paul Bert 1878)

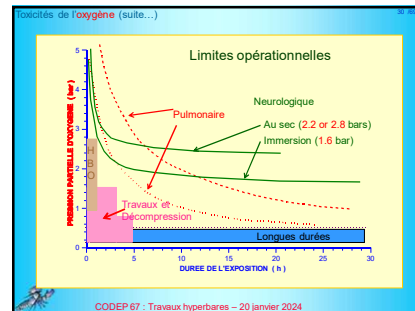
Le délai d'apparition des troubles est variable selon les espèces, les cellules ou organes concernés, et la pression partielle d'oxygène

Chez l'homme, les deux premiers organes cibles sont :

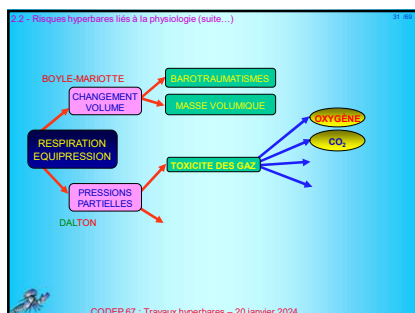
- Le cerveau (Effet Paul Bert - 1878) Risque convulsions
- Le poumon (Effet Lorrain-Smith - 1899) Risque pneumonie

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

29



30



31

TOXICITE DU GAZ CARBONIQUE

CONCENTRATION Pour P = 1 bar(s)	PRESSION PARTIELLE Quelque soit P	OBSERVATIONS
0 à 1 %	0 à 10 hPa	Pas d'effet notable
1 à 2 %	10 à 20 hPa	Effet très faible Ventilation légèrement accrue
2 à 3 %	20 à 30 hPa	Inconfort respiratoire, ventilation accrue au travail.
> 3 %	> 30 hPa	Hyperventilation, bouffées de chaleur, maux de tête au retour à PCO ₂ normal
> 5 %	> 50 hPa	Dyspnée, maux de tête, perte de connaissance possible

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

32

Toxicité du gaz carbonique (suite...)

En décompression, le gaz carbonique à forte pression partielle accroît le risque d'accident de décompression

Dans les sas lors des décompressions à l'air, il convient de bien contrôler la pression partielle de gaz carbonique :

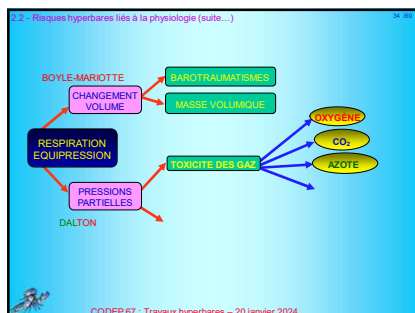
Ventilation avec un air non contaminé

Analyse en général à l'extérieur mais [CO₂] sert à calculer la pression partielle PCO₂

PCO₂ < 10 hPa

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

33



34

TOXICITE DE L'AZOTE

« Narcose à l'Azote » « Ivresse des profondeurs »

La narcose à l'azote est liée à la pression partielle d'azote (PN₂ > 4 bars)

Donc jusqu'à 3 bars pas de problème trop sérieux

Les symptômes

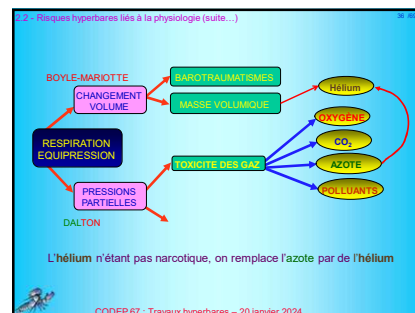
- Performances intellectuelles réduites,
- Mémoire immédiate affectée,
- Doubles tâches difficiles
- Mais aussi : habitude parfois possible

Ils sont progressifs avec l'accroissement de PN₂

Il en résulte une limite pratique pour l'air comprimé entre 3,5 et 5 bars maximum (selon les tâches à effectuer).

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

35



36

2.2 - Risques hyperbares liés à la physiologie (suite...)

Valeurs Limites d'Exposition des polluants

Il existe des seuils réglementaires pour les VOC (Composés Organiques Volatiles)

Valeur Limite d'Exposition (VLE): **15 minutes...**

Valeur Moyenne d'Exposition (VME): **8 heures par jour**

Il s'agit soit de ppm, donc établies pour P = 1 bar(a)
soit de mg/m³

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

37

2.2 - Risques hyperbares liés à la physiologie (suite...)

Critères de qualité de l'air comprimé

La qualité de l'air comprimé stocké ne suffit pas pour qualifier la qualité de l'atmosphère respirée.

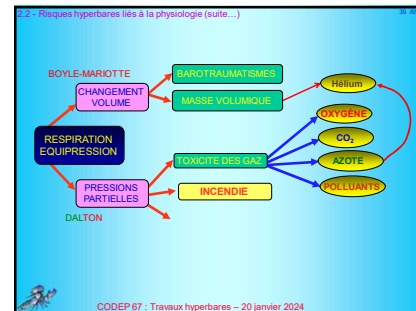
La qualité de l'atmosphère hyperbare peut être altérée par :

- La production de polluants par l'activité (CO)
- Des polluants provenant du terrain (H₂S - Kérosène)
- L'insuffisance de ventilation (CO₂)

Un contrôle par analyse peut être indispensable...

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

38



39

2 - Evaluation des risques et sécurité (suite...)

2.3 - Risque d'incendie

Combustion

Amorçage

COMBUSTIBLE + OXYGÈNE → CO₂ + → Chaleur

La disponibilité de l'oxygène est liée à PO₂, FO₂ et PN₂

De plus l'incendie peut être à l'INTÉRIEUR ou à l'EXTÉRIEUR de la zone hyperbare

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

40

2.3 - Risque d'incendie (suite...)

Effet barbecue

PO₂ << 0,2 b → BARBECUE

PO₂ = 0,2 b → FORGE

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

41

2.3 - Risque d'incendie (suite...)

Effet barbecue en hyperbarie

1 + 1 b

AIR PO₂ = 0,4 b

PO₂ > 0,2 b

FORGE? → EAU

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

42

2.3 - Risque d'incendie (suite...)

Mesures de prévention incendie

Contrôler les combustibles (graisses dans les sas...)

Contrôler le comburant : **L'OXYGÈNE**

Fuites masques respiratoires - contrôle analytique [oxygène] < 25 %

Précautions extrêmes pour soudage (vêtements ignifugés, jet d'eau)

Électricité: pas de mesures particulières (par rapport à P = 1 bar_{atm})

Adapter les précautions dans la galerie (permis de feu !)

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

43

2.3 - Risque d'incendie (suite...)

Formation !

Température de flamme élevée

Pression : 1 bar

Pas d'explosion

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

44

2.3 - Risque d'incendie (suite...)

Mesures de prévention incendie dans la galerie

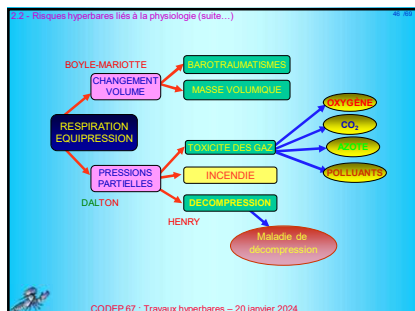
Refuge non hyperbare (24 h)

MA1148

MINESAFE

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

45



46

Gaz inerte et oxygène

La décompression est donc liée aux gaz inertes...

L'oxygène est essentiel car il permet de réduire la dose de gaz inerte inspirée

L'utilisation principale est la décompression avec respiration d'oxygène aux paliers

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

47



48

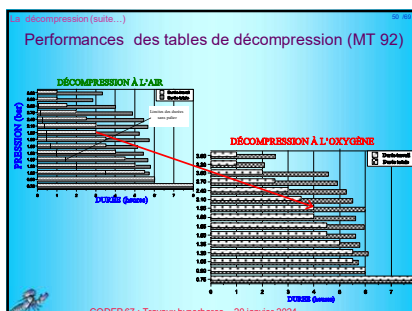
Les procédures de décompressions «tubistes»

Les tables de « plongée » ne conviennent pas :

- Pas d'immersion donc port du poids, décompression au sec
- Durées de travail beaucoup trop courtes
- Population concernée différente
- Effort fourni beaucoup plus intense

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

49



50

EXEMPLE DE TABLE AVEC PALIER À L'OXYGÈNE (MT 92)

Pression de travail : 1,95 bar

Temps travail	Aller-1er Palier	AIR 1,2 b	OXY 0,9 b	OXY 0,6 bar	TOTAL DECOMP.	TOTAL INTERVENTION
0h30 - 1h	6 min		10		16 min	1h 16
1h 30	4 min	5	15		24 min	1h 54
2h 00	4 min	10	15	5-10	44 min	2h 44
2h 30	4 min	15	10	5-25	59 min	3h 29
3h 00	4 min	20	5	5-25	79 min	4h 19
3h 30	4 min	25	5	5-25	99 min	5h 09
4h 00	4 min	35	5	5-25	119 min	5h 59

Oxygène (pointing to OXY columns)

Air (pointing to AIR column)

Table de rattrapage : + 30 min.

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

51

Facteurs favorisant les accidents de décompression

- La fatigue et la condition physique insuffisante (aptitude)
- Pression partielle de CO₂ élevée pendant les paliers
- Les interventions successives (intervalle 12 heures minimum)
- La déshydratation (boire abondamment pendant intervention et décompression)
- L'exercice intense après la fin de la décompression
- Le vol en avion après intervention (attente 24 h)

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

52

Prise en charge d'une victime de la décompression

- Consignes claires pour le personnel (sur site et à domicile)
- Caisson de recompression d'urgence et opérateur sur le site
- Médecin hyperbariste d'astreinte par téléphone

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

53

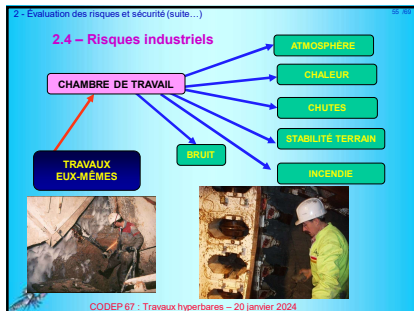
Prise en charge d'une victime d'accident grave en pression

Procédure écrite - Manuel de sécurité

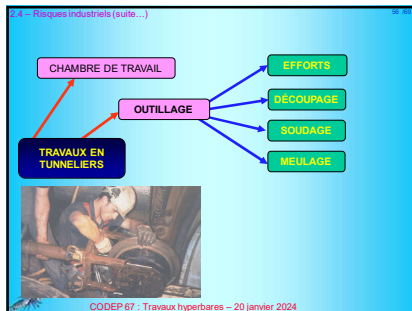
- Levage d'un brancard dans la chambre de travail
- Passage d'un brancard dans les sas
- Equipe de secours, formée aux interventions sous pression
- Gestion de la décompression; victime et sauveteurs
- Disposer d'une table de décompression séjour très long
- Simulation sur site au début des interventions hyperbares

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

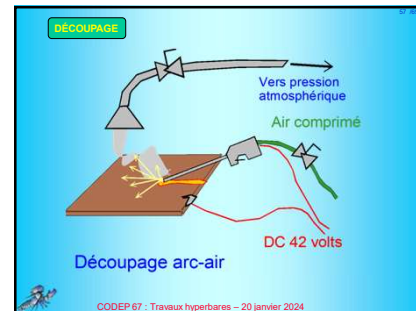
54



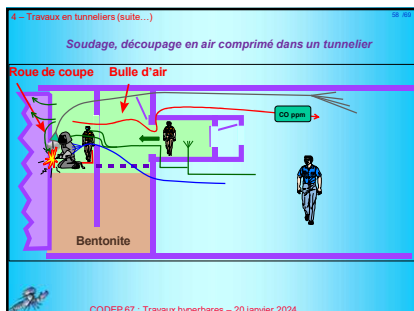
55



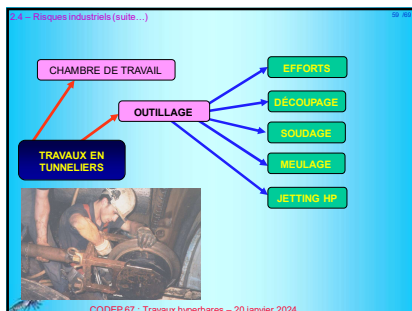
56



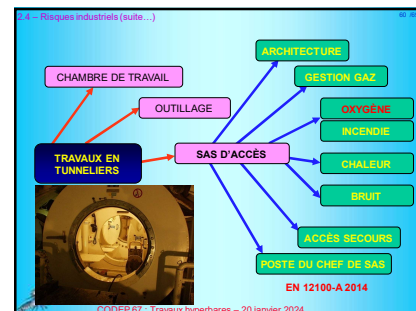
57



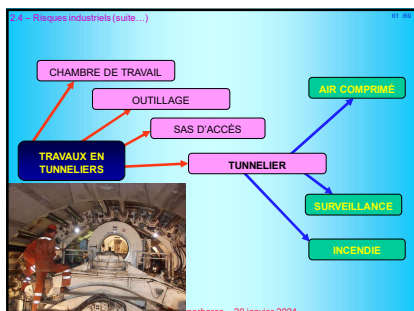
58



59



60



61

2.4 - Risques industriels (suite...)

A l'issue de l'évaluation des risques, Un **Manuel de Sécurité Hyperbare** doit être rédigé

Fonctions et Responsabilités

Qualité des gaz (air comprimé, atmosphères, autres gaz)

Procédure d'utilisation des sas

Procédures d'intervention et tables de décompression

Procédures d'utilisation des outillages sous pression

Procédures de secours; rapport accident / presque accident

C'est aussi un manuel pédagogique de formation des personnels

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

62

Travaux hyperbares sans immersion

1 - L'hyperbarie, Généralités, Histoire

2 - Évaluation des risques

3 - Quelques conséquences réglementaires
(françaises...)

CODEP 67 - Travaux hyperbares - 20 janvier 2024

63

