

**LES ATMOSPHERES CONFINEES KARSTIQUES
ET AUTRES GAZ DES CAVERNES**

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN MEDECINE

présentée et soutenue publiquement le 29 Mai 1990

par

Jean-Michel OSTERMANN

Né le 19 Mai 1960 à RABAT (MAROC)

EXAMINATEURS DE LA THESE

Monsieur le Professeur	MENIER	Président
Monsieur le Professeur	BONNAUD	Juge
Monsieur le Professeur	DESPROGES-GOTTERON	Juge
Monsieur le Professeur	DUMONT	Juge
Monsieur	RENAULT, Docteur ès-Sciences, Université de Lyon I	Membre invité

U N I V E R S I T E D E L I M O G E S

F A C U L T E D E M E D E C I N E

- DOYEN DE LA FACULTE : Monsieur le Professeur BONNAUD
- ASSESSEURS : Monsieur le Professeur PIVA
Monsieur le Professeur COLOMBEAU

PERSONNEL ENSEIGNANT

. PROFESSEURS DES UNIVERSITES

ADENIS Jean-Paul	Ophtalmologie
ALAIN Luc	Chirurgie infantile
ARCHAMBEAUD Françoise	Médecine interne
ARNAUD Jean-Paul	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BARTHE Dominique	Histologie, Embryologie
BAUDET Jean	Clinique obstétricale et Gynécologie
BENSAID Julien	Clinique médicale cardiologique
BONNAUD François	Pneumo-Phtisiologie
BONNETBLANC Jean-Marie	Dermatologie
BOULESTEIX Jean	Pédiatrie
BOUQUIER Jean-José	Clinique de Pédiatrie
BRETON Jean-Christian	Biochimie
CAIX Michel	Anatomie
CATANZANO Gilbert	Anatomie pathologique
CHASSAIN Albert	Physiologie
CHRISTIDES Constantin	Chirurgie thoracique et cardiaque
COLOMBEAU Pierre	Urologie
CUBERTAFOND Pierre	Clinique de Chirurgie digestive
de LUMLEY WOODYEAR Lionel	Pédiatrie
DENIS François	Bactériologie-Virologie
DESCOTTES Bernard	Anatomie
DESPROGES-GOTTERON Robert	Clinique thérapeutique et rhumatologique
DUDOGNON Pierre	Rééducation fonctionnelle
DUMAS Michel	Neurologie
DUMAS Jean-Philippe	Urologie
DUMONT Daniel	Médecine du Travail
DUNOYER Jean	Clinique de Chirurgie ortho- pédique et traumatologique
DUPUY Jean-Paul	Radiologie
FEISS Pierre	Anesthésiologie et Réanimation chirurgicale
GAROUX Roger	Pédopsychiatrie
GASTINNE Hervé	Réanimation médicale
GAY Roger	Réanimation médicale
GERMOUTY Jean	Pathologie médicale et respiratoire
GUERET Pascal	Cardiologie et Maladies vasculaires

LABADIE Michel	Biochimie
LABROUSSE Claude	Rééducation fonctionnelle
LAUBIE Bernard	Endocrinologie et Maladies métaboliques
LEGER Jean-Marie	Psychiatrie d'Adultes
LEROUX-ROBERT Claude	Néphrologie
LIOZON Frédéric	Clinique médicale A
LOUBET René	Anatomie pathologique
MALINVAUD Gilbert	Hématologie
MENIER Robert	Physiologie
MERLE Louis	Pharmacologie
MOREAU Jean-Jacques	Neurochirurgie
NICOT Georges	Pharmacologie
OLIVIER Jean-Pierre	Radiothérapie et Cancérologie
OUTREQUIN Gérard	Anatomie
PECOUT Claude	Chirurgie orthopédique et traumatologique
PESTRE-ALEXANDRE Madeleine	Parasitologie
PILLEGAND Bernard	Hépatologie-Gastrologie- Entérologie
PIVA Claude	Médecine légale
RAVON Robert	Neurochirurgie
RIGAUD Michel	Biochimie
ROUSSEAU Jacques	Radiologie
SAUVAGE Jean-Pierre	Oto-Rhino-Laryngologie
TABASTE Jean-Louis	Gynécologie-Obstétrique
TREVES Richard	Thérapeutique
VALLAT Jean-Michel	Neurologie
VANDROUX Jean-Claude	Biophysique

SECRETAIRE GENERAL DE LA FACULTE - CHEF DES SERVICES ADMINISTRATIFS

CELS René

A NOTRE PRESIDENT DE THESE

Monsieur le Professeur R.MENIER
Professeur des Universités de Physiologie
Biologiste des Hopitaux

Vous avez suivi notre travail avec beaucoup de
patience.

Veillez trouver ici l'expression de toute notre
reconnaissance.

A NOTRE JURY

Monsieur le Professeur F.BONNAUD
Professeur des Universités de Pneumologie
Médecin des Hopitaux
Doyen de la Faculté de Médecine

Vous avez accepté très aimablement de siéger à notre jury, soyez en vivement remercié.

Monsieur le Professeur R.DESPROGES-GOTTERON
Professeur des Universités de Clinique Thérapeutique
et Rhumatologique,
Médecin des Hopitaux
Chef de Service
Correspondant de l'Académie Nationale de Médecine

Vous avez bien voulu accepter de juger ce travail, recevez ici nos plus vifs remerciements.

Monsieur le Professeur J.DUMONT
Professeur des Universités de Médecine du Travail
Médecin des Hopitaux

Nous vous remercions vivement d'avoir orienté nos premières démarches dans ce travail et aimablement accepté de le juger.

A NOTRE MEMBRE INVITE

Monsieur P.RENAULT
Docteur Es-Science
Géologue
Enseignant à l'Université de LYON I

Votre longue expérience des cavernes et vos nombreux conseils nous ont été d'une aide inestimable dans l'élaboration de ce travail,

Veillez trouver ici l'expression de toute notre reconnaissance

A mes Parents,
à qui je dois tout

A tous ceux qui me sont chers

A mes amis Spéléologues

P L A N

P L A N

ABREVIATION ET LOIS DES GAZ

1 INTRODUCTION

2 LE MILIEU SOUTERRAIN KARSTIQUE

2.1 Définitions

2.2 Notions de climatologie

3 LES ATMOSPHERES CONFINEES KARSTIQUES

3.1 L'atmosphère terrestre

3.2 Les atmosphères confinées karstiques

4 RAPPELS DE PHYSIOLOGIE RESPIRATOIRE

4.1 Mécanique ventilatoire et ventilation pulmonaire

4.2 Ventilation alvéolaire

4.3 Echanges gazeux pulmonaires

4.4 Transport des gaz

4.5 Régulation de la ventilation

4.6 Les stimuli respiratoires

4.7 La gazométrie artérielle

5 PHYSIOLOGIE DU CONFINEMENT HYPERCARBOXYIQUE

5.1 Conséquences de l'hypercapnie

5.2 Données récentes sur le confinement hypercapnique

6 PHYSIOPATHOLOGIE DE L'HYPOXIE

6.1 Le milieu intérieur

6.2 La ventilation

6.3 Fonction circulatoire

6.4 Troubles neurologiques

7 LE CONFINEMENT HYPOXIQUE

7.1 Le confinement hypoxique expérimental

7.2 Le confinement hypoxique accidentel

7.3 Le confinement hypoxique en spéléologie

7.4 Observations personnelles

8 DISCUSSION

8.1 Le déficit en oxygène

8.2 Valeurs admissibles de confinement

9 AUTRES GAZ DES CAVERNES

9.1 Gaz radioactifs

9.2 Hydrogène sulfuré

9.3 Méthane

9.4 Acétylène

9.5 Oxyde de carbone

9.6 Oxydes d'azote

9.7 Acide chlorhydrique

9.8 Chloropicrine

9.9 Acide cyanhydrique

9.10 Ammoniac

9.11 Vapeurs d'hydrocarbures

9.12 Anhydride sulfureux

10 EXPLORATIONS ET SECOURISME EN ATMOSPHERE CONFINEE OU TOXIQUE

10.1 Techniques d'exploration

10.2 Secourisme

11 CONCLUSION

12 BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

ABREVIATIONS ET LOIS DES GAZ

ABREVIATIONS UTILISEES

ATA Atmosphère Absolue.
A.C.K. Atmosphère Confinée Karstique.
A.R.I.: Appareil Respiratoire Individuel.
C.E.R.T.S.M.: Centre de Recherche et d'Etude sur les Techniques
Sous-Marines (Marine Nationale, Toulon).
C.M.A.: Concentration Maximale Admissible.
C.T.C.: Concentration Toxique Critique.
S.S.F. Spéléo Secours Français.
kPa : Kilopascal.
mbar: Millibar.
ppm: parties par million.

dX: Variation de la grandeur X
FO2: Fraction d'oxygène.
FCO2: Fraction de gaz carbonique.
FIO2: Fraction inspirée d'oxygène.
FICO2: Fraction inspirée de gaz carbonique.
PO2: Pression partielle d'oxygène.
PCO2: Pression partielle de gaz carbonique.
PAO2: Pression alvéolaire en oxygène.
PACO2: Pression alvéolaire en gaz carbonique.
PaO2: Pression artérielle en oxygène.
PaCO2: Pression artérielle en gaz carbonique.
PETO2: Pression expiratoire terminale en oxygène.
PETCO2: Pression expiratoire terminale en gaz carbonique.
PO2 : Pression partielle d'oxygène.
PCO2: Pression partielle de gaz carbonique.
SaO2: Saturation artérielle en oxygène.

UNITES ET LOIS DES GAZ:

Unités de pression:

Les unités sont nombreuses et diffèrent selon la grandeur mesurée: en physiologie, le **Torr** ou **millimètre de mercure** (mmHg), est très souvent employé mais tend à être actuellement délaissé au profit du **Kilopascal** (KPa).

La pression de référence est la **Pression Atmosphérique** mesurée à l'altitude zéro, soit au niveau de la mer.

En météorologie karstique, les quantités de gaz sont très fréquemment données en pourcentage, bien que souvent annoncées en unités de pression: p. ex. $PCO_2 = 4\%$, les indications données par les appareils de mesure étant en %. Il semble donc préférable d'utiliser dans ce cas la concentration fractionnaire F (la concentration fractionnaire correspond au pourcentage: pour 21% d'O₂, $FO_2 = 0,21$). La correspondance avec les unités de pression nécessite d'utiliser la loi de DALTON. Les unités de pression sont alors le Torr ou le Millibar. Les

équivalences entre les différentes unités sont représentées dans le tableau 1.

atm	:	Torr	:	kPa	:	mbar	:
1	:	760	:	100	:	1013,25	:
0,0013	:	1	:	0,133	:	1,333	:
0,013	:	7,6	:	1	:	10,13	:
9,8 10	:	0,75	:	0,098	:	1	:

Tableau 1: correspondance entre unités de pression.

Par ailleurs, la quantification d'un gaz se fait parfois en utilisant l'unité ppm (parties par million). 10.000 ppm correspondent à une fraction de 1%.

Lois des gaz

* Loi de BOYLE-MARIOTTE: a température constante, le produit du volume d'un gaz parfait par la pression dans laquelle il se trouve est constant: $P \times V = \text{Constant}$

* Loi de DALTON: la pression partielle d'un gaz donné dans un mélange gazeux occupant le volume V est la pression qu'exercerait ce gaz s'il occupait seul le volume V.

- Chaque gaz du mélange exerce une pression partielle qui est proportionnelle à sa fraction dans le gaz.

- La somme des pressions partielles est égale à la pression totale du mélange.

- La pression partielle P d'un gaz dans un mélange gazeux est égale au produit de la pression totale PB par la fraction F de ce gaz dans le mélange: $P = PB \times F$.

* Loi de HENRY: Le volume d'un gaz dissous dans un volume donné de liquide est proportionnel à la pression partielle P de ce gaz dans le liquide: $v = z \frac{P}{760} V$

v = volume dissous

P = pression en Torr

z = coefficient de solubilité du gaz dans l'eau

* Loi de GRAHAM: Le débit de diffusion d'un gaz est inversement proportionnel à la racine carrée de son poids moléculaire.

* Le débit instantané de gaz de diffusant entre deux points d'un mélange gazeux ou d'un liquide est proportionnel à la différence de pression de ce gaz entre les deux points.

* Dans un liquide, le débit de diffusion d'un gaz est aussi proportionnel à sa solubilité dans le liquide.

"Le mécanisme de combinaison de l'acide carbonique aux bases, facteur essentiel de l'équilibre acide-base du sang, conditionne plusieurs propriétés fondamentales des êtres vivants. Il est antérieur à la vie organisée et intéresse aussi bien la géologie que la physiologie".

HENDERSON

I N T R O D U C T I O N

1 INTRODUCTION

Les premières expériences de confinement eurent lieu au XVII^e siècle, et consistaient à placer de petits animaux dans des cloches en verre pour observer leur comportement.

Un siècle plus tard, LAVOISIER précisait la modification atmosphérique qui en résultait, et le décès était attribué au déficit en oxygène.

Au XIX^e siècle, les possibilités d'épuration du gaz carbonique ont permis une dissociation des effets de chaque gaz. Les perturbations importantes produites par le CO₂ conduisent alors les physiologistes à le représenter comme également responsable de la mort.

Avec l'important développement technologique contemporain, le problème s'est plus axé sur l'hypercarboxie, plus difficile à maîtriser que le déficit en oxygène dans les sous-marins ou véhicules spatiaux.

Ceci explique peut-être le peu de publications précises disponibles sur les effets du confinement atmosphérique.

Pourtant, ce type d'atmosphère est loin d'être exceptionnel, et plusieurs décès sont à déplorer dans certaines professions (puisatiers, fossoyeurs,..etc).

Parmi les milieux naturels les plus enclins au confinement atmosphérique, les grottes occupent une place de choix: bien que de nombreux gaz puissent s'y trouver, l'élévation du gaz carbonique avec diminution d'oxygène est la perturbation de loin la plus commune.

Les premiers spéléologues considéraient ce type de cavernes comme très dangereux en raison de la présence de CO₂, alors parfois nommé "gaz méphitique" (3). A l'heure actuelle, ce gaz est encore souvent considéré comme seul responsable des symptômes perçus. Il faut dire qu'il est fortement impliqué dans la formation des cavernes lors de sa dissolution dans les eaux d'infiltrations, et les spécialistes du monde souterrain étudièrent son origine et sa répartition sans tenir compte de l'oxygène.

Actuellement, les atmosphères confinées karstiques n'inquiètent plus les spéléologues comme au début du siècle, et les explorations s'y déroulent pour l'attrait de découvertes ou dans des buts d'observations scientifiques (géologie, biologie...).

Cependant, bien que le nombre d'accidents dus aux gaz soit faible, en particulier pour le confinement, le développement important de la spéléologie et la découverte permanente de nouvelles cavités en multiplie le risque. De plus, la méconnaissance des phénomènes physiopathologiques qui y sont liés n'a pas encore permis de fixer les limites de sécurité.

Aussi nous a-t-il paru utile de faire le point des connaissances sur la physiologie du confinement en y apportant une modeste contribution, et d'y ajouter quelques conduites pratiques préventives utilisables en spéléologie, des erreurs étant parfois commises.

Nous posons enfin le problème délicat du secourisme en atmosphère confinée ou toxique, sachant qu'il risque se poser à tout moment.

LE MILIEU SOUTERRAIN KARSTIQUE

2 LE MILIEU SOUTERRAIN KARSTIQUE

2.1 Définition

- Le **karst** est une région située au Nord-Est de l'Adriatique, approximativement entre Trieste et Lubljana (actuelle Yougoslavie), et caractérisée par une grande abondance de grottes, gouffres, et paysages typiques des régions calcaires.

Les premières études méthodiques de ces phénomènes eurent lieu à propos de cette région dont le nom fût adopté plus généralement: "Le nom de **karst** est donné à toute région constituée par des roches carbonatées compactes et solubles (calcaires et dolomies) dans lesquelles apparaissent des formes superficielles et souterraines" (33).

Ainsi ce terme exclut-il certaines cavités à la composition atmosphérique bien particulière (grottes volcaniques, mines, cavités artificielles...) au profit des cavernes creusées par l'action des eaux météoriques ou plus rarement thermales sur les roches carbonatées fracturées ou affaiblies par un joint de stratification.

Le "**réseau de fentes**" (figure 1) est un élément important à prendre en compte pour la compréhension de certains phénomènes climatologiques karstiques: le volume de ce réseau impénétrable représente 80 à 100% du volume des cavités d'un massif (62). Il totalise environ 2% du volume total des karsts (50).

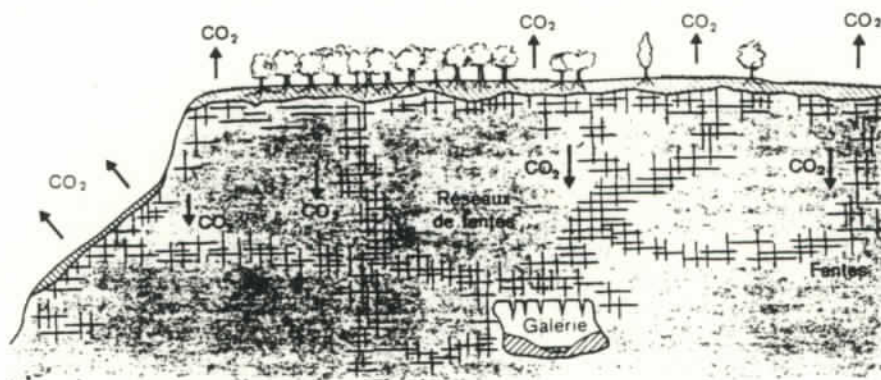


Figure 1: Le réseau de fentes (50).

2.2 Notions de climatologie

La connaissance des principaux paramètres de climatologie souterraine: pression atmosphérique, hygrométrie, températures, mouvements d'air, permet de mieux comprendre la composition atmosphérique des cavernes et ses variations.

2.2.1 Pression atmosphérique

La pression atmosphérique peut, lors de ses variations, provoquer une dilatation des masses gazeuses à l'intérieur du karst (basses pressions), ou une compression (hautes pressions), conformément à la loi de Mariotte. Ceci a été fréquemment observé avec le gaz carbonique dans les cavités (cf § 3.2.5).

2.2.2 Hygrométrie

Le climat souterrain est caractérisé par une forte humidité relative, avec des valeurs très souvent proches de la saturation (entre 95 et 100%).

2.2.3 Températures

La température moyenne d'une cavité dépend de plusieurs facteurs, notamment altitude et latitude, ce qui permet d'établir des courbes en fonction de ces paramètres (figure 2).

Par ailleurs, on admet en général que la température moyenne de la cavité correspond à peu près à la température moyenne extérieure. Cependant, des différences par rapport aux valeurs théoriques peuvent apparaître avec l'orientation de l'entrée, la morphologie de la cavité, une source de chaleur interne,...etc (35).

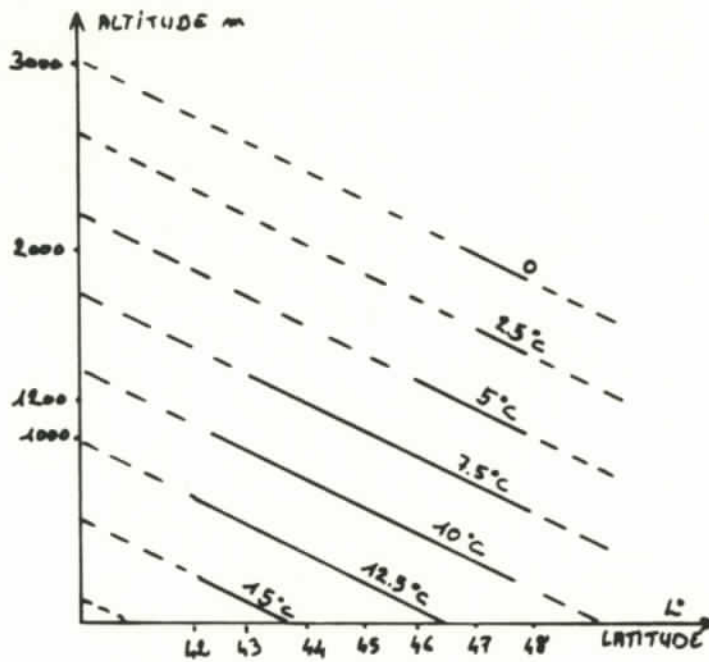


Figure 2: Relation entre altitude, latitude, et température, d'après (15).

Les eaux d'infiltration et des écoulements jouent également un rôle majeur dans la répartition des températures du karst (50).

A l'intérieur de la grotte (ou du gouffre), on distingue grossièrement deux zones (35):

- la zone d'entrée, dont la température est directement influencée par l'extérieur.

- une zone profonde, aux variations infimes, mais dont le degré thermique dépend de la morphologie de la cavité (air de plus en plus froid dans un "piège à air froid", et inverse dans une cavité ascendante, cf § 2.2.4).

2.2.4 Mouvements de l'air

Le mouvement des masses d'air dans le karst a permis d'établir une classification sommaire des cavités (32,71)(figure 3).

- Les "Tubes à vent" sont des cavités à deux ou plusieurs entrées d'altitudes différentes et parcourues par un courant d'air qui s'inverse avec les saisons: en hiver, l'air interne sera plus chaud que l'air externe, donc aura tendance à sortir par l'entrée haute, remplacé par de l'air externe au niveau de l'entrée basse. Le phénomène s'inversera en été quand l'air externe sera plus chaud: l'air froid de la cavité, plus lourd, sortira par l'entrée basse. Lorsque la température extérieure est sensiblement identique à celle de la cavité, la ventilation de cette dernière est généralement stoppée. Ceci peut se produire à certains moments de la journée ou de l'année.

Ce type de cavités ne présentera qu'exceptionnellement un confinement atmosphérique en raison du renouvellement fréquent de l'air qu'elle contient.

- Les "pièges à air froid" sont représentés par toute grotte ou gouffre à tendance verticale descendante: ce profil permet l'accumulation d'air qui ne sera pas renouvelé en été car plus froid que l'air externe. En hiver, lorsque la température extérieure est inférieure à la température de l'air de la grotte, ce dernier est donc plus léger car plus chaud et s'échappera.

- Les "pièges à air chaud" représentent le phénomène inverse: la cavité est ascendante et permet l'accumulation d'air chaud qui ne sera renouvelé qu'en été.

- Les grottes horizontales, en fonction de leur morphologie de détail, peuvent alternativement piéger l'air chaud et l'air froid. Si les dimensions de l'entrée le permettent, l'air froid s'écoulera par le bas en été et l'air chaud par le haut en hiver.

Par ailleurs, les cavités peuvent être le siège de vastes courants de convection faisant intervenir l'air des

galeries mais également celui des nombreuses fissures du karst.
(50)(figure 4).

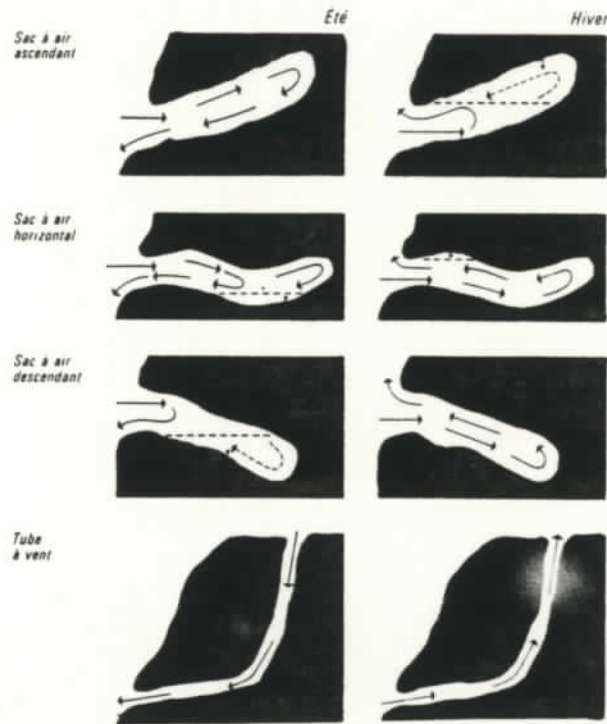


Figure 3: Circulations d'air dans différents types de cavités en hiver et en été (32).

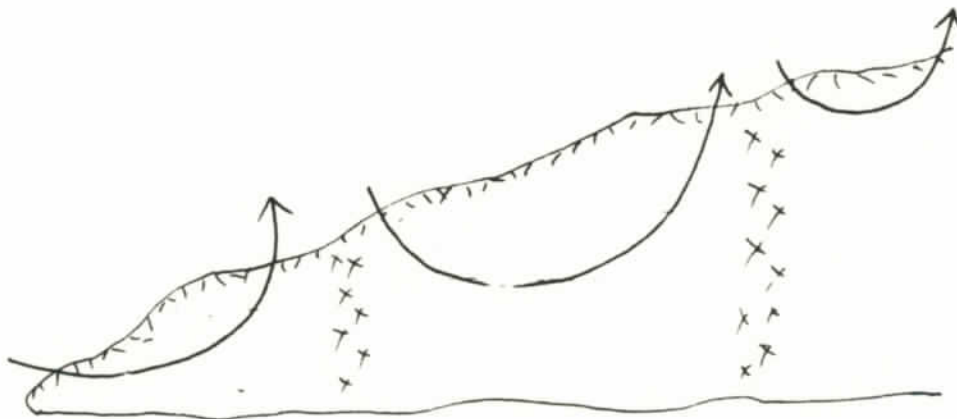


Figure 4: Cellules de convection dans un massif à secteurs colmatés (50).

Cependant, cette classification schématique n'est pas applicable à tous les phénomènes karstiques hypogés, et certaines nuances sont à introduire notamment à propos des atmosphères confinées: RENAULT (63) signale que " un air chaud à haute pCO_2 a une masse spécifique plus élevée qu'un air froid à pCO_2 réduite ce qui stabilise son stockage dans les cavités descendantes". Ainsi, certaines cavités possèdent un gradient thermique descendant et de l'air chaud surmonté d'air froid en raison d'un cloisonnement qui isole certaines masses d'air.

De plus, les cavités n'ont en fait que rarement une morphologie aussi simple et présentent le plus souvent un agencement de ces différentes formes de base.

2.2.5 Composition de l'air

L'atmosphère de la plupart des grottes diffère de celle respirée à l'extérieur:

- La teneur en gaz carbonique est presque toujours plus élevée, bien que les fortes teneurs qui concernent cette étude soient limitées à certaines régions ou cavités (cf § 3.2.4).
- Comme vu précédemment, l'humidité relative est souvent proche de la saturation (§ 2.2.2).
- Certains gaz naturels peuvent être présents, bien que très rarement, avec une toxicité potentielle mais parfois des vertus thérapeutiques: quelques cavernes calcaires naturelles sont utilisées en spéléothérapie (74). La plupart des cavités thermales sont cependant artificielles.
- Les gaz introduits artificiellement dans le milieu sont parfois à l'origine d'accident graves (cf annexe 1)
- La ionisation de l'air, positive ou négative, est parfois notable (cf § 9).
- Signalons enfin la présence parfois de germes pathogènes (histoplasmoses, rage,...).

LES ATMOSPHERES CONFINEES KARSTIQUES

3 LES ATMOSPHERES CONFINEES KARSTIQUES

3.1 L'atmosphère terrestre

3.1.1 Composition normale

L'atmosphère terrestre est composée de 20,95% d'oxygène, 79,03% d'azote, 0,03% de gaz carbonique, et de gaz rares à l'état de traces.

Le gaz carbonique, également nommé anhydride carbonique ou dioxyde de carbone (formule = CO_2), joue un rôle très important dans la nature malgré sa teneur infime dans l'air ambiant.

En effet, il est absorbé par les plantes qui utilisent l'atome de carbone pour constituer le tissu végétal, lors de la photosynthèse, en échange de l'oxygène indispensable à la vie. Les mécanismes d'oxydation cellulaire des êtres vivants produisent par ailleurs cet atome qui doit être éliminé par la respiration sous forme de CO_2 .

Un autre rôle important du CO_2 est celui joué sur le climat: il participe en effet avec la vapeur d'eau et le méthane à l'"effet de serre" qui rend la température terrestre plus clémente.

3.1.2 Variations de la teneur atmosphérique en CO_2

Il existe une décroissance de la teneur en gaz carbonique avec l'altitude et une augmentation au sein des villes.

Par ailleurs, l'utilisation intensive de combustibles naturels (charbon, pétrole, gaz) ainsi que la déforestation et les nouvelles pratiques agricoles ont entraîné une augmentation notable de cette teneur: la courbe établie par KEELING à partir de 1958 met bien en évidence ce phénomène (ainsi d'ailleurs que les variations saisonnières) avec une concentration en gaz

carbonique qui passe de 315 ppm à environ 345 ppm en 1985 (45). La teneur actuelle serait d'environ 370 ppm. La persistance de cet accroissement entraîne un risque climatique par intensification de l'effet de serre (figure 5).

Des augmentations plus ponctuelles peuvent s'observer à l'occasion de phénomènes volcaniques (catastrophe du Lac Nyos au Cameroun, en Août 1986) ou en région industrialisée.

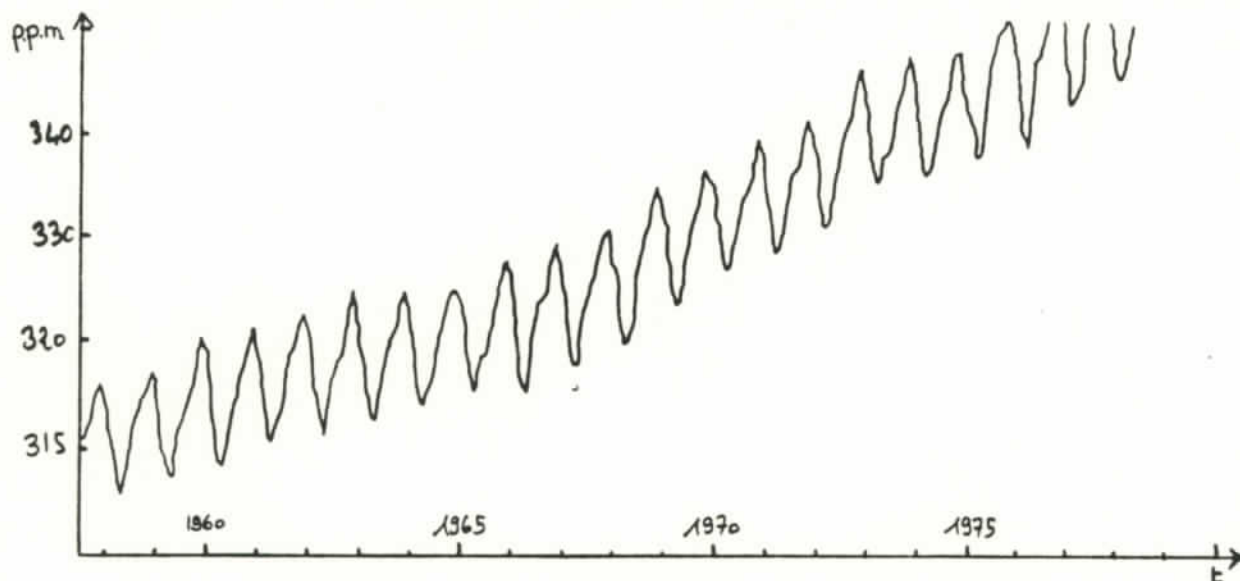


Figure 5: courbe de KEELING, d'après (45).

3.2 Les atmosphères confinées karstiques

3.2.1 Définitions

Une certaine imprécision règne autour de la définition du mot "confinement": il peut avoir un sens morphologique, lorsqu'il qualifie un lieu, ou concerner une atmosphère et signifier une modification de sa composition corollaire d'un non renouvellement.

Pour les karsts, CHOPPY (16) utilise le terme dans le premier sens, tandis que RENAULT (65) dénonce l'ambiguïté du mot et propose de parler alors de "confinement chimique" et "confinement morphologique".

D'après ZUGIBE et Al (77), un "lieu confiné"

("confined space") est défini comme étant un endroit aux ouvertures limitées exposant l'atmosphère à un déficit en oxygène et/ou à une contamination par des substances toxiques, inflammables, ou explosives. On voit donc ici que les deux sens du terme sont employés. La classification du "National Institute for Occupational Safety and Health" comporte trois degrés de confinement d'un lieu:

- Lieu Confiné de Classe A: S'y exposer représente un risque vital immédiat; les critères sont une concentration en oxygène inférieure ou égale à 16%, ou la concentration de substance toxique présente un risque mortel, ou la quantité de gaz inflammable fait risquer l'explosion.

- Lieu Confiné Classe B: peut provoquer des troubles importants si aucune mesure préventive n'est prise, mais n'implique pas de risque immédiat pour la vie; la concentration en oxygène est comprise entre 16,1 et 19,4%, la concentration en gaz toxique est comprise entre la concentration toxique critique et la quantité admissible, et le risque d'explosion est mineur.

- Lieu Confiné de Classe C: Ici l'atmosphère n'impose aucune mesure particulière de sécurité, l'oxygène est entre 19,5 et 21,4%, le taux d'inflammable négligeable de même que la concentration de gaz toxique.

Par ailleurs, les physiologistes emploient parfois le terme de confinement pour désigner une atmosphère enrichie en gaz carbonique, mais à teneur en oxygène normale (si ce n'est la diminution due au CO₂) (58); d'autres ne tiendront compte que de l'oxygène (23,77), et enfin les derniers parleront de confinement avec excès de CO₂ et déficit en O₂ (18,43).

Mais souvent, les auteurs décrivant des incidents ou accidents dus à une atmosphère confinée ne fournissent aucune précision sur la composition de l'air (cf § 7.2).

Pour la facilité de notre travail, nous allons considérer systématiquement la teneur des deux gaz chaque fois

que possible, et distinguer les **atmosphères confinées hypercarboxiques** des **atmosphères confinées hypoxiques**.

Les **atmosphères confinées hypercarboxiques**, enrichies en gaz carbonique sans déficit proportionnel en oxygène, se rencontrent dans la nature et notamment parfois dans les grottes (cf § 3.2.2) mais la bonne connaissance de leurs effets résulte de leur existence dans des lieux clos respirés avec apport d'oxygène remplaçant celui consommé (sous-marins par exemple) et des études en caisson étanche que cette situation a motivé. Ici, nous avons un confinement morphologique vrai mais un confinement atmosphérique relatif si on considère que l'oxygène doit être pris en compte.

Les **atmosphères confinées hypoxiques** représentent des atmosphères dont la composition est issue de mécanismes d'oxydation. La respiration en est l'exemple le plus fréquent et s'accompagne de production de gaz carbonique dans des proportions grossièrement identiques à la consommation d'oxygène (le rapport du CO₂ produit à l'O₂ consommé reflétant le quotient respiratoire). Elles sont fréquentes dans les grottes sous cet aspect, l'hypoxie simple étant exceptionnelle.

Tout volume à air mal renouvelé dans lequel ou à proximité duquel se produit un mécanisme d'oxydation est susceptible de contenir une atmosphère confinée hypoxique.

3.2.2 Origines du confinement atmosphérique karstique

La plupart des cavernes, à l'exception toutefois de certains "tubes à vent", ont une teneur en gaz carbonique supérieure à celle de l'air extérieur. Des teneurs cent à cent-cinquante fois supérieures sont fréquentes dans certaines régions. Ce gaz intéresse vivement les karstologues car il est indispensable à la formation des cavernes calcaires: sa dissolution dans l'eau provoque la formation d'acide carbonique qui favorisera la dissolution du calcaire sous forme de bicarbonate selon la réaction simplifiée suivante:



Aussi, ses origines sont-elles bien connues:

- L'origine pédologique constitue la source majeure de CO_2 et de déficit en O_2 , avec notamment le processus d'humification dû à l'activité enzymatique des bactéries et champignons. On cite également le rôle de la dégradation des acides humiques (4). Les racines de plantes et leur respiration sont parfois évoquées, mais leur importance est probablement autant mécanique, par agrandissement des fissures permettant le passage des gaz, que respiratoire.

Les concentrations volumétriques de CO_2 peuvent atteindre 16% dans certains sols mal aérés (47).

L'atmosphère des sols détermine celle du karst par diffusion dans le réseau de fentes. Par ailleurs, les eaux d'infiltration s'enrichissent en CO_2 et peuvent le déverser dans les conduits majeurs dont l'air en est "sous-saturé": lorsque l'eau arrive dans une cavité dont la PCO_2 est (relativement) faible, un nouvel équilibre tend à se créer, traduit par le transfert du gaz depuis l'eau vers l'air. Ce phénomène est d'ailleurs à l'origine de la formation des concrétions.

BAKALOWIKZ (4) a montré le rôle prépondérant des infiltrations pour le transfert du gaz carbonique de quelques cavités Ariégeoises, tandis que JAMES (41) a prouvé par étude d'isotopes légers du carbone le passage de l'atmosphère du sol à celle de la grotte.

- L'origine profonde: l'existence sous jacente à certains karsts d'une activité hydrothermale ou volcanique peut constituer une source importante de gaz carbonique (et d'autres gaz). Tel est le cas de la grotte de La Madeleine dans l'Hérault (3,68,...), ou de la grotte d'Hanimec en Yougoslavie (41) où 36% de CO_2 auraient été mesurés. Précisons que d'une manière théorique, ce type de caverne ne devrait pas comporter de déficit en oxygène comme ç'est le cas lorsque le CO_2 est

d'origine pédologique ou respiratoire. En effet, l'apport par exemple de 5% de CO₂ à 95% d'air normal donne:

$$FO_2 = \frac{20,95 \times 95}{100} = 19,85\% \text{ environ.}$$

- Origine animale et combustions: La respiration de visiteurs dans une cavité exigue mal ventilée tendra à établir une atmosphère confinée hypoxique par consommation de l'oxygène et élimination de gaz carbonique. Chez l'homme, dans les conditions de métabolisme basal (on peut prévoir dix fois plus dans le cas d'une exploration spéléologique), la consommation d'O₂ est de 0,3 litres/minute, et le rejet de CO₂ de 0,25 litres/minute. On conçoit donc aisément qu'un petit volume (par exemple une cloche d'air entre deux siphons) devienne rapidement irrespirable.

La respiration des chauves-souris dans certaines cavités (Texas, Australie,...) peut également provoquer une augmentation notable des teneurs en CO₂: JAMES (42) signale une élévation de la teneur en CO₂ à plus de 6% à Drum Cave lors de la période de reproduction des milliers de chiroptères qui s'y retrouvent. LWEIS (48) signale le même phénomène au Texas.

Les réactions de combustion (éclairage acétylène, bougies, réchauds, etc...) affectent, au même titre que la respiration, la composition de l'air dans un volume réduit.

La présence de micro-organismes aéro et anaérobies dans certaines cavités d'Australie jouerait également un rôle dans ce sens, et expliquerait l'important déficit en O₂ de certaines atmosphères karstiques (41).

- Diverses origines, d'importance moindre, peuvent apporter du CO₂ aux cavernes, ainsi qu'un déficit en O₂: les matières organiques apportées par les eaux d'infiltration et les pertes peuvent, par décomposition, modifier l'atmosphère. Ceci est à rapprocher de l'action des microorganismes. Des acides forts inclus dans les eaux météoriques et des acides faibles organiques peuvent aussi libérer du gaz carbonique par action sur les calcaires. Cependant, ces acides n'existent

qu'en quantité négligeable dans la nature (4).

3.2.3 Les teneurs en oxygène

Peu de mesures existent concernant l'oxygène des cavernes. Cependant, il a été constaté dans la plupart des atmosphères karstiques enrichies en CO₂ un déficit "plus important que celui dû à un simple apport de CO₂" (64). La quantité d'oxygène disparue est souvent la même que celle de gaz carbonique en excès et la somme O₂+CO₂ est donc sensiblement égale à 21%, comme à l'extérieur. Ceci est très en faveur de l'origine pédologique du confinement atmosphérique (SCHOELLER, 1967 cité par 16).

CHOPPY (16) qualifie ce type d'atmosphère de "normale" par opposition à certaines atmosphères karstiques présentant un déficit important en O₂, tel que la somme O₂+CO₂ soit inférieure à 21%. Cet auteur suppose que le déficit en oxygène est fréquent en caverne, en fonction des quelques mesures disponibles.

Les mesures que nous avons réalisées dans 3 gouffres du LOT confirment ces remarques (cf § 7.3).

Enfin, JAMES (41) propose une classification de l'atmosphère des cavités en trois types:

- Type 1: le CO₂ est simplement dilué à l'air de la cavité: il en résulte un déficit en azote et oxygène proportionnel à l'apport de CO₂. Exemple: CO₂ = 4,22%, O₂ = 19,20%, N₂ = 76,58% pour une cavité de l'Ardèche (28).

- Type 2: excès de CO₂, excès modéré de N₂, déficit en O₂, ce type d'atmosphère résultant de l'action des micro-organismes (l'excès d'N₂ s'expliquant par le métabolisme d'éléments azotés). Exemple: CO₂ = 4,2%, O₂ = 15,5%, N₂ = 80,3%

- Type 3: excès de CO₂ et d'azote, important déficit en O₂. Ce type d'atmosphère résulterait de l'action d'anaérobies. Exemple: CO₂ = 4,0%, O₂ = 12,0%, N₂ = 84,0%.

Précisons que ces trois types d'atmosphères peuvent être identifiées par la somme CO₂ + O₂ (sensiblement égale à

21% pour l'air externe), cette somme étant supérieure à 21% pour le type 1, sensiblement égale pour le type 2, et inférieure pour le type 3.

Les cavités à CO₂ d'origine profonde entrent dans le type 1.

Parfois, le déficit en O₂ est attribué au CO₂ qui, plus lourd que l'air, s'amasse au fond des cavités (37), mais cette hypothèse est fautive puisque la quantité d'azote est supérieure à la normale.

3.2.4 Répartition des atmosphères confinées

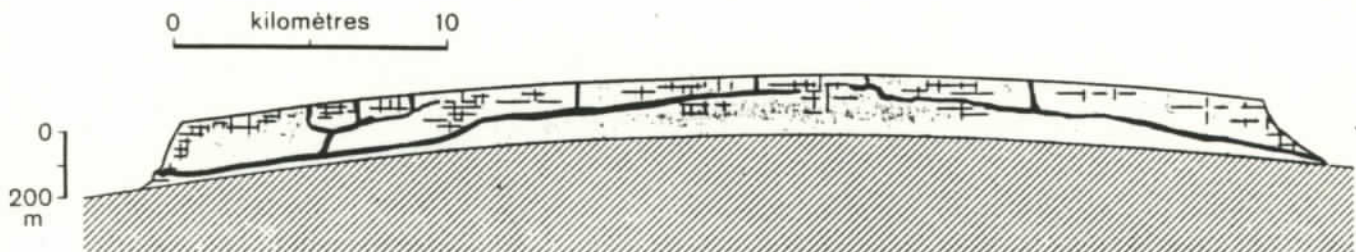
Les atmosphères confinées se répartissent en fonction de plusieurs critères et notamment le type de karst, le type de cavité ou l'origine de la modification atmosphérique.

- Le type de karst détermine globalement l'indice de renouvellement de l'air qu'il contient (figure 6): les réseaux de montagne présentent en effet souvent, du fait du relief, plusieurs entrées d'altitudes différentes facilitant l'établissement de ventilations. La proximité des versants peut jouer un rôle similaire. A l'opposé, les karsts de plateau, outre un confinement atmosphérique facilité par l'activité pédologique, n'ont pas des dénivellées suffisamment importantes pour déterminer de grandes circulations d'air. De plus, la présence d'une couverture alluviale diminue les possibilités d'échanges entre le karst et l'air externe (cf figure 6).

En France, de nombreuses cavités à atmosphère confinée ont été explorées dans l'Ardèche et le Lot où le CO₂ peut atteindre 7%. D'autres ont été signalées dans pratiquement tous les départements karstiques non montagneux (Aude, Dordogne, Gard, Hérault, Tarn, Yonne, etc...).



Karst de montagne



Karst de plateau

Figure 6: types atmosphériques de karst (60)

- Le type de cavité joue un rôle majeur dans l'établissement du confinement atmosphérique par l'intermédiaire également de l'importance de sa ventilation: les "tubes à vent" auront donc un renouvellement permanent de leur air, mais présenteront parfois des teneurs en CO₂ relativement élevées (jusqu'à 3%). C'est le cas de grottes ayant d'importantes surfaces d'échange avec le réseau de fentes (65). Les autres types de cavités - pièges à air chaud, ou à air froid - sont bien plus sujettes au confinement atmosphérique car l'air s'y renouvelle moins (cf § 2.2.4). Les "vérous atmosphériques" (complètement isolés de l'extérieur) auront une atmosphère confinée nuancée par les variations de pression barométrique et les échanges avec l'eau (en fonction de la loi de HENRY) si cet élément a déterminé l'isolement (14).

Par conséquent, RENAULT (65) distingue deux types atmosphériques de galeries sèches:

- Les réseaux organisés en "tubes à vent", dont "la composition atmosphérique sera proportionnelle à la vitesse du transit gazeux et à la longueur des conduits, ce qui détermine la richesse des échanges avec le réseau de fentes"

- Les réseaux "barométriques", dans lesquels existent "des ventilations lentes ou temporaires" en raison de l'isolement de l'extérieur.

La présence d'un écoulement souterrain peu saturé en CO₂ et de débit suffisant peut également abaisser le taux de ce gaz dans l'air.

D'autre part, la présence de cloisonnements relatifs à l'intérieur de certains réseaux (par exemple étroitures) détermine l'existence de masses d'air sujettes au confinement atmosphérique.

- Le lieu de production assure souvent la présence de confinement à proximité: le gaz carbonique sera détecté près des infiltrations d'eau. Certains auteurs considèrent d'ailleurs que la présence de ce gaz signifie obligatoirement

la proximité de sa source (4), mais d'autres y objectent la notion de densité du CO₂ qui l'entraîne au bas des cavités (62) On parle de "sédimentation" du gaz que l'on explique par une masse volumique plus élevée que celle de l'air .

En se basant sur le "schéma provisoire des zones à CO₂ karstiques" établi par RENAULT (63) (figure 7), on considère que l'atmosphère d'un karst ("zone pédologique") présente des anomalies ponctuelles (diminution du confinement) régies par les processus de ventilation et l'absorption par l'eau de courants à débit important.

— SCHEMA PROVISOIRE DES ZONES A CO² KARSTIQUES —

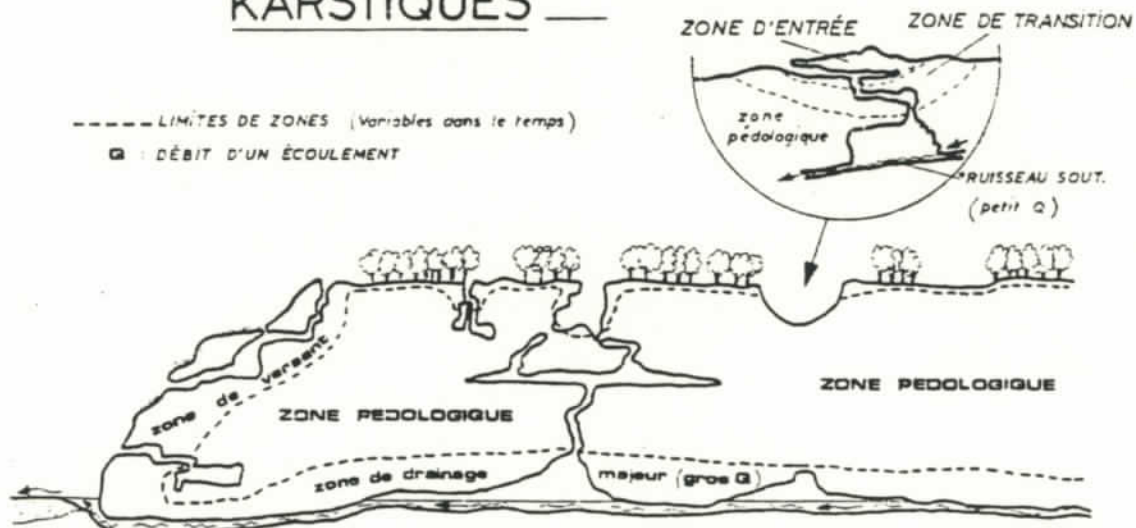


Figure 7 (d'après 63)

3.2.2 Variations temporelles du confinement

- La ventilation des cavités, examinée précédemment, présente une alternance saisonnière en relation avec les variations thermique externes (cf § 2.2.4)
- La pression atmosphérique provoque, lorsqu' elle

est basse, une dilatation des masses gazeuses du karst et une augmentation du volume d'air confiné par action directe sur l'air des conduits pénétrables, ou indirecte par l'intermédiaire du réseau de fentes dont l'air se déverse dans ces mêmes conduits. A l'inverse, une haute pression va réduire l'étendue du confinement.

- Les précipitations favorisent le transfert du gaz dissous dans l'eau, limitent les échanges avec l'air externe par imperméabilisation de l'horizon pédologique, et chassent l'air du réseau de fentes.

- La température externe, en plus des effets sur les mouvements d'air, favorise lorsqu'elle est élevée l'activité biologique des sols (16). Ce phénomène est prépondérant car c'est lors de la saison chaude que les plus fortes teneurs en gaz carbonique ont été mesurées.

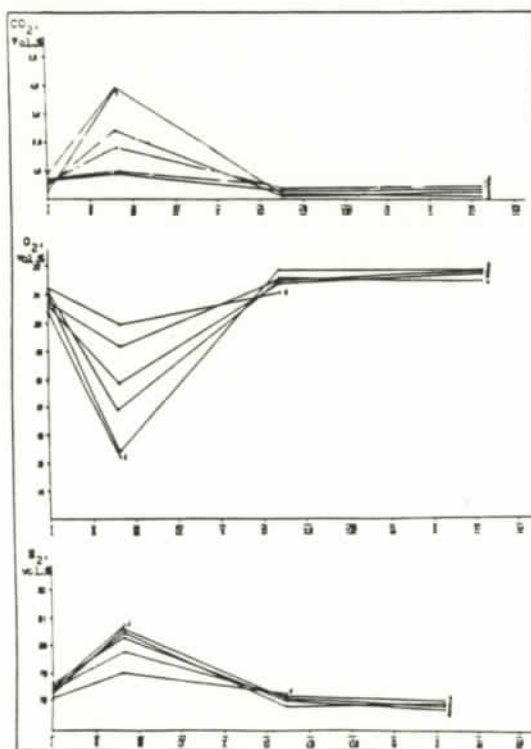


Figure 8: variations temporelles de la qualité atmosphérique d'une cavité (d'après 44)

RAPPELS DE PHYSIOLOGIE RESPIRATOIRE

4. RAPPELS DE PHYSIOLOGIE RESPIRATOIRE (23,34,765)

Les processus de la respiration, indispensables à la vie, assurent l'apport d'oxygène à la cellule et l'évacuation du gaz carbonique, déchet issu des mécanismes d'oxydation cellulaire.

4.1 Mécanique ventilatoire et ventilation pulmonaire

Les phénomènes mécaniques ventilatoires permettent de faire rentrer et sortir des alvéoles pulmonaires les gaz respiratoires.

L'**inspiration** est assurée par le diaphragme assisté des muscles intercostaux. Scalènes et sterno-cléido-mastoidiens n'interviennent que dans la respiration forcée.

L'**expiration** est passive, les muscles abdominaux et intercostaux internes n'intervenant que dans l'expiration forcée.

Les **résistances respiratoires**, forces qui s'opposent aux mouvements d'inspiration et d'expiration, sont représentées par l'élasticité pulmonaire, le surfactant, l'élasticité thoracique, la résistance des voies aériennes et tissulaire pulmonaire. Une augmentation de ces forces gênera l'hématose.

La **ventilation pulmonaire** assure une prise d'oxygène dans l'atmosphère ambiante et un rejet de gaz carbonique.

Au repos, 250 ml d'O₂ sont pris et 200 ml de CO₂ rejetés en moyenne.

L'étude spirométrique de la ventilation pulmonaire a permis de déterminer plusieurs volumes (figure 9):

- Le **Volume Courant** (V_T = "Tidal Volume") est le volume d'air inspiré et expiré couramment au cours d'un cycle respiratoire normal. Valeur moyenne: 0,5 l.

- Le **Volume de Réserve Inspiratoire (VRI)** est le volume admis par inspiration profonde après une inspiration normale. Valeur moyenne: 2,5 l.

- Le **Volume de Réserve Expiratoire (VRE)** est le volume évacué par expiration forcée après une expiration normale. Valeur moyenne: 1,5 l.

- Le **Volume Résiduel (VR)** reste dans les poumons après une expiration forcée. Valeur moyenne: 1,5 l.

La **ventilation pulmonaire** est égale au produit de la fréquence respiratoire f par le volume courant:

$V = f \times VT$, et f est de 15 à 20 par minute, donc $V = 7$ à 10 litres par minute environ.

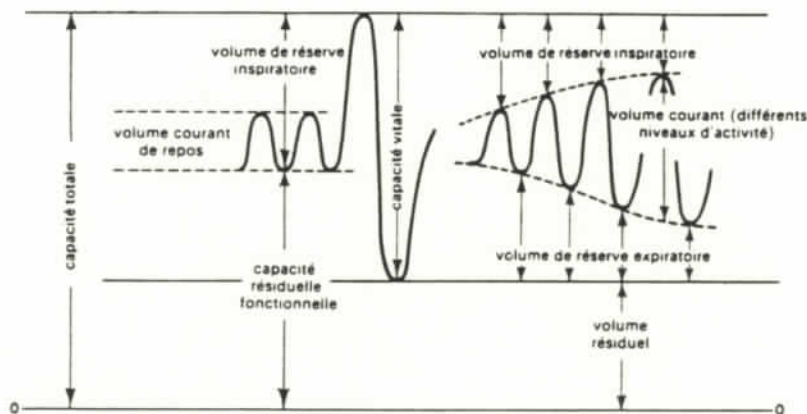


figure 9: Les volumes pulmonaires

La combinaison de ces différents volumes détermine des **capacités respiratoires**:

- **CPT** est la **Capacité Pulmonaire Totale**: elle représente la somme $VRI + VRE + VT + VR$. Elle est de 6 litres environ.

- **CI** est la **Capacité inspiratoire**: elle est égale à $VRI + VT$ et est de 3 litres environ.

- **CRF** est la **Capacité Résiduelle Fonctionnelle**, égale à la somme $VRE + VR$. (3 litres environ).

- **CV** est la **Capacité Vitale**, soit $VRI + VT + VRE$; Elle détermine les possibilités respiratoires maximale d'un sujet. Elle est de 3,2 l chez la femme et de 4,5 l chez l'homme en moyenne.

4.3 Echanges gazeux pulmonaires

La plus ancienne méthode de mesure des échanges gazeux est le **confinement**: en plaçant un animal dans un volume gazeux de composition connue, la mesure en fin d'expérience du taux d'O₂ disparu permet d'évaluer la quantité consommée.

Actuellement, le calcul de ces échanges se fait avec un spirographe de BENEDICT ou en circuit ouvert.

- Valeur moyenne des échanges gazeux:

La consommation d'oxygène V_{O2} est égale à 0,25 à 0,30 l par minute; la production de CO₂ est égale à 0,20 à 0,24 litres par minute, ceci au repos. La valeur minimale de V_{O2} est fixée par le métabolisme basal. Cette valeur peut augmenter lors de la mise en jeu des processus de thermorégulation, et surtout en cas d'exercice musculaire, l'énergie mécanique étant une transformation de l'énergie des mécanismes d'oxydation. A partir d'une certaine intensité, V_{O2} ne peut plus augmenter ce qui permet d'établir V_{O2} max, la capacité aérobie. Elle est égale à 10 à 20 fois la V_{O2} de repos, et reflète précisément l'aptitude physique à un effort prolongé et intense. Ses valeurs vont de 3 l/mn chez le sédentaire à 6 l/mn chez un champion de ski de fond.

Le **quotient respiratoire R** est le rapport du volume de CO₂ produit au volume d'oxygène consommé dans le même temps:

$$R = \frac{V_{CO_2}}{V_{O_2}}$$

Avec un régime équilibré, il est de 0,80 environ. Il varie notamment avec l'exercice musculaire en s'abaissant si cet exercice est modéré (consommation de glucides) ou s'élevant lors d'exercice intense (consommation de lipides après épuisement des réserves glucidiques).

- La diffusion pulmonaire:

La diffusion d'O₂ et CO₂ entre alvéole et sang est

purement physique et due à la différence de pression entre les deux parties.

La diffusion d'O₂ est facilitée par une différence de pression entre alvéole et capillaire importante, environ 60 torr (cf tableau 2). Le débit de diffusion sera donc important.

La diffusion du CO₂ depuis le capillaire sanguin jusqu'aux alvéoles sera facilitée, malgré une différence de pression de seulement 6 torr, en raison d'une solubilité de ce gaz vingt fois supérieure à celle de l'oxygène.

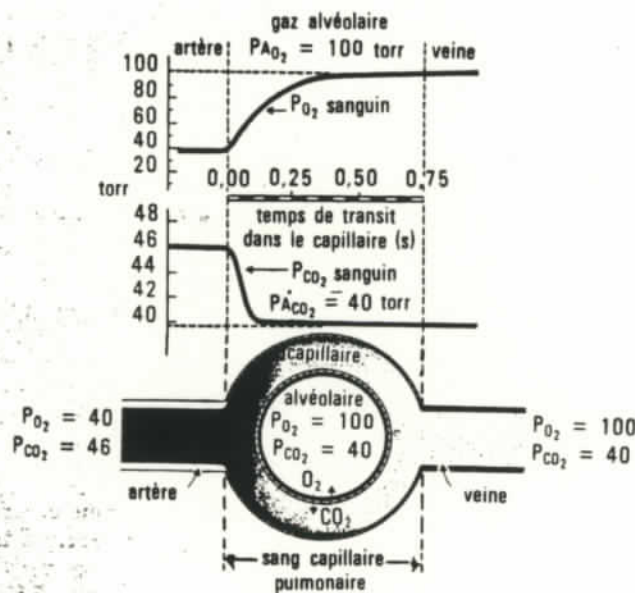


Figure 10: évolution de PCO_2 et PO_2 dans le capillaire pulmonaire (23).

Les rapports ventilation/perfusion sont inégaux: il existe des zones pulmonaires bien ventilées et mal ou non perfusées, et à l'inverse des zones perfusées non ventilées (effet shunt).

Ceci détermine une non uniformité de la composition des gaz alvéolaires et donc du sang artérialisé des différentes zones pulmonaires.

4.4 Transport des gaz respiratoires

4.4.1 Oxygène

L'oxygène est transporté de manière dissoute dans le plasma ou combiné à l'hémoglobine.

- La **dissolution** de l'oxygène obéit à la loi de HENRY, donc est directement proportionnelle à la pression de ce gaz dans l'air respiré:

$$v \text{ O}_2 \text{ dissous} = 0,0237 \times \frac{95}{100} = 0,003, \text{ soit } \mathbf{0,3\%}$$

La quantité d'oxygène dissous est donc infime et très nettement insuffisante pour assurer les besoins de l'organisme.

- La **forme combinée à l'hémoglobine** (oxyhémoglobine) permet un apport bien plus efficace aux tissus: $\text{Hb} + \text{O}_2 = \text{HbO}_2$. La quantité d'oxygène fixée par le sang dépend de la pression partielle d'O₂ dans l'air. La "courbe de dissociation de l'hémoglobine" est représentative de ce phénomène: elle est tracée en utilisant en abscisse la P_{O₂}, et en ordonnée le pourcentage de saturation en oxygène de l'hémoglobine. (figure 11).

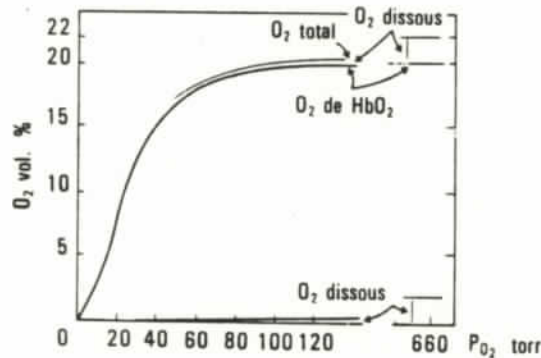


Figure 11: Courbe de dissociation de l'hémoglobine (23).

Cette courbe de dissociation à une forme sigmoïde: l'augmentation de HbO₂ avec la pression partielle d'O₂ est

d'abord lente, puis brutale, puis à nouveau lente quand on approche de la saturation. La **P50** correspond à la pression de demi-saturation de l'hémoglobine.

De nombreux facteurs modifient l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène. Ceci provoque un déplacement de la courbe: vers la droite, l'affinité de l'O₂ pour Hb diminue (et la P50 augmente), ce qui augmente la quantité d'oxygène délivrée aux tissus. Vers la gauche, on a l'effet inverse.

* L'abaissement de la **température** du sang provoque une augmentation de l'affinité de l'O₂ pour l'hémoglobine, ce qui se traduit par un déplacement de la courbe de dissociation vers la gauche (Figure 12).

* L'augmentation de **PCO₂** diminue l'affinité de Hb pour O₂. Ce mécanisme important s'appelle l'**effet BOHR**. Il permet à l'hémoglobine de délivrer plus d'O₂ aux tissus lorsque la teneur en CO₂ du sang s'élève. Un abaissement du pH sanguin a le même effet.

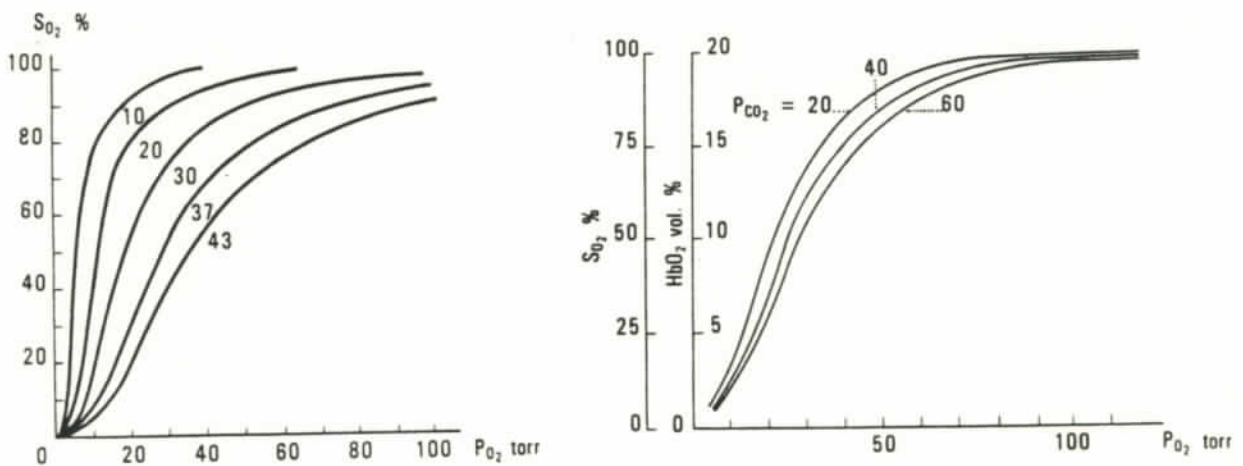


Figure 11: Relation S02%- PO2 en fonction de la température et PCO2 (23).

* Le 2-3 DPG est un métabolite cellulaire présent en grande quantité dans les hématies. Son augmentation entraîne une déviation de la courbe de dissociation de l'hémoglobine vers la droite (diminution d'affinité).

4.4.2 Gaz carbonique

- Le transport du CO₂ s'effectue selon trois procédés:

* **La dissolution** dans le plasma dépend, tout comme l'oxygène, de la loi de HENRY. La quantité de CO₂ véhiculée selon ce mode atteint 1% environ. La différence avec l'O₂ (0,3%) s'explique par un coefficient de solubilité trente fois supérieur pour le gaz carbonique. Cependant, cette faible quantité implique d'autres moyens pour transporter ce gaz.

* **l'hydratation** du CO₂ avec formation de bicarbonate est un moyen bien plus efficace; il se fait selon la réaction suivantes:



Cette réaction, très lente dans le plasma, est considérablement accélérée dans le globule rouge grâce à une enzyme, l'anhydrase carbonique. L'ion bicarbonate ainsi formé passera dans le plasma en échange d'un ion Cl⁻ (effet HAMBURGER).

* La carbaminohémoglobine est la combinaison du CO₂ aux radicaux amine de la globine dans l'hémoglobine. La quantité transportée ainsi est à peu près analogue à celle de la forme dissoute.

- La courbe de dissociation du CO₂, établie selon les mêmes principes que celle de l'oxygène (PCO₂ en abscisse et concentration en volume % de CO₂ en ordonnée), subit également des déplacements en fonction de plusieurs paramètres, notamment la **pression d'oxygène** qui entraîne, si elle augmente, un déplacement à droite de la courbe: il y a donc diminution d'affinité du CO₂ pour le sang dans ce cas (effet HALDANE) (Figure 13).

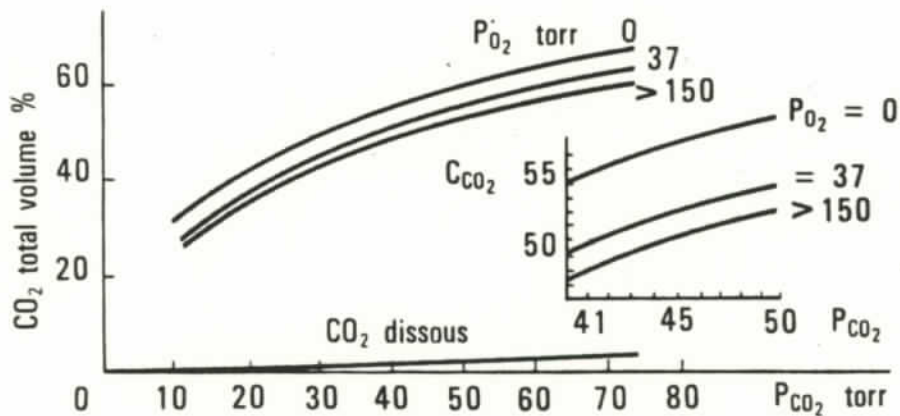


Figure 13: Courbe de dissociation du CO₂ (23).

4.5 Régulation de la ventilation

De nombreux facteurs internes et externes sont susceptibles d'influencer la production de CO₂ et la consommation d'O₂ par l'organisme. Aussi, l'action d'un système de régulation de la ventilation est-elle indispensable.

Cette régulation agit par l'intermédiaire des centres respiratoires situés au niveau du tronc cérébral, de chémorécepteurs centraux et périphériques (cf § 4.6.1), et d'un ensemble de réflexes. Ce système permet l'ajustement de la respiration aux besoins de l'organisme.

4.6 Stimuli ventilatoires

4.6.1 Les corpuscules aortiques et carotidiens

Il s'agit de chémo-récepteurs situés au niveau de la crosse de l'aorte et des sinus carotidiens. Ils réagissent lors d'un déficit en oxygène, un excès de CO₂, ou une acidose. La stimulation de ces corpuscules entraîne une augmentation du volume courant et de la fréquence respiratoire, un renforcement du tonus des bronchioles. L'augmentation du CO₂ ou l'abaissement du pH du sang stimule ces récepteurs d'autant plus efficacement que l'hypoxie est importante. Si la teneur en O₂ du sang est normale, le CO₂ n'agit que par l'intermédiaire de récepteurs centraux.

On voit donc ici le rôle important joué par ces récepteurs en cas d'asphyxie.

4.6.2 Stimuli ventilatoires

- La diminution du taux d'oxygène du sang entraîne une élévation du débit ventilatoire proportionnelle à l'importance de l'hypoxie. De même, l'inhalation d'O₂ pur provoque l'effet inverse.

- Le débit ventilatoire augmente également avec l'enrichissement en CO₂ du sang (figure 14).

- Les ions H⁺, les catécholamines et la température provoquent en s'élevant une réaction ventilatoire positive.

- L'élévation de la pression artérielle provoque un ralentissement respiratoire pouvant aller jusqu'à l'apnée.

- Divers autres stimuli physiques interviennent également: douleur, volonté, émotion, exercice physique (par combinaison de divers stimuli) etc.

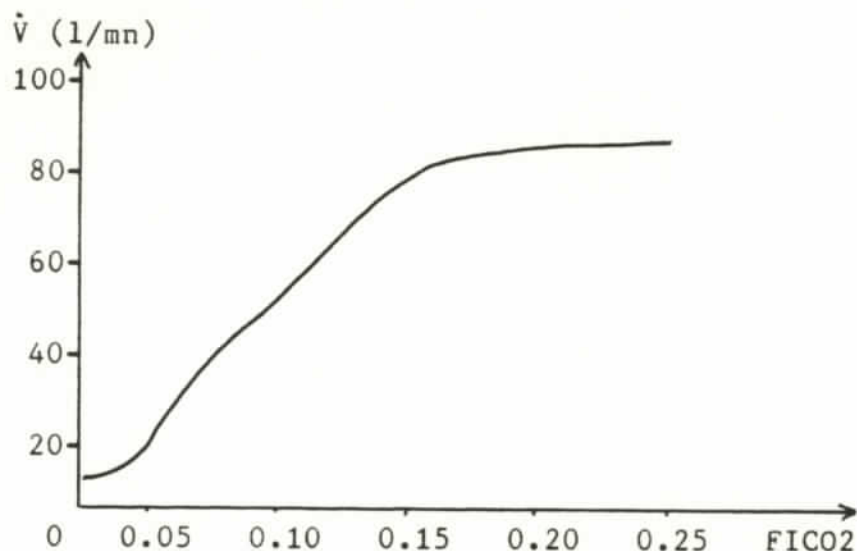


Figure 14: Evolution du débit ventilatoire en fonction de FICO₂ (23).

4.7 Etude de la gazométrie artérielle (23,76)

La composition des gaz du sang artériel est le reflet global de l'hématose au niveau pulmonaire. Les anomalies sont essentiellement l'hypoxémie, et les troubles de l'équilibre acido-basique.

4.7.1 Hypoxémie

Chez un individu sain par ailleurs (absence d'anémie, d'intoxication, etc), l'hypoxémie se rencontre lors d'une défaillance du système respiratoire (hypoventilation alvéolaire, effet shunt, shunt anatomique, ou altération de la membrane alvéolo-capillaire), ou par baisse de la FIO₂ ou PO₂ (altitude). L'hypoventilation alvéolaire globale s'accompagne d'une hypercapnie, alors que pour les autres causes la PaCO₂ est normale ou abaissée.

4.7.2 Equilibre acido-basique

En pathologie respiratoire, l'étude des gaz du sang artériel peuvent mettre en évidence une acidose ou une alcalose respiratoire:

- L'acidose respiratoire, définie par une rétention de CO₂, est liée à une insuffisance de ventilation des alvéoles, ou à une élévation de PCO₂ (généralement causée par une élévation de FICO₂). Elle peut être compensée, l'élévation des bicarbonates permettant alors de maintenir le pH à une valeur normale, ou non compensée, le pH étant inférieur à la normale.

- L'alcalose respiratoire est toujours la conséquence d'une hyperventilation. Elle est non compensée lorsque le pH est alcalin, avec PaCO₂ basse et CO₂ total discrètement abaissé du fait des mécanismes tampon du sang. Par élimination de bicarbonates, l'alcalose peut être compensée.

Il existe par ailleurs des situations pathologiques provoquant une acidose (acido-cétose diabétique, insuffisance rénale, jeûne, exercice musculaire violent,...) ou une alcalose métabolique (ingestion de bicarbonates, vomissements,...).

Les variations métaboliques ou respiratoires de l'équilibre acido-basique peuvent être résumée sur le diagramme de DAVENPORT, ou relation pH/CO₂ total (figure 15): une acidose aigue abaisse le pH suivant la ligne tampon du sang, et la compensation se fait par rétention rénale de bicarbonate en ramenant le pH à sa valeur normale, parallèlement aux lignes iso-PCO₂. Le même type de mécanisme se fait de manière symétrique pour une alcalose, avec élimination rénale de bicarbonates ramenant le pH à sa valeur normale.

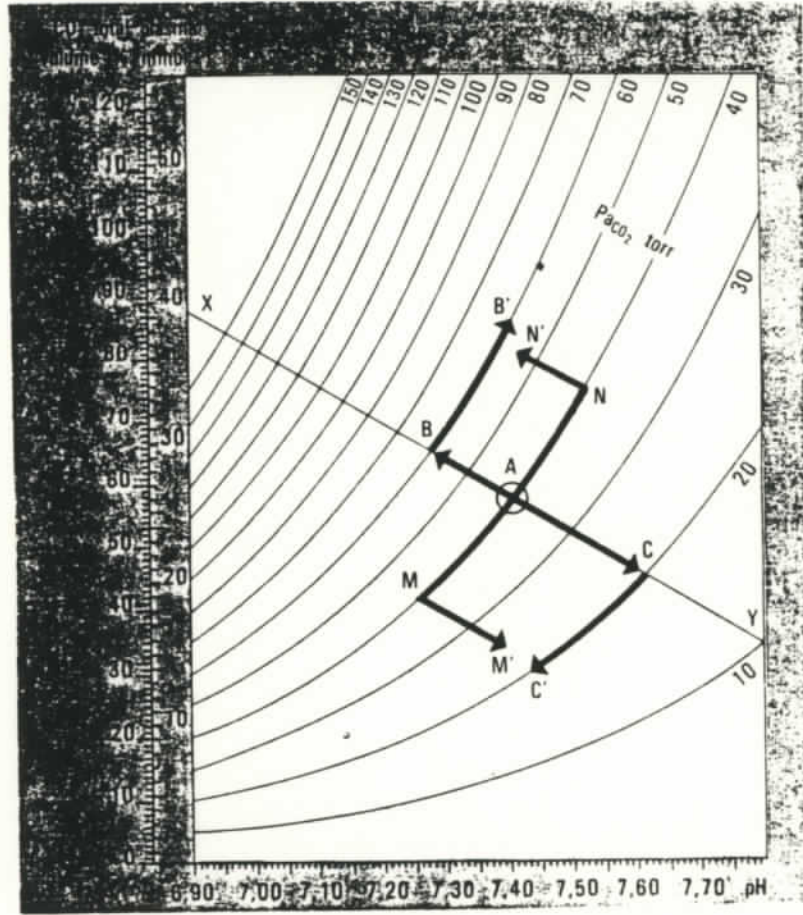


Figure 15: Diagramme de DAVENPORT

PHYSIOPATHOLOGIE DU CONFINEMENT HYPERCARBOXIQUE

5 LE CONFINEMENT HYPERCARBOXIQUE

Le confinement atmosphérique avec simple enrichissement en gaz carbonique est une situation qui préoccupe les physiologistes car elle peut se produire, avec l'évolution des techniques modernes, dans plusieurs circonstances: sous-marins, véhicules spatiaux et abris anti-atomiques en particulier (58).

D'autre part, l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère a, pour des raisons déjà évoquées (cf § 3.1.2), incité à mieux connaître les effets de ce gaz sur l'organisme lors d'expositions chroniques.

Enfin, ce type d'atmosphère peut se rencontrer dans la nature à proximité de phénomènes volcaniques, et parfois en caverne.

Nous en résumons donc ici les principaux effets connus ainsi qu'une synthèse des travaux de RADZISZEWSKI (58).

5.1 Physiopathologie de l'hypercapnie (23,76)

L'augmentation de la teneur en gaz carbonique du sang, qu'elle soit d'origine exogène (respiration d'une atmosphère enrichie en CO₂) ou endogène (augmentation du métabolisme) entraîne un certain nombre de réactions visant à réduire cet excès:

- Les **systèmes tampon du sang** (protéines plasmatiques, hémoglobine, sels minéraux), par élévation du taux de bicarbonates, tendent à réduire l'excès d'ion H⁺ induit par le CO₂. Cependant, ce système de capacité limitée est relayé par d'autres mécanismes plus puissants:

- Une **compensation respiratoire** permet, par hyperventilation alvéolaire, d'éliminer du CO₂. Cette hyperventilation est due à une augmentation du volume courant et est proportionnelle à l'importance de l'hypercapnie. Par ailleurs, la PaO₂ s'élève légèrement du fait de l'amélioration de la ventilation.

- L'augmentation du gaz carbonique sanguin s'accompagne

d'un abaissement du pH. Aussi, **le rein** corrige progressivement ce déséquilibre par réabsorption des bicarbonates et élimination de radicaux acides. Il s'agit alors d'une acidose respiratoire compensée.

Enfin, il existe d'importantes variations inter-individuelles en ce qui concerne les réactions à l'hypercapnie.

5.2 Données récentes sur le confinement hypercapnique (58)

Il s'agit de travaux réalisés en chambre climatique, avec exposition de sujets sélectionnés à des teneurs en gaz carbonique allant de 0 à 4,5% pour des durées de 6 à 45 jours.

5.2.1 Fonction respiratoire

Le confinement hypercarboxique entraîne une surcharge progressive puis stable en CO₂ des gaz alvéolaires qui ne dépasse pas 25% de la PiCO₂ en raison de l'efficacité de l'hyperventilation.

D'autre part, "après l'exposition, la surcharge en CO₂ (alvéolaire et sanguine) régresse dès la 2^o heure et disparaît totalement en 24 heures, quelles que soient la durée d'exposition et PiCO₂".

Pour ce qui concerne l'oxygène, "la pression partielle d'O₂ dans le gaz de fin d'expiration augmente de manière significative en fonction de PiO₂ en raison de l'hyperventilation....En espace écologique clos, **PiO₂ pourrait chuter sans qu'il y ait de retentissement sur le niveau de saturation hémoglobinée**". Nous verrons plus loin les problèmes que posent cette affirmation (cf § 8).

La ventilation est augmentée nettement à partir de FICO₂ = 1% . Elle est maximale lors des deux premières heures pour s'atténuer et se stabiliser au bout de 24 heures. Cette élévation de la ventilation porte essentiellement sur le volume courant, la fréquence n'étant augmentée modérément qu'à partir

d'une FICO₂ de 4%. L'espace mort est également plus important à partir de FICO₂ = 1%.

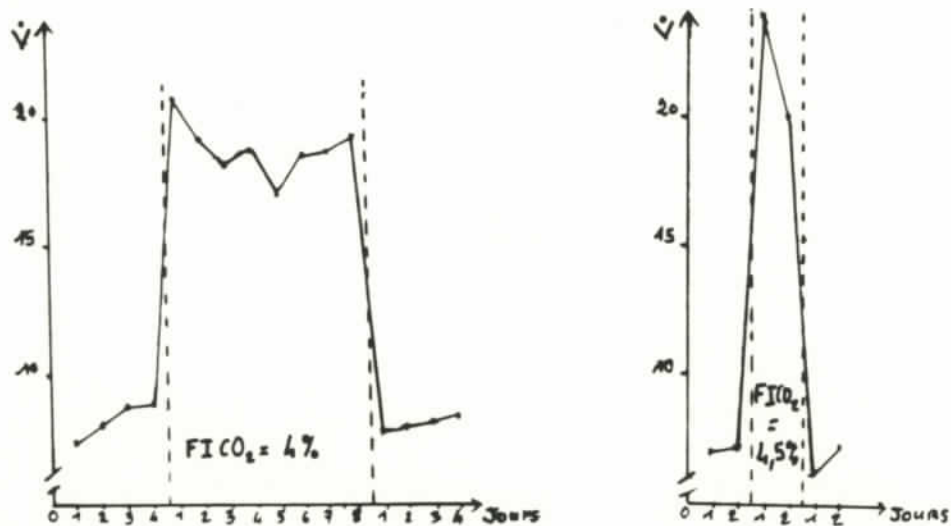


Figure 16: Réaction ventilatoire à FICO₂ 4% et FICO₂ 4,5% (d'après 58, simplifié)

Le coût énergétique de l'hyperventilation a été calculé: l'augmentation de la consommation d'oxygène apparait à partir de 1% de CO₂ dans l'air inspiré. A FICO₂ 4,5%, l'augmentation de V_{O₂} atteint 40% alors que l'hyperventilation est de 140%.

5.2.2 Equilibre acide-base et gaz du sang

L'abaissement du pH sanguin est net lorsque la FICO₂ atteint 3%. Pour des valeurs supérieures à celle-ci, l'acidose est importante durant environ deux heures. Parallèlement, les bicarbonates n'augmentent que faiblement.

Après la deuxième heure et jusqu'à la vingt-quatrième, l'acidose s'atténue, les bicarbonates s'élèvent de 8 à 10% ainsi que la kaliémie, et on constate une polyurie avec excrétion massive d'acidité nette.

Une troisième période débute après 24 heures avec l'élévation des bicarbonates de 4% puis un retour à la normale de référence, de même pour potassium, acidité urinaire et diurèse.

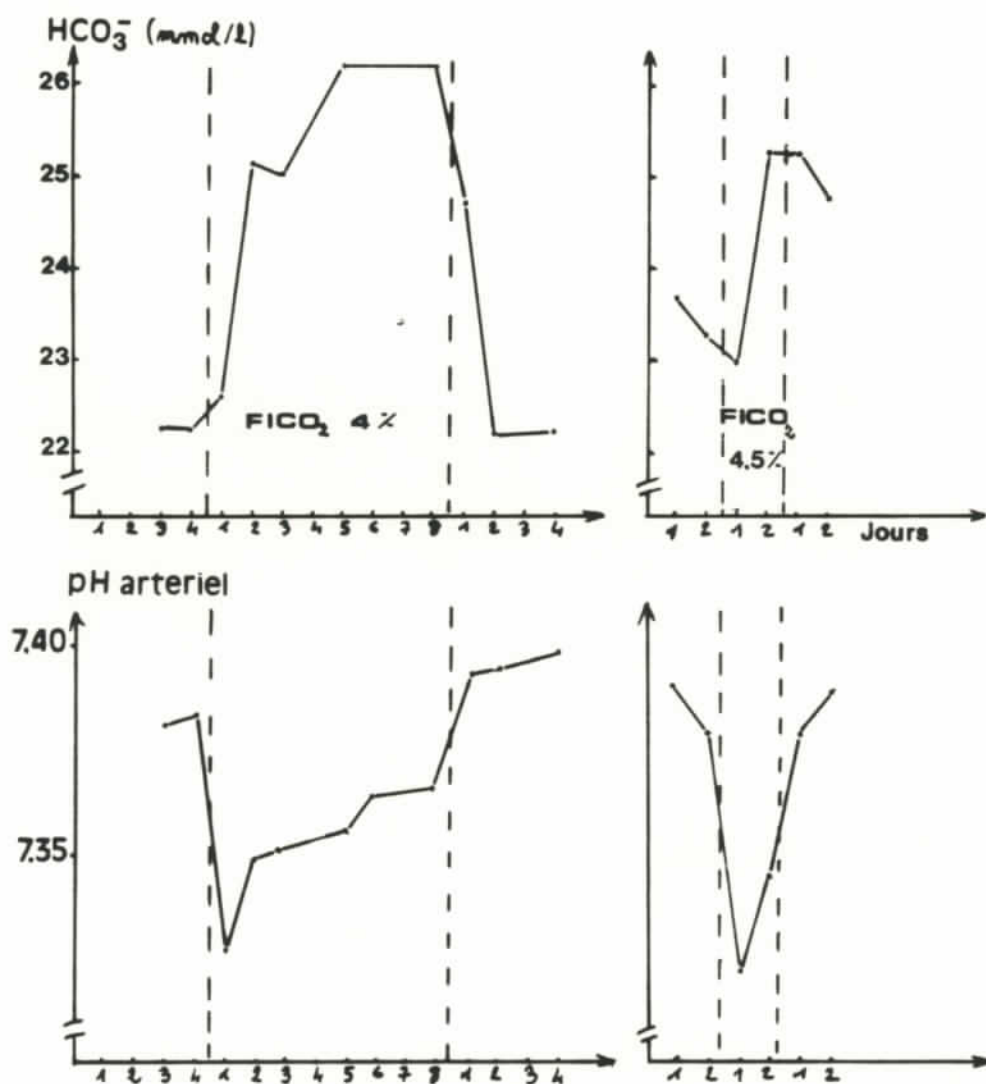


Figure 17: Equilibre acide-base du sang à $\text{FICO}_2 = 4\%$ et $4,5\%$ (d'après 58, simplifié).

Pour ce qui concerne les gaz du sang, l'effet de l'hypercapnie n'est significatif qu'à partir de $PiCO_2$ 1%: on observe à cette valeur une surcharge en CO_2 de 2,5 torr en moyenne, et une surcharge également de PaO_2 de 3,5 torr environ. Ces résultats sont superposables à ceux observés pour les pressions expiratoires terminales. (figure 18).

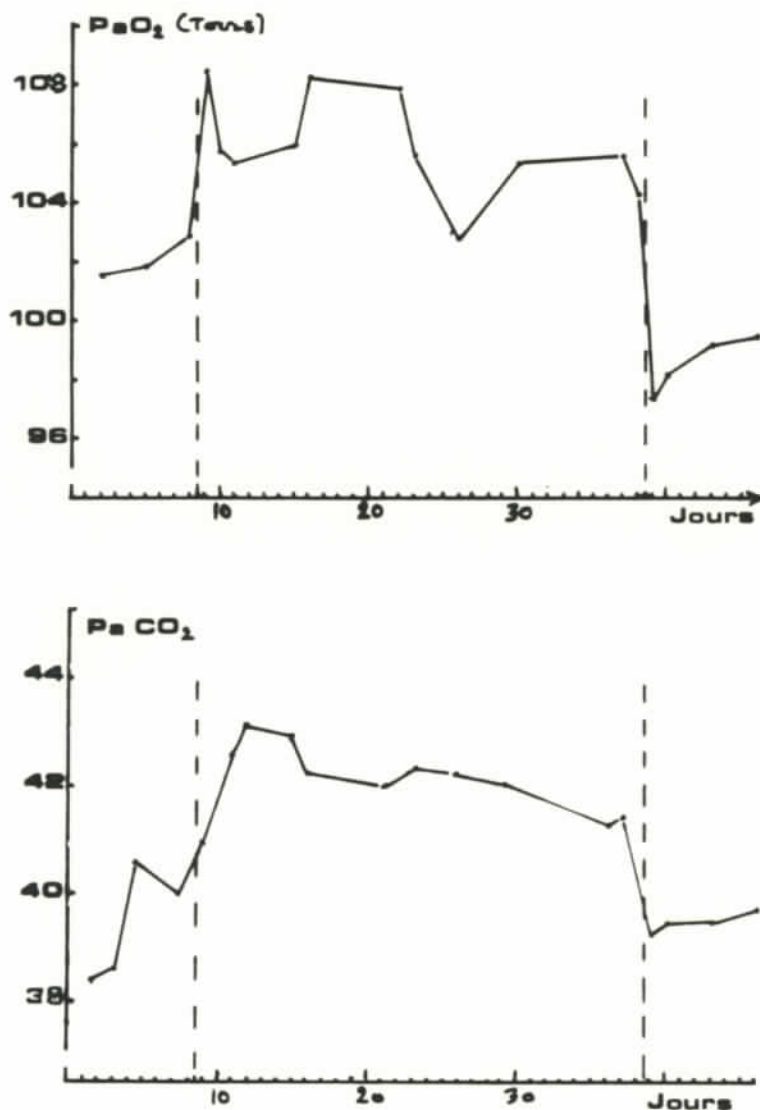


Figure 18: Gazométrie sanguine lors d'une exposition prolongée à $FICO_2$ 1 % (d'après (58), simplifié).

L'étude de RADZISZEWSKI ne prend malheureusement pas en compte les valeurs obtenues aux PICO₂ élevées en raison d'un manque de précision de l'appareil de mesure.

5.2.3 Fonction rénale et potassium plasmatique

Une augmentation de la diurèse est retrouvée lorsque la FICO₂ dépasse 4%. Elle serait due à une diminution de la réabsorption tubulaire d'eau par inhibition de l'Hormone Anti Diurétique et à la diminution importante du pH artériel.

Parallèlement à la diurèse, il existe une augmentation progressive et systématique de l'excrétion de tous les électrolytes urinaires pendant environ trois jours lors d'exposition continue au CO₂.

Pour ce qui concerne la kaliémie, son augmentation est significative et due à l'effet combiné de l'hémoconcentration et de la sécrétion d'ions H⁺ par le rein.

5.2.4 Paramètres hématologiques

Pour des FICO₂ supérieures à 2%, la tendance est à la diminution de l'hématocrite, du nombre de globules rouges et du volume globulaire moyen, alors qu'on observe l'effet inverse pour une FICO₂ supérieure à 3%, avec une augmentation systématique de ces paramètres pendant 24 heures qui s'explique par l'hémoconcentration due à la diurèse, et probablement une splénocontraction.

5.2.5 Activité hormonale surrénalienne

L'étude de l'acide vanylmandélique (A.V.M.), des 17 hydroxycorticoïdes (17 OH), et des 17 cétostéroïdes (17 Céto),

catabolites hormonaux d'origine médullo et cortico-surrénalienne, a permis d'établir que l'activité surrénalienne est nettement mise en jeu à partir d'une FICO₂ de 4,5%. Ce critère est retenu pour qualifier d'"inacceptable" l'exposition de l'homme à des valeurs égales ou supérieures (cf § 5.2.9).

5.2.6 Fonction circulatoire

L'étude envisagée rapporte que fréquence cardiaque et pression artérielle restent stables quelles que soient les valeurs des FICO₂.

Par ailleurs sont apparues des extra-systoles ventriculaires à l'exercice chez 3 sujets sur 15 à FICO₂ = 3% et chez 4 sujets sur 15 à FICO₂ = 4%.

Ces résultats sont cependant à confronter aux acquis antérieurs concernant les effets cardio-vasculaires de l'inhalation de CO₂ (38): les effets observés seraient la résultante d'un effet dépresseur direct, et d'un effet indirect par stimulation du système sympathique. La prépondérance de l'effet sympathique entrainerait une hypertension artérielle modérée et une augmentation du débit cardiaque par augmentation de la force contractile et de la fréquence. Au niveau des circulations locales, il y a élévation très nette du débit coronaire et cérébral, et peu de modifications pour les autres secteurs.

5.2.7 Symptômes subjectifs d'intolérance au CO₂

Les **céphalées** ne sont pas présentes chez tous les sujets. Elles sont dues à une vasodilatation par action directe du CO₂ sur les muscles lisses, et à une diminution de la sérotonine. Elles apparaissent à partir de FICO₂ = 2%, et deviennent fréquentes au delà. Elles sont majorées par l'effort physique.

Les **gastralgies** existent chez 16% des sujets, et seraient dues à une hyperacidité de la muqueuse gastrique.

Une **irritation pharyngée et des picotements oculaires** sont parfois perçus.

Les **nausées** n'existent qu'aux fortes PICO₂.

Les **bouffées de chaleurs** sont ressenties par la plupart des sujets.

Enfin, l'exercice est pénible à partir de FICO₂ = 4%.

5.2.8 Tests psychosensoriels et psychomotricité

Les tests psychosensoriels réalisés n'ont pu mettre en évidence de déficit de ces fonctions en raison d'un phénomène d'apprentissage.

Par ailleurs, pour des FICO₂ ne dépassant pas 4,5%, "les capacités opérationnelles des sujets seraient préservées pendant une durée suffisante pour leur permettre de réagir à une situation d'urgence".

Selon INOUYE et coll. (cité par (58)), la psychomotricité ne serait affectée qu'au delà de 5%.

5.2.9 Conclusions

L'un des objectifs de la thèse de RADZISZEWSKI était de déterminer avec précision les Concentration Maximales Admissibles (C.M.A.) en CO₂, soit teneurs ne présentant pas de risque pour une durée donnée d'exposition, et la Concentration Toxique Critique (C.T.C.) qui correspond "à la concentration qui en quinze minutes est capable de provoquer des effets pathologiques réversibles nécessitant la mise en oeuvre immédiate de mesures de sécurité et de protection."

Pour les expositions de longue durée (plusieurs semaines), la C.M.A. est de **0,7%**.

Pour les expositions de courtes durées, les critères retenus sont résumés dans le tableau 3.

Ceci permet de proposer comme C.M.A et C.T.C de gaz carbonique les valeurs suivantes:

C.M.A. 90 jours: 0,7%

C.M.A. 24 heures: 3%

C.M.A. 1 heure: 4%

C.T.C. 15 minutes: 5%

P_{iCO_2} (kPa)	1,93		2,85		3,8		4,28	
Durée	2 h	24 h	2 h	24 h	2 h	24 h	2 h	24 h
$\Delta \dot{V}E \nearrow$ (p.100)	60	45	70	50	160	130	240	180
$\Delta PET_{CO_2} \nearrow$ (torr)	1,3	3	3,5	6	5	6,5	5	8
$\Delta pH \searrow$	= 0	0,01	0,02	0,035	0,04	0,02	0,06	0,04
Adaptation à l'exercice	Bonne		Extrasystolie		Capacité limitée		Exercice proscrit	
17 CETO urinaires	/		Pas de variations		Pas de variations		Augmentation	
Symptômes subjectifs	Rares		Céphalées discrètes		Hyperpnée et céphalées intenses et gênantes, gastralgies			
Psychomotricité	Pas d'altération des performances							

Tableau 3: Principaux résultats obtenus au cours de l'hypercapnie chronique expérimentale chez l'homme, d'après 58.

PHYSIOPATHOLOGIE DE L'HYPOXIE

6 PHYSIOPATHOLOGIE DE L'HYPOXIE (23,43,76)

L'étude des mécanismes intervenant dans l'hypoxie s'est faite soit lors d'exposition à un mélange pauvre en oxygène, soit par diminution de pression atmosphérique (altitude ou caisson), ce qui réduit la pression partielle des gaz du mélange respiré et notamment de l'O₂ (hypoxie hypobarique).

Comme pour le gaz carbonique, le système d'adaptation intervient à plusieurs niveaux: milieu intérieur, respiration, circulation.

6.1 Milieu intérieur

6.1.1 Capacité de transport de l'hémoglobine

En présence d'hypoxie, il existe une modification d'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène traduite par un déplacement à droite de la courbe de dissociation de l'Hb.

On a ainsi une diminution d'affinité de l'oxygène pour cette molécule, ce qui augmente sa libération au niveau des tissus (cf § 4).

Cette diminution d'affinité est due essentiellement à une élévation du taux de 2-3 D.P.G. dont le taux s'élève de 27 à 38% au cours des 36 premières heures de vie en hypoxie d'altitude (75).

D'autres réactions d'adaptation dues à un ajustement du fonctionnement des chaînes métaboliques interviennent dans le même sens (Glutathion réduit, Méthémoglobine, ATP).

6.1.2 Modification de la numération globulaire

L'hypoxie induit une polyglobulie d'apparition progressive en huit à dix jours. Elle est due à une augmentation du taux d'érythropoïétine, et dans un premier temps à une splénocontraction accompagnée d'une hémococoncentration.

6.1.3 Equilibre acide-base

L'exposition à une hypoxie entraîne une élévation du pH sanguin en raison de l'hypocapnie et de la désaturation du sang en Hb (Hb réduite moins acide que HbO₂).

6.2 Ventilation

L'hypoxie aiguë entraîne une hyperventilation à partir de l'altitude de 3000 mètres environ, ou lorsque la FIO₂ est de 0,14. (Lors d'un séjour prolongé, une hyperventilation se produira aux altitudes supérieures à 1000 mètres).

Cette réponse ventilatoire porte essentiellement sur le volume courant (comme pour CO₂) et n'apparaît que si PAO₂ s'abaisse en dessous de 60 torrs (43).

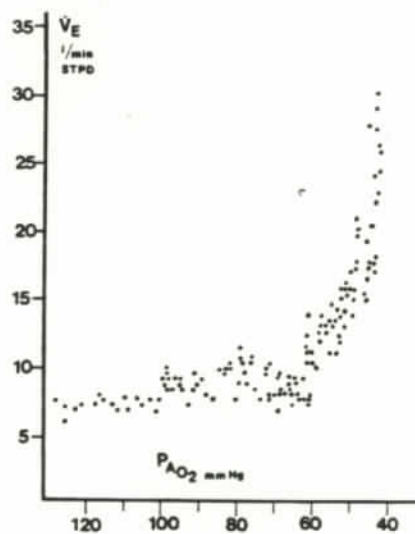


Figure 18: Réponse ventilatoire à l'hypoxie (76)

Cette réponse est rapide, mais certains sujets présentent une absence totale de réaction à l'hypoxie.

L'inhalation d'un mélange contenant 10% d'oxygène et de l'azote provoque une augmentation de la ventilation qui passe

de 7 à 8 litres/mn en moyenne.

L'hypoxie est donc un stimulus beaucoup moins puissant que l'augmentation de gaz carbonique.

Une des conséquences de l'hypoxie est, par le biais de l'hyperventilation réactionnelle, l'abaissement de la PaCO₂: ceci entraîne alors un abaissement également de la PCO₂ du LCR et du liquide interstitiel, d'où diminution de stimulation des récepteurs centraux et donc de l'hyperventilation. L'hypoxie serait donc un stimulus beaucoup plus efficace en l'absence d'hypocapnie.

Ceci a conduit certains auteurs à proposer l'inhalation de CO₂ à doses modérées pour traiter le mal aigu des montagnes (18).

Par ailleurs, il a été prouvé qu'hypoxie et hypercapnie n'ont pas un effet simplement additif car la réponse à l'hypercapnie est amplifiée par l'hypoxie.

6.3 Réactions circulatoires

L'hypoxie provoque une augmentation du débit cardiaque ainsi que de la fréquence. Au cours de l'acclimatation, ces modifications tendent à s'atténuer, et les valeurs tendent à revenir les mêmes qu'avant l'exposition.

6.4 Troubles neurologiques (67)

Des troubles de la vision peuvent apparaître à partir de 3000 mètres d'altitude (diminution du champ visuel, troubles de l'accommodation, baisse de l'acuité).

Il peut exister également des troubles de la coordination motrice et de l'équilibre, ainsi qu'une parésie généralement prédominante au niveau des membres inférieurs.

Durant les premières heures d'un séjour en altitude, le sujet ressent une certaine euphorie, une sensation de bien-être. Mais il existe en réalité des troubles intellectuels dont il n'a pas conscience: lenteur d'idéation, difficultés au

calcul mental, déficit de la mémoire, baisse de la vigilance, agressivité parfois. Puis l'euphorie fait place à des troubles plus importants qui signent l'oedème cérébral: céphalées, nausées, insomnies, dyspnée.

) Au repos et au niveau de la mer, le danger n'existerait qu'en dessous de $FI_{O_2} = 14\%$.

LE CONFINEMENT HYPOXIQUE

7 LE CONFINEMENT HYPOXIQUE

7.1 Le confinement hypoxique expérimental

7.1.1 Expériences de BERT

Les premières expériences de confinement remonte-
raient à LAVOISIER (à partir de 1874) à qui elles permirent la
découverte des gaz respiratoires. A la fin du siècle dernier,
BERT (7) les utilise pour établir un certain nombre de
principes régissant la physiologie respiratoire notamment lors
de l'hypoxie d'altitude et l'hyperbarisme. Ainsi naissait
l'écophysiologie.

Ces expériences, réalisées en milieu clos avec de
petits animaux, entraînaient des modifications constantes de
l'atmosphère respirée avec diminution de l'oxygène et
augmentation du gaz carbonique jusqu'à la mort (figure 19).

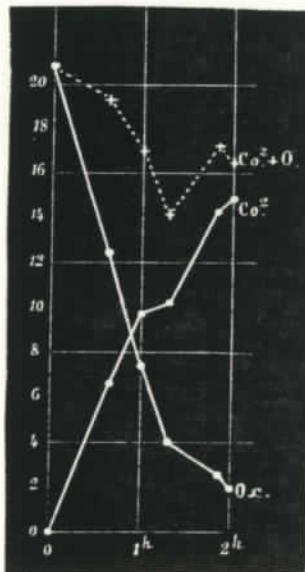


Figure 19: évolution de la qualité atmosphérique en milieu clos pour les expériences de BERT (7).

Au niveau des gaz du sang, il y a dans un premier temps augmentation de PaCO₂ et diminution lente de PaO₂, puis un effondrement de PaO₂ et de PaCO₂ (Figure 20).

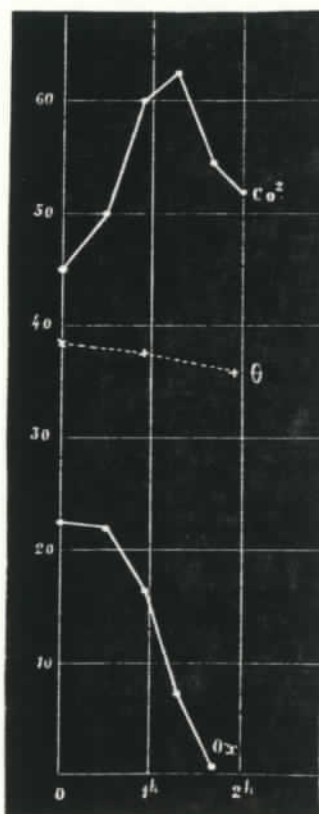


Figure 20: gaz du sang lors des expérience de BERT.

La diminution lente d'oxygène des gaz du sang s'explique par ce que BERT appelait une "extraction plus énergique de l'oxygène" certainement due à l'élévation de la PaCO₂.

La seconde phase apparait lorsque le déficit ambiant en O₂ est tel que les mécanismes d'oxydation cellulaires ne se produisent plus.

Dans ce cas, l'asphyxie est donc due à un déficit en oxygène et le gaz carbonique n'a qu'un rôle secondaire pour la seconde phase.

7.1.2 Données plus récentes

La composition des gaz alvéolaires en atmosphère confinée hypoxique a été étudiée par CONSOLAZIO et al (1947) (cités par (1)): la modification des teneurs ambiantes en O₂ et CO₂ a bien sûr des répercussions sur PAO₂ et PACO₂ représentées par la figure 21. L'intérêt de ce travail a été de mettre en évidence les possibilités d'adaptation de l'organisme avec l'absence de parallélisme entre la composition de l'air alvéolaire et externe: en effet, on voit qu'une diminution de PO₂ de 40 mmHg n'entraîne une diminution de PAO₂ que de 10 mmHg (de même pour une élévation de PCO₂).

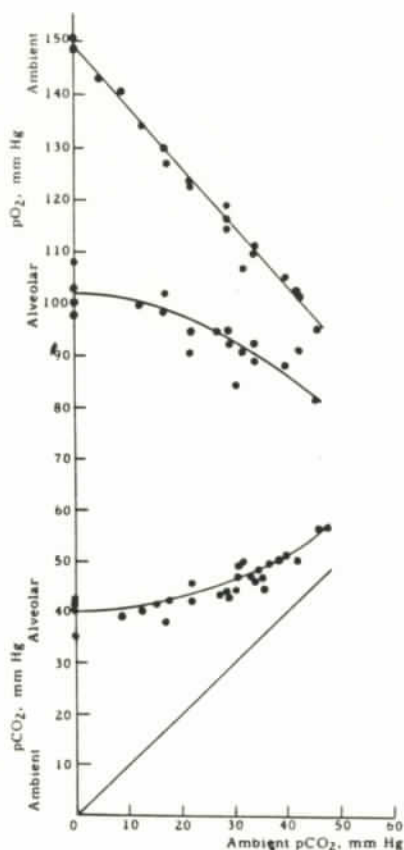


Figure 21: Composition des gaz alvéolaires en atmosphère confinée (CONSOLAZIO et Al , cités par (1))

D'autre part, il est prouvé qu'une diminution de FI_{O_2} potentialise l'effet d'une hypercapnie (les stimuli O_2 et CO_2 ne sont pas seulement additifs).

Au niveau des gaz du sang, on sait que l'inhalation d'un mélange enrichi en CO_2 provoque une légère élévation de la Pa_{O_2} (23).

Donc, la diminution de FI_{O_2} potentialise l'action du CO_2 , ce qui améliore la ventilation et donc Pa_{O_2} . Même s'il existe une diminution de PA_{O_2} , on a une élévation de Pa_{O_2} en hypercapnie. Cependant, ce phénomène ne semble pas avoir beaucoup retenu l'attention, et on ignore par exemple jusqu'à quel déficit en O_2 il existe une correction par une hypercapnie donnée.

Les autres mécanismes dépendent des valeurs de Pa_{O_2}/Pa_{CO_2} et ont été envisagés plus haut.

Ces observations tendent à ramener les problèmes respiratoires et métaboliques en A.C. hypoxique à ceux des A.C. hypercarboxiques.

7.2 Le confinement accidentel

7.2.1 Circonstances

Il existe de nombreux cas d'exposition accidentelle à des atmosphères confinées. Les professions les plus atteintes sont les puisatiers, fossoyeurs, égoutiers, mineurs,..etc (39).

Malheureusement, l'analyse qualitative et quantitative des atmosphères incriminées est exceptionnelle. On est en droit de penser cependant que le déficit en oxygène accompagne l'excès de gaz carbonique dans la plupart des cas, même si le terme d'"intoxication au gaz carbonique" est employé très souvent. Il existe en outre des atmosphères privées d'oxygène sans élévation du CO_2 (mines de pyrite, oxydation de réservoirs en métal, par exemple).

Il s'agit souvent de volumes artificiels creusés au niveau du sol, et les mêmes mécanismes que ceux évoqués pour les cavernes calcaires (diffusion de l'atmosphère du sol végétal) sont très probables, avec la différence qu'ici n'existe pas un réservoir atmosphérique péricavitaire pour atténuer l'importance du confinement.

Pour le cas de lieux clos dans lesquels sont entreposés des végétaux, le déficit en oxygène est là aussi évident avec la "fermentation" de ceux-ci.

Il peut s'agir de puissants mécanismes d'oxydation: HEULLY et Al (36) citent un décès survenu dans une mine avec une atmosphère contenant 9,8% de CO₂ et 5% d'O₂. L'origine est attribuée à "la décomposition des terrains calcaires", alors que le minerai extrait est susceptible de consommer beaucoup d'O₂ (il s'agit de mines de fer dans les calcaires Bajociens de MOSELLE).

D'autres sources ont été citées: microorganismes (77), moteurs à explosion (59), cuves à vendanges, etc

Contrairement à l'exposition en caverne, de nombreux décès sont à déplorer dans ces cas. Ceci s'explique de plusieurs manières: tout d'abord, les modifications atmosphériques sont parfois bien plus importantes qu'en caverne naturelle en raison de sources différentes du confinement et d'échanges avec d'autres compartiments gazeux plus réduits que dans un karst; d'autre part, il existe une association fréquente avec d'autres gaz (CO, H₂S, etc); enfin, les sujets non prévenus présentent quelquefois des malaises indirectements mortels (chute, noyade, etc) d'autant plus facilement que l'exposition est brutale.

7.2.2 Symptômes

Plusieurs symptômes sont décrits dans ce cas (39):

Les sueurs sont abondantes, il existe une sensation de soif, une gêne respiratoire avec sensation d'oppression thoracique, tachycardie, puis apparaissent une agitation, une

diminution de la pression artérielle, et le coma qui précède la mort.

Malheureusement, ces symptômes sont souvent mal corrélés à la composition atmosphérique, et leur description varie suivant les auteurs.

7.2.3 Traitements

Il y a quelques années, Le traitement systématiquement préconisé pour tous les types d'asphyxies était le "carbogène", mélange de 7% de gaz carbonique et de 93% d'oxygène (18). Actuellement, il est remplacé par l'oxygénothérapie (31,39).

7.3 Les atmosphères confinées karstiques

De nombreux troubles ont été décrits au cours d'explorations spéléologiques en A.C.S. karstique. Pour tenter de les regrouper, nous avons utilisé les compte-rendus d'explorations et des questionnaires fournis à des spéléologues confrontés à ce type de problème (annexe 2), et réalisé plusieurs observations lors de visites du type de cavités concernées par cette étude.

7.3.1 Historique

Les premiers explorateurs considéraient le gaz carbonique comme un "redoutable poison" (MARTEL, 1894, cité par 63).

Un demi siècle plus tard, DUJARDIN-WEBER (21) dit encore que "l'anhydride carbonique offre de réels danger d'asphyxie"

Le développement de la recherche scientifique en caverne motivée pour le CO₂ par son rôle dans la karstogénèse a permi, à partir surtout du milieu du siècle, une meilleure

connaissance du phénomène.

Parallèlement, l'évolution des techniques de progression et le nombre d'explorations ont confronté de plus en plus de personnes aux atmosphères confinées karstiques, ce qui permet d'en établir empiriquement la relative innocuité.

A notre connaissance, seuls JAMES et coll. (40) se sont jusqu'à présent sérieusement penchés d'une manière théorique sur les problèmes physiopathologiques de la spéléologie en A.C.. Par ailleurs, plusieurs études ont regroupé les symptômes et/ou les techniques d'exploration (6,10,42,64,69...).

7.3.2 Fonction respiratoire:

Le signe objectif le plus tôt et fréquemment perçu en atmosphère confinée karstique est l'hyperventilation qui n'a épargné personne lors de nos observations. Les sujets la traduisent par "essoufflement", "soif d'air". Il existe parfois une sensation de constriction thoracique, de gêne aux mouvements respiratoires.

Ce seul symptôme peut avoir des conséquences néfastes chez le sujet non habitué: désir de fuite, panique, stress... Les spéléos Australiens, qui fréquentent des cavités confinées depuis longtemps, décrivent deux types de réactions respiratoires (ref 40):

- Une hyperventilation dans la plupart des cas, associée à une vasodilatation cutanée: les sujets sont alors appelés "Pink-puffers".

- Pour une petite minorité existerait une absence de réaction respiratoire: les "Blue-bloatters", qui sont cyanosés.

On retrouve ici des termes utilisés parfois en anesthésiologie et pneumologie.

Le deuxième type de sujet ne semble pas avoir été décrit par les spéléologues Français jusqu'à présent.

L'hyperventilation apparaît à partir de 1% de CO₂

et porterait sur la fréquence respiratoire et le volume courant (40).

En ce qui concerne la gazométrie sanguine, le seul exemple dont on dispose est celui rapporté par JALLET (39): à la suite d'un malaise (céphalées, vertiges, obnubilation) lors d'une exploration de cavité à A.C. près de Montpellier (qualité atmosphérique non étudiée), un spéléologue est hospitalisé et des gaz du sang sont réalisés d'emblée:

pH = 6,89 PaCO₂ = 110 mmHg PaO₂ = 135 mmHg

Par ailleurs, la recherche d'HbCO est négative et le diagnostic d'intoxication au CO₂ est porté. Le traitement consista à administrer de l'oxygène pur et le sujet fut rétabli le lendemain.

Ce résultat non commenté est d'autant plus surprenant que le prélèvement semble avoir été réalisé avant l'oxygénothérapie.

7.3.3 Fonction cardio-vasculaire

Très peu d'observations ont été faites sur la fonction cardio-vasculaire en atmosphère confinée karstique: selon JAMES (40), des palpitations peuvent apparaître à partir de 4% de CO₂, et une vasodilatation surtout visible au niveau de la face (flush).

7.3.4 Signes neurologiques

* Les céphalées sont un des signes les plus fréquents. Au niveau physiopathologique, elles s'expliquent par l'importante vasodilatation induite par l'hypercapnie. En effet, les variations du débit sanguin cérébral sont directement proportionnelles à la capnie.

Les céphalées apparaissent généralement en cours

d'exploration, et disparaissent souvent quelques heures après, parfois le lendemain.

* Des troubles moteurs et une fatigue intense peuvent apparaître pour une exposition prolongée à des teneurs en CO₂ assez élevées, ou lors d'efforts musculaires importants.

La capacité de travail serait notablement diminuée à partir de 3% de CO₂ (40).

Les difficultés de progression dépendent de nombreux paramètres, mais peuvent aller jusqu'à l'impossibilité de s'extraire du danger, ceci pour des teneurs en gaz carbonique inférieures à 6% (48).

Il existe aussi quelques fois des crampes musculaires et des troubles de la coordination des mouvements.

* Les vertiges sont quelques fois cités (19,48), mais ils sont également souvent appelés "étourdissement", parfois par des sujets anxieux.

Aucun syndrome vertigineux vrai n'a été observé.

* Plusieurs cas de troubles de la mémoire immédiate ont été rapportés: les plus anciennement décrits l'ont été par FOREL en 1864 (cité par 7), lors d'une visite à la Grotte aux Fées (Suisse): "Après un séjour de plusieurs heures dans cette caverne, en étudiant mon état physiologique, j'ai constaté: accélération du pouls, accélération des mouvements respiratoires, et troubles intellectuels que je décrivais alors dans les termes suivants: lorsque j'ai voulu compter mon pouls, j'ai été obligé d'y revenir à sept fois: je me trompais souvent, je passais des nombres, je comptais deux fois de suite la même dizaine, ou je comptais une dizaine en passant par la fin.

Il est à noter que la composition de l'atmosphère était alors la suivante: CO₂= 1,9%, O₂= 14,7%. FOREL attribue alors les troubles à l'hypoxie.

Nous avons observé des troubles analogues après seulement 1 heure dans 1,5 à 4,7% de CO₂ (O₂ non mesuré), chez

une personne qui ne put décrire une concrétion ou une galerie quittée quelques minutes avant (56). Chez un autre sujet, après 30 minutes à 4% de CO₂, il lui était impossible de se souvenir des chiffres lus dans le compas quelques secondes plus tôt (55).

* Des troubles de l'orientation non justifiés par la configuration de la grotte existent parfois. Ils sont peut-être à rapprocher des troubles de la mémoire immédiate précédemment décrits.

7.3.5 Atteintes sensorielles

- Les troubles visuels sont relativement rares et perçus lors d'expositions prolongées ou à de fortes teneurs en CO₂. Ont été parfois signalés une diminution du champ visuel (48,69) l'un des cas étant apparu après 6 heures de visite dans une cavité avec 3% de CO₂.

* Des hallucinations visuelles nous ont été rapportées, toujours pour des expositions longues (55): Deux sujets, après un séjour de près de deux heures dans une rivière souterraine dont l'atmosphère contenait 4 à 5% de CO₂, perçurent "des serpents" pour l'un, et des "vaguelettes dorées" pour le second.

Signalons ici que les hallucinations visuelles ont déjà été notées en spéléologie, mais à la suite d'explorations très longues (plusieurs dizaines d'heures) et en dehors de tout contexte d'hypercarboxie (70).

* Une dysgueusie à type de "goût métallique" existe parfois (55).

7.3.6 Atmosphères confinées et psychisme

* symptômes: outre les hallucinations mentionnées plus haut, une sensation d'angoisse est souvent perçue avec la difficulté respiratoire, avec parfois une sensation de danger imminent. Cette impression est bien sûr amplifiée par l'hostilité du milieu, et l'on a remarqué une majoration des signes subjectifs, pour une même cavité, dans des passages étroits (ne nécessitant pas d'effort supplémentaire de progression) sans que les mesures faites à postériori n'indiquent la moindre modification des teneurs en O₂ et CO₂. Il semble en être de même pour les parties profondes des cavités.

Cette angoisse apparaît avec les difficultés respiratoires, ce qui n'est pas sans évoquer le stress perçu par les malades victimes d'insuffisance respiratoire aigue.

L'atteinte de cette fonction vitale qu'est la respiration semble donc favoriser l'apparition d'un réflexe "carcéral".

A l'inverse, il existe parfois une euphorie qui peut être accompagnée d'agitation psychomotrice (55). Cette euphorie peut apparaître après une période d'angoisse et être perçue comme une sensation de dominer le milieu.

Une obnubilation est citée pour un cas d'exposition à FC02 = 2% (48), et pour un autre sans mesures atmosphériques (40).

Les hallucinations ont été envisagées au § 7.3.5.

* Atmosphères confinées et expérience: il existe un incontestable effet d'apprentissage pour les atmosphères confinées karstiques, et les personnes ayant l'expérience de plusieurs explorations présentent souvent une diminution des signes fonctionnels. La méconnaissance du phénomène autant que l'effet de surprise qu'il peut entraîner mettent rapidement en situation de stress (56).

* Effet placebo: l'influence du psychisme sur la manière d'appréhender ces atmosphères est évidente dans certains exemples: nous avons vu une personne ressentir des malaises et sortir de la cavité après lui avoir annoncé la présence de CO₂; or, il y en avait à peine plus qu'à l'extérieur. A l'inverse, un sujet très sensible au confinement n'éprouva aucun trouble dans une cavité riche en gaz carbonique, après qu'on lui ait annoncé qu'il n'y en avait pas (RENAULT, comm. orale.).

Dès 1943, DUJARDIN-WEBER (21) remarquait l'importance du psychisme en A.C.: "Bien des visiteurs des cavernes voient trop souvent à tort la présence d'un gaz! En l'occurrence, il s'agit souvent d'une appréhension, d'une peur injustifiée ou d'une autosuggestion voir même collective, et semble-t-il aux yeux de l'ironiste, bien souvent d'un état physiologique particulier inhérent à l'ingestion préalable d'une trop grande quantité de victuailles et boissons ou d'autres égarements incompatibles avec les efforts, la tension des sens et l'esprit critique. C'est dire qu'un contrôle absolu de soi-même est nécessité de l'ambiance souterraine et de tout ses facteurs conditionnels."

7.3.7 Troubles digestifs

Le signe digestif le plus fréquent est la nausée, rarement suivie de vomissements. Elle accompagne volontiers les céphalées.

Les épigastralgies décrites pour les A. C. Hyper-carboxiques n'ont pas été retrouvées.

7.3.8 Troubles divers

* Un syndrome post-critique caractérisé par l'apparition à partir d'une FC0₂ de 5% de céphalées, nausées et parfois vomissements, flush facial, palpitations, a été décrit par JAMES et al. (40), et nommé "off effects". Ces

symptômes n'apparaîtraient qu'après l'exposition, et seraient dus à la diminution rapide de la PaCO₂. Ce syndrome n'a pas été retrouvé dans nos observations, et seuls certains symptômes (céphalées, nausées) sont présents d'ailleurs souvent avant le retour en surface.

* Des picotements oculaires et pharyngés sont assez fréquents et pourraient être attribués à l'acidité du gaz au contact des muqueuses. Ils sont, chez certaines personnes, le premier signe indiquant la présence de CO₂ dans l'air.

* Des épisodes hyperthermiques survenant après la visite de grottes à atmosphère confinée ont été remarqués chez un sujet (6). Bien que de multiples causes puissent en être à l'origine, il est à noter que des "phénomènes fébriles graves ressemblant à des fièvres paludéennes" ont été également rapportés pour les survivants de prisonniers enfermés dans des caves à air non renouvelé (BROUARDEL cité par (39)).

* Une polyurie semble exister comme pour les atmosphères confinées hypercarboxiques (cf § 5.2.3), mais sa mise en évidence est difficile, surtout pour les courtes visites.

* L'augmentation de la diaphorèse est fréquente, mais également difficile à relier au seul confinement atmosphérique, de multiples causes pouvant la provoquer (tenues imperméables souvent utilisées, saturation de l'air en vapeur d'eau, activité physique, etc). Ajoutons que la température ambiante est parfois plus élevée quand il y a du CO₂.

7.3.9 Variabilité des symptômes

Le nombre et l'intensité des symptômes varie beaucoup selon les individus, tout comme d'ailleurs les modifications

physiopathologiques dues aux atmosphères hypercarboxiques (cf §5).

Par ailleurs, les signes fonctionnels sont majorés par une activité physique importante, le stress, le caractère étroit ou profond des galeries (à rapprocher du stress), une exposition brutale.

Une exposition brutale est difficile à supporter, de même que la période de début d'exposition aux confinements importants.

7.4 Observations personnelles

7.4.1 Variation des paramètres cardio-vasculaires et respiratoires au Cuzoul de Roc Traoucat (Sauliac, LOT).

Le Cuzoul de Roc Traoucat est une cavité connue pour ses fortes teneurs en gaz carbonique (jusqu'à 5,9%). Ses caractéristiques atmosphériques ont été étudiées en détail par P.RENAULT (63). Les observations ont été faites le 11-6-1989.

* Méthodes d'étude: les teneurs en CO₂ et O₂ ont été réalisées à l'aide d'une pompe DRAEGER et de tubes réactifs adaptés. La déviation standard relative étant de 10 à 5%, deux mesures ont été faites pour l'oxygène de manière à limiter les fausses indications. Les valeurs ont été corrigées en fonction de la pression atmosphérique.

Les paramètres physiologiques évalués étaient: la pression artérielle, la fréquence cardiaque (pouls radial), la fréquence respiratoire, ainsi qu'une auscultation cardiaque. Toutes les mesures ont été doublées et réalisées après dix à quinze minutes de repos en décubitus dorsal. Une première série a été faite avant l'exploration, la seconde après exposition à l'atmosphère confinée de vingt-cinq à quarante-cinq minutes.

* La cavité et son atmosphère: l'accès au lieu des mesures se fait par une galerie généralement horizontale comportant quelques étroitures faciles à franchir.

La température était de 12°C. Les valeurs de CO₂/O₂ sont portées sur la figure 22:

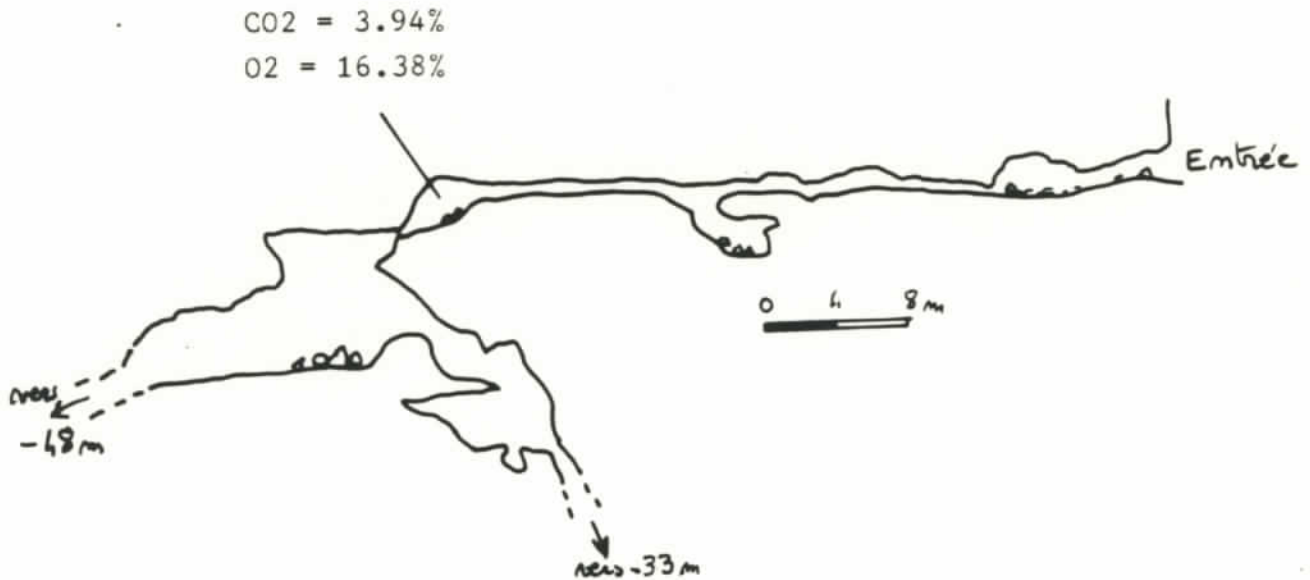


Figure 23: Cuzoul de ROC TRAUCAT (Sauliac-46), coupe.

* Résultats: Tableau 4

mesures :	avant exploration				:	pendant exploration			
:-----									
sujets :	P.A.:	F.C.:	F.R.:	Ausc. :	P.A.:	F.C.:	F.R.:	Ausc. :	
B.B.	: 11-6	: 72	: 12	: /	: 9-6	: 70	: 19	: E.S.	
:-----									
I.B.	: 12-8	: 84	: 20	: /	: 12-8	: 100	: 20	: /	
:-----									
H.B.	: 14-7	: 60	: 20	: /	: 11,5-5	: 77	: 20	: /	
:-----									
M.D.	: 11-6	: 57	: 18	: /	: 11,5-8	: 52	: 16	: /	

P.A. = pression artérielle. F.C. = fréquence cardiaque
F.R. = fréquence respiratoire. Ausc. = auscultation

* Interprétation:

- Les pressions artérielles systoliques sont diminuées de 2 et 2,5 unités chez deux sujets, relativement stables chez les deux autres. La diastolique est abaissée dans un cas (1,5 unités), élevée dans un autre cas (2 unités), et stable pour les autres.

- La fréquence cardiaque est augmentée pour deux personnes, et très discrètement abaissée pour les deux autres.

- La fréquence respiratoire n'est augmentée que pour un sujet, les trois autres ayant des valeurs sensiblement stables. Cependant, tous les sujets ont perçu des difficultés respiratoires qui confirment l'hypercapnie.

- De rares extra-systoles sont apparues chez un sujet, sans signes fonctionnels.

* Conclusions: Cette première petite expérience est difficile à interpréter, et n'aura de valeur qu'avec d'autres observations. Cependant, elle met en évidence encore une fois la diversité des réactions individuelles. On remarque aussi que la fréquence respiratoire n'est pas systématiquement augmentée, et la baisse de la pression artérielle constatée pour deux personnes est à confirmer par d'autres mesures. Il n'existe pas d'élévation de la pression artérielle.

Ajoutons que les conditions de réalisation étaient éloignées des conditions réelles d'exploration: présence de deux médecins, bonne information des sujets, absence d'efforts physiques. Ceci prouve l'intérêt d'un "conditionnement " correct avant d'aborder une atmosphère confinée.

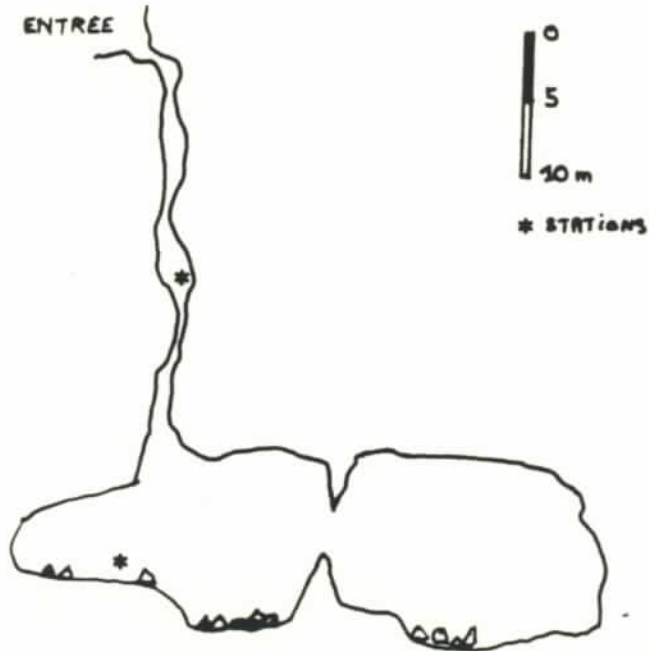
7.4.2 Variation des paramètres cardio-vasculaires et respiratoires à l'igüe de Fauvelet (Caniac, LOT).

L'igüe de Fauvelet est un gouffre du causse de Gramat (LOT) également riche en gaz carbonique. Une succession de puits étroits mène à une salle confortable à la profondeur de 50 mètres environ, où ont été réalisées les mesures. La visite eût lieu le 24 Septembre 1989.

* Les méthodes d'étude sont identiques à celles de Roc Traoucat (§7.4.1). La durée d'exposition dans les puits a été d'une heure environ. Les observations physiologiques ont été faites après un repos de 15 à 40 minutes.

* Etude atmosphérique: La teneur en CO₂ au milieu des puits était de 3,6% (O₂ non mesuré). Dans la salle, on obtenait: FC0₂ = 3,14% ; FO₂ = 17,90%.

Figure 23: Igue de FAUVELET (Caniac-46) coupe schématique:



* Résultats: Tableau 5

	mesures: avant exploration				: pendant exploration			
	:-----							
sujets	: P.A.:	F.C.:	F.R.:	Ausc.:	: P.A.:	F.C.:	F.R.:	Ausc.
A.M.	: 11-7	: 80	: 12	: E.S.	: 13-8	: 72	: 12	: /
F.R.	: 12-7,5	: 84	: 18	: /	: 14-9	: 100	: 24	: /
B.H.	: 12-7	: 72	: 12	: E.S.	: 13-8	: 72	: 12	: /
P.D.	: 11-6	: 84	: 20	: /	: 12-7	: 88	: 24	: E.S.

* Interprétation:

- Les pressions artérielles sont toutes plus élevées, de 1 à 2 unités pour les systoliques et 1 à 1,5 unités pour les diastoliques.

- La fréquence cardiaque est élevée pour une personne, abaissée pour une autre, et sensiblement identique pour les deux autres.

- Les fréquences respiratoires sont augmentées pour deux sujets et stables pour les deux autres.

- L'auscultation cardiaque décèle des extra-systoles chez deux sujets avant l'exploration, et chez un troisième pendant, avec normalisation pour les deux autres.

* Conclusions:

On remarque ici, par rapport à la précédente expérience, une augmentation systématique des pressions artérielles qui peut avoir plusieurs origines:

- soit l'effort physique. Il n'est cependant pas plus important qu'au Cuzoul de Roc Traoucat dont l'accès nécessite une ascension d'une cinquantaine de mètres.

- soit l'hypercapnie: la durée d'exposition a été en effet plus longue d'environ une demi-heure, mais la teneur en CO₂ était inférieure de 0,5 à 1%. De plus, les observations suivantes nous prouveront que pour des expositions inférieures à une heure aux valeurs allant jusqu'à FICO₂ = 4%, il ne semble pas exister d'élévation de PaCO₂ (cf § 7.4.3 et 7.4.4).

- soit le "stress", favorisé par un éloignement de la surface et une relative étroiture des puits, conformément à ce qui est évoqué au § 7.3.6.

Les autres résultats confirment encore la variation des réactions individuelles, et l'absence d'élévation systématique des fréquences respiratoires et cardiaques.

7.4.3 Première étude gazométrique sanguine à l'Igue du Frau (MONTFAUCON, LOT):

Cette étude effectuée le 4 Novembre 1989 avait pour but d'observer les modifications gazométriques du sang artériel de trois sujets après exposition à une atmosphère confinée karstique.

* Méthode d'étude: après une heure à une heure trente de séjour dans la partie confinée de la cavité, le prélèvement a été réalisé par ponction de l'artère radiale à l'aide d'un modèle de seringue à piston spécialement adapté à cet usage, avant de sortir du gouffre. Les échantillons ont alors été acheminés dans une bouteille isolante contenant de la glace au laboratoire de Biologie Médicale de Sarlat (DORDOGNE) et analysés immédiatement, soit quarante-cinq à soixante minutes après le premier prélèvement. Le matériel de lecture a été étalonné avant utilisation et chaque résultat vérifié.

L'étude des caractéristiques de l'atmosphère s'est faite selon les mêmes modalités que lors des précédentes études. Par prudence, une recherche de vapeurs nitreuses et monoxyde de carbone a été faite devant les traces récentes d'une désobstruction à l'explosif (recherche négative).

* La cavité et son atmosphère: L'Igue du Frau est un gouffre de plusieurs dizaines de mètres de profondeur, situé sur le causse de Gramat. Cette cavité est constituée d'un premier puits assez étroit d'environ dix mètres, donnant accès à une courte galerie également étroite et déclive qui est suivie d'un second puits (voir coupe). Les sujets ont effectué ce parcours sans descendre le 2° puits, et ont séjourné dans la galerie en attendant le prélèvement qui a été fait à la base de la première verticale.

La composition de l'atmosphère montrait un confinement important: les premières mesures (bas du 1^o puits) donnèrent $FCO_2 = 4,16\%$; $FO_2 = 15,06\%$. Les secondes ont été faites dans la galerie descendante: $FCO_2 = 4,16\%$, $FO_2 = 15,57\%$. Il existe donc un important déficit en oxygène associé à une teneur en gaz carbonique plus de cent fois supérieure à celle de l'air extérieur.

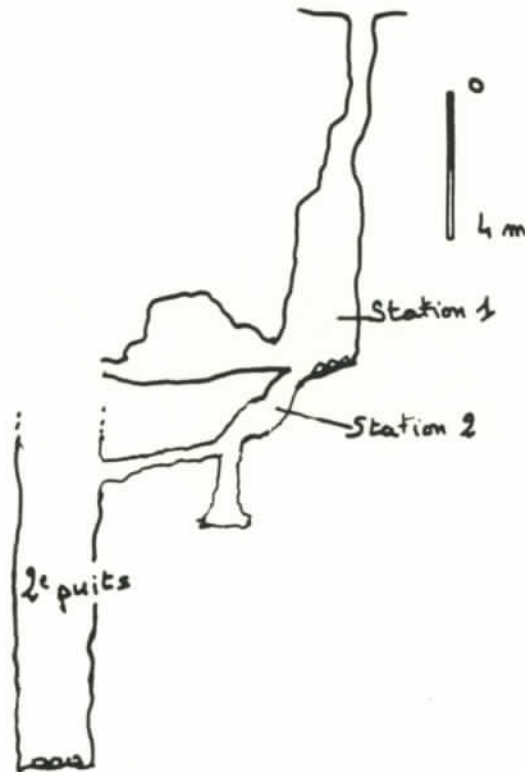


Figure 24: Igue du FRAU, coupe schématique.

* Résultats gazométriques:

Tableau 6: gazométrie sanguine à l'igüe du FRAU (1° expérience)

sujet	:	B.H.	:	A.M.	:	J.M.O.:	:	Normes	:
pH	:	7,31	:	7,19	:	7,24	:	7,37-7,46	:
PaCO ₂	:	40,40	:	51,60:	:	57,60	:	32-46	:
PaO ₂	:	116,80	:	46,60:	:	32,00	:	74-108	:
Bicar.	:	20,40	:	19,80:	:	24,40	:	21-29	:
CO ₂ T	:	21,70	:	21,47:	:	26,26	:	22-30	:
B.E.	:	-5,3	:	-8,8	:	-4,1	:	:+ ou - 2,2	:
Bic.St.	:	20,80	:	18,60:	:	21,60	:	21-29	:
SaO ₂	:	97,90	:	78,40:	:	50,40	:	92-97	:

Bicar. = Bicarbonates plasmatiques

CO₂T = CO₂ Total plasmatique

B.E. = Excès de bases

Bic.St. = Bicarbonates Standard

* Interprétation:

Les pO₂ et SaO₂ indiquent que le prélèvement concernant A.M. et J.M.O. était veineux, ce qui s'explique facilement par les difficultés des conditions de réalisation. On peut cependant remarquer une acidose pour les trois sujets, avec une dpH allant de -0,06 à -0,18 par rapport à la valeur minimale théorique, et un déficit en bases allant de 1,9 à 6,6. Concernant l'étude gazométrique proprement dite, seul le

prélèvement de B.H. est donc utilisable: il montre curieusement une acidose modérée sans hypercapnie ni élévation des bicarbonates (acidose respiratoire non compensée), et une hyperoxie.

Les difficultés de prélèvement, les délais d'acheminement, et l'existence d'un seul échantillon artériel n'autorisent pas d'interprétation formelle. On peut cependant remarquer qu'il existe, tout comme dans le cas cité au § 7.3.2, une hyperoxie à mettre sur le compte du stimulus CO₂, et ceci malgré dans le cas présent un déficit en O₂ aux alentours de 5% par rapport à la teneur de l'air ambiant.

7.4.4 Deuxième étude gazométrique sanguine à l'Igue du Frau (le 13 Janvier 1990).

* Méthode d'étude: est identique à la première observation (§ 7.4.3), avec cependant utilisation de seringues à tube capillaire, et analyse des résultats au laboratoire d'Exploration Fonctionnelle Respiratoire du sanatorium La Roseraie à MONTFAUCON, à quatre kilomètres environ du gouffre. Les prélèvements ont été effectués sur quatre sujets ayant séjourné de 45 à 60 minutes au niveau de la deuxième station de mesure. Les analyses furent réalisées environ quinze minutes après le dernier prélèvement. Les indications concernant l'oxygène ayant été défectueuses (erreur systématique d'environ 20%), une réévaluation a été faite à posteriori en tenant compte cette erreur vraisemblablement imputable à une détérioration thermique des tubes réactifs.

* Qualité atmosphérique de la cavité: Les analyses d'air (tableau 7) eurent lieu aux mêmes stations que précédemment. La valeur corrigée tient compte de la pression barométrique (740 Torr le jour de l'observation). On remarque donc que pour les deux séries de mesures, l'oxygène est globalement déficitaire dans les proportions de l'apport de CO₂.

Tableau 7: paramètres atmosphériques de l'igue du FRAU :

Station	paramètre	valeur indiquée	valeur corrigée
1	FCO2	0.5 %	0.48 %
1	FO2	19.5 %	19.11 %
1	FO2	20%	19.6 %
2	FCO2	3.5 %	3.4 %
2	FO2	17.5 %	17.17 %
2	FO2	18 %	17.65 %

* Résultats: tableau 8

Sujet	B.B.	B.H.	F.R.	P.D.
pH	7.32	7.34	7.36	7.33
PaCO2	44	42.3	40.1	39.6
PaO2	55	93	104	109
SaO2	85.78	96.63	97.5	97.61
CO3H-	21.98	22.13	21.96	20.24
CO2T	23.3	23.4	23.17	21.43
BE	-3.68	-3.05	-2.66	-4.81

CO3H- = bicarbonates; CO2T = CO2 Total; BE = Excès de bases.

Tableau 8: Gazométrie artérielle à l'igue du Frau (13-1-1990).

On constate tout d'abord que le prélèvement de B.B. était veineux. Seul l'équilibre acido-basique est donc interprétable.

Les saturations en O₂ des autres sujets sont normales. La PaO₂ est un peu abaissée chez B.H., normale chez F.R., et légèrement élevée pour P.D..

L'étude de l'équilibre acido-basique met en évidence une acidose respiratoire non compensée pour les quatre sujets, bien visible sur les diagrammes de DAVENPORT (figures 25,26,27).

Pour B.H., il existe une discrète élévation de la capnie, celle-ci étant normale pour P.D. et F.R.. Notons que B.H. a effectué un effort important en franchissant l'étroiture qui mène au deuxième puits, avant le prélèvement.

* Interprétation:

Ces résultats confirment ceux obtenus lors de la précédente expérience, avec apparition d'une acidose non compensée, une capnie sensiblement normale, et une saturation oxygénée supérieure à la normale chez deux sujets, et un peu abaissée chez le troisième.

Les variations de l'équilibre acido-basique sont conformes aux observations de RADZISZEWSKI (§ 5.2.2).

Le maintien des saturations artérielles en O₂ malgré l'abaissement des FIO₂ avaient également été pressenties par cet auteur, ce que confirment ces résultats.

L'effort physique semble accentuer le déséquilibre gazométrique, avec apparition de perturbations de PaCO₂ (élévation) et PaO₂ (abaissement).

L'exposition prolongée entraînerait certainement un début de compensation rénale de l'acidose et l'apparition d'une hypercapnie.

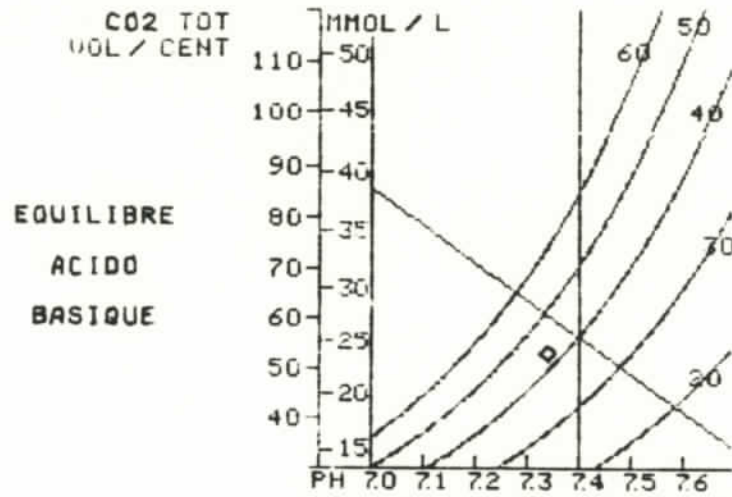


Figure 26: Diagramme de DAVENPORT, sujet B.H.

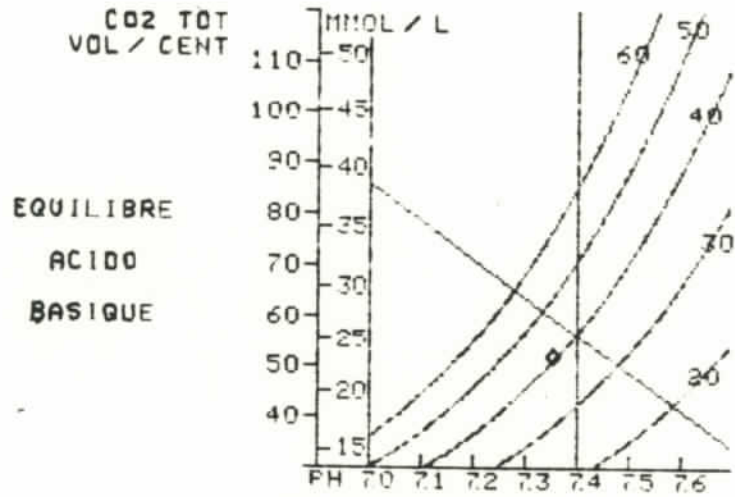


Figure 27: Diagramme de DAVENPORT, sujet F.R..

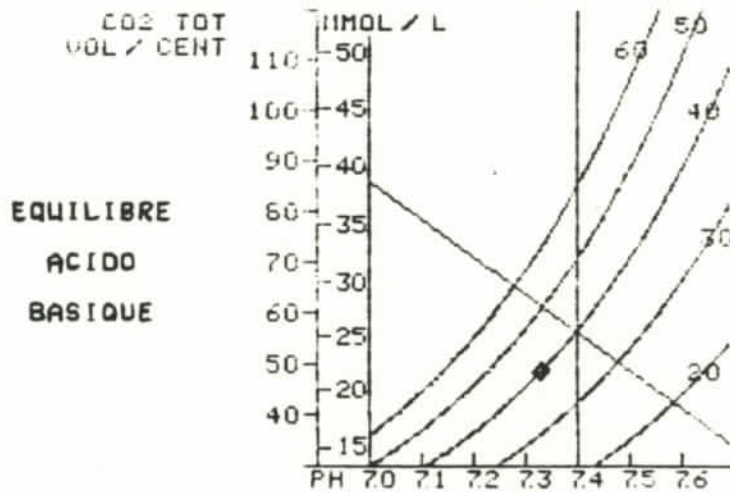


Figure 28: Diagramme de DAVENPORT, sujet P.D..

D I S C U S S I O N

8 DISCUSSION

8.1 Le déficit atmosphérique en O₂

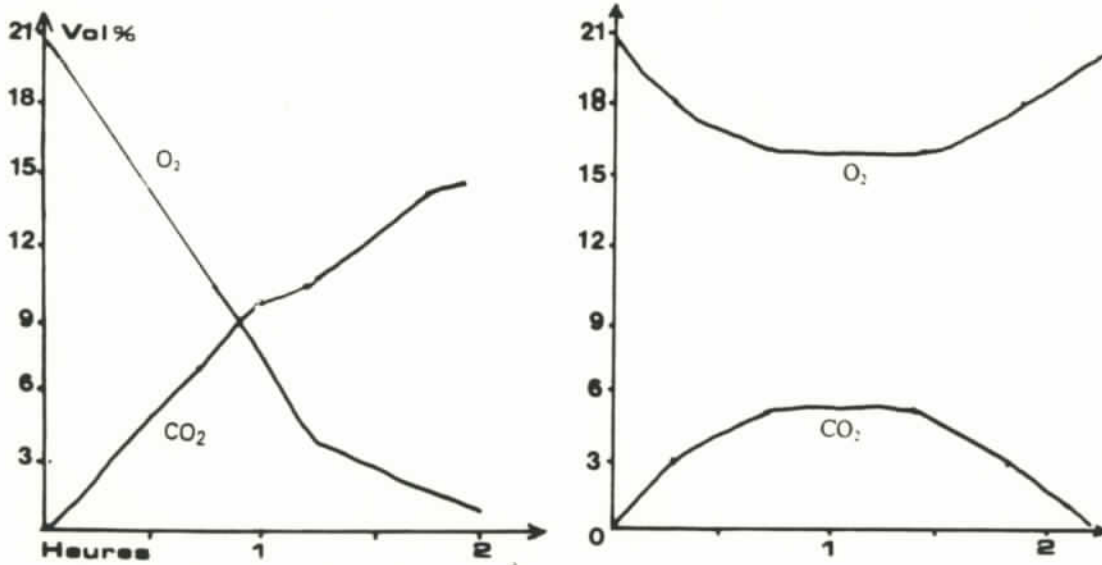
Le déficit en O₂ des cavernes à A.C. est quasi systématique et d'amplitude très variable, bien que souvent proportionnel à l'excès de CO₂. Ce déficit est connu des spéléologues qui ont parfois préconisé l'emploi d'oxygène pour faciliter les explorations (10,64).

Par ailleurs, BERT signalait dès 1878 le rôle essentiel joué par le déficit de ce gaz dans la mort en A.C..

Depuis, l'oxygénothérapie est préconisée dans toute exposition à un confinement atmosphérique sans discernement (30,39).

Pour ce qui concerne les expériences de BERT, il convient d'observer que la qualité de l'air subit en volume clos une perpétuelle dégradation comme l'attestent les courbes de CO₂/O₂ en fonction du temps déjà citées (§ 7.1). Il est évident que les capacités d'adaptation de l'organisme sont alors sollicitées jusqu'à épuisement.

La situation n'est donc pas comparable à celle d'une exposition en A.C. Karstique où le profil évolutif de la qualité de l'air est très variable: généralement, le confinement atmosphérique est également progressif mais avec un maximum atteint sans croisement des courbes d'O₂/CO₂ (figure 28); l'exposition peut aussi être brutale, ou régressive.



courbe n°1 Volume clos
(BERT, 1878)

courbe n°2: Atmosphère karstique

Fig 28: Qualité de l'air dans deux types de confinement hypoxique.

D'autre part, les quelques analyses gazométriques disponibles réalisées en hypercapnie exogène mettent en évidence l'existence d'une augmentation de la PaO₂ lorsque la PCO₂ s'élève, sans que soit étudiée la valeur du déficit en oxygène supportable (tableau 9).

REFERENCES	FICO ₂	dPH	dHCO ₃ ⁻	dPaCO ₂	dPaO ₂
	%		(mmol)	(torr)	(torr)
CERTSM 1980	0,5	0	+ 1,4	+ 1,5	+ 2
CERTSM 1981	1	-0,01	+ 1,2	+ 2,5	+ 3,5
HARRISON 1981:	1,5	-0,02	+ 1,5	+ 4	+ 4 à 5

Tableau 9: Etudes gazométriques incluant PaO₂ (d'après 58).

Dans un contexte spéléologique, le cas rapporté par JALLET (§ 7.3.2) et nos observations (§ 7.4.3 et 7.4.4) laissent supposer que l'hypercapnie induite par élévation de la PCO₂ peut maintenir les PaO₂ dans des valeurs normales, même pour un déficit important de l'oxygène ambiant. Ces résultats à priori curieux pourraient s'expliquer par une diminution de l'effet schunt due à un important recrutement alvéolaire corollaire de l'élévation du volume courant en hypercapnie. Le CO₂ est d'ailleurs proposé pour le traitement des hypoxies d'altitude (18).

Cependant, cette hyperoxygénation du sang dépend d'une part de PCO₂, d'autre part de l'importance du déficit en O₂: il est évident qu'une PO₂ très basse aura des répercussions néfastes si la PCO₂ correspondante est faible. On sait par ailleurs que l'exposition à un air très confiné peut entraîner la mort. Donc, même s'il s'avérait que la saturation de l'hémoglobine en O₂ soit suffisante en A.C. karstique dans la plupart des cas, il convient de garder à l'esprit qu'à priori:

- Un déficit en O₂ atmosphérique n'est compensé qu'en présence de CO₂ en quantité d'autant plus importante que le

déficit est grand.

- A partir d'une certaine importance du déficit en O₂, le CO₂ ne permet pas de compenser ce déficit.

- Le CO₂ peut être toxique en soi même sans déficit en O₂.

- Une défaillance du système respiratoire peut entraîner une rapide désoxygénation de l'hémoglobine.

Ainsi, certains symptômes éprouvés lors d'explorations en A.C. et qui sont identiques à des manifestations d'hypoxie pourraient être le signe d'un déficit réel en O₂ du sang artériel (troubles de la mémoire immédiate, de la coordination des mouvements, etc).

Par conséquent, la seule mesure de la FO₂ paraît insuffisante pour évaluer le danger d'une A.C., elle doit être couplée à celle de CO₂ (et réciproquement).

Quoi qu'il en soit, l'oxygénothérapie proposée pour le traitement de personnes ayant subi une A.C. ne semble pas justifiée dans la plupart des cas en spéléologie.

Quand à l'utilisation d'O₂ lors d'explorations courantes, elle nous paraît dangereuse en raison du risque d'explosion. Le seul intérêt de la prescription de ce gaz -qui doit être médicale- réside dans la diminution relative de la FICO₂.

Cependant, le danger d'apnée par oxygénothérapie chez une personne hypercapnique ne concerne que les insuffisants respiratoires chroniques (hypercapnie ancienne).

8.2 Valeurs admissibles

Les explorations spéléologiques en A.C. exposent souvent les sujets à des teneurs dépassant les valeurs proposées par RADSZIZEWSKI (§ 5.2.9): au delà de FCO₂ = 5%, l'importance des signes fonctionnels empêche les séjours prolongés, mais des FCO₂ de 4,5 à 5% sont parfois supportées plusieurs heures.

On est donc en droit de se demander si le respect strict

des C.M.A. et C.T.C. n'est pas une nécessité, mais de nombreux facteurs viennent nuancer la réponse:

En effet, les études faites en A.C. Hypercarboxiques sont, pour certains points, difficilement adaptables directement aux grottes tant il existe de différences entre les deux situations:

- En A.C. hypercarboxique, les volontaires sont sélectionnés en fonction de leurs aptitudes physiques et psychiques, mais il existe une sécheresse de l'air, et les expériences se déroulent en un lieu complètement clos durant plusieurs jours. L'apparition d'une angoisse liée à cette situation est possible (RENAULT, comm. pers.).

- Dans le milieu karstique, les caractéristiques propres à la cavité ou au contexte peuvent passer de reposantes à stressantes (secours par exemple), il existe une hétérogénéité des qualités physiques, physiologiques, psychiques des explorateurs, et les efforts de progression peuvent être intenses.

Cependant, les explorations réalisées en dépassant les C.M.A. et C.T.C. font apparaître des troubles neurologiques supérieurs (troubles de la coordination psychomotrice, déficit de la mémoire, hallucinations, ...) pouvant mettre en jeu la sécurité des sujets.

D'autre part, le syndrome épuisement-hypothermie caractéristique des explorations souterraines (49) doit apparaître plus facilement en raison des perturbations métaboliques induites par la seule hypercapnie (acidose resp., polyurie majorant la déshydratation,).

Comme évoqué précédemment, la possibilité d'une hypoxie n'est pas à écarter dans certains cas.

Le stress semble majoré en caverne avec l'éloignement de l'entrée de la cavité, mais ne correspond pas forcément à une augmentation de la vigilance.

Bien qu'il soit difficile pour un sport de pleine nature d'imposer une qualité atmosphérique (rappelons simplement l'audace de certains alpinistes qui n'a jamais rencontré la moindre objection) il nous semble raisonnable de s'astreindre, pour les cavités karstiques, à ne pas dépasser pour le CO₂ les valeurs proposées par RADZISZEWSKI sans utiliser de protection respiratoire adaptée.

En ce qui concerne l'oxygène, Il parait indispensable de ne pas dépasser un déficit de 7%, soit une **FI02 = 14%** environ, pour les raisons évoquées plus haut.

AUTRES GAZ DES CAVERNES

9 AUTRES GAZ DES CAVERNES (49)

9.1 Gaz radioactifs

Le principal gaz radioactif des cavernes est le Radon (Rn222). On y rencontre aussi du Thoron et de l'Actinon mais ils sont rapidement détruits en raison d'une demi-vie courte.

La radioactivité est plus importante en général dans les cavernes qu'à l'air libre (13).

9.1.1 Origines et répartition (72)

Ces gaz radioactifs sont issus de la désintégration de Radium 226, Uranium 238 et Thorium inclus dans le calcaire ou ses produits de décomposition, ou dans les couches sous-jacentes aux calcaires. Dans ce cas, la diffusion du gaz sera favorisée par l'arrivée d'eaux d'origine profonde.

SAUMANDE (70) remarque une radioactivité plus importante au niveau des zones fortement argileuses, de même que DAUZERE (cité par 72). La radioactivité est également plus élevée aux endroits où l'eau et l'air sont stagnants (49).

Seul le Radon est à prendre en compte, les autres corps étant rapidement détruits.

9.1.2 Effets

L'intérêt de l'étude de ce gaz en physiologie réside dans l'importante ionisation de l'air qu'il induit par émission d'un rayonnement alpha lors de sa désintégration. En caverne, il s'agirait surtout d'ions négatifs dont les effets bénéfiques sont nombreux (49):

- inhibition du développement viral et bactérien
- régulation des systèmes endocriniens et nerveux central.
- Augmentation de perméabilité des cellules.

- Augmentation de l'oxygénation des tissus.
- Accélération des mouvements des cils vibratiles trachéaux.
- Etc...

Par ailleurs, la désintégration du Rn se fait avec émission d'un rayonnement qui peut induire des cancers pulmonaires: ce risque serait à surveiller chez les personnes travaillant en caverne (guides touristiques p. ex.) (49).

9.2 Hydrogène sulfuré (H₂S)

9.2.1 Origines

Il s'agit d'un gaz rare en caverne. CHOPPY (16) cite plusieurs cavités en contenant, souvent en relation avec des griffons thermaux.

L'oxydation de pyrite et certaines fermentations anaérobies peuvent également produire du H₂S (putréfactions), de même que la décomposition de terrains contenant du gypse .

9.2.2 Effets

La toxicité des fortes doses réalise un blocage des réactions enzymatiques respiratoires et une intoxication proche de celle à l'acide cyanhydrique (24).

La concentration maximale autorisée (C.M.A.) sur un lieu de travail est 10 ppm

La toxicité débute à **20 ppm**.

Entre 50 et 150 ppm, quelques heures d'exposition entraînent céphalées, nausées, irritation oculaire.

Entre 170 et 300 ppm, quelques minutes suffisent à provoquer de nombreux symptômes: irritation respiratoire avec toux, oedème aigu du poumon, délire, confusion, coma.

A partir de 400 ppm, la mort est quasi instantanée

par arrêt cardiaque et paralysie respiratoire.

Ajoutons que le gaz est explosif à partir de 4300 ppm

9.2.3 Traitement

Le traitement des intoxications graves nécessite une assistance respiratoire, et l'utilisation de cytochrome c.

9.2.4 Prévention

Les explorateurs doivent y penser lorsqu'ils perçoivent une odeur nauséabonde inexplicée. La proximité d'une décharge, d'un charnier, de gisements de pyrite ou d'une activité thermique (notamment sources sulfureuses) doit rendre méfiant. Les grottes marines peuvent également, par action des sulfates, contenir H₂S.

En plongée souterraine, le dégagement de bulles en remuant la vase, ou leur présence à la surface de l'eau doit inciter à faire des dosages avant d'enlever l'embout.

9.2.5 Détection

L'hydrogène sulfuré a une odeur caractéristique d'oeuf pourri, mais une seule inspiration peut être mortelle (par exemple en plongée souterraine).

Aussi une détection est-elle préférable à l'aide de papier réactif, ou mieux en utilisant le système de tubes réactifs DRAEGER (modèle H₂S 1/c).

9.3 Methane (CH₄)

9.3.1 Origines

C'est un gaz également exceptionnel en spéléologie, notamment en raison de sa légèreté. Il peut cependant être parfois rencontré sous terre lorsque des pertes de surface

entraînent des débris organiques, par décomposition de la roche encaissante (16), ou avoir une origine profonde près des zones fracturées (44). Pour ces origines naturelles, le méthane n'est généralement présent qu'à l'état de traces.

Les origines accidentelles sont plus fréquentes en particulier lorsqu'il existe à proximité des sources de pollution organique (décharges d'ordures, épandage de lisier, etc).

9.3.2 Effets

Le danger de ce gaz est surtout dû à ses propriétés explosives: MALLARD (49) cite le cas de spéléologues Espagnols victimes d'une explosion de CH₄ en visitant une cavité située sous une décharge municipale.

Au niveau respiratoire, le gaz provoque une asphyxie par diminution de la teneur ambiante en oxygène, mais ne réagit pas chimiquement dans l'organisme (gaz inerte). Les signes seront donc ceux d'une hypoxie (cf § 6).

Cependant, la limite inférieure d'inflammabilité de CH₄ étant de 5% environ, un rapide calcul nous montre que la fraction d'O₂ à cette proportion est de 19,95%, ce qui est encore loin de poser un problème d'asphyxie.

9.3.3 Traitement

L'hypoxie produite par le gaz en quantité importante impose une oxygénothérapie.

9.3.4 Prévention

Tout comme pour le H₂S, il est important d'effectuer des contrôles fréquents de la qualité de l'atmosphère en zones paraissant insalubres.

Se rappeler que le gaz est explosif bien avant d'être

toxique ou cliniquement détecté: on doit utiliser des éclairages parfaitement étanches ou les éclairages spéciaux des services des mines si on suspecte sa présence.

L'utilisation d'appareils respiratoires se fera en fonction de la teneur en oxygène.

9.3.5 Détection

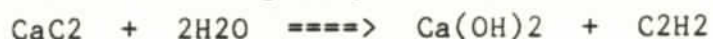
Le méthane est inodore et asymptotique.

Une détection qualitative est possible à l'aide de tubes réactifs adaptés.

9.4 Acétylène (C₂H₂) (9,49)

9.4.1 Origine

Quasi universellement utilisé comme gaz d'éclairage par les spéléologues, sa présence en quantité importante en caverne peut résulter de manoeuvres incontrôlées du carbure de calcium qui en est à l'origine par réaction avec l'eau:



Précisons également que la formation d'acétylène à partir de carbure de calcium s'accompagne du dégagement d'autres gaz: oxyde de carbone, hydrogène sulfuré, hydrogène phosphoré, hydrocarbures.

Plusieurs accidents sont en effet à déplorer, dus pour la plupart à l'absence d'un conditionnement étanche pour le transport du carbure. Le récit le plus savoureux est sans doute celui de N. CASTERET (12), qui relate une expédition dans les gouffres du Maroc:

"Au moment où je vais faire demi-tour pour remonter jusqu'au petit lac,....je suis cloué sur place par un bruit terrifiant: une explosion sourde et puissante suivie d'un fracas de grondements....Je constate avec stupeur que le gouffre au dessus de moi est illuminé de lueurs

ininterrompues....A tout ce fracas se mêlent des hurlements et des vociférations qui me laissent stupéfait et pantelant, accroché à mon échelle.....L'explication de cet infernal sabbat était simple, mais comment y aurais-je jamais pensé ? En prévision d'une longue séance souterraine, il avait été prévu qu'on emporterait une provision de carbure pour recharger les lampes....Mais au lieu d'utiliser la boîte métallique à ce destinée, l'homme chargé de cette réserve avait préféré à la boîte jugée encombrante le capuchon de son burnous dans lequel il avait placé plusieurs kilos de carbure....En se déplaçant à quatre pattes dans le réduit exigu où tout le monde m'attendait, il vit le contenu de son capuchon se vider entièrement et fort malencontreusement dans un petit bassin d'eau. En voulant repêcher le carbure, le malheureux avait approché sa lampe allumée de la surface de l'eau où le carbure bouillonnait impétueusement..."

9.4.2 Effets

Les intoxications à l'acétylène sont rares, le danger résidant surtout dans le risque d'explosion.

Par ailleurs, la toxicité du gaz serait assez faible notamment par rapport à celle des impuretés qui se dégagent en même temps.

L'inhalation de C_2H_2 provoquerait des troubles digestifs (nausées, vomissements), neurologiques (céphalées, ébriété, incoordination motrice puis coma), cardio-respiratoires (dyspnée, cyanose, bradycardie, collapsus) , et allergiques (urticaire, asthme) chez certains sujets.

L'action toxique débiterait pour une concentration de 20% environ, l'action anesthésiante (autrefois utilisée en médecine) à 40%.

9.4.3 Traitement

Oxygénothérapie et traitement symptomatique.

9.4.4 Prévention et détection

Elle consiste surtout à bien s'assurer de l'étanchéité des moyens de transport du carbure. En cas de contact inopiné de celui-ci avec de l'eau, penser absolument à éviter toute proximité de flammes.

L'odeur caractéristique de l'acétylène (qui est d'ailleurs surtout due aux impuretés) permet d'identifier rapidement sa provenance.

9.5 Oxyde de carbone (CO) (5,8):

9.5.1 Origines

L'oxyde (ou monoxyde) de carbone est l'un des gaz les plus meurtriers en spéléologie (cf annexe 1).

* Le plus souvent, il est dû à l'utilisation d'explosifs destinés à agrandir certains passages étroits ou infranchissables. L'explosion s'accompagne également du dégagement d'autres gaz (vapeurs nitreuses, gaz carbonique, acide chlorhydrique,...). L'importance du dégagement gazeux dépend de nombreux paramètres (53,54):

- Nature de l'explosif: le cordeau détonnant serait le moins toxique, puis la Gomme A, le Titagel 1000 et Titadyne 25 (34).

- Quantité d'explosif,
- Densité du chargement,
- Longueur et diamètre des trous,
- Importance de la charge d'amorçage,
- Nature du minerai abattu,
- Nature du bourrage (l'eau augmente la quantité de CO).

- Débit d'aérage,...etc

* Une autre source non négligeable est l'utilisation

de moteurs à explosion (groupe électrogène, compresseurs, pompes, moteurs divers) dans ou à proximité d'une caverne: plusieurs incidents ou accidents ont été signalés lors d'explorations de cavités mises à jour par des travaux de terrassement (construction de routes, etc...) ou à proximité immédiate.

* Enfin, il y eut également plusieurs victimes à cause de feux allumés dans des cavités, ou juste au dessus.

* Le CO d'origine profonde est exceptionnel, et le plus souvent présent à l'état de traces (16).

9.5.2 Effets

* physiopathologie: l'essentiel de l'effet toxique du CO est dû au blocage de l'hémoglobine. En effet, l'affinité de ce gaz pour Hb est environ 230 fois plus forte que pour l'oxygène. Il y a alors formation de carboxyhémoglobine (HbCO) pour de très faibles quantités de CO dans l'air inspiré.

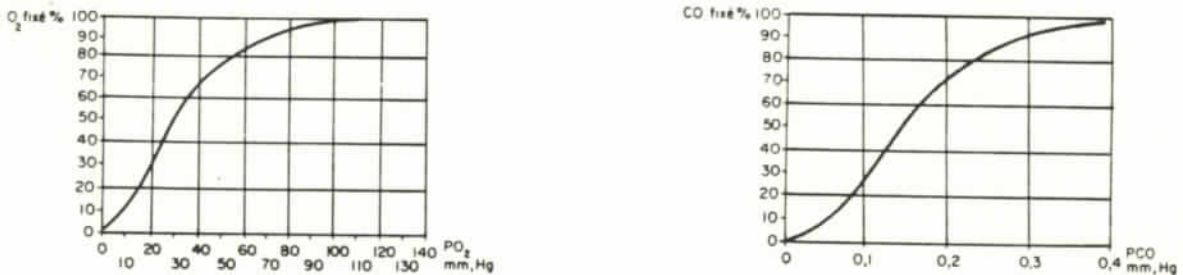


Figure 28: Courbes de dissociation de l'oxyhémoglobine (à gauche) et de la carboxihémoglobine (à droite) (d'après 5).

De plus, la présence d'HbCO provoque une déviation de la courbe de dissociation de l'hémoglobine vers la gauche et des troubles enzymatiques.

L'intoxication oxycarbonée provoque enfin une acidose métabolique par augmentation des lactates sériques. L'acidose est proportionnelle à la gravité de l'intoxication.

* clinique: les symptômes de début d'intoxication sont en général des céphalées, vertiges, nausées, vomissements, asthénie physique et psychique parfois brutale et intense, une tendance lipothymique. Si l'intoxication est plus importante, on peut observer une obnubilation ou au contraire une agitation, des tremblements, des propos incohérents.

Les troubles neurologiques sont fréquents:

- Perte de connaissance avec parfois coma de stade I à III si l'exposition est intense ou prolongée.
- Troubles du tonus (hyper ou hypotonie).
- Signes pyramidaux diffus ou localisés (hémi ou monoplégie).
- Troubles de la régulation thermique: hypo ou hyperthermie.

Les formes graves sont souvent accompagnées de signes cardio-vasculaires:

- Arrêt cardiaque ou collapsus cardio-vasculaire dans les cas graves.
- Oedème aigu du poumon.
- Troubles de la repolarisation fréquents (40 à 63% des cas).
- Parfois troubles du rythme ou de la conduction.

Biologiquement, il existe une acidose métabolique par augmentation des lactates sériques, une hyperglycémie et glycosurie, une élévation des CPK et parfois des transaminases et de la LDH, une hyperleucocytose.

Les signes d'intoxication débutent pour une teneur ambiante en CO de **100 à 200 ppm**, ou à **partir de 10% d'HbCO**.

1000 ppm, soit 0,1%, provoquent une intoxication grave, et la mort survient rapidement à partir de 2000 ppm.

L'effort physique, en augmentant la ventilation, peut

graver l'intoxication. Le confinement atmosphérique est également un élément péjoratif (cf 10.2.2).

9.5.3 Traitement

Le traitement de l'intoxication oxycarbonée est essentiellement basé sur l'oxygénothérapie:

- L'oxygénothérapie isobare est fréquemment utilisée en première intention, dès que le diagnostic est suspecté. Elle doit être le plus précoce possible, l'oxygène étant administré pur au masque ou dans une enceinte de HOOD durant environ six heures chez l'adulte. Puis l'O₂ est employé à doses régressives.

- L'oxygénothérapie hyperbare est bien plus efficace en corrigeant immédiatement l'hypoxie tissulaire. Une séance de deux heures à 2 atmosphères est généralement suffisante.

Un traitement symptomatique doit s'appliquer également en fonction des troubles observés: remplissage, intubation, réhydratation, ...etc.

Toute suspicion d'intoxication oxycarbonée impose l'hospitalisation.

9.5.4 Prévention

La prévention des accidents dus à l'oxyde de carbone en spéléologie passe par le respect strict des consignes de sécurité lors de l'utilisation d'explosifs (cf § 10.2.2).

L'utilisation d'appareils à combustion (groupes électrogènes, chauffages à gaz, compresseurs, pompes, etc) doit être évitée en cavités.

L'exploration de cavités situées près de chantiers de travaux publics doit se faire avec instruments de détection de CO.

Les premiers signes d'intoxication (céphalées, vertiges, nausées, etc) doivent faire immédiatement quitter les

lieux, en limitant les efforts physiques.

9.5.5 Détection

Une détection précise peut se faire à l'aide de tubes réactifs (pour la marque DRAEGER, utiliser le modèle CO 10/a).

Une concentration supérieure ou égale à **100 ppm** doit imposer le retour en surface.

L'intoxication sera confirmée par le dosage de l'HbCO, réalisable en laboratoire. Lors d'un sauvetage réel dans une cavité du DOUBS (2), la concentration d'HbCO des secouristes fut réalisée par l'intermédiaire d'un centre hospitalier voisin: ceci permit d'éviter le suraccident. Cependant, les conditions habituelles de pratique de la spéléologie ne permettent pas toujours d'avoir un laboratoire à proximité. Aussi la technique d'évaluation de HbCO à partir des gaz alvéolaires décrite par LEICHNITZ (47, p249) en utilisant un tube réactif nous semble-t-elle utilisable dans ces conditions. Il existe par ailleurs d'autres systèmes simples et peu onéreux permettant le dosage approximatif d'HbCO sur le terrain.

9.6. Oxydes d'azote (NO, NO₂, NO₃,...)

9.6.1 Origines

Les oxydes d'azote, ou vapeurs nitreuses, sont présentes dans les cavités également à la suite de l'utilisation d'explosifs. Leur dégagement accompagne celui du CO, et dépend des mêmes paramètres (cf § 9.5.1).

9.6.2 Effets

* Physiopathologie: les vapeurs nitreuses provoquent la destruction des cellules alvéolaires, et d'importants troubles respiratoires en raison de leur effet corrosif.

* Symptômes: plusieurs types d'intoxications peuvent se produire:

- irritation oculo-pharyngée suivie rapidement d'un oedème aigu du poumon et décès;

- cyanose, nausées, vomissements, perte de connaissance. Ce type d'intoxication serait rarement mortel.

- Collapsus cardio-vasculaire rapide et asphyxie, décès rapide.

- Irritation oculo-pharyngée et respiratoire (toux) cédant à l'arrêt de l'exposition, puis apparition d'un oedème pulmonaire aigu après une période de latence qui peut durer 2 à 36 heures. Ce type de manifestations serait le plus fréquent.

9.6.3 Prévention et détection

La prévention des accidents dus aux vapeurs nitreuses, comme pour le CO, passe par le respect des règles d'utilisation d'explosifs sous terre (cf § 10.2.2).

La cavité doit être évacuée si la teneur **atteint ou dépasse 10 ppm.**

La détection peut se faire à l'odorat (seuil de perception 0,5 ppm) et aux signes d'irritation oculo-pharyngés, mais **l'atmosphère peut être mortelle sans gêne importante.**

Ici aussi, le procédé utilisant des tubes réactifs est le plus précis (modèle Vapeurs Nitreuses 2/a DRAEGER).

9.6.4 Traitement

Hospitalisation et traitement symptomatique, oxygénothérapie.

9.7 Acide chlorhydrique (HCl)

9.7.1 Origine

L'utilisation d'explosifs peut aussi dégager des vapeurs d'acide chlorhydrique. Il semble que ce soit surtout le cas du cordeau détonnant, le gaz étant dû à la combustion de la gaine plastique(36).

9.7.2 Effets

Les vapeurs d'acide chlorhydrique déterminent une atteinte des muqueuses traduite par une irritation oculaire, nasale pharyngée, et une toux. Des doses importantes peuvent provoquer un oedème aigu du poumon et la mort.

9.7.3 Prévention et détection

Le dégagement de ce gaz étant dû à la gaine du cordeau détonnant, limiter l'utilisation de ce type d'explosif.

Le seuil olfactif pour ce gaz est inférieur à 5 ppm.

Cette valeur représente le maximum autorisé sur un lieu de travail. La détection précise peut se faire à l'aide de tubes réactifs DRAEGER Acide Chlorhydrique 1/a pour des teneurs jusqu'à 20 ppm. Au delà, utiliser les tubes 50/a.

La teneur à ne pas dépasser est de **10 ppm**.

9.7.4 Traitement

Le traitement d'une intoxication sévère nécessite une assistance respiratoire, et une hospitalisation avec traitement symptomatique.

9.8 Chloropicrine

9.8.1 Origines

Ce gaz est utilisé dans certaines régions pour détruire les renards et blairaux dans leurs terriers, surtout depuis l'extension de la rage selvatique.

Parfois, le terrier est en fait une cavité qui peut être visitée par les spéléologues, et on nous a rapporté deux cas de début d'intoxication (heureusement sans conséquences) dont l'un survenu par gazage pendant l'exploration (DELERON, Comm. Orale).

Bien qu'aucun accident grave ne semble avoir été signalé, les spéléologues doivent connaître ce danger (GUICHARD, cité par 64).

9.8.2 Effets (24)

La chloropicrine dégage des vapeurs lacrymogènes et suffocantes (contient du phosphogène).

Elle provoque un larmolement, une conjonctivite intense, des éternuements, une toux, des vomissements, et aboutit à l'oedème pulmonaire lésionnel avec insuffisance cardiaque aiguë. Dans un des cas qui nous ont été rapportés existait une dysgueusie à type de "goût de sang", une cyanose des lèvres persistant quelques jours.

La toxicité débute à la dose de 10 mg/m³. Une exposition suffisamment prolongée à la dose de 20 à 100 mg/m³ peut provoquer un O.A.P. lésionnel avec d'importantes séquelles (bronchiolite oblitérante).

Une dose de 2 g/m³ est instantanément mortelle.

9.8.3 Traitement

Le traitement d'une intoxication sévère nécessite l'hospitalisation dans un service de réanimation: repos absolu,

lavage des muqueuses et de la peau, antibiothérapie sont de règle. L'oxygénothérapie et parfois l'assistance ventilatoire sont utilisées lors d'atteintes respiratoires.

9.8.4 Prévention et détection

La contamination d'une cavité peut être suspectée lorsque l'entrée de celle-ci est rebouchée de pierres, avec à l'intérieur une longue branche dont l'extrémité est entourée d'un chiffon qui a servi à l'application du produit. D'autre part, le récipient du produit est souvent laissé sur place.

Il est toujours prudent de s'assurer, avant visite d'une grotte (en particulier les "trous de renards"), que celle-ci ne doit pas être gazée dans la journée, d'où l'intérêt de contacter les propriétaires de cavités.

9.9 Acide Cyanhydrique (HCN)

9.9.1 Origines:

Mêmes origines que la Chloropicrine (destruction de renards et blairaux).

9.9.2 Effets (24,49)

Ce gaz peut être un poison violent par effet anoxiant aigu: l'oxygénation du sang est normale, mais il y a impossibilité d'absorption de O₂ par les tissus.

La C.M.A. est de 10 ppm (11 mg/m³).

A de faibles concentrations apparaissent des malaises, vertiges, parfois une apnée.

A des doses plus fortes, il y a confusion agitation, vomissements, perte de connaissance, contracture musculaire, trismus.

Pour une intoxication massive, il y a mort en quelques minutes par apnée et arrêt cardiaque

9.9.3 Traitement

L'hospitalisation est là aussi obligatoire:

Les formes d'intoxication modérée seront traitées par perfusion de sérum glucosé à 10% et hyposulfite de Na à 2%.

Pour les formes plus graves, le traitement nécessite l'administration d'hydroxycobalamine à fortes doses, l'inhalation de nitrite d'amyle.

9.9.4 Prévention et détection

Mêmes mesures que pour la Chloropicrine.

Le seuil de détection olfactive est de 5 ppm environ.

La détection est possible à l'aide de tubes réactifs DRAEGER Acide Cyanhydrique 2/a.

9.10 Ammoniac (NH₃)

9.10.1 Origines

La fermentation du guano de chauves-souris peut être à l'origine d'une production d'ammoniac dans certaines cavernes (16,29).

Il en serait de même pour la putréfaction avancée de certains corps organiques (21).

Ce gaz reste cependant très exceptionnel en spéléologie notamment en raison de son poids moléculaire peu élevé (=17,04).

9.10.2 Effets (5)

L'ammoniac provoque une irritation des muqueuses, et une atteinte des voies respiratoires avec bronchospasme, oedème pulmonaire lésionnel, et parfois dyspnée par oedème de la glotte.

9.10.3 Détection et traitement

La détection de ce gaz est aisée en raison de son odeur acide caractéristique que tout le monde connaît.

La C.M.A. est de 50 ppm, et le seuil olfactif d'environ 5 ppm. La détection est donc généralement possible avant d'atteindre les concentrations toxiques. Une détection quantitative est réalisable à l'aide de tubes réactifs DRAEGER Ammoniac 5/a.

Le traitement est basé sur l'oxygénothérapie, la corticothérapie, voir la ventilation assistée si nécessaire.

9.11 Vapeurs d'hydrocarbures (essence, fuel, Butane, Propane...etc)

9.11.1 Origines

La fuite de réservoirs artificiels (par exemple station service sur un massif karstique), ou de réservoirs naturels (mine utilisée comme réservoir souterrain) peuvent provoquer un épanchement dans les cavités. Il en est de même pour les décharges publiques en milieu karstique lorsque des hydrocarbures y ont été déversés.

Par ailleurs, la présence d'hydrocarbures due à la décomposition de la roche a été signalée dans la grotte de MOULIS en Ariège (15), et dans en U.R.S.S.: ethane, butane, isobutane, etc jusqu'à 1,08% (44).

9.11.2 Effets

MALLARD (49) cite le cas de spéléologues victimes, aux Etats-Unis, d'une explosion de vapeurs d'hydrocarbures. Ceux qui échappèrent aux brûlures furent intoxiqués à l'oxyde de carbone.

En effet, le seuil d'inflammabilité des hydrocarbures est très bas (0,6% pour les hydrocarbures d'essence), et l'explosion est le principal danger. Comme précédemment cité, le dégagement secondaire de CO représente un risque supplémentaire.

D'autre part, les vapeurs d'hydrocarbures agissent par diminution de la teneur en O₂ de l'air (effet anoxiant), et présentent une toxicité propre (5):

- Effet anesthésique, troubles intellectuels (erreurs de jugement, réactions inconsidérées, troubles de la coordination musculaire).

- Toxicité myocardique: risque de fibrillation ventriculaire, bradycardie,....

Le propane est moins dangereux car il provoque une irritation des muqueuses avant la toxicité neuro ou cardiologique.

9.11.3 Prévention et détection

Comme pour de nombreux autres gaz, la perception d'odeurs inhabituelles en caverne doit inciter à faire demi-tour en l'absence de moyens d'identification.

Lorsqu'on suspecte la présence de vapeurs d'hydrocarbures, il est impératif également d'éteindre immédiatement toute flamme risquant de provoquer l'explosion (éclairages acétylène, bougies...).

La détection instrumentale peut se faire à l'aide de tubes réactifs Hydrocarbures 2 pour les vapeurs d'essences, et hydrocarbures 0,1%/b pour Butane et Propane.

9.12 Anhydride sulfureux (SO₂)

9.12.1 Origines

La présence d'anhydride sulfureux a été relevée dans quelques cavités en relation avec des griffons thermaux (200 ppm dans une grotte d'Algérie) (16,17) et serait responsable de l'accident survenu à LA ROQUE DES ALBAREDES (cf Annexe 1).

9.12.2 Effets

L'anhydride sulfureux (ou dioxyde de soufre) est un acide très corrosif provoquant une irritation des voies respiratoire, parfois un oedème de la glotte, un O.A.P., ou une apnée.

9.12.3 Traitement

Assistance ventilatoire et traitement symptomatique en milieu spécialisé.

9.12.4 Prévention et détection

La C.M.A. est de 2 ppm, et le seuil olfactif de 0,5 ppm.

L'exploration de cavités en relation avec des sources thermales doit s'effectuer à l'aide d'un détecteur de gaz, et en connaissant les valeurs à ne pas dépasser.

La détection et quantification est possible à l'aide de tubes réactifs Anhydride Sulfureux 1/a.

9.13 Conclusions

Bien que de nombreux gaz puissent se rencontrer en cavernes, la présence de la plupart est tout à fait exceptionnelle.

Cependant, on constate en étudiant les accidents et incidents dus aux gaz des cavités que la mortalité est assez élevée (environ 30% pour les cas pris en compte).

D'autre part, la plupart sont imputables à l'utilisation d'explosifs dans de mauvaises conditions (cf Annexe 1 et § 10.2.2).

Il est utile enfin de savoir que la toxicité totale d'un mélange gazeux est supérieure à celle de chaque gaz le constituant. Ceci est en particulier vrai pour l'association CO₂/ autre gaz, en raison du puissant effet stimulant respiratoire du gaz carbonique.

Les associations de gaz toxiques ne sont pas rares (CO + NO_x, CO + CO₂ par exemple). La proximité de régions volcaniques peut faire craindre la présence de CO₂, SO₂, HCl, H₂S, CO,...

EXPLORATIONS ET SECOURISME
EN ATMOSPHERE CONFINEE OU TOXIQUE

10 EXPLORATIONS ET SECOURISME EN ATMOSPHERE CONFINÉE OU TOXIQUE

10.1 Techniques d'exploration

10.1.1 Détection des gaz

La prévention des accidents dus aux gaz souterrains passe avant tout par l'identification correcte de ceux-ci. De nombreux moyens permettent cette identification, des plus simples aux plus précis:

* Le gaz carbonique:

- Détection physiologique: elle est assez précise chez les personnes bien habituées, lesquelles détecteraient des différences de 0,5% (40). Cependant, il est fréquent d'arriver dans une quantité de 3 à 4% avant de ressentir des troubles. Il s'agit donc d'un moyen très aléatoire, mais qui a permis la découverte de nombreuses cavités à atmosphère confinée.

- Utilisation d'une flamme: de nombreux tableaux existent, citant les teneurs en CO₂ qui provoquent l'extinction d'une bougie, d'allumettes, d'une lampe à acétylène,...etc (10,40,64,...). Mais les résultats sont souvent contradictoires (tableau 9) car il n'est que trop rarement tenu compte de l'oxygène qui est en fait le principal élément assurant la combustion. Cependant, l'utilisation d'un briquet par exemple permet de localiser le niveau supérieur de la partie atmosphérique confinée: à partir de l'atmosphère "saine", un mouvement descendant permet d'observer une suspension de la flamme au dessus de l'A.C..

BIBLIO ==>	BURKE	GREE	RENAULT	JAMES	JAMES	
COMBUSTIBLE:	1953	1966	1972	1975	1975	
-----;						
Allumettes :	/	/	/	1	1	:
-----;						
bougies	4,3	3	10	4	3	:
-----;						
carbure	10	8,9	8-9	6	5	:
-----;						

Tableau 9: FC02% provoquant l'extinction (d'après 40).

- titrage d'une solution: l'utilisation de réactions basées sur l'absorbtion de CO2 par des alcali (potasse par exemple) permet à peu de frais l'estimation des teneurs en gaz carbonique. Cette technique nécessite cependant des manipulations trop longues en cas de sauvetage.

- La pompe DRAEGER est un instrument utilisé depuis vingt ans en spéléologie en raison de ses qualités multiples: précis (pour CO2), maniable, peu encombrant, permet la recherche d'autres gaz... Cependant, son prix le rend difficilement accessible à tous les clubs spéléo.

Le principe est simple: la pompe aspire un volume de 100 cm3 de l'air à analyser qui passe à travers un tube de verre gradué contenant un produit réagissant avec le gaz recherché (Violet cristallin et hydrazine pour le CO2). Le changement de couleur indique la teneur en %. Les tubes étant étalonés à 20°C et à une pression de 760 Torrs (1013 mbar), des corrections sont parfois à faire en fonction des conditions de mesure (47).

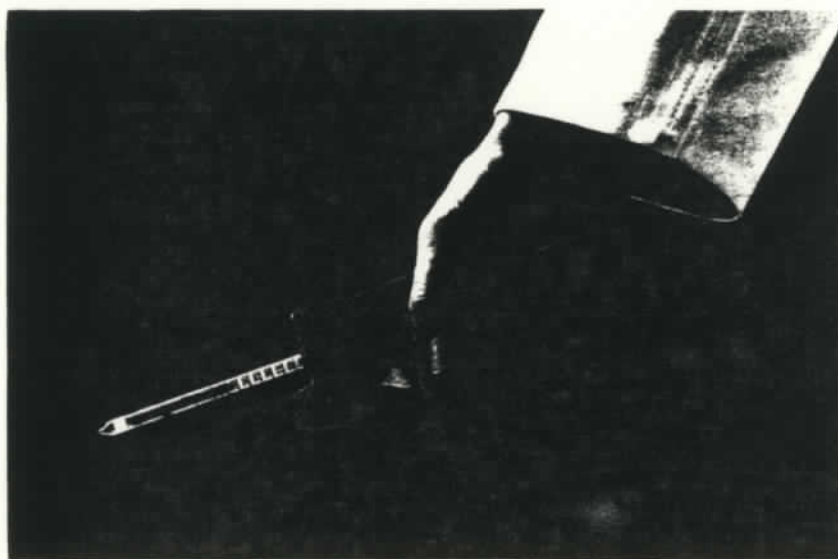


Figure 29: Pompe DRAEGER.

Le domaine de mesure s'étend de 0,01% à 20% de CO₂, ceci avec une déviation standard relative de 10 à 5% (47).

- Le système BACHARACH utilise également des tubes réactifs, et son principe ressemble à celui du précédent. Il est cependant moins précis pour les valeurs de FC02 inférieures à 0,1% (1000 ppm).

- Le FYRITE est aussi un instrument léger mesurant CO₂ ou O₂ dans l'air: son principe est basé sur l'absorption du composé à doser par un liquide indicateur, entraînant une variation volumétrique proportionnelle. Son maniement est un peu plus complexe que celui des tubes réactifs et nécessite l'utilisation des deux mains, mais il est également assez

précis. Le principe de variation de volumes est aussi utilisé par les eudiomètres, de manipulation un peu plus délicate (20).

- Les instruments lourds sont cités pour mémoire, leur utilisation n'étant généralement possible qu'en laboratoire. Il s'agit d'appareils dont le fonctionnement est basé sur la conductibilité électrique différentielle (analyseur BECKMAN p.ex.), sur l'absorption infrarouge (analyseur MSA p.ex.), la spectrométrie de masse, etc... Ces instruments sont souvent polyvalents. Leur prix est très élevé.

* L'oxygène:

- La détection physiologique d'un déficit en oxygène est d'autant plus difficile que les troubles induisent une diminution de la perception du danger. La sensation de gêne apparaîtrait en dessous de $PAO_2 = 60$ Torr, soit une PO_2 d'environ 100 Torr (ce qui correspond à peu près à 14% d' O_2 si $PB = 760$ Torr).

- Les combustions visibles sont, comme vu précédemment, un moyen d'avoir une estimation sommaire de la quantité d' O_2 de l'air: selon nos observations, les allumettes s'éteindraient en dessous de 15 à 16% d' O_2 , les bougies et le briquet brûlent difficilement à 14% d' O_2 . Les lampes à acétylène sont inutilisables pour cette détection (30).

- L'eudiomètre de DRESKO-DEROUET (20) permet aussi la détermination du pourcentage d' O_2 de l'air avec une précision de 0,15%.

- La pompe DRAEGER permet là aussi, en utilisant des tubes adaptés, de faire des mesures de FO_2 . Cependant, il existe une imprécision gênante (déviation standard relative: 10 à 5%) et le prix des tubes réactifs est assez élevé.

- Le FYRITE est plus précis et économique, mais il faut savoir que les produits utilisés sont corrosifs et leur manipulation peut être délicate sous terre.

- L'Oxymètre de Draeger permet des mesures précises en continu mais son prix est élevé.

- Il existe d'autres appareils bien moins adaptés aux mesures en sites souterrains en raison de leur encombrement et fragilité.

* Autre gaz:

Les moyens de les détecter ont été envisagés au § 9. Précisons cependant qu'en l'absence d'instruments, il peut être intéressant d'effectuer un prélèvement de l'atmosphère douteuse à des fins d'analyse en laboratoire.

Pour ce faire, le moyen le plus facile à réaliser consiste à remplir une bouteille en verre (y compris le bouchon) d'huile ou d'une solution d'eau saturée en chlorure de sodium, et de la vider sur le lieu du prélèvement. Savoir cependant que le système de fermeture (en général joint thorique) peut être perméable à la longue, donc raccourcir au maximum le délai d'analyse (40).

Il est possible également de faire ce prélèvement avec des sacs en P.V.C. et TEDLAR prévus à cet effet fournis avec une pompe refoulante, mais se pose également ici le problème de la porosité qui ne semble pas avoir été évaluée pour CO₂ et O₂.

Enfin, il est possible de recueillir un échantillon d'atmosphère dans un tube à analyse de sang (type tube sec). Ces tubes étant sous vide, il suffit alors d'y enfoncer une aiguille à intra-musculaire pour qu'un échantillon de l'air ambiant soit prélevé. Cependant, la plupart de ces tubes

contiennent du CO₂ (RENAULT, comm. pers). Là aussi les mesures devront se faire sans tarder en raison de la porosité du bouchon.

10.1.2 Techniques d'exploration en A.C. Karstique (10,64).

De nombreuses précautions doivent être prises lors d'une incursion en atmosphère confinée karstique. Leur énoncé a pour but d'éviter la survenue d'accidents, l'exposition étant parfois imprévue. Mais les visites peuvent être motivées par la perspective de découvertes spéléologiques ou scientifiques, et l'éventualité d'une intervention de secours est à envisager également.

Le choix de la période de visite peut être déterminant, le confinement atm. étant moindre en hiver ou lors de fortes pressions barométriques. Les maximums de CO₂ sont rencontrés en fin d'été. Une période pluvieuse peut favoriser le confinement atmosphérique pour des raisons précédemment évoquées (§ 3.2.).

Les équipiers doivent avoir une bonne expérience spéléologique, et une certaine maîtrise de soi. L'absence d'affection en cours et une bonne forme physique sont obligatoires. L'équipe doit être réduite au minimum pour éviter les pertes de temps.

Pour l'exploration proprement dite, le matériel individuel doit être adapté, le gain de poids étant un atout non négligeable. La visite doit être bien préparée à l'avance de manière à éviter les pertes de temps: pour une verticale, les agrès doivent être accessibles et adaptés aux besoins.

Pour la visite de cavités peu connue en région à CO₂ karstique élevé, le descendeur est à proscrire pour le premier à descendre s'il s'agit d'une verticale.

Si la cavité est connue et souvent fréquentée, l'aménagement des parties difficiles est à prévoir: équipements fixes, agrandissement des étroitures, etc...

L'exemple des cavités confinées désobstruées à l'explosif n'étant pas exceptionnel et jamais signalé, il faut bien s'assurer que ça n'a pas été le cas: en présence de fils électriques ou d'éboullis récent non naturels, il ne faut pas continuer la progression sans recherche de gaz toxiques (surtout CO et Vapeurs Nitreuses).

En ce qui concerne l'utilisation d'éclairage acétylène, certains le déconseillent en raison de la consommation d'O₂, tandis que SALGUES et MAGDELEINE (69) constatent qu'il permet une meilleure visibilité, et que la flamme "réchauffe et rassure". Ajoutons que confort (relatif) et bonne acuité visuelle diminuent les risques d'accident. On peut se contenter de proscrire l'acétylène pour des petites cavités ou endroits exigus sans oublier que le gaz non brûlé est plus dangereux que le déficit en O₂ induit par la combustion (ne pas éteindre sa flamme si le C₂H₂ continue à se dégager).

Le comportement de chaque équipier doit viser à "l'économie de mouvement": une progression lente et réfléchie s'impose. On doit alors s'interdire le franchissement d'obstacles sévères (étroitures, ...). Dans la mesure du possible, la progression doit s'effectuer à deux au moins et permettre ainsi de faire vérifier chaque manoeuvre engageant la sécurité individuelle ou collective (manipulation d'agrs, équipements personnels, etc). La progression doit tenir compte, comme en plongée, du temps nécessaire au retour.

En plongée souterraine, une prudence accrue est nécessaire dans les zones karstiques connues pour leur hautes teneurs en CO₂, et au niveau des pertes qui peuvent entraîner d'importantes modifications atmosphériques en aval par apport de débris végétaux et pollutions diverses. Comme signalé au chapitre 9, tout dégagement de bulles à partir du sol, toute modification de l'aspect de l'eau (irisation, pellicule en surface,...) doit inciter à faire des analyses d'air. Nous conseillons, à l'arrivée dans une partie exondée, de continuer

systématiquement la respiration au détendeur après avoir oté le masque, puis d'alterner respiration nasale et buccale. La moindre anomalie (picotement oculaire, irritation cutanée par exemple), doit faire évacuer les lieux en attendant de pratiquer une recherche de gaz toxiques.

Un certain nombre d'accidents survenus post siphons ont fait envisager l'implication de gaz toxiques ou d'atmosphères confinées. Dans le cas où deux ou plusieurs plongeurs sont découverts inanimés dans une partie exondée, la responsabilité de ces gaz est évidente (accident de CADRIEU en 1971). Les fortes contraintes physiologiques de la plongée souterraine font évoquer parfois d'autres causes (hydrocution par exemple), mais le doute subsiste pour certaines victimes découvertes décédées sans explication.

Dans certains cas enfin, la victime est découverte après de longues recherches dans un volume restreint et le confinement atmosphérique peut avoir joué un rôle dans la survenue du décès: 1976, cavité de PLANEY - HAUTE-SAONE.

10.1.3 Appareils respiratoires (66).

En présence de gaz à doses toxiques, il est impératif d'utiliser des systèmes isolant plus ou moins complètement l'appareil respiratoire des victimes ou sauveteurs.

* Appareils occasionnels: on regroupe sous cette rubrique tout système de fortune permettant temporairement de limiter les effets toxiques d'une atmosphère:

- les bouteilles de plongée remplies à l'air comprimé peuvent assurer une certaine autonomie respiratoire, sont d'un emploi facile, mais présentent une partie des inconvénients des Appareils Respiratoires Isolants (A.R.I). à circuit ouvert décrits plus loin (encombrement, déstabilisation,...) Elles peuvent cependant être utiles en l'absence d'autre moyen de

protection respiratoire plus adapté. On peut alors les utiliser placées dans un kit-bag pour une meilleure stabilité (employer mono-bloc), en prenant la précaution de mettre un pince-nez si les gaz sont toxiques.

Une bouteille de 6 litres permet une autonomie d'environ 30 minutes, pour un travail moyen.

- L'utilisation d'un narghilé (détendeur alimenté depuis la surface par un compresseur ou des bouteilles d'air comprimé) peut s'avérer fort utile pour une victime difficile d'accès (étroitures). L'air est acheminé à l'utilisateur soit par dépression de la part de ce dernier, soit sous pression ce qui permet de prolonger la distance d'utilisation: elle est d'environ vingt mètres pour le premier cas et de cinquante pour le second. On voit donc que dans ce cas, la distance d'utilisation est très limitée.

- Les compresseurs permettent un apport d'air pur aux environs du tuyau d'arrivée. Ce système fonctionne selon un principe identique au narghilé, mais sans adaptation respiratoire. La distance visage-tuyau doit donc être réduite pour éviter le mélange avec l'air ambiant. Ce système a été utilisé lors de secours en gaz toxiques (52; BOARDMAN, Comm. Pers.) ou d'explorations.

- Les masques filtrants ne sont efficaces que pour des quantités de CO₂ ne gênant pas la progression et ne suppléent pas le déficit en O₂ mais peuvent être employés pour d'autres gaz: SO₂, H₂S, HCl, CO, NH₄ avec prudence.

* A.R.I. à circuit fermé: il s'agit d'un système de sac respiratoire conçu par DAVIS en 1906, qui possède un filtre (chaux sodée en général) absorbant CO₂ et vapeur d'eau produits par l'organisme. La respiration se fait dans le sac ("faux poumon"), de l'oxygène comprimé dans une petite bouteille ou apporté par réaction chimique de CO₂ sur du peroxyde de potassium (K₂O₂) remplaçant celui consommé. C'est le système utilisé par les nageurs de combat de l'armée ou dans certaines

professions exposées à un risque respiratoire accidentel (mines par exemple).

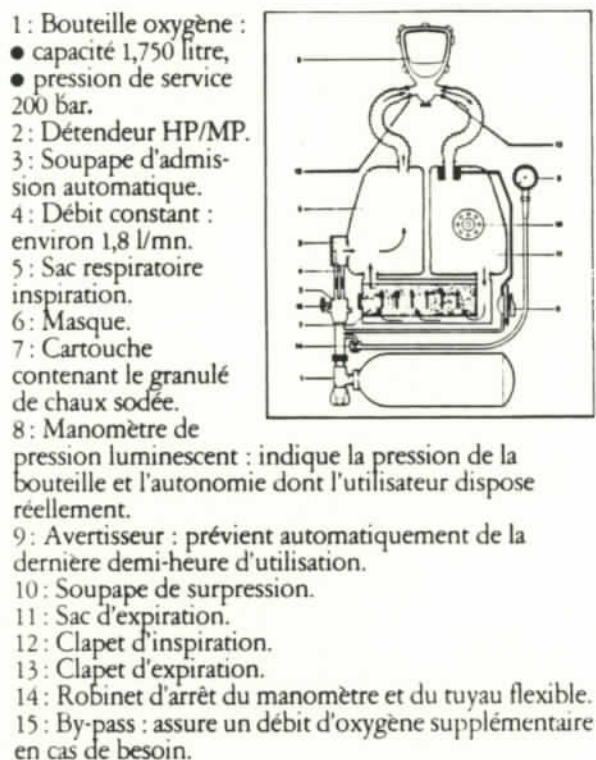


Figure 30: Fonctionnement d'un A.R.I. à circuit fermé, modèle FENZY.

Ce type d'appareils présente les avantages d'une légèreté et d'un encombrement relativement réduit par rapport aux circuits ouverts, à autonomie égale. Il peut, pour certains modèles, se porter plié à la ceinture en attendant l'utilisation. D'autres sont en position ventrale ou dorsale. L'autonomie dépend du débit respiratoire et du modèle envisagé. Elle s'étend de 15 mn à 4 ou 5 heures.

Ces systèmes nécessitent, pour être réutilisables, de disposer de cartouches de recharge (modèle MSA) ou de chaux sodée (FENZY, DRAEGER), et d'oxygène comprimé. Une intervention de secours prolongée réalisée à l'aide de modèles à autonomie modeste mettra donc rapidement hors service de nombreux

appareils. D'autres défauts varient selon les modèles: fragilité, gêne à la mobilisation de la tête, dégagement de chaleur par la réaction chimique, encombrement pour les modèles capacitifs, débit continu quand le système est amorcé...

Ce type d'A.R.I. a déjà été employé en spéléologie (51).

* A.R.I. à circuit ouvert: il s'agit du même principe que les blocs de plongée, conçu par COUSTEAU et GAGNAN en 1942: l'air est comprimé dans des bouteilles, et fourni par l'intermédiaire d'un système à détendeur. La plupart des A.R.I. à circuit ouvert sont équipés d'un masque assurant la protection du visage.

Plusieurs avantages existent pour ces appareils: ils sont tout d'abord d'un maniement simple, et faciles à se procurer: la plupart des centres de secours de la protection civile en sont équipés. Par ailleurs, il est aisé de les recharger à l'aide d'un compresseur à proximité même du lieu d'utilisation si besoin. Ils sont mieux adaptés au transport aérien que les bouteilles de plongée, et le masque peut être une sécurité supplémentaire pour les gaz à toxicité cutanée et muqueuse, le risque d'inhalation accidentelle étant de plus absent. Enfin, l'utilisation se fait à volonté.

Les inconvénients sont cependant à prendre en considération: le rapport poids/autonomie est bien plus important que pour les systèmes à circuit fermé, ce qui provoque un déplacement du centre de gravité et une diminution de la capacité de mobilisation. Par ailleurs, la perte d'un contact direct avec l'extérieur est favorisée par le port du masque, et cela entraîne des problèmes spécifiques: stress, diminution du champ visuel, déficit auditif et olfactif, augmentation de l'espace mort par le masque, augmentation également des résistances respiratoires (57). L'emploi de ces systèmes nécessite donc une certaine habitude.

Le modèle BIOLINE de chez FENZY (fig. N) permet cependant de limiter certains inconvénients tout en permettant

l'accès à des zones difficiles: il s'agit d'un A.R.I. à circuit ouvert, mais avec réserve d'air à distance de l'utilisateur utilisée grâce à un tuyau d'alimentation. Cette réserve peut être un compresseur ou des bouteilles d'air comprimé.

* Remarques: il n'existe pas de système de protection respiratoire parfaitement adapté à l'exploration spéléologique. Pour les explorations courantes et les sauvetages en caverne d'accès facile, les A.R.I. à circuit ouvert conviennent bien. On préférera les systèmes à circuit fermé pour les sauvetages dans des cavités difficiles en raison de l'encombrement réduit, du faible poids, et de l'absence de masque facilitant la progression, à condition toutefois d'avoir un nombre suffisant d'appareils.

En cas d'accident, il faudra cependant s'accomoder du premier système disponible en raison de la rapidité d'intervention nécessaire.

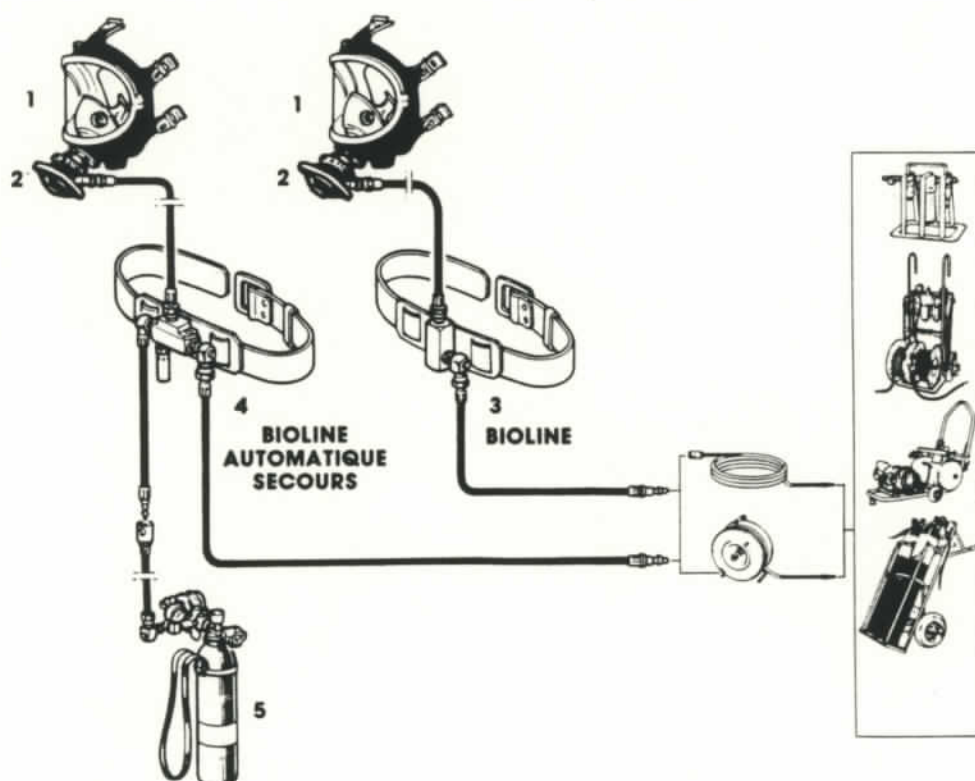


Figure 31: Le système BIOLINE.



M.S.A. SSR 30/100



FENZY 55 SP



DRAEGER TRAVOX 120



DRAEGER PA 80

Quelques modèles d'A.R.I.

modèle	type	autonomie	poids	masque
		moyenne		
M.S.A.SSR:	C.F.	30 mn	2 Kg	non
30/100				
FENZY	C.F.	90 mn	9 Kg	oui
55 SP				
DRAEGER	C.F.	120 mn	11 Kg	oui
Travox 120:				
DRAEGER	C.F.	240 mn	12,8 Kg	oui
BG 174				
DRAEGER	C.O.	45 mn	15 Kg	oui
PA 80				

C.F. : Circuit Fermé C.O. : Circuit Ouvert

Tableau 10: Caractéristiques de quelques A.R.I.

10.2 Secourisme

Même si la proportion d'accidents dus aux gaz des cavernes est faible (environ 6%), le développement des explorations dans l'espace et le temps ne laisse pas envisager une diminution de ces chiffres. Il appartient donc aux responsables des secours spéléologiques de se pencher sur les problèmes que pose ce type d'accident, rapidement évoqués dans ce chapitre.

10.2.1 Techniques de secourisme

Les quelques accidents dus aux gaz survenus ces dernières années en caverne ont obligé à envisager les problèmes d'intervention dans ce cas très particulier. Le geste le plus urgent est évidemment d'extraire la victime de l'atmosphère viciée. En cas d'impossibilité, deux solutions existent pour apporter de l'air pur: l'isolement respiratoire des sauveteurs et victimes, étudié au § 10.1.3, ou le renouvellement atmosphérique de la cavité:

- Le renouvellement atmosphérique est possible par plusieurs moyens: la création d'une seconde communication de la caverne avec l'extérieur peut provoquer une ventilation naturelle (cf § 2.2). Cependant, ce procédé sera d'autant plus lent que le volume d'air contaminé sera important, et il s'applique rarement aux cavités verticales dans lesquelles les autres moyens doivent être envisagés.

L'emploi de systèmes de ventilation artificiels peut être efficace (turbines, ventilateurs puissants)(35). Cependant, ils seront difficile à utiliser efficacement à distance de l'entrée.

Les compresseurs ont parfois été utilisés notamment dans du CO₂. Les modèles courants distribuent environ 500 litres/minute, mais l'efficacité se limite souvent aux alentours du tuyau d'arrivée de l'air, car un gaz lourd (CO₂ par exemple) reprendra sa place au niveau du sol. Il faut également prendre garde à la qualité de l'air diffusé, une pollution étant toujours possible (CO, CO₂,...) avec un matériel non prévu pour distribuer de l'air "médical", par exemple un compresseur de travaux publics. Ce risque de pollution existe également avec les compresseurs d'air "médical", destinés à remplir les bouteilles de plongée par exemple, mais il est moindre car les capteurs d'air sont situés en hauteur.

Ce procédé peut être efficace dans les petites

cavités (52) et avec des gaz légers (CO par exemple), mais son utilisation en présence de CO₂ est souvent un échec.

- L'isolement respiratoire a été étudié au § 10.1.3. Pour ce qui concerne la ou les victimes, il est parfois urgent de leur assurer un apport d'air pur.

- La détermination des gaz doit être qualitative et quantitative. C'est le premier élément à connaître avant de déclencher toute tentative de sauvetage. Une orientation peut être fournie par le type de cavité et sa localisation, les symptômes éventuellement ressentis par des visiteurs, etc. En l'absence de données précises, il paraît utile de rechercher oxyde de carbone, vapeurs nitreuses, hydrogène sulfuré, oxygène, gaz carbonique. Il faut bien sûr tenter d'évaluer la répartition des gaz dans la cavité.

- Le déroulement du sauvetage doit s'effectuer en ayant à l'esprit la possibilité d'un suraccident: les équipiers doivent être choisis en fonction de leurs compétences spéléologiques, et fréquemment renouvelés. Si l'indication d'utiliser les A.R.I. n'a pas été posée (teneurs en toxiques ou confinement modéré), la surveillance médicale des sauveteurs doit être constante. En cas d'oxyde de carbone, les valeurs de HbCO sont facilement évaluées sur le terrain avec un matériel adapté (cf § 9.5.5) et permettront d'éviter l'intoxication.

Les techniques de progression des sauveteurs sont énumérées au chapitre précédent.

- Applications pratiques:

La détection d'atmosphères toxiques ou confinées doit être rapidement possible par les organismes de secours départementaux (régions à teneurs élevées en CO₂) ou régionaux. Les régions bien karstifiées devraient posséder un détecteur de gaz avec kit d'ampoules polyvalent (CO₂, O₂, CO, H₂S, NO_x).

Les secouristes de régions à atmosphère confinée

doivent bien connaître les effets de ce type de milieu.

La suspicion d'accident dû aux gaz en caverne doit faire réquisitionner d'emblée des appareils respiratoires, compresseurs, et un personnel suffisamment nombreux. Il en est de même pour les cavités étroites nécessitant l'emploi d'explosifs, ou les accidents variés (traumatismes par exemple) en atmosphère confinée.

10.2.2 Utilisation d'explosifs

L'utilisation d'explosifs en spéléologie est à l'origine de la plupart des accidents dus aux gaz . Par ailleurs, l'évacuation d'un blessé, dans une cavité étroite, nécessite souvent l'emploi d'explosifs afin de permettre le passage de la civière. Ces situations ont motivé quelques réflexions théoriques et pratiques quand à l'utilisation des explosifs sous terre:

- L'emploi d'explosifs ne doit se faire qu'en dernier recours: certaines civières telles les FERNO-KED permettent maintenant le passage d'étroitures alors infranchissables.

- Une bonne connaissance de la climatologie de la cavité est nécessaire avant l'emploi d'explosifs: volumes approximatifs de dilution des gaz, vitesse de renouvellement de l'air, existence éventuelle d'un confinement atmosphérique,...

- Les délais permettant une nouvelle incursion dans la cavité dépendent de la climatologie: une cavité ventilée en permanence verra son atmosphère purifiée en quelques jours, voire quelques heures. Le renouvellement peut être beaucoup plus long en l'absence de courant d'air. Dans ce cas, un délai d'une semaine semble en général insuffisant (tout dépend bien sûr de la qualité et quantité d'explosifs employés, ainsi que de nombreux paramètres cités au § 9.5.1), l'accident survenu à l'aven FELZINES en 1956 le rappelant cruellement (cf annexe 1).

- L'existence d'un confinement atmosphérique doit être une contre-indication à l'utilisation d'explosifs, sauf

nécessité absolue (secours) et précautions particulières (A.R.I.). En effet, c'est tout d'abord un indice de non renouvellement de l'air, et les gaz dégagés persisteront d'autant plus longtemps dans la cavité. Ensuite, la toxicité des gaz sera considérablement multipliée en présence de CO₂, lequel stimule la respiration très activement comme vu au § 5 et 7. Les valeurs de vapeurs nitreuses et oxyde de carbone à ne pas dépasser sont donc caduques, et toute trace des ces gaz doit entraîner un repli.

- En cas de secours, l'emploi d'explosifs peut être rendu nécessaire par certains passages étroits. On doit alors effectuer régulièrement un contrôle de la qualité de l'air, veiller s'il existe une ventilation qu'elle ne déplace pas les gaz vers le blessé, utiliser des systèmes respiratoires et ventilateurs dès que les doses sont critiques. Pour les explosifs, la technique des microcharges est à préférer aux autres (36). Un nouveau conditionnement du cordeau détonnant est actuellement à l'étude par des artificiers de Dordogne: pour une puissance accrue, il dégagerait moins de toxiques.

10.2.3 Thérapeutiques

* Traitements symptomatiques: Les symptômes incommodants sont souvent traités par les sujets eux-mêmes: les céphalées, très fréquentes, sont facilement soulagées par l'aspirine. Cependant, si l'efficacité du traitement est incontestable, le caractère acide de la molécule incite à préférer la prescription d'autres antalgiques (paracétamol par exemple) lors d'une exposition à une A.C. qui, comme envisagé précédemment, induit une acidose sanguine. On doit aussi penser que la vasodilatation cérébrale responsable des céphalées est un mécanisme de défense contre l'hypoxie partiellement enrayé par l'aspirine, même si cette hypoxie semble exceptionnelle pour le cas envisagé.

* L'oxygénothérapie: pour le traitement des expositions entraînant une défaillance des grandes fonctions (conscience, respiration, circulation), l'oxygénothérapie semble tout à fait indiquée, en appoint des techniques usuelles de réanimation. Nous avons discuté par ailleurs la non-opportunité d'utiliser cette thérapeutique de manière préventive (§ 8.1).

* L'isolement respiratoire: doit être systématiquement appliqué dès que possible pour les victimes de malaise dus au confinement, ainsi que pour les blessés autres risquant de poser un problème de réanimation (par exemple traumatisme cranien), et soumis à une cavité de mauvaise qualité atmosphérique .

Le premier acte de secourisme consiste à extraire la victime de l'atmosphère viciée.

C O N C L U S I O N

11 CONCLUSION

Les atmosphères confinées karstiques, affrontées de longue date, semblent rarement mettre en danger les explorateurs de cavernes.

En effet, l'importance du volume des vides karstiques permet en général d'éviter les détériorations mortelles de la qualité de l'air souterrain.

Par ailleurs, d'importantes diminutions de la teneur en oxygène semblent être anihilées par l'effet stimulant respiratoire du gaz carbonique, lequel paraît être responsable de la plupart des symptômes perçus.

Cependant, les multiples combinaisons de proportion de ces deux gaz, qui mériteraient une étude détaillée, doivent inciter au respect des valeurs admissibles, de même que les effets nocifs du CO₂ aux teneurs élevées.

De nombreux autres gaz peuvent également se rencontrer sous terre, heureusement de manière exceptionnelle. Ils sont en effet à l'origine de la plupart des accidents toxiques graves en spéléologie.

La moitié d'entre eux cependant ne présente pas un caractère vraiment imprévisible, et sont d'origine humaine.

La prévention des accidents dus aux gaz des cavernes passe donc par une bonne connaissance de la climatologie karstique, le respect des règles d'utilisation des explosifs et techniques à combustion, le respect des valeurs admissible pour chaque gaz, et l'emploi fréquent de techniques de détection en exploration.

Un large regroupement des cas d'intoxication devrait enfin aboutir à une meilleure compréhension des circonstances mettant en péril les spéléologues.

B I B L I O G R A P H I E

12 BIBLIOGRAPHIE

- 1°) ALTMAN P., GIBSON J., WANG C.: **Effect of combined anoxia and hypercapnia on alveolar CO₂ and O₂ at man.** Handbook of respiration, WB Saunders Company, Philadelphia 1958, pp. 158-9.
- 2°) AUCANT Y., 1976: **Accident mortel à Morre, Doubs, Spélunca IV, 2, 90-1.**
- 3°) BADIN A., 1875: **Grottes et cavernes**, Ed. Hachette, Paris, 362p
- 4°) BAKALOWICZ M., 1979: **Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification.** Thèse Sci. Nat., Paris VI.
- 5°) BAROIS A., 1984: **Les intoxications** in Les urgences, Ed. Maloine, Paris, p 521-67.
- 6°) BEDOS A., 1987: **Rapport Médical; Cpte Rendu Expé. Thaf-Maros 1986, -155-60**, Ed. A.P.S. Toulouse.
- 7°) BERT P., 1878. **La pression barométrique; Recherches de physiologie expérimentale.** Ed. du C.N.R.S. (Ed. 1979), 1183p
- 8°) BIANCHI-DEMICHELI F. 1983: **Intoxication aux gaz lors de l'utilisation d'explosifs en spéléologie.** Stalactite (La Chaux de Fonds), 33, 2, 103-8.
- 9°) BIANCHI-DEMICHELI F. 1986. **Le gaz Acétylène; Stalactite (La Chaux de Fonds) 36 (2) 94-5.**
- 10°) BOREL C.; LEMAIRE C. 1979: **La spéléo et le gaz carbonique; Bull. C.D.S. du Lot, 5, 71-73.**

- 11°) BURSAUX C.D., 1971: **Contribution à l'étude du pouvoir tampon du sang pour le CO₂ in vivo.** Thèse Med. Paris VII.
- 12°) CASTERET N., 1941: **Au fond des gouffres;** Lib. Acad. Perrin, PARIS, 288p
- 13°) CHAPUIS A., LOPEZ A., CABROL C. 1970: **Quelques caractéristiques physiques de l'atmosphère d'un milieu souterrain;** Spélunca 4, 4, 199-202.
- 14°) CHOPPY J., 1982: **Réflexions théoriques sur la composition des poches d'air.** Actes Coll. Plongée Sout., Mémoire S.C.Paris N°10, p100-4.
- 15°) CHOPPY J., 1984: **Température de l'air;** Processus dynamiques dans les vides karstiques, Ed. J.CHOPPY, Paris.
- 16°) CHOPPY J., 1988: **Composition de l'air;** Processus dynamiques dans les vides karstiques, Ed. CHOPPY, Paris.
- 17°) COLLIGNON B., 1983: **Rhar es Skoun, étude d'une grotte thermale dans la région des Bibans, Algérie du Nord.**
Spélunca (5) 12, 19-24.
- 18°) CORDIER D., MAGNE H., MAYER M., 1927: **Anaérobiose et intoxication carbonique.** Ann. de Physio., Physique, Chimie III, 791-817.
- 19°) DEHARVENG L., BEDOS A., 1986: **Gaz carbonique;** C.R. Expé. Thaf- Maros 85, p 144-52, Ed. APS, TOULOUSE.
- 20°) DRESKO-DEROUET L., 1960: **Un micro-eudiomètre portatif pour l'analyse de petits volumes d'air. Technique simple de mesure de respiration dans les grottes.** Ann. Spél. (XV),2;377-81.

- 21°) DUJARDIN-WEBER E., 1943: **Sur le méphitisme de quelques corps gazeux décelables en spéléologie.** Spélunca X, 109-38.
- 22°) FENIES J.: **Spéléologie et médecine**, Ed. Masson, Paris, 1965, 158p.
- 23°) FLANDROIS R., BRUNE J., WIESENDANGER T., 1976: **La respiration**, Physiologie Humaine , Ed. SIMEP, 191p.
- 24°) FOURNIER E., GERVAIS P., 1977: **Guide pratique des intoxications**; Ed. Heures de France.
- 25°) FRACHON J.C., 1985: **Le secours Français en Spéléo-Plongée; Secours siphon et post-siphon**, C.R. Renc. Int. de Sec. Siphon, Francheville, 20-29.
- 26°) FRACHON J.C., 1989: **Dossiers S.S.F. sur les accidents dus aux gaz.** Comm. Pers.
- 27°) FREJAVILLE J.P., BISMUTH C., CONSO F., 1981: **Toxicologie clinique**, Flammarion Med. Sc. Ed., 571 + 199p.
- 28°) GAIA R., 1967: **Compte rendu d'échantillonnage et d'analyse d'atmosphère au Puits de Plance**; Spélunca 4 (3), 227-8.
- 29°) GALAN C., GALAN A., 1983: **Notas sobre la sima fumarola de isla de Monos, N.E. Venezuela.** Bol. Soc. Venez. Espel.(20) 3-9.
- 30°) GAUTIER M., 1984: **La lampe à carbure: une dangereuse méthode pour contrôler la teneur en O₂ de l'air**; Stalactite (34) 2 116-7.
- 31°) GENAUD Med. Gén., 1975: **Manuel du secouriste en ranimation.** Ed. France Sélection, 213p.
- 32°) GEZE B., 1965: **La spéléologie scientifique**; Ed. du Seuil.

33°) GEZE B., 1979: **Le karst: définition et intérêt de l'étude des phénomènes karstiques.** Coll. Ass. Géol. du S.O., Tarbes 1978 Ed. SEPMAS Toulouse.p1-6.

34°) GONTIER J., 1977: **La respiration ;** P.U.F., Que-Sais je N°1441, 126p..

35°) GINET R., DECOU V., 1977: **Initiation à la biologie et à l'écologie souterraine.** Ed. Delarge, Paris,275p.

36°) GUILLAUME F., MIGUET T., OYHANCABAL A., 1989: **A propos de la toxicité de la fumée de tir d'explosifs en spéléologie** Spélunca V, 33, 16-21.

37°) HEULLY F., DE REN G., PETIET G., ANCIAUX P., 1967: **Problèmes posés par une intoxication aigüe mortelle à l'anhydride carbonique survenue dans une mine de fer;** Ann. Méd. Lég. 47, 62-7.

38°) HOLZAPFEL L., 1980: **Exploration du système nerveux végétatif par le test au CO2.** Thèse Méd. Lyon I.

39°) JALLET M.F., 1971: **Contribution à l'étude des accidents observés chez les travailleurs exposés à des atmosphères viciées par accumulation de gaz carbonique.** Thèse Méd. Montpellier.

40°) JAMES J., PAVEY A., ROGERS A., 1975: **Foul air and the resulting hazards to cavers.** Trans. Brit. Cave Res. Ass. 2, 2, 79-88.

41°) JAMES J., 1977: **CO2 in the cave atmosphere.** Trans. Brit. Cave Res. Assoc. 4, 4, 417-29.

42°) JAMES J., DYSON J., 1981 : **CO2 in caves.** Caving Intern. Mag. N°13, 54-9.

43°) KAISER C., 1970: **Respiration**, in Physiologie humaine tIII, Flammarion ed. Paris, 203-39.

44°) KLIMCHUK A.B., YABLOKOVA N.L., OLSHTYNSKY S.P., 1981: **The regularities in the formation of gas composition of the air in the Large Karst Caves of Podolia and Bukovina**. Proceed. 8th Intern. Congress, Bowling Green, 1, 21-3.

45°) LAMBERT G., 1987: **Le gaz carbonique dans l'atmosphère**; La Recherche (18), 189, 778-87.

46°) LEICHNITZ K., 1982: **Livre de poche concernant les tubes réactifs**; Drägerwerk AG, Lübeck, 5° Ed., 271p.

47°) LEICHNITZ K., 1983: **La technique de mesure par tubes réactifs** Ed. Ecomed, 339p.

48°) LWEIS W.C., 1981: **Carbon dioxyde in Coldwater Cave**. Proceed 8th Congress of Speleo., Bowling Green, 1, 91-2.

49°) MALLARD M., 1985: **Secours et prévention en spéléologie**. Thèse Med. Lille.

50°) MANGIN A., ANDRIEUX C.: **Infiltration et environnement souterrain, le rôle de l'eau sur les paramètres climatiques**. Actes Journées Trombe, Mém. Spél. Club de PARIS N°14, 1988, 1, p78-95.

51°) McFARLANE D.A., 1981: **Oxygen rebreather equipment for use in foul air caves** Trans. Brit. Cave Res. Ass. (8), 3, 130-4.

52°) MUGNIER C., 1977: **Une méthode de sauvetage pouvant être utilisée lors d'accidents dûs à des gaz toxiques**. Spélunca (4) 1, 36.

53°) NEUPONT G., 1983: **Nocivité des fumées de tir**; Spéléo Corrèze Info 8, 17-9.

54°) NEUPONT G., 1986: **Nocivité des fumées de tir en spéléologie**; S.C.Info 11, 22-6.

55°) OSTERMANN J.M., 1990: **Troubles liés à l'atmosphère respirée dans deux cavernes de Thaïlande**. Périgord-Explo N°3, 1990, p 69-76.

56°) OSTERMANN J.M., 1990: **Quelques observations psychophysiologiques en atmosphère confinée karstiques**. Périgord-Explo N°3, p 63-7

57°) PRIM Méd. Col., 1989: **Les risques agressologiques du métier de Sapeur-Pompier**; Le Sapeur-Pompier, 802, Mai, 202-9.

58°) RADZISZEWSKI E., 1987: **Effets physiologiques chez l'homme du confinement de longue durée en atmosphère enrichie en dioxyde de carbone**; Thèse Sc. Lyon, 329p.

59°) RAYMOND V., 1960: **Les intoxications des puisatiers**; Arch. Mal. Prof., 21, 9, 517-23.

60°) RENAULT P., 1968: **Sur la distinction de plusieurs régions karstiques en raison de la teneur en anhydride carbonique des atmosphères de grottes**; C.R.A.S., 267, 2288-90.

61°) RENAULT P., 1970: **La formation des cavernes**. Coll. "Que sais-je"? P.U.F., PARIS, 127p.

62°) RENAULT P., 1972: **Le gaz des cavernes**; Sciences Progrès Découverte 3443, 12-8.

63°) RENAULT P., 1982: **Le CO2 dans l'atmosphère de quelques cavernes du Quercy**; Spéléo-Dordogne 74, 116p.

64°) RENAULT P., 1983: **Le CO2 est-il dangereux ?**; Spélunca V, 11, 37-39.

65°) RENAULT P., 1988: **Note sur la notion de confinement dans le domaine spéléologique**; Comm. Pers., 7p.

66°) RENAULT P., 1989: **Appareils de protection respiratoire**; Comm.Pers., 2p.

67°) RIVOLIER J., 1984: **Les aspects psychologiques de la pratique de l'alpinisme**; in Médecine de l'alpinisme, Ed. Masson, PARIS.

68°) ROQUES H., 1963: **Sur la répartition du CO2 dans les karsts**. Annales de Spéléo., Ed C.N.R.S., XVIII, 2, 141-84.

69°) SALGUES D., MAGDELAINE J., 1980: **L'Igue de Cuzals**; Grottes et Gouffres, bull. S.C.Paris, 3-15.

70°) SAUMANDE P., 1973: **Etude du comportement de l'homme dans un milieu d'exception: le milieu souterrain**. Thèse Sc. LIMOGES,

71°) SCHOELLER H., 1967: **Conduite de l'étude hydrogéologique et climatologique des grottes descendantes**. Spélunca Mém. IV, 5, 76-93.

72°) TROMBE F., HENRY LA BLANCHETAIS C., 1947: **Etude sur la conductibilité de l'air et la présence de radiations pénétrantes telluriques dans quelques souterrains des Pyrénées**. Ann. de Spél., 2, 2-3, 125-148.

73°) TROMBE F., 1952: **Traité de Spéléologie**; Payot Ed., 376p.

74°) VAYSSIÈRE R., 1983: **A propos du thermalisme, revue générale de spéléothérapie en Europe**. Thèse Med. Toulouse, 21, 284p.

75°) VERGNES H., 1988: **Fonction respiratoire de l'érythrocyte en altitude**; Rev. de l'Union Nat. des Méd. de Rés., 1, 13-18.

76°) WRIGHT S.: **Physiologie appliquée à la médecine**: Ed. Médecine Sc. Flammarion, 668p.

77°) ZUGIBE F.T. et Al, 1987: **The Confined Space-Hypoxia Syndrome**, Journ. of Forensic Sci., 32, 2, 554-559.

A N N E X E S

ACCIDENTS DUS AUX GAZ DES CAVERNES
survenus en France

N°	DATES	LIEUX	GAZ	ORIGINE GAZ	NBRE VICTIMES: (DECES)	REF. BIBLIO.
1	1938	St Antonin	CO + ?	moteur pompage	(2)	FENIES, 1965
2	10/1949	Larroque des : Albères- 66	CO2 + : H2S ?	profonde ?	(1)	" "
3	?	La Fulatière- : 39	C2H2	Générateur : Acétylène	1	" "
4	1948	Moulis- 31	CO + NOx	explosifs	2	" "
5	10/1950	Les Matelles : 34	CO2 ?	pédologique ?	(1)	FRACHON, 1989
6	9/1956	Sebazac :Concourès- 12	CO + : NOx ?	explosifs : (charge creuse):	1 + (1)	" "

N°	DATES	LIEUX	GAZ	ORIGINE	NBRE VICTIMES: (DECES)	REF. BIBLIO
7	:1965 ?	:Villeneuve les: :Maguelonnes-34:	: CO2	: profonde	: 5	: Spélunca IV,4, : 304 (1966)
8	: 2/1969	: Batsère- 65	: CO + NOx	: explosifs	: 1 +(1)	: FRACHON, 1989
9	:10/1970	: Cournonterral: : 34	: CO2	: profonde ?	: 1	: JALLET, 1971
10	:8/1971	: Cadrieu- 46	: H2S	: oxydation lignite:	: 1 + (2)	: FRACHON,1989
11	:10/1972	: Cuves-Saurier: : 63	: CO2	: profonde ?	: (3)	: RITTER, 1973
12	:1974 ?	: ? - 16	: CO + CO2	: groupe électro.	: 2	: OLIVET, Comm.p.:
13	:4/1976	: Morre- 25	: CO	: travaux publics	: 8 + (1)	: AUCANT, 19??
14	:9/1978	: Bois d'Amont : 39	: CO + NOx	: explosifs	: 1 + (1)	: FRACHON, 1988

N°	DATE	LIEU	GAZ	ORIGINE	NBRE VICTIMES:	REF. BIBLIO
15	:10/1982	: Sorrèze- 81	: CO + NOx	: moteur pompage	: 4	: BOU, Comm.Pers.:
16	:5/1984	: Roquefort : Les Pins- 06	: CO	: travaux publics	: 4	:FRACHON, 1989 :
17	:8/1984	: Espagne	: H2S ?	: ?	: (1)	:RIAS, 1984
18	:8/1985	: Pradelle- 26	: CO + NOx	: explosifs	: (2)	:Spélunca,20,XVI:
19	:10/1986	: Louviers- 27	: CO	: feu de bois	: 1 + (1)	:FRACHON, 1989
20	:5/1988	: Caniac- 46	: CO + NOx	: , explosifs	: 4	:TOURRON, Comm.P.:

Seuls sont pris en compte les accidents répertoriés par le S.S.F. et ceux ayant nécessité une médicalisation.

ANNEXE 2: QUESTIONNAIRE

CAVITE:

Nom: Date de l'exploration:
Commune: Département/Pays:
Description:

Bibliographie:

localisation du CO2:
Teneur maximum de CO2:
Teneur minimum d'O2:
Pression Atmosphérique extérieure:
Buts de l'exploration:
Durée estimée de l'exposition:

EXPLORATEUR:

Nom: Age:
Adresse:
Antécédents Médicaux et chirurgicaux:

Traitements en cours:
Etes vous fumeur ?
Avez-vous déjà pratiqué des explorations avec CO2 ?
Pratiquez-vous la plongée ?
Spéléo pratiquée depuis:

SYMPTOMES:

Parmi les troubles suivants, soulignez ceux que vous avez ressenti et leur durée:

Céphalées

Vertiges

Troubles visuels (nature):

Angoisse

Euphorie

Obnubilation

Fatigue (pendant et après la visite):

Chaleur, sueurs:

Troubles moteurs

Nausées, vomissements, douleurs gastriques:

Soif, polyurie:

Difficultés respiratoires

Accélération ou diminution du pouls:

Picotement oculaire et/ou pharyngé:

Hyperthermie dans les jours qui suivent

Autres signes:

Avez-vous pris un traitement ? lequel ?

Y a-t-il eu alors amélioration des troubles ?

Remarques:

ANNEXE 3:

CARACTERISTIQUES DE QUELQUES GAZ DES CAVERNES

D'après (46).

GAZ	: POIDS MOL.	: C.M.A.	: SEUIL OLF.	:
CO2	: 44.01	: 5000 ppm	: /	:
CO	: 28.01	: 30 ppm	: /	:
H2S	: 34.08	: 10 ppm	: < 0.1 ppm	:
SO2	: 64.06	: 2 ppm	: 0.5 ppm	:
NH3	: 17.03	: 50 ppm	: 5 ppm	:
NO2	: 46.01	: 5 ppm	: 0.5 ppm	:
CH4	: 16.04	: / *	: /	:
C2H2	: 26.04	: /	: /	:

MOL.= moléculaire OLF. = olfactif

* Inflammable à partir de 5 Vol%

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

<u>PLAN:</u>	7
<u>ABREVIATIONS ET LOIS DES GAZ:</u>	11
<u>1 INTRODUCTION</u>	16
<u>2 LE MILIEU SOUTERRAIN KARSTIQUE</u>	19
2.1 Définition.....	20
2.2 Notions de climatologie.....	21
2.2.1 Pression atmosphérique.....	21
2.2.2 Hygrométrie.....	21
2.2.3 Températures.....	21
2.2.4 Mouvements de l'air.....	22
2.2.5 Composition de l'air.....	25
<u>3 LES ATMOSPHERES CONFINEES KARSTIQUES</u>	26
3.1 L'Atmosphère terrestre.....	27
3.1.1 Composition normale.....	27
3.1.2 Variations de la teneur en gaz carbonique.....	27
3.2 Les Atmosphères Confinées Karstiques.....	28
3.2.1 Définition.....	28
3.2.2 Origines du confinement atmosphérique.....	30
3.2.3 Les teneurs en oxygène.....	33
3.2.4 Répartition des atmosphères confinées.....	34
3.2.5 Variations temporelles.....	37
<u>4 RAPPELS DE PHYSIOLOGIE RESPIRATOIRE</u>	39
4.1 Mécanique ventilatoire et ventilation pulmonaire.....	40
4.2 Ventilation alvéolaire.....	42
4.3 Echanges gazeux pulmonaires.....	43
4.4 Transport des gaz.....	45
4.4.1 Oxygène.....	45
4.4.2 Gaz carbonique.....	47
4.5 Régulation de la ventilation.....	48

4.6	Les stimuli ventilatoires.....	49
4.6.1	Les corpuscules aortiques et carotidiens.....	49
4.6.2	Stimuli ventilatoires.....	49
4.7	Etude de la gazométrie artérielle.....	50
4.7.1	Hypoxémie.....	50
4.7.2	Equilibre acide-base.....	51
5	<u>PHYSIOPATHOLOGIE DU CONFINEMENT HYPERCARBOXIQUE.....</u>	53
5.1	Physiopathologie de l'hypercapnie.....	54
5.2	Données récentes sur le confinement hypercapnique.....	55
5.2.1	Fonction respiratoire.....	55
5.2.2	Equilibre acido-basique et gaz du sang.....	56
5.2.3	Fonction rénale et potassium plasmatique.....	59
5.2.4	Paramètres hématologiques.....	59
5.2.5	Activité hormonale surrénalienne.....	59
5.2.6	Fonction circulatoire.....	60
5.2.7	Symptômes subjectifs d'intolérance au CO ₂	60
5.2.8	Tests psychosensoriels et psychomotricité.....	61
5.2.9	Conclusions.....	61
6	<u>PHYSIOPATHOLOGIE DE L'HYPOXIE.....</u>	63
6.1	Le milieu intérieur.....	64
6.1.1	Capacité de transport de l'hémoglobine.....	64
6.1.2	Modification de la numération globulaire.....	64
6.1.3	Equilibre acido-basique.....	65
6.2	La ventilation.....	65
6.3	Réactions circulatoires.....	66
6.4	Troubles neurologiques.....	66
7	<u>LE CONFINEMENT HYPOXIQUE.....</u>	68
7.1	Le confinement hypoxique expérimental.....	69
7.1.1	Expériences de BERT.....	69
7.1.2	Données plus récentes.....	71
7.2	Le confinement hypoxique accidentel.....	72
7.2.1	Circonstances.....	72
7.2.2	Symptômes.....	73
7.2.3	Traitement.....	74

7.3 Les atmosphères confinées karstiques.....	74
7.3.1 Historique.....	74
7.3.2 Fonction respiratoire.....	75
7.3.3 Fonction cardio-vasculaire.....	76
7.3.4 Signes neurologiques.....	76
7.3.5 Atteintes sensorielles.....	78
7.3.6 Atmosphère Confinée et psychisme.....	79
7.3.7 Troubles digestifs.....	80
7.3.8 Troubles divers.....	80
7.3.9 Variabilité des symptômes.....	81
7.4 Observations personnelles.....	82
7.4.1 Variation des paramètres cardio-vasculaires et respiratoires au Cuzoul de Roc Traoucat.....	82
7.4.2 Variations des paramètres cardio-vasculaires et respiratoires à l'Igue de Fauvelet.....	85
7.4.3 Première étude gazométrique sanguine à l'Igue du Frau.....	88
7.4.4 Deuxième étude gazométrique sanguine à l'Igue du Frau.....	91
<u>8 DISCUSSION.....</u>	95
8.1 Le déficit atmosphérique en oxygène.....	96
8.2 Valeurs admissibles de confinement.....	99
<u>9 AUTRES GAZ DES CAVERNES.....</u>	102
9.1 Gaz radioactifs.....	103
9.2 Hydrogène sulfuré.....	104
9.3 Methane.....	105
9.4 Acétylène.....	107
9.5 Oxyde de Carbone.....	109
9.6 Oxydes d'Azote.....	113
9.7 Acide Chlorhydrique.....	115
9.8 Chloropicrine.....	116
9.9 Acide Cyanhydrique.....	117
9.10 Ammoniac.....	118

9.11 Vapeurs d'hydrocarbures.....	119
9.12 Anhydride Sulfureux.....	121
9.13 Conclusions.....	121
<u>10 EXPLORATIONS ET SECOURISME EN ATMOSPHERES CONFINEES OU TOXIQUES.....</u>	<u>123</u>
10.1 Techniques d'exploration.....	124
10.1.1 Détection des gaz.....	124
10.1.2 Techniques d'exploration.....	129
10.1.3 Appareils respiratoires.....	131
10.2 Secourisme.....	138
10.2.1 Techniques de secourisme.....	139
10.2.2 Utilisation d'explosifs.....	141
10.2.3 Thérapeutiques.....	142
<u>11 CONCLUSION.....</u>	<u>144</u>
<u>12 BIBLIOGRAPHIE.....</u>	<u>146</u>
<u>ANNEXES.....</u>	<u>155</u>
Annexe 1: Accidents dus aux gaz des cavernes	156
Annexe 2: Questionnaire.....	159
Annexe 3: Caractéristiques de quelques gaz.....	161
<u>TABLE DES MATIERES.....</u>	<u>162</u>

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu voir le jour sans l'aide efficace de nombreuses personnes que je tiens à remercier très vivement:

Les membres du Groupe Spéléologique Scientifique et Sportif de PERIGUEUX, et en particulier: H.BEFFARA, B.BUCQUOIS, F.COUSTILLAS, P.L.DIENNET, P.DUPOTY, B.HOMS, A.MENIER, X.NOQUES, Y.OLIVET, A.PASQUET, J.M.PINNE, T.TEILLET.

M.AMAT

Pr BANGE, Université LYON I

Dr J.BARIOD, Commission Médicale F.F.S.

C.BES

B.BOARDMAN, British Cave Rescue Council

Dr CRAVENS

M.DELERON, Association Spéléologique Périgourdine

F.DARNE

Sté DRAEGER

A.FABBRICATORE, U.I.S. Cave Diving

Pr FLANDROIS, Université LYON I

Dr FLORES, Université LYON I

Lt A.LAPEYRE, Centre de Secours de PERIGUEUX

X.LEDUC, L.LIGNAC, et C.TOURRON du Groupe Spéléologique Périgourdin.

Dr MARCENACH, Laboratoire de Biologie Médicale de SARLAT

Mmes MONESTIER et VAQUIER, Laboratoire d'Explorations Fonctionnelles Respiratoires La Roseraie, MONTFAUCON

Dr RADZISZEWSKI, C.E.R.T.S.M., TOULON

P.RENAULT, Université LYON I

A. et C. SERGENT

A.SLAGMOLEN, Commission Secours de l'Union Internationale de Spéléologie

SERMENT D'HIPPOCRATE

En présence des maîtres de cette école, de mes condisciples, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine.

Je donnerai mes soins à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.

Admis à l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe ; ma langue taira les secrets qui me seront confiés, et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser les crimes.

Reconnaissant envers mes maîtres, je tiendrai leurs enfants et ceux de mes confrères pour des frères et s'ils devaient entreprendre la Médecine ou recourir à mes soins, je les instruirai et les soignerai sans salaire ni engagement.

Si je remplis ce serment sans l'enfreindre, qu'il me soit donné à jamais de jouir heureusement de la vie et de ma profession, honoré à jamais parmi les hommes. Si je le viole, et que je me parjure, puissè-je avoir un sort contraire.