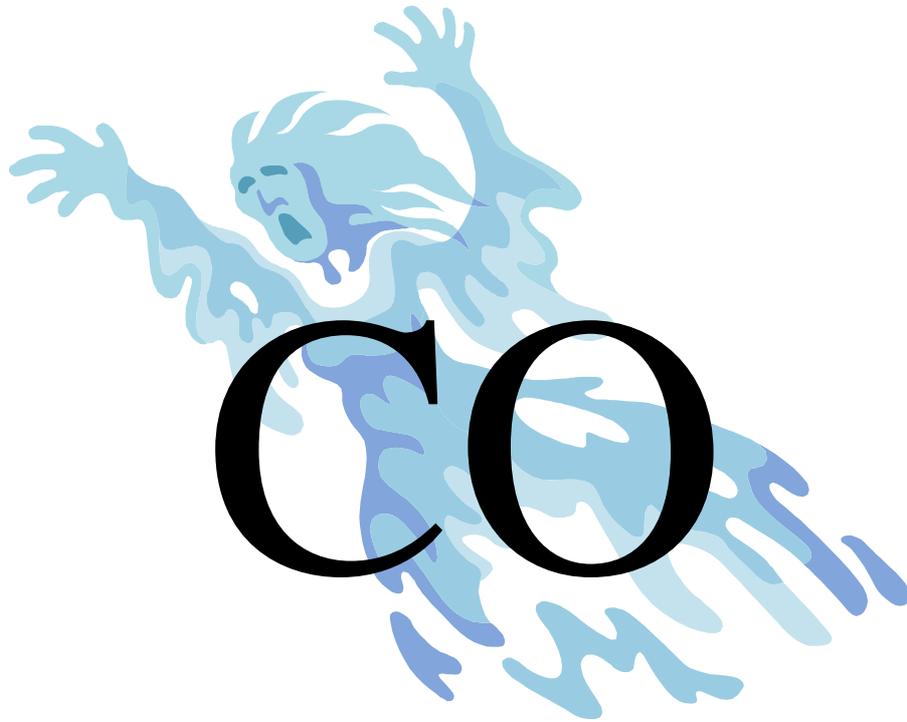


Version finale
Février 2006



Monoxyde de carbone et minages en spéléologie

© 2002 - 2006 - Michel & Jacques DEMIERRE
www.techt.ch

1. Table des matières

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1. | <i>Table des matières</i> | 1 |
| 2. | <i>Introduction</i> | 3 |
| 2.1. | NO_x - Les gaz nitreux | 3 |
| 2.2. | CO - Le monoxyde de carbone | 4 |
| 2.3. | CO₂ - Le dioxyde de carbone | 5 |
| 3. | <i>CO - Le monoxyde de carbone en détail</i> | 5 |
| 4. | <i>Caractéristiques Physiques et Chimiques</i> | 6 |
| 5. | <i>Intoxication au CO</i> | 7 |
| 6. | <i>Détection du CO</i> | 9 |
| 7. | <i>Premiers secours</i> | 10 |
| 8. | <i>CO et minage</i> | 10 |
| 8.1. | Minage à l'air libre | 10 |
| 8.2. | Minage en milieu confiné | 10 |
| 8.3. | Réduction des expositions au CO | 12 |
| 9. | <i>Normes pour l'exposition au CO</i> | 12 |
| 9.1. | Normes suisses d'exposition au Monoxyde de Carbone | 12 |
| 9.1.1. | VME – Valeur moyenne d'exposition..... | 12 |
| 9.1.2. | VLE - Valeur limite d'exposition..... | 12 |
| 9.1.3. | Alarmes dans les parkings | 13 |
| 9.2. | Normes américaines d'exposition au Monoxide de Carbone (OSHA) | 13 |
| 9.2.1. | TWA : Time Weighted Average | 13 |
| 9.2.2. | Ceiling | 13 |
| 9.2.3. | Instantaneous | 13 |
| 9.3. | Autres « normes » | 14 |
| 9.3.1. | Spéléo secours suisse..... | 14 |
| 9.3.2. | Spéléo secours français | 14 |
| 9.3.3. | AL : Action Level..... | 14 |
| 9.3.4. | EEGL : Emergency Exposure Guidance Levels..... | 14 |
| 9.3.5. | IDLH: Immediately dangerous to life or health concentration value | 14 |
| 9.4. | Conclusion | 14 |
| 10. | <i>Valeurs indicatives</i> | 15 |
| 10.1. | LCLo : Lethal concentration (Lowest Concentration causing death) | 15 |
| 10.2. | Dosages atmosphériques : | 15 |
| 10.2.1. | Longue durée | 15 |
| 10.2.2. | Durée limitée | 15 |
| 11. | <i>Le minage en spéléologie</i> | 17 |
| 11.1. | Technique | 17 |
| 11.1.1. | Généralités..... | 17 |
| 11.1.2. | Forage..... | 17 |
| 11.2. | Les explosifs en spéléologie et le CO | 19 |
| 11.2.1. | Explosifs et trous de gros diamètres (>Ø12 mm)..... | 19 |

| | | |
|----------------------|--|-----------|
| 11.2.2. | Explosifs et trous de petit diamètre (microtirs et minitirs) | 19 |
| 11.2.3. | Les détonateurs isolés et les cartouches HILTI | 19 |
| 11.2.4. | Le cordeau détonant | 20 |
| 11.2.5. | Les explosifs standards pour les charges forées | 21 |
| 11.2.6. | Les explosifs pour les charges appliquées | 21 |
| 11.2.7. | Les charges de PETN | 21 |
| 11.2.8. | Les explosifs «prototypes » | 22 |
| 11.3. | Conclusion..... | 22 |
| 12. | Mesures..... | 22 |
| 12.1. | Introduction | 22 |
| 12.2. | Résultats | 23 |
| 12.3. | Analyse des résultats | 23 |
| 12.4. | Conclusion..... | 24 |
| 13. | Conclusion..... | 24 |
| 14. | Lexique..... | 25 |
| 15. | Bibliographie | 25 |
| 16. | Remerciements..... | 25 |
| 17. | Contacts..... | 26 |
| ATTENTION !!! | | 26 |

2. Introduction

L'utilisation d'explosif provoque des effets sur l'environnement. L'un d'entre eux, le plus problématique en spéléologie, est les gaz toxiques. En situation confinée qui est celle souvent rencontrée en cavité, cet effet se transforme en un piège mortel.

Les explosifs sont constitués, pour la quasi-totalité d'azote N, de carbone C et d'oxygène O.

Après explosion, ces atomes vont se combiner pour former notamment les gaz suivants :

- NO, N₂O et NO₂. Ce sont les gaz nitreux.
- CO Monoxyde de carbone.
- CO₂ Dioxyde de carbone.

Tous les explosifs ne dégagent pas les mêmes concentrations d'explosifs (Tab 2a). C'est pourquoi, il est préférable de choisir un explosif ne dégageant que peu de gaz toxiques.

| GAZ↔ EXPLOSIFS↔ | Oxyde de carbone (CO) | Vapeurs nitreuses (NOx) | Gaz carbonique (CO2) |
|--------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Titadyne | Important | Important | Important |
| Sigmagel | Important | Important | Faible |
| Gomme A | Moyen | Moyen | Important |
| Titagel | Moyen | Important | Faible |
| Cordeau détonant | Important | Faible | Moyen |
| Renforteur | Moyen | Nul (à confirmer) | Faible |

Tab 2a : Production de gaz pour différents types d'explosifs [SSF]. Les concentrations de gaz émises lors de l'explosion sont fortement dépendantes du type d'explosif. De ce type, le choix d'un explosif adapté permet de réduire le risque d'intoxication [SSF].

Il a été mesuré [ROC] et [GUI], après un tir de 110cm de cordeau 12 g/m, les concentrations de gaz toxiques suivantes :

- CO 100 ppm
- Vapeurs nitreuses 0.5 ppm
- CO₂ 2000 ppm

Dans le cas particulier des minages en spéléologie (milieu confiné et petites charges) et en utilisant un explosif adapté, le risque majeur provient principalement du monoxyde de carbone [SSF2].

2.1. NO_x - Les gaz nitreux

Les gaz nitreux sont eux aussi des gaz dangereux émis lors des explosions de substances nitrées. Les gaz nitreux correspondent au N₂O, NO et NO₂ ; les deux derniers étant les plus dangereux. L'utilisation d'un explosif adapté permet de réduire considérablement la quantité de gaz émis. Le Tab 2b présentent les symptômes d'intoxication en fonction de la concentration du gaz et de la durée de l'exposition. A partir de 10 ppm, les symptômes deviennent perceptibles. Ce gaz est même perceptible avec une concentration de 0.5 ppm. Toutefois, l'atmosphère peut-être mortelle sans une gêne importante.

| PPM NOx | Durée d'exposition | Symptômes et risques |
|-----------|--------------------|--|
| 0,1 | 8 h | Seuil de l'odorat |
| 0,5 | | Odeur caractéristique |
| 5 | 2 h | Concentration max. admise dans l'industrie |
| 10 à 40 | | Faible irritation |
| 80 | 3 à 5 Min. | Oppression au niveau du thorax |
| 90 | 30 min. | œdème pulmonaire aigu |
| 100 - 200 | 30 - 60 min. | Très dangereux |
| 250 | qqs. min. | Mort |

Tab 2b : Symptômes liés à l'exposition aux vapeurs nitreuses [SSF]. Des irritations apparaissent déjà à partir de seulement 10 ppm .

Les gaz nitreux provoquent une forte irritation des muqueuses qui peut entraîner un œdème pulmonaire aigu et un décès dans les 24/48 heures (Tab 2c). Il faut noter que les symptômes disparaissent après l'exposition, durant un temps de latence de 2 à 26 heures avant l'apparition des complications (œdème pulmonaire).

- Irritation oculo-pharyngée et respiratoire (toux) cédant à l'arrêt de l'exposition, puis apparition d'un œdème pulmonaire aigu après 2 à 36 heures.
- Baisse de la pression artérielle rapide avec asphyxie et décès.
- Cyanose, nausées, vomissement, perte de connaissance.

Tab 2c : Signes d'intoxication au monoxyde de carbone [SSF]. Une irritation des yeux et respiratoire signale un début d'intoxication aux vapeurs nitreuses.

La norme pour la spéléologie peut être fixée à 10 ppm selon la SSF. Cette norme n'est plus valable en cas de fortes concentration de CO₂ (>5000 ppm), car le CO₂ augmentera la ventilation du sujet et donc l'effet du toxique dans les mêmes proportions.

2.2. CO - Le monoxyde de carbone

Le CO se fixe sur l'hémoglobine à la place de l'oxygène pour former la carboxyhémoglobine. Cela empêche le transport de l'oxygène provoquant ainsi l'asphyxie.

| ppm CO | Durée d'exposition | Symptômes et risques |
|--------|--------------------|--|
| 50 | 8 h | Néant |
| 100 | | Sans danger occasionnellement |
| 200 | 2 h | nausées, céphalées, vertiges, intoxication. respiratoire |
| 1000 | | Intoxications graves |
| 2000 | 4 à 5 h | Mort |
| 4000 | 1 h | Mort |
| 5000 | 20 min. | Mort |
| 10000 | 1 min. | Mort |

Tab 2d : Symptômes liés à l'exposition au monoxyde de carbone [SSF].

Comme une exposition de 8 heures à 100 ppm est sans danger pour une personne jeune et en bonne santé si elle n'est qu'occasionnelle.

La mesure du degré d'intoxication se fait en mesurant la concentration de carboxyhémoglobine dans le sang. Le degré d'intoxication peut être séparé en différents stades en fonction de la gravité de l'intoxication (Tab 2e).

Le dosage sanguin de carboxyhémoglobine est utilisé pour établir le diagnostic. Voir ci dessous le % pour chaque stade (en italique)

- ↳ 1^{er} stade - (*inférieur à 10 %*) : Très peu de symptômes.
- ↳ 2^{ème} stade - (*10 %*) : Dyspnée.
- ↳ 3^{ème} stade (*+ de 20 %*) : Dyspnée plus marquée, céphalées, trouble de la conduction nerveuse, vertiges, nausées, vomissements, fatigue.
- ↳ 4^{ème} stade (*+ de 30 %*) : Obnubilation ou au contraire agitation, tremblements, propos incohérents, troubles visuels.
- ↳ 5^{ème} stade (*de 40 à 50 %*) : Aggravations des mêmes troubles, agitation, nausées et vomissements, perte de connaissance au moindre effort.
- ↳ 6^{ème} stade (*+ de 60 %*) : Perte de connaissance, coma, mort.

Tab 2e : Signes d'intoxication au CO. Ils sont séparé en plusieurs stades en fonction de la gravité de l'intoxication [SSF].

La clinique de l'intoxication est banale et trompeuse. Les symptômes principaux sont les suivants (dans l'ordre croissant de gravité) :

- **Céphalées** (maux de tête frontaux), **vertiges**, **grande fatigue**, asthénie, angoisse, palpitations, troubles visuels
- Douleurs abdominales, **nausées**, **vomissements** (sans diarrhées)
- Malaises, **perte de connaissance**, ébriété, impotence musculaire (la personne n'est plus capable de réagir correctement)
- **Coma**, **mort**

Si plusieurs personnes montrent ces symptômes, il faut systématiquement penser à une intoxication à l'oxyde de carbone ! Il faut alors en premier lieu procéder à l'évacuation de la (les) victime(s) hors de l'atmosphère toxique.

2.3. CO₂ - Le dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est présent dans l'air à l'état naturel avec une concentration comprise entre 300 et 600 ppm. Ce gaz, avec une densité de 1.52, est plus lourd que l'air. De ce fait, il a tendance à stagner au sol. Comme vous pouvez le constater dans le tableau 2.3a, les concentrations dangereuses de CO₂ sont très élevées et sont rarement atteintes lors d'utilisation de petites charges explosives. Cependant, ce gaz peut déjà exister à l'état naturel dans des concentrations provoquant des effets physiologiques. La norme pour la spéléologie est fixée par la SSF à 40'000 ppm pour une exposition d'une heure et à 50'000 ppm pour ¼ d'heure [SSF].

- ↳ 0,5 % (5000 ppm) Faible hyperventilation.
- ↳ 2% (20000 ppm) Augmentation de 50 % de la ventilation (amplitude respiratoire) : A cette teneur, le CO₂ est un stimulant respiratoire provoquant une hyperpnée efficace
- ↳ 3 % (30000 ppm) Augmentation de 100 % de la ventilation (amplitude respiratoire) : Devient un dépressur respiratoire et narcotique.
- ↳ 5 % (50000 ppm) Augmentation de 300 % de la ventilation (amplitude respiratoire et fréquence) : Dyspnée, céphalées, respiration pénible.
- ↳ 8 % (80 000 ppm) : Malaise, céphalées, sensations vertigineuses, perte de connaissance.
- ↳ 10 % (100000 ppm) Picotements du nez, de la gorge, Céphalée pénible, Bourdonnements d'oreilles, Sommeil, Ralentissement du pouls
- ↳ Au-dessus de 10 % : Intoxication massive avec perte de connaissance qui peut être suraiguë en quelques secondes → → Mort brutale si elle survient en atmosphère viciée et confinée (cuve à vin, chantier de désobstruction),

Tab 2f : Signes d'intoxication au dioxyde de carbone [SSF]. Comme vous pouvez le constater, les concentrations dangereuses sont bien supérieures aux valeurs des autres gaz produits lors d'une explosion.

Sa toxicité est nettement plus faible que celle des autres gaz. Cependant, en augmentant l'amplitude respiratoire (Tab 2f), il augmente la toxicité des autres gaz, rendant caducs les valeurs limites des autres gaz. Ceci doit absolument être pris en compte à partir de 3000 ppm de CO₂.

3. CO - Le monoxyde de carbone en détail

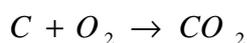
Le monoxyde de carbone (CO) est le gaz toxique le plus fréquemment rencontré lors d'empoisonnements. Il a comme caractéristique particulièrement sournoise de n'être pas décelable par nos sens ; c'est un poison invisible ! Le CO est issu de toutes les combustions et notamment des installations de chauffage non électrique et des moteurs à combustion. C'est pour cela qu'il est la cause de centaines d'accidents chaque année et plus particulièrement pendant l'hiver [Lech p.17]. Le CO est aussi la cause majeure de la toxicité des fumées d'incendies.

Les activités professionnelles peuvent mettre en présence des personnes avec le CO. C'est pour cela que des normes concernant le monoxyde de carbone et les activités professionnelles ont été établies. Elles serviront de référence pour le minage en spéléologie. Mais les personnes les plus exposées sont ... les fumeurs. En effet, la concentration moyenne de CO qui rentre dans les poumons est de 400 ppm [Patty]!

Chaque personne travaillant en présence de CO devrait au moins connaître la toxicité de ce gaz, ces caractéristiques physiques, comment mesurer et diminuer sa concentration, les symptômes d'intoxication et les gestes qui sauvent.

Mais d'où provient donc le monoxyde de carbone ?

Lors d'une combustion, le carbone C réagit avec l'oxygène O₂ pour former le dioxyde de carbone CO₂, gaz peu toxique.

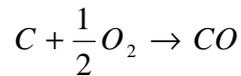


Cette réaction a lieu lors des combustions oxydantes où il y a un excès d'oxygène (bilan d'oxygène positif pour les explosifs).

Lorsqu'il y a un manque d'oxygène ou une combustion incomplète (flamme instable ou touchant un corps froid), le carbone ne réagit pas complètement avec l'oxygène ; il se forme



alors du CO et des imbrûlés (noir de fumée décelable à la couleur de la fumée). On parle de combustion réductrice (bilan d'oxygène négatif pour les explosifs) [Lech p.11].



Le monoxyde de carbone est donc produit lors de la combustion incomplète des substances carbonées. L'atome de carbone se trouve dans: les matières plastiques, le papier, l'huile, l'essence, l'acétylène, la quasi totalité des explosifs, ...

Pour les explosifs, le carbone et l'oxygène se trouve déjà dans l'explosif. De ce fait, il est possible de savoir qu'elle est le type de "combustion" en utilisant le bilan d'oxygène propre à l'explosif; l'oxygène de l'air n'étant pas pris en compte. Un explosif ayant un bilan d'oxygène négatif (Plastex, TNT, PETN) produira beaucoup de CO. Un explosif ayant un bilan positif (presque toutes les cartouches de minages: Gotthardite, Telsit, ...) produira peu de CO.

Le carbone se trouve dans:

- L'explosif : PETN, nitroglycérine, combustible de l'ANFO, TNT, charbon de la poudre noire, ...
- Le conditionnement de l'explosif : le matériau servant au conditionnement de l'explosif brûle lors de l'explosion. C'est pour cela que le cordeau détonant produit beaucoup de CO, car la masse de la gaine est importante par rapport à celle de l'explosif (~35%).
- Les matériaux de bourrage : les matériaux de bourrage peuvent aussi brûler lors de l'explosion. L'exemple le plus frappant est le papier mouillé qui peut découpler la production de CO [CLQ p.25] [LAFARG]!

Un explosif ayant un bilan positif mais étant en présence d'un bourrage ou d'un conditionnement combustible peut avoir pour l'ensemble un bilan négatif et donc produire beaucoup de CO !

Comme mentionné précédemment, l'explosion de substances explosives dégage du CO (et plusieurs gaz toxiques dont les vapeurs nitreuses qui sont aussi mortelles). Lors de minages à l'air libre, le CO se dilue rapidement dans l'atmosphère. En effet les propriétés physiques de ce gaz font qu'il diffuse très vite (cependant, la diffusion dans une grotte est assez longue) et il ne s'accumule pas dans les trous ou les plafonds contrairement au gaz nitreux ou au CO₂. Les problèmes liés au CO apparaissent lorsque les gaz ne peuvent plus se diluer. Il s'agit d'endroits fermés tels que les tranchées profondes, les puits et à fortiori les grottes et gouffres. Dans ce cas le gaz se retrouve confiné dans un espace restreint, ce qui empêche la décroissance de sa concentration par dilution. Seule une ventilation permet de diminuer rapidement la concentration de gaz. Or lors de minage en spéléologie il y a souvent un manque voire une absence complète de courant d'air et dans de nombreux cas les volumes d'air se trouvant dans la cavité sont très faibles. De ce fait, les gaz toxiques de l'explosion et tout particulièrement le CO ne sont pas évacués ou dilués. Il se peut que des concentrations mortelles de CO persistent plusieurs jours après une explosion. Ne pas tenir compte des dégagements de CO lors de minage en milieux confinés est donc criminel !

Afin d'utiliser les données correspondant au CO, une introduction au minage en spéléologie est donnée. Elle comprend principalement le forage, les types d'explosifs ainsi que leurs utilisations, et les microtirs.

L'objectif de ce rapport est donc de mettre clairement en évidence les risques liés au CO et de présenter les bases des techniques de minage en spéléologie en les mettant en relation avec le CO. L'approche de ces problèmes est effectuée de manière scientifique, soit en utilisant des sources sûres et en faisant des essais pratiques. De ce fait, nous avons obtenu des résultats intéressants et de prime abord surprenants.

En suivant les recommandations se trouvant dans les chapitres suivants, il est possible de travailler de manière efficace et sûr en présence de CO. Afin de pouvoir évaluer correctement les risques d'une exposition au CO, les normes américaines et suisses ainsi que des valeurs indicatives sont données dans ce document.

4. Caractéristiques Physiques et Chimiques

Inodore, incolore, sans saveur (indécelable par nos sens)

Toxique par inhalation (forme gazeuse)

Densité relative à l'air : 0,97 ⇒ envahit tout l'espace, ne s'accumule pas dans les creux et les plafonds

Diffusion : assez rapide (petite molécule) ⇒ envahit progressivement tout l'espace

Conversion : 1 ppm = 1.25 mg/m³ à 0°C 1 atm

1 ppm = 1.145 mg/m³ à 25°C 1 atm

Limite d'explosion : 12,5-74%

Solubilité dans l'eau : 2 g/100 ml

Sa facilité à diffuser et sa densité égale à celle de l'air font qu'il se dilue peu à peu dans tous les volumes disponibles. Cependant, la diffusion est tout de même assez lente. Il a été montré que le brassage de l'air provoqué par un spéléologue augmente considérablement la vitesse de dilution du CO [Sans]. Sa densité fait qu'il ne s'accumule pas dans les creux et les plafonds. En contre-partie des intoxications à distances sont possibles, car le gaz se déplace facilement avec les courants d'airs.

Le monoxyde de carbone est stable et chimiquement inerte en conditions normales (25°C et 1 atm). Il devient réactif à plus haute température ou en présence d'un catalyseur [Nas p.10].

5. Intoxication au CO

L'empoisonnement au CO gazeux a lieu par absorption par voies respiratoires. Après inhalation, le CO se fixe à 85% sur l'hémoglobine pour laquelle l'affinité est 230 fois supérieures à celle de l'oxygène et forme de la carboxyhémoglobine (COHb). Le dosage du COHb permet de connaître la gravité de l'empoisonnement. Les effets physiologiques du CO ne se limitent pas à la formation de COHb : ils sont nombreux [Hirsch p.111] et sont causés par l'interruption du métabolisme énergétique.

Le dosage sanguin de carboxyhémoglobine est utilisé pour établir le diagnostique. Voir ci dessous le % pour chaque stade (en italique)

- ↳ 1^{er} stade - (*inférieur à 10 %*) : Très peu de symptômes.
- ↳ 2^{eme} stade - (*10 %*) : Dyspnée.
- ↳ 3^{eme} stade (*+ de 20 %*) : Dyspnée plus marquée, céphalées, trouble de la conduction nerveuse, vertiges, nausées, vomissements, fatigue.
- ↳ 4^{eme} stade (*+ de 30 %*) : Obnubilation ou au contraire agitation, tremblements, propos incohérents, troubles visuels.
- ↳ 5^{eme} stade (*de 40 à 50 %*) : Aggravations des mêmes troubles, agitation, nausées et vomissements, perte de connaissance au moindre effort.
- ↳ 6^{eme} stade (*+ de 60 %*) : Perte de connaissance, coma, mort.

Tab 5a : Stades d'intoxication au CO [SSF]. Le dosage de la COHb permet d'évaluer la gravité de l'intoxication.

Il existe deux types d'intoxications au CO :



- Intoxication provoquée par une **exposition répétée** : il s'agit de multiples expositions à de relativement faibles concentrations de toxique. Les effets ne sont pas immédiats, mais sont causés par l'accumulation des expositions.
- Intoxication provoquée par une **exposition aiguë** : il s'agit d'une exposition courte à une relativement haute concentration de toxique ; les effets sont immédiats. Cette exposition peut être rapidement fatale sans produire de symptômes d'alarmes significatifs !

Pour le mineur spéléologue ces deux intoxications doivent être prises en compte : soit l'intoxication aiguë provoquée lors de chaque minage et l'exposition chronique provoquée par toute la durée du minage.

La clinique de l'intoxication est banale et trompeuse. Les symptômes sont les suivants (dans l'ordre croissant de gravité) :

- **Céphalées** (maux de tête frontaux), **vertiges**, **grande fatigue**, asthénie, angoisse, palpitations, troubles visuels
- Douleurs abdominales, **nausées**, **vomissements** (sans diarrhées)
- Malaises, **perte de connaissance**, **vertiges**, ébriété, impotence musculaire (la personne n'est plus capable de réagir correctement)
- **Coma**, **mort**

Si plusieurs personnes montrent ces symptômes, il faut systématiquement penser à une intoxication à l'oxyde de carbone ! Il faut alors en premier lieu procéder à l'évacuation de la (les) victime(s) hors de l'atmosphère toxique.

Lors d'intoxication, les effets du CO peuvent être suffisants pour empêcher de réagir correctement ; les performances physiques et intellectuelles étant fortement diminuées [Hirsch p.78] (similaire à l'ivresse)! C'est pour cela que les premiers symptômes (céphalées) doivent immédiatement être traités avec sérieux, l'aggravation de la situation pouvant rapidement conduire à une issue dramatique !

L'intoxication augmente en fonction de :

- La concentration de CO.

- La durée d'exposition (Fig 5a).
- La ventilation du sujet (fréquence et volume de la respiration).
- La sensibilité du sujet (Les personnes ayant des problèmes cardio-vasculaires sont très sensibles au CO).

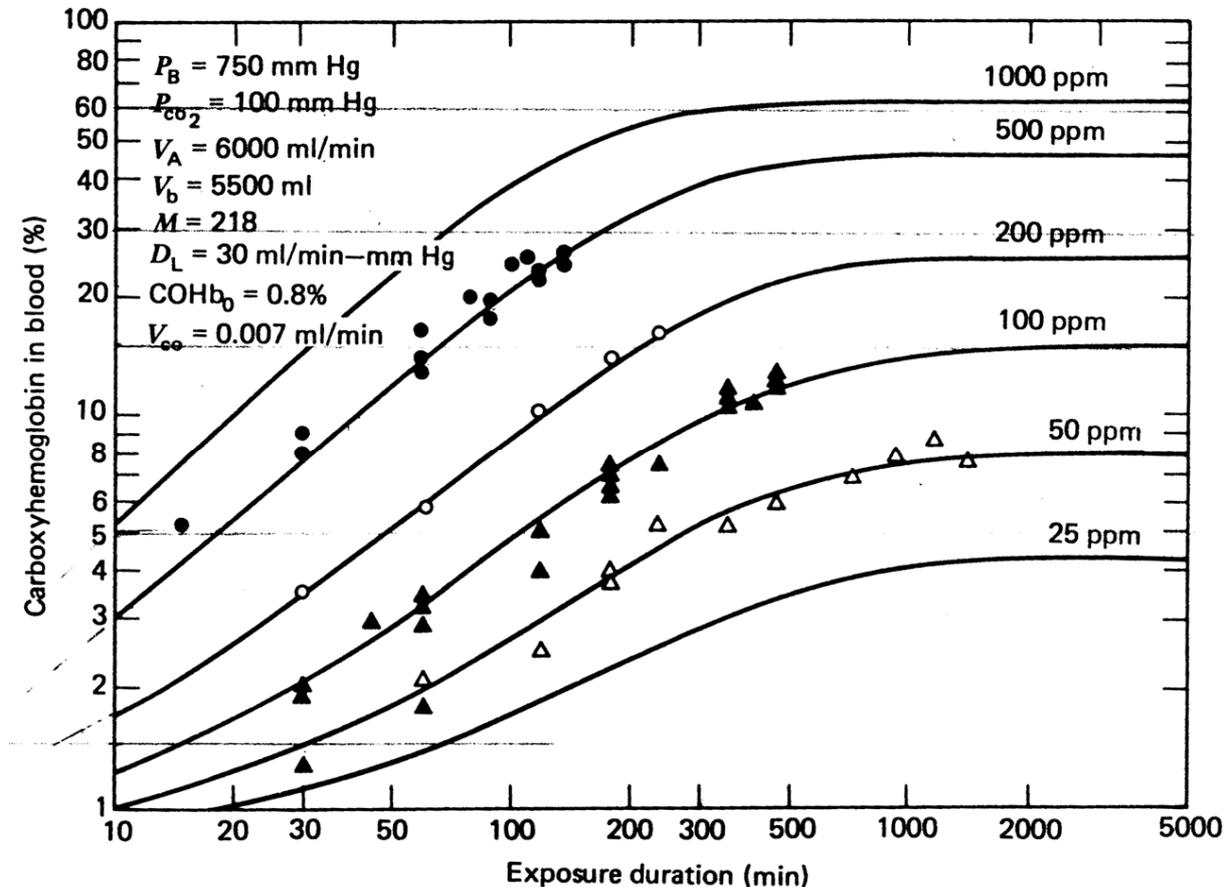


Fig 5a : Intoxication au CO en fonction de la durée de l'exposition.

Une fois le sujet dans une atmosphère non contaminée, le CO se trouvant dans le sang va peu à peu se résorber par les voies respiratoires. Il est du reste possible de connaître le degré d'intoxication en mesurant la concentration de CO dans l'air expiré, de la même manière que cela est fait pour mesurer le taux d'alcoolémie [Patty p.4118]. La vitesse de résorption est déterminée par la demi vie du CO, soit le temps qu'il faut pour que la moitié du CO se trouvant dans le sang soit évacué par les voies respiratoires. La liaison HbCO est réversible avec une $\frac{1}{2}$ vie de :

- 5 heures en air ambiant.
- 90 minutes en atmosphère d'oxygène pur normobar.
- 20 minutes en atmosphère d'oxygène hyperbare à 3 ATA (OHB).

Cette demi-vie est directement liée à la ventilation du sujet. Un effort physique intense peu divisé par quatre ces valeurs [Hirsch p.65].

Par exemple, suite à une exposition au CO, l'organisme libère peu à peu le CO se trouvant dans le sang ; au bout de 10 heures à l'air ambiant, il n'y a plus que $\frac{1}{4}$ de la dose initiale. L'oxygène (oxygénothérapie) est le véritable antidote à l'intoxication car elle permet une libération très rapide du CO ; après 3 heures à l'oxygène pur, il restera $\frac{1}{4}$ de la dose initiale.

L'empoisonnement est donc réversible s'il est détecté à temps, mais des empoisonnements importants peuvent provoquer des dommages irréversibles aux organes du corps qui nécessite beaucoup d'oxygène comme le cœur et le cerveau. Il y a normalement des séquelles neurologiques seulement pour des empoisonnements qui causent un coma [Patty p.4124].

Il faut aussi savoir que des expositions à de très fortes concentrations (50 000 ppm) peut être fatal avant que le taux de COHb dans le sang ne soit élevé.

Pour résumer :

Le CO est un gaz qui ne peut pas être décelé par nos sens ; il est inodore, incolore et sans saveur.

Les symptômes d'intoxication à connaître sont :

- Céphalées (maux de tête frontaux).
- Grande fatigue.
- Nausées.
- Vertiges.
- Perte de connaissance.
- Vomissements (Intoxication grave !).

L'intoxication est d'autant plus importante que :

- La concentration de CO est élevée.
- La durée d'exposition est grande.

L'intoxication au CO est réversible si l'intoxication n'est pas importante.



6. Détection du CO

Comme mentionné précédemment, notre organisme n'est pas capable de détecter le monoxyde de carbone. Des instruments de mesure doivent donc être utilisés pour détecter sa présence. Trois méthodes sont applicables pour la détection du CO de manière autonome:



- Tubes réactifs.
- Capteurs électroniques.
- Badges sensibles.

Les tubes réactifs sont des tubes réactifs qui, utilisés avec une pompe, permettent la mesure de la concentration du CO ; une pompe à soufflet aspire un volume de gaz qui passe à l'intérieur d'une ampoule contenant un réactif qui change de couleur en présence du gaz cherché. La lecture se fait directement par une graduation sur le tube, chaque mesure du niveau de CO nécessitant un nouveau tube. Pour la mesure avec des tubes réactifs, Les tubes réactifs ne permettent qu'une mesure ponctuelle et ne permettent pas le suivi de la concentration de CO [CLQ p.18]; la mesure n'est pas instantanée et permanente et leur utilisation est assez onéreuse. De nombreux fabricants proposent des tubes réactifs (Dräger, ...).

Les instruments de mesure électronique permettent l'affichage en continu de la concentration instantanée du CO. Certains appareils permettent de calculer les valeurs correspondant aux normes (VME et VLE). Par exemple le Dräger Pac III, robuste et étanche est bien adaptés à la spéléologie. Il faut compter environ 1000 francs suisses pour un de ces appareils, environ 150.- pour une calibration et environ 300 francs pour un capteur (durée de vie d'environ 3 ans). Nous en effectuons la calibration chaque année. Il faut savoir que son capteur de CO, comme la majorité des capteurs électrochimiques, est sensible à l'acétylène. Ce problème peut être résolu grâce à un filtre. A noter un nouveau détecteur utilisant un capteur semi-conducteur au sélénium : le CO Mètre PRO. Les caractéristiques sont les suivantes :

- sans calibration (contrairement aux capteurs électrochimiques) ;
- compact (60x85x29 mm) ;
- alarme visuelle et sonore à 3 niveaux : 50, 100 et 150 ppm ;
- mesure jusqu'à 999 ppm ;
- bon marché (FS 149.- chez www.speleomat.com), prix inférieur à l'entretien annuel d'un Dräger Pac III (!) ;
- Peu sensible à l'acétylène ;
- précision médiocre (mais suffisante !) ;
- non étanche.

La mesure par des badges sensibles est basée sur une réaction colorimétrie avec le CO. Ils permettent directement de mesurer les expositions TWA et à court terme. Ils sont peu onéreux (<15 Frs pièces); chaque personne se trouvant dans une atmosphère potentiellement dangereuse peut en porter un. Ils ne permettent pas la mesure instantanée de la concentration de CO, mais ils mesurent une dose en ppm*temps. Ces badges sont par exemple fabriqués par « K&M Environmental » et « American gas & chemical co. Ltd. ». Certains badges sont sensibles à l'acétylène.

D'un point de vue pratique, les instruments de mesure électronique, avec leur affichage en continu, sont à privilégier vu la nature des travaux de minage souterrains. Des mesures instantanées et répétitives sont en effet nécessaire pour suivre l'apparition et l'évolution de la concentration en gaz lors de chaque tir.

7. Premiers secours

Les mesures de premier secours doivent être connues par toutes les personnes faisant du minage en spéléologie.

Le premier point est qu'il faut vérifier la concentration de CO voir des gaz nitreux avant d'intervenir sur les lieux d'un empoisonnement lié à l'utilisation d'explosifs ; des concentration de gaz toxiques se trouvant peut-être encore dans la cavité!

Puis, il faut sortir la personne intoxiquée de la zone contaminée. Si elle arrête de respirer, il faut effectuer la respiration artificielle. La personne doit rester au repos et au chaud afin d'éviter l'hypothermie. Il faut aussi faciliter la respiration. Il faut appeler au plus vite les secours médicalisés, afin d'effectuer une oxygénothérapie.



8. CO et minage

8.1. Minage à l'air libre

Lors de minages à l'air libre, le monoxyde de carbone est très vite dilué. Le risque d'intoxication oxycarbonée est quasi nul en raison des propriétés de la molécule de CO. Elle a la même densité que l'air. De ce fait elle ne s'accumule pas dans les creux ou les plafonds, contrairement aux gaz nitreux et au CO₂ (c'est du reste cette particularité du CO₂ qui cause de nombreux accidents). Comme le CO est une petite molécule, elle diffuse très vite. Ce qui veut dire que le CO se dilue très rapidement dans l'air. Il ne se forme pas des zones où la concentration de CO est élevée.

Il est noté dans l'ordonnance sur les substances explosibles que [LOE p.14]: «On tiendra compte des gaz toxiques, notamment dans les locaux fermés, les galeries, les puits et les tranchées». Dans les cas cités, il ne s'agit plus de minage à l'air libre, mais de minages en milieu confiné.



8.2. Minage en milieu confiné

Dans des lieux confinés (principalement en souterrain), la dissolution du CO n'est pas possible, mis à part dans le volume restreint de la cavité. Comme la durée de vie d'une molécule de CO est grande, l'atmosphère est polluée jusqu'à ce que l'air vicié soit remplacé par de l'air frais. Dans le cas de la spéléologie, les volumes sont en général petits, ce qui n'entraîne qu'une faible dissolution. De plus aucun système de ventilation artificiel n'est utilisé, ce sont donc les courants d'air naturels qui permettent le rafraîchissement de l'air. C'est pour cela que les risques liés à l'utilisation d'explosif sous terre sont liés à la climatologie de la cavité. Il existe par exemple des cavités où il y a une absence quasi complète de courant d'air. Dans ce cas, les gaz de l'explosion peuvent persister pendant de longues périodes (plusieurs jours). Les concentrations de CO après un minage dépendent donc énormément de l'endroit où ils sont utilisés.

Prenons comme hypothèse que le minage est une source constante de CO dans un volume confiné V. En régime permanent, on trouve [Urban p.4116]:

$$C = \frac{K}{RV} \quad (1)$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} C : \text{Concentration de CO à l'équilibre [ppm]} \\ V : \text{Volume de dissolution [m}^3\text{]} \\ R : \text{Rafraîchissement d'air par heure [\%/heure]} \\ K : \text{Volume de CO libéré par heure [m}^3\text{/heure]} \end{array} \right.$$

Dans le cas d'un série de minage, on trouve (equ. 1) que la concentration de CO sera en négligeant le rafraîchissement de l'air:

$$C = N \frac{V_{CO}}{V} \quad (2)$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} C : \text{Concentration de CO [ppm]} \\ V : \text{Volume de dissolution [m}^3\text{]} \\ V_{CO} : \text{Volume de CO libéré par minage [m}^3\text{]} \\ N : \text{Nombre de minages} \end{array} \right.$$

La concentration de CO sera donc d'autant plus importante que le volume de dissolution est faible et que le renouvellement de l'air est faible. Bien évidemment plus la source est importante, plus la concentration dans le volume confiné est grande. Ces critères permettent de différencier les endroits confinés en fonction du volume de la cavité et du renouvellement de l'air. Dans les zones avec un faible renouvellement de l'air, il faut faire très attention à l'accumulation du CO provoqué par les tirs successifs, même si le volume de dissolution est important.

Dans les milieux confinés, il faut donc différencier :

- les cavités **ventilées**.
- les cavités **non ventilées**.



Dans les cavités **ventilées** (avec courant d'air), Le monoxyde de carbone est déplacé par le mouvement moyen de l'air dans la cavité. De ce fait, les gaz nocifs sont évacués naturellement, plus ou moins rapidement selon la puissance du courant. Une attente d'une durée suffisante suffit à garantir de faibles niveaux de CO ; les risques d'intoxication sont limités. Les propriétés du CO font que les gaz toxiques sont facilement déplacés. Attention, les intoxications peuvent avoir lieu à distance de l'endroit du minage. Dans les minutes qui suivent un minage, le CO est mélangé aux autres gaz et poussières de l'explosion. De ce fait il n'est pas difficile de repérer les zones intoxiquées. La dissipation de ces « marqueurs » permet de savoir lorsque les gaz ne sont plus à des concentrations dangereuses (seulement valable dans les premières minutes suivant l'explosion !).

Dans des cavités **non ventilées** (sans courant d'air), les gaz nocifs peuvent rester longtemps à des concentrations dépassant les normes d'exposition (seul la diffusion dans les galeries diminue la concentration des gaz) ; les phénomènes provoquant sa diminution étant très lents (plusieurs heures voire plusieurs jours de ½ vie). Si la cavité est de petit volume, l'effet de ce confinement est renforcé à cause de l'augmentation rapide des concentrations de CO. L'utilisation d'explosifs dans ce type de cavités nécessite la plus grande prudence ; la mesure de la concentration de CO est obligatoire, même longtemps après le minage (plusieurs heures, voir plusieurs jours). Il ne faut pas oublier que le CO ne peut pas être décelé par nos sens et qu'il peut y avoir des concentrations dangereuses de CO sans que les autres gaz et poussières de l'explosion ne provoque une gêne importante. Contrairement aux minutes suivant un minage, le CO n'est plus mélangé aux poussières et autres gaz de l'explosion ; les zones toxiques ne sont plus repérables sans matériel de mesure ! Il ne faut pas oublier de signaler à l'entrée de la grotte la présence de gaz dangereux (Tir de mines, attention gaz). Pour diminuer le confinement, il est possible d'utiliser un souffleur. Un souffleur ainsi qu'une gaine de polyéthylène est souvent une excellente solution. Elle est même parfois plus efficace qu'un gros ventilateur d'extraction de fumée placé à l'entrée d'une cavité, surtout pour une cavité colmatée [Sans].

Lors de minage en spéléologie, il faut tenir compte de la direction, de la vitesse ainsi que de la constance des courants d'air. En étudiant ces trois paramètres, il est possible de choisir l'endroit idéal pour se placer en attendant que la concentration de CO diminue; il faut notamment profiter des courants d'air favorables et faire attention aux inversions de courants.

Un autre point important est de tenir compte des volumes où la dissolution des gaz est possible. Prenons l'exemple d'un vaste puits suivi d'un méandre étroit qui doit être désobstrué. Après le minage, des concentrations importantes de CO se trouvent dans le méandre, tandis que dans le puits, les concentrations de CO sont nettement inférieures aux normes. Un passage étroit entre deux volumes important permet facilement de stopper les gaz. Des concentrations dangereuses se trouvant d'un côté du passage étroit, alors que de l'autre la concentration est nulle. Lors d'un de nos minages, nous avons des concentrations supérieures à 200 ppm d'un

côté d'une chatière alors que de l'autre côté, où les volumes étaient très grands, la concentration de CO était proche de zéro.

Pour résumer, lors de minage en milieu confiné, il faut profiter des volumes permettant la dissolution des gaz et des courants d'air favorables.

8.3. Réduction des expositions au CO

Tout doit être fait pour limiter l'exposition au CO (Toujours appliquer « ALARA » : As Low as Reasonably Achievable). En effet, moins on s'expose, moins les risques sont grands ! Voici différents principes permettant de réduire l'exposition lors de travaux de minages :

- Diminuer la quantité d'explosif par tirs de mines. Le dégagement de gaz est directement proportionnel à la quantité d'explosif. En divisant par deux la charge, le dégagement de CO est divisé par deux.
- Attendre que le CO se dilue dans l'atmosphère. Une méthode empirique consiste à attendre 1 minute par gramme d'explosif (inutilisable en réalité).
- S'éloigner de l'explosion afin d'augmenter le volume où peut se diluer le CO. Si le volume où peut se diluer le CO est doublé, la concentration est évidemment divisée par deux.
- Se placer intelligemment pour ne pas être dans les fumées de l'explosion. Pour la spéléologie il faut connaître la climatologie de la cavité (courant d'air constant, direction, ...).
- Choisir un explosif produisant moins de CO (et moins de gaz nitreux !).
- Utiliser une ventilation artificielle [CLQ] [Sans].
- Utiliser un système de protection respiratoire (l'utilisation de matériel de protection respiratoire nécessite une instruction et un entraînement que n'a pas le spéléologue). Il existe des filtres pour le CO permettant une protection limitée dans le temps (environ 20 minutes).



Mais d'une manière générale, ce qu'il faut retenir est « **toujours attendre que les gaz se diluent !** ». Plus vous attendrez avant de retourner sur les lieux du minage, moins la concentration de CO sera grande... « ALARA ! »

9. Normes pour l'exposition au CO

9.1. Normes suisses d'exposition au Monoxyde de Carbone

Les normes suisses pour l'exposition au travail sont basées sur les valeurs VME et VLE. Les données pour la Suisse sont fournies par la SUVA et proviennent des valeurs limites d'exposition aux postes de travail 2001 pour les deux premières.

9.1.1. VME – Valeur moyenne d'exposition

VME : 30 ppm

La valeur VME indique la concentration moyenne dans l'air des postes de travail en un polluant donné qui ne met pas en danger la santé de la très grande majorité des travailleurs sains qui y sont exposés, et ceci pour une durée de 42 heures hebdomadaires, à raison de 8 heures par jours, pendant de longues périodes. Cette valeur correspond souvent au premier niveau d'alarme des appareils de détection. La VME ne représente pas une limite entre une concentration inoffensive et une concentration dangereuse.



9.1.2. VLE - Valeur limite d'exposition

VLE : 60 ppm

La valeur VLE complète la norme VME. En effet, la VME définit une valeur moyenne sur 8 heures et les concentrations de polluant varient souvent de façon considérable au cours du temps. Pour certains polluants, les dépassements de la valeur moyenne doivent être limités afin d'éviter une atteinte à la santé. Il est précisé que la valeur peut être atteinte 4 fois par jours pendant une durée de 30 minutes. Cette valeur correspond souvent au deuxième niveau d'alarme des appareils de détection.



9.1.3. Alarmes dans les parkings

Parking : 100 ppm

Des détecteurs se trouvent parfois dans les parkings souterrains. Cette valeur correspond au seuil des détecteurs de CO.

9.2. Normes américaines d'exposition au Monoxyde de Carbone (OSHA)

L'OSHA (Occupational Safety and Health Administration) est l'organisme officiel américain concernant la santé et la sécurité du travailleur. Concernant les expositions aux gaz toxiques, différents types d'exposition sont définis pour chaque gaz. En effet, la concentration en toxique n'est pas le seul élément, il y a aussi la durée de l'exposition (par exemple l'exposition chronique sur de grandes durées et l'exposition « acute » à haute concentration sur de faibles durées). Les différentes valeurs sont réunies sous l'appellation de PEL (Permissible Exposure Limit).

Pour le CO, avec du matériel de mesure instantané, la norme est constituée de trois valeurs. Elles doivent toujours être les trois vérifiées.

9.2.1. TWA : Time Weighted Average

NIOSH TWA : 35 ppm

Il s'agit de la valeur pondérée moyenne mesurée sur 8 heures d'exposition (une journée de travail). Ce qui veut dire que la dose ($Dose = C \cdot t \cong \text{somme } (C \cdot T)$: somme des produit du temps et de la concentration) maximale ne doit pas dépasser $35 \cdot 8 = 280 \text{ ppm} \cdot \text{heures}$.



Exemples :

- Pierre est exposée à 100 ppm pendant 1 heure. Jérôme est exposé à 50 ppm pendant 3 heures. La dose reçue par Pierre est de $100 \cdot 1 = 100 \text{ ppm} \cdot \text{heures}$. La dose reçue par Jérôme est de $50 \cdot 3 = 150 \text{ ppm} \cdot \text{heures}$. Jérôme aura donc été plus exposé au CO que Pierre alors que la concentration du gaz chez Jérôme était plus faible !
- Une personne est exposée à 100 ppm pendant 2 heures. Elle reçoit donc une dose de $100 \cdot 2 = 200 \text{ ppm} \cdot \text{heures}$. L'exposition suivante correspond à 20 ppm pendant 4 heures. La dose totale est de $200 + 4 \cdot 20 = 280 \text{ ppm}$. La personne ne peut donc plus être exposée au CO pendant les heures suivantes, car elle a atteint la valeur TWA à cause de la cumulation des deux expositions.

9.2.2. Ceiling

NIOSH Ceiling : 200 ppm sur 5 minutes

Cette valeur correspond au plafond à ne pas dépasser. Dans le cas du CO, il faut le calculer sur la moyenne pondérée de 5 minutes d'exposition. Ce qui correspond à une dose de $1000 \text{ ppm} \cdot \text{minutes}$.

Exemple :

Une personne est exposée à 800 ppm pendant 1 minute. Elle reçoit donc une dose de $800 \text{ ppm} \cdot \text{minutes}$. Durant les 4 prochaines minutes elle ne devra pas être exposée à plus de $200 \text{ ppm} \cdot \text{minutes}$, soit une valeur de $200/4 = 50 \text{ ppm}$.



9.2.3. Instantaneous

Instantaneous : 1500 ppm

C'est la valeur instantanée maximale. Cette valeur ne doit en aucun cas être dépassée. Elle est prise par rapport à l'ancienne valeur IDLH (voir chap. 9.3.5) qui correspond à la concentration ou il est normalement possible de s'extraire de la zone intoxiquée sans aide extérieur. Cette valeur n'est évidemment pas adaptée aux conditions de la spéléologie ou l'extraction de la zone dangereuse peut-être longue et difficile. Pour respecter la norme « Ceiling », l'exposition instantanée à 1500 ppm doit être inférieure à 40 secondes ! Il faut savoir qu'à partir de 200 ppm, le CO peut provoquer des intoxications graves. Cette valeur ne peut être utilisée que dans des cas bien particuliers de mesure de la concentration de CO. Autrement, la valeur Ceiling doit être utilisée comme plafond à ne jamais dépasser.



9.3. Autres « normes »

9.3.1. Spéléo secours suisse

Les alarmes des détecteurs de CO du spéléo secours sont réglées sur :

Alarme 1 : 30 ppm

Alarme 2 : 150 ppm

Ne jamais dépasser **150ppm** !

9.3.2. Spéléo secours français

100 ppm

Il faut que la concentration de CO₂ soit inférieure à 3000 ppm pour appliquer cette norme.

9.3.3. AL : Action Level

AL : 15 ppm (Typiquement ½ TWA)

Il s'agit de la valeur limite à partir de laquelle la mesure de la concentration de CO n'est plus nécessaire si les conditions ne changent pas. En général la valeur de ½ TWA est prise comme référence.

9.3.4. EEGL : Emergency Exposure Guidance Levels

10-minutes EEGL : **1500 ppm**

30-minutes EEGL : **800 ppm**

60-minutes EEGL : **400 ppm**

24-heures EEGL : **50 ppm**

Ces normes sont définies pour des expositions durant des conditions spéciales (incendies, contamination, accident, ...). Ces expositions ne sont pas inoffensives mais tolérables et les effets temporaires sont tolérés pour des personnes jeunes et en bonne santé. L'utilisation de ces normes requiert la plus grande prudence et beaucoup d'expérience !

9.3.5. IDLH: Immediately dangerous to life or health concentration value

IDLH : 1200 ppm (anciennement 1500 ppm)

Cette valeur permet à une personne de ne pas avoir de lésion ou d'effets irréversibles sur la santé en cas de panne du système de protection respiratoire; pour des concentrations supérieures, seul un appareil hautement fiable peut-être utilisé. En cas d'exposition à cette concentration, tous les efforts doivent être faits pour sortir de la zone contaminée immédiatement. En dessous de la concentration IDLH, il est normalement possible de s'extraire de la zone intoxiquée sans aide extérieur.

Cette valeur est basée sur les effets que peut provoquer une exposition au CO de 30 minutes.

1/10 IDLH est une bonne indication pour une exposition de 30 minutes (CO : **120 ppm**).

9.4. Conclusion

Lors de minages sans urgences, les normes d'exposition devraient être utilisées et évidemment les concentrations de gaz toxiques mesurées. Pour la Suisse, il s'agit des normes VME et VLE de respectivement :

- 30 ppm, 42 heures hebdomadaires et 8 heures par jours.
- 60 ppm, 4 fois par jours pendant une durée de 30 minutes.

Cependant, ces normes sont trop contraignante dans le cas particulier du spéléo-minage, car elles ne correspondent pas au type « occasionnel » de ces expositions au CO. C'est pourquoi la norme du SSF est fixée à 100 ppm, car une exposition de 8 heures à cette valeur est sans danger si elle n'est qu'occasionnelle. Il faut toutefois se rappeler que des concentrations élevées de CO₂



augmente l'amplitude respiratoire et augmente dans la toxicité des autres gaz. Cela doit être pris en compte lorsque la concentration de CO₂ dépasse 3000 ppm.

La valeur IDLH (immédiatement dangereuse pour la vie et la santé) de 1200 ppm n'est pas adaptée au spéléo-minage, car il est évident qu'en spéléologie le temps nécessaire pour sortir de la zone dangereuse peut-être nettement plus long, et de ce fait cette valeur n'est pas adaptée.

En prenant les normes OSHA comme référence, il ne faut pas s'exposer à une concentration supérieure à 200 ppm (ceiling) ; comme cela il sera toujours possible de quitter la zone à risques sans prendre de risques. Il ne faut aussi jamais pénétrer dans un endroit où la concentration de CO dépasse cette valeur de 200 ppm.

Si le matériel de mesure n'est pas utilisé, Il faut rester en permanence au-dessous de la valeur AL de 15 ppm. En cas de doute, mieux vaut ne pas prendre de risques inutiles. Il y a des erreurs qui ne s'oublie pas et la première ne va pas disparaître ; continuez à rêver...

Les normes EEGL sont données à titre indicatif.

10. Valeurs indicatives

Ces valeurs permettent d'avoir une idée de l'effet des expositions au CO. Elles doivent être considérées avec la plus grande prudence. En effet, l'effet du CO sur l'organisme dépend de très nombreux paramètres, comme l'effort physique (ventilation du sujet) qui peut multiplier par 3 voire 4 la vitesse d'intoxication ou comme la concentration de CO₂ qui modifie la ventilation! Les personnes ayant des problèmes cardio-vasculaires sont nettement plus sensibles au CO [Nas p.179]. L'altitude a aussi une grande influence [Hirsch p.94].

10.1. LCLo : Lethal concentration (Lowest Concentration causing death)

Il ne s'agit pas d'une norme, mais d'une indication concernant les potentialités d'accident mortel avec le CO.

5000 ppm durant **5 minutes**

4000 ppm durant **30 minutes**

10.2. Dosages atmosphériques :

10.2.1. Longue durée

Ces valeurs permettent d'évaluer les risques d'intoxications provoquées par un séjour prolongé dans une atmosphère contaminée. En effet, pour de longues expositions à des concentrations faibles de CO, la concentration de HbCO se stabilise et les symptômes ne varient que lentement. Au-dessus de 200 ppm la toxicité du CO devient importante.

| Concentration | Effet physiologique (personnes en bonne santé) |
|--------------------|---|
| 9 ppm | Qualité standard à l'intérieur (8 heures) |
| 35 ppm | Qualité standard à l'intérieur (1 heures) |
| <100 ppm | sans danger, céphalée |
| 200 ppm | Nausées, fatigue, jugement dérangé, possible dizziness, diminution de la vision |
| 500 ppm | vomissement, perte de connaissance brève |
| 1000 ppm | intoxication graves, coma, peut être fatal |
| 2000 ppm | mortel en quelques heures |
| 5000 ppm | mortel en 20 minutes |

10.2.2. Durée limitée

| Concentration/durée | Effet physiologique |
|--------------------------------|---|
| selon Caruschem | |
| 100 ppm/1 heure | pas d'effets sensibles |
| 500 ppm/1 heure | syndromes d'exposition |
| 1000 ppm/1 heure | dangereux |
| 2000 ppm/1 heure | Potentiellement fatal |
| 5000 ppm/1 heure | Instantanément fatal |
| Selon [Patty] : | |
| 1000 à 1200 ppm/1 heure | déplaisant, mais pas de symptômes dangereux |
| 1500 à 2000 ppm/1 heure | peut-être mortel |
| Autres sources | |

| | |
|------------------|---|
| 800 ppm | Vertiges, nausée et convulsions en 45 minutes, inconscience en 2 heures et mort en 2-3 heures |
| 1600 ppm | Mots de tête, vertiges et nausée en 20 minutes, mortel en 1 heure |
| 3200 ppm | Mots de tête, vertiges et nausée en 5-10 minutes, mortel en 30 minutes |
| 6400 ppm | Mots de tête, vertiges et nausée en 1-2 minutes, mortel en 10-15 minutes |
| 12800 ppm | Mortel en 1-3 minutes |

Ces données ne sont valables que si une période de temps suffisante avec l'exposition précédente permet l'élimination du CO. La $\frac{1}{2}$ vie du CO (chap. 5) dans le sang étant de 5 heures en air ambiant. Il faut donc attendre 10 heures pour diviser par quatre l'intoxication au CO.

11. Le minage en spéléologie

11.1. Technique

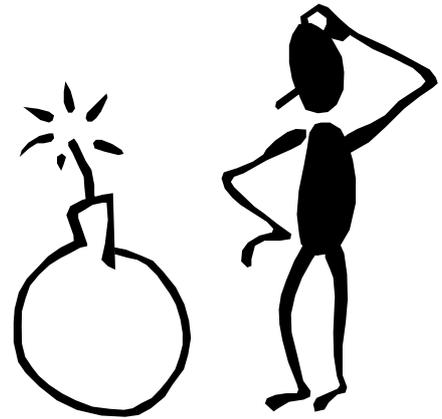
11.1.1. Généralités

Dans ce paragraphe, seuls les rudiments du minage en spéléologie seront abordés. Les travaux et les techniques de minage traditionnel ne sont pas traités.

Le minage utilise en général les charges suivantes :

- Charges forées.
- Charges appliquées.
- Charges perforantes (creuses).

La quasi-totalité des minages utilise des charges forées. Ayant un rendement extrêmement faible, les charges appliquées ne sont utiles qu'occasionnellement pour détruire un bloc isolé, sans devoir déployer du matériel de forage ou pour effectuer des tirs sous l'eau. Quant aux charges perforantes, difficiles à mettre en œuvre, elles ne sont utilisées que marginalement, ce qui est d'ailleurs « dommage » car elles peuvent se révéler très perfor(m)antes pour faire des forages dans des endroits inaccessibles.



11.1.2. Forage

En spéléologie, la problématique du minage pour des charges forées se résume principalement en un problème de forage ! En effet, les grosses machines de forages (pneumatique, essence, ...) ne sont que rarement adaptées à la spéléologie. La source d'énergie de l'engin de forage pour le mineur spéléologue est dans la majorité des cas soit un accumulateur soit une génératrice. Les appareils ont dans la majorité des cas une puissance inférieure à 750W (350 W pour la perceuse BOSCH GBH24 VRE et 600 W pour la perceuse 220 V HILTI TE15), ce qui limite le diamètre de forage et rend l'utilisation des cartouches de Ø25 mm difficile voire impossible. Cet état de fait a rendu nécessaire le développement de nouvelles techniques de minage propre à la spéléologie.

Lorsque des équipements thermiques sont utilisés, il ne faut pas oublier que ce sont des sources très importantes de CO. Les génératrices et les perceuses thermiques [CLQ p. 51] doivent être utilisés avec la plus grande prudence en souterrain.



Les forages de gros diamètres (>Ø12 mm) nécessitent du matériel lourd. En spéléologie leur utilisation est à réserver pour la réalisation de longues désobstructions de grosses sections. Ces forages sont très difficilement réalisables avec des perceuses à accumulateurs. Les perceuses électriques pour réaliser des forages de Ø32 mm doivent de préférence avoir une puissance supérieure à 750W [SSF2 p. 50].

Pour le perçage avec des accumulateurs, il faut minimiser la quantité d'énergie électrique nécessaire par minage afin de réaliser le plus de trous en un minimum de temps. Pour le perçage avec une génératrice, ce paramètre est moins important. Seul l'augmentation du temps de forage est à relever. La mise en œuvre du perçage avec une génératrice est évidemment plus longue et plus difficile en contre partie la puissance et l'énergie disponible sont plus élevées.

Les mèches existantes fixent aussi des limites pour les forages de petits diamètres ; on trouve facilement sur le marché les longueurs maximales suivantes :

- Ø6 *150 mm prix indicatif : <10 Frs
- Ø8 *540 mm prix indicatif : 50 Frs
- Ø10 *750 mm prix indicatif : 130 Frs
- Ø12 *950 mm prix indicatif : 110 Frs

En première approximation, le volume de matière à extraire du trou est proportionnel à l'énergie et donc au temps de forage. L'énergie nécessaire est donc proportionnelle au carré du diamètre de forage. En prenant le diamètre 8 comme référence, on trouve :

- Ø6 -44% de l'énergie pour forer un trou de Ø8
- Ø8 Référence
- Ø10 +56% de l'énergie pour forer un trou de Ø8
- Ø12 +125% de l'énergie pour forer un trou de Ø8

Il faut donc plus du double de temps et d'énergie pour forer un trou de $\varnothing 12$ qu'un de $\varnothing 8$! La vérification pratique a permis de mesurer les vitesses de forages suivantes dans les calcaires du avec une perceuse à accumulateurs BOSCH GBH24 VRE (nouveau modèle) utilisant des accumulateurs au plomb externes comme source d'énergie. Nous avons fait pour chaque mèche 3 trous verticaux de 10 cm de profond, puis calculé la moyenne. Les résultats sont les suivants (résultats indicatifs):

- $\varnothing 6$: 2,4 secondes/cm -14% du temps pour forer un trou de $\varnothing 8$
- $\varnothing 8$: 2,8 secondes/cm Référence
- $\varnothing 10$: 4,3 secondes/cm +59% du temps pour forer un trou de $\varnothing 8$
- $\varnothing 12$: 5.6 secondes/cm +100% du temps pour forer un trou de $\varnothing 8$

Nous avons vérifié les résultats sur des trous de 40 cm :

- $\varnothing 8$: 3.8 secondes/cm Référence
- $\varnothing 10$: 5.3 secondes/cm +40% du temps pour forer un trou de $\varnothing 8$

Les résultats coïncident assez bien avec les valeurs théoriques, mis à part pour le trou de $\varnothing 6$. Il faut savoir qu'il est plus difficile de faire des forages de petit diamètre, en raison de la flexion de la mèche. De ce fait un forage de petit diamètre est plus difficile et donc plus long à réaliser que le prévoit l'évaluation théorique.

La conclusion logique est la suivante : plus le diamètre du trou est faible, plus le temps de forage et l'énergie nécessaire est faible.

Un trou de 6 mm de diamètre ne permet pas le passage d'une amorce et la longueur désobstruée est trop courte. De plus le gain lors du forage est faible. Selon nous, un forage de 12 mm demande trop d'énergie électrique et est trop long à forer. Libre à chacun de faire son choix judicieusement en fonction de la technique de minage utilisée...



Il faut aussi garder à l'esprit qu'il n'est pas commode de transporter et d'utiliser des forets longs (1 mètre) dans des endroits étroits, car ils sont plus longs qu'un kit. De tels forets ne sont normalement utilisables que pour faire des désobstructions dans de grosses sections et proche de l'entrée.

Nous avons comparé les performances des différentes perceuses pour les forages $\varnothing 8$ mm * 10 cm :

- HILTI TE15 (perceuse 220 V) 2,5 secondes/cm
- HILTI TE10A accu d'origine 2,9 secondes/cm
- HILTI TE10A accu au Pb non mesuré !
- BOSCH GBH24VRE accu d'origine non mesuré !
- BOSCH GBH24VRE accu au Pb 2,8 secondes/cm

Et les forages $\varnothing 8$ mm * 40 cm :

- HILTI TE15 (perceuse 220 V) 3 secondes/cm
- HILTI TE10A accu d'origine 3.75 secondes/cm
- BOSCH GBH24VRE accu au Pb 3.75 secondes/cm



Les perceuses à accumulateurs « HILTI TE10A » et « BOSCH GBH24VRE » ont les mêmes performances. L'accumulateur au Pb ne diminue pas les performances de la perceuse s'il a été bien conçu avec une résistance série faible. De nouveaux modèles de perforateurs, avec des performances sensiblement améliorées, comme le Hilti TE-6A ou le BOSCH GBH 36 V-LI avec son accu Lithium n'ont pas été comparé permettent typiquement le forage dans du calcaire de 5 trous de $\varnothing 8$ mm * 40 cm avec un accu d'origine (!).

Les accumulateurs peuvent avantageusement être remplacés par des accumulateurs au Plomb (plomb sans entretien à électrode gélifiées, Cyclon) en série, soit 3 pour du 36V et 2 pour du 24V. Ces accumulateurs peuvent par exemple être montés dans des tubes en plastiques « GEBERIT » pour une protection extrême contre les chocs. Il peut être intéressant de pouvoir séparer les accus pour en faciliter le transport. A noter que la charge des accus au plomb est bien plus longue que celles des accus d'origine, ce qui peut être très problématique lorsque la source d'énergie est une génératrice.

La perceuse à alimentation secteur « HILTI TE15 » n'est que légèrement plus rapide qu'une perceuse à accumulateurs : le temps de forage est seulement 15% inférieur pour les trous courts et 20% pour les trous longs ! Si l'on tient compte du temps de mise en place, du poids du matériel, du risque de problèmes techniques et des potentialités d'électrocution [CLQ p.46], l'utilisation d'une perceuse secteur ne se justifie que rarement

pour des microtirs (chap. 11.2.2) à moins que le nombre de trous à réaliser dépasse la capacité des accumulateurs disponibles.

Pour la génératrice, nous conseillons les nouvelles génératrices Honda Eu 10i fournissant 1kW pour un poids de seulement 13kg avec une autonomie de plus de 8 heures en mode économique de gestion de puissance. Génial !

Il existe une méthode ingénieuse pour combiner les avantages des accus et de l'alimentation avec une génératrice. Une génératrice est placée à l'extérieur de la cavité pour recharger les accus vides au fur et à mesure, le chargeur pouvant se trouver sous terre à proximité de la désobstruction. Cela permet d'utiliser des perceuses à accus sans limitation d'autonomie.

Pour notre part, nous choisissons en général un matériel permettant des désobstructions rapidement mise en œuvres. Nous utilisons une perceuse à accus Hilti TE-6A. Tout le matériel de minage peut être facilement transporté dans des kits usuels par deux personnes en séparant explosifs et moyens d'allumage. Cette manière de faire nous donne une autonomie supérieure à 10 trous de Ø8 *550 mm avec deux accus d'origine, ce qui permet déjà une belle avance.

Pour de plus grosses désobstructions proches de l'entrée et d'accès facile, nous utilisons de préférence le matériel une génératrice et une perceuse de type TE15 afin de pouvoir réaliser un grand nombre de trous durant une journée de désobstruction et économiser les accus.

11.2. Les explosifs en spéléologie et le CO

11.2.1. Explosifs et trous de gros diamètres (>Ø12 mm)

Dans le cas des trous de gros diamètre, il n'est pas difficile de trouver l'explosif idéal pour le minage, car les techniques conventionnelles et éprouvées peuvent être utilisées. Pour limiter la formation de CO, il ne faut pas utiliser de matériaux combustibles pour le bourrage et pour le conditionnement de l'explosif. Les cartouches standard du marché ont un diamètre de 25 mm. Les forages doivent donc avoir un diamètre de 28 (minimum), 32 (standard) ou encore 35 mm et plus. Il ne faut pas oublier les forages de Ø20 (voire de Ø16) qui permettent d'utiliser un éclateur de roche [CLQ p.66].

Pour des charges importantes, il faut être particulièrement prudent avec les autres gaz nocifs produit par l'explosion, Comme par exemple les gaz nitreux. Ils sont plus denses que l'air et ils s'accumulent donc dans les trous. Leur durée de vie est importante et ils ne se diluent que lentement. Nous ne pouvons que recommander un explosif ne produisant pas beaucoup de gaz nitreux (il faut éviter les gélatines).

11.2.2. Explosifs et trous de petit diamètre (microtirs et minitirs)

Pour les trous de petit diamètre, le problème est nettement plus compliqué. Selon les fournisseurs d'explosif, les explosifs standards pour le minage de charges forées disponibles en Suisse (gélatines, gels, slurries, émulsions, ...) n'explose pas forcément dans des trous inférieurs à 12 mm (à part les poudres noires et blanches qui ont des performances minimales pour des risques maximaux !). Le fait de retrouver des ratés dans des trous de petit diamètre n'est pas encourageant ! De ce fait il est fortement déconseillé d'utiliser des explosifs standards pour les charges forées de petit diamètre (Ø12 cas limite). Les explosifs que l'on peut trouver en Suisse pouvant exploser dans les trous de petit diamètre sont le cordeau détonant (PETN), le Plastex et l'Axionit.



D'une manière générale, il n'est donc pas possible de transposer directement les techniques de minage aux micros et minitirs.

11.2.3. Les détonateurs isolés et les cartouches HILTI

Pour de petits travaux de minages, l'utilisation de détonateurs seuls dans des forages de Ø8 mm donne déjà de bons résultats (blocs et roche en place avec des avancements faibles) en ne dégageant que des quantités négligeables de CO (chap. 12.2). Un détonateur produira 8 ppm de CO s'il explose seul dans un volume confiné de 10 m³ ; il est donc presque impossible de s'intoxiquer au CO avec des détonateurs isolés mis à feu séparément ! Pour des tirs plus importants, il est possible de mettre plusieurs détonateurs dans le même trou. Il faut savoir qu'un trou bien bourré effectué avec un tamponnoir permet déjà de faire exploser des blocs avec un détonateur ou plus si nécessaire (micro-placages [CLQ p.26]).

Il y a aussi les cartouches HILTI [REG28] pour les spéléologues courageux (ou inconscients) prêts à frapper sur une charge explosive ! Cette méthode est très efficace pour ceux qui savent s'en servir. Là aussi, le dégagement

de CO est assez faible, mais il est toutefois comparable à celui des détonateurs. Selon le fabricant, une cartouche dégage 0.055 litre de CO. Un essai dans un bidon étanche de 190 litres a donné 270 ppm de CO [REG28]. Il est ainsi possible de calculer la production spécifique de CO de 30 ppm*m³/cartouches. Le dégagement d'un détonateur est seulement 2.3 fois supérieur à celui de 2 cartouches Hilti noires.

11.2.4. Le cordeau détonant

11.2.4.1. Introduction

Le cordeau détonant est constitué d'une âme de PETN dans une enveloppe textile recouverte d'une enveloppe étanche. Pour les cordons modernes, l'enveloppe est composée d'un matériau organique sans chlore (Il ne faut jamais utiliser de cordeau ayant une enveloppe contenant du PVC et qui produit des gaz toxiques!).

Les types de cordons disponibles en Suisse sont :

- 5 g/m
- 12 g/m Øextérieur 5 mm
- 24 g/m Øextérieur 7 mm
- 40 g/m Øextérieur 9 mm
- 80 g/m Øextérieur 11 mm
- 150 g/m

Le cordeau détonant peut être utilisé efficacement comme charge explosive pour le minage. Il est du reste utilisé pour le minage soigné des profils. Nous profitons du diamètre externe du cordeau pour effectuer des minages de petits diamètres. Le cordeau détonant 24 g/m a un diamètre externe de 7 mm, ce qui le rend très intéressant pour des forages de Ø8 mm. Le cordeau détonant de 40g/m rentre dans les trous de Ø10 mm et celui de 80 g/m dans les trous de Ø12 mm.

Il existe deux techniques de mise en œuvre du cordeau détonant :

- Utiliser un cordeau détonant qui sort du trou (détonateur extérieur).
- Mettre toute la charge à l'intérieur du trou.

La première méthode, très facile à mettre en œuvre, a le désavantage d'utiliser une grande quantité d'explosif, ce qui produit beaucoup de CO. Elle provoque aussi d'importantes nuisances sonores (onde de choc).

La deuxième méthode consiste à mettre dans le trou le cordeau détonant et le détonateur. Vu le petit diamètre des trous, il est obligatoire de mettre bout à bout le détonateur et le cordeau détonant. Le chargement du trou consiste à remplir les 2/3 du trou de mine avec du cordeau détonant. Cette méthode permet de limiter l'onde de choc et la production de CO. Un simple bout de câble électrique introduit dans le trou constitue un bon bourrage. Et comme le câble ne brûle pas lors de l'explosion, il n'y a pas de dégagements de gaz. Le bourrage ainsi réalisé augmente légèrement l'efficacité de l'explosif et diminue sensiblement l'onde de choc. Un tir de mine effectué de cette manière ne fait que très peu de bruit choc, ce qui est le principal avantage de cette pratique. Le cordeau 40g/m permet de fixer le détonateur dans la gaine plastique.

11.2.4.2. Bilan d'oxygène

La PETN qui constitue l'âme explosive du cordeau détonant est un explosif à bilan d'oxygène négatif (-10%). Il libère donc beaucoup de monoxyde de carbone. Lors de l'explosion du cordeau détonant, la gaine participe aussi à la combustion. Ce qui veut dire que la quantité de combustible est augmentée, ce qui provoque une diminution conséquente du bilan d'oxygène. Cette quantité supplémentaire de gaine va lors de sa combustion libérer des substances carbonées comme le CO₂ et le CO ! Voici, pour les cordons usuels en spéléologie, la quantité de gaine relative de gaine (DETONE):

- Cordeau 24 g/m masse de la gaine : 14 g/m soit 37 % de la masse totale
- Cordeau 40 g/m masse de la gaine : 20 g/m soit 33 % de la masse totale
- Cordeau 80 g/m masse de la gaine : 30 g/m soit 28 % de la masse totale

Normalement, un explosif à bilan d'oxygène négatif ne doit pas être utilisé sous terre. Le cordeau est l'exception, car il est utilisé couramment en tunnel pour effectuer les tirs de profils.

11.2.4.3. Observations lors de minage en milieu confiné

Le monoxyde de carbone ne peut pas être détecté par nos sens. Par contre il est intimement lié aux autres gaz et poussières pendant la période suivant l'explosion. Ces autres substances sont facilement détectables par nos sens. Nous avons effectué de nombreuses mesures dans les gaz d'explosion suite au minage avec du cordeau détonant. Nous n'avons jamais mesuré de concentrations de CO dangereuses en dehors de la fumée provenant de

l'explosion durant les minutes qui suivent l'explosion. Alors que des concentrations mortelles se trouvaient à l'intérieur du nuage. La conclusion logique est la suivante : Il faut absolument éviter de se trouver dans la fumée visible de l'explosion ! Il faut attendre qu'elle se résorbe. Il est clair que la fumée de l'explosion et le CO ne sont liés que pendant les minutes suivant l'explosion, Après une longue période (20 minutes), des concentrations de CO mortelles peuvent persister dans la cavité alors que la fumée se sera dissipée.

11.2.4.4. Conclusion



Le cordeau détonant est un explosif à bilan d'oxygène négatif. Son emploi ne doit avoir lieu que dans des cavités ventilées ou avec des petites charges et les cordeaux dans les trous de mines (charge allumette). En milieu confiné avec une circulation d'air faible, il doit être utilisé avec beaucoup de prudence et il faut attendre le temps nécessaire... Par contre sa simplicité de mise en œuvre et les performances obtenues font de lui un excellent moyen de minage dans les endroits avec des courants d'air. Le cordeau détonant de 24 g/m est particulièrement bien adapté au minage spéléo avec des perceuses à accumulateurs, car il peut être utilisé dans des trous de Ø8 mm avec des résultats remarquables.

11.2.5. Les explosifs standards pour les charges forcées

Dans le cas de forage de gros diamètres (>Ø12 mm), les techniques traditionnelles de minages peuvent être utilisées avec succès. Selon nous, le meilleur explosif disponible en suisse pour le minage en spéléo est la gotthardite. Elle permet un dégagement minimal de gaz nocifs avec des résultats excellents. Contrairement au cordeau détonant, son emploi nécessite évidemment un bourrage.

Malheureusement l'utilisation de ces explosifs s'arrête à des trous de Ø12 mm à cause de leurs diamètres critiques ; ils n'explosent pas forcément dans des trous de petit diamètre. Il faut rappeler que pour utiliser les explosifs de manière sûr, il faut un allumage sûr de la charge explosive et que le traitement d'un raté dans un trou de petit diamètre est problématique ! Ces substances ne sont donc pas adaptées aux micros (<10 g) et minitirs.

Il existait en Suisse des charges tubées de petit diamètre pour le minage des profils. Elles ne sont plus fabriquées.

11.2.6. Les explosifs pour les charges appliquées

Pour les charges appliquées à l'air libre, le plastex ou l'axionit (explosifs casse blocs) sont les explosifs adéquats. Ces explosifs contiennent des produits déficitaires en oxygène (principalement le dinitrotoluol et la penthrite), ce qui leur confère un bilan d'oxygène négatif (-70%). De ce fait ils dégagent beaucoup de CO et leur emploi est donc interdit en minage souterrain. Il est à noter qu'ils ont en plus le grand défaut de «noircir» les parois de la cavité.

Les explosifs casse-blocs peuvent être dans certains cas avantageusement remplacés dans le cas du minage souterrain par de l'explosif brisant normal (bilan d'oxygène positif), en augmentant la charge de 30% (par exemple Tovex S). Dans le cas de charges importantes, les gaz nitreux et le CO₂ produit peuvent être extrêmement dangereux ; il faut donc mesurer les concentrations de ces gaz.

11.2.7. Les charges de PETN

La penthrite est un explosif à bilan d'oxygène négatif (-10%) ; elle libère donc du CO lors de son explosion. La PETN est l'explosif du cordeau détonant, des détonateurs et la matière de base de certains explosifs plastiques.

Cet explosif a l'avantage d'avoir un diamètre critique faible, ce qui lui permet d'exploser dans des charges de quelques millimètre de section. C'est pour cela que c'est un explosif servant de base pour les micros et minitirs.

Il existe des microcharges tubées de PETN, vendues en France sous le nom de renforçateurs. Il s'agit si l'on veut de détonateurs ne contenant pas la charge primaire de mise à feu. Ils contiennent 3,3 g de PETN comprimée. Leur utilisation est des plus facile est permet d'obtenir d'excellents résultats (l'utilisation de renforçateur dans des forages de Ø 8 mm permet d'obtenir de meilleurs résultats que des charges bourrées d'explosif dans des trous de Ø 12 mm). Malheureusement, ils ne sont pas disponibles en Suisse.

La récupération (illégal et dangereuse) de la PETN se trouvant dans les cordeaux détonant pour la reconditionner dans des tubes (généralement en aluminium) permet de diminuer très fortement la production de CO par rapport au cordeau détonant. Cependant, les performances explosives de la PETN pure sont directement liées à sa densité de remplissage. Par exemple, pour obtenir une vitesse maximale, soit 8350 m/s, la PETN doit avoir une densité de 1,74, ce qui nécessite qu'elle soit soumise, selon des procédés industriels, à une pression de 2800 kg/cm³. En effectuant cette opération de façon manuelle, il est difficile de dépasser une densité de 1 g/cm³.

La PETN a alors une vitesse de détonation de l'ordre de 5000 m/s (7000 m/s dans le cordeau détonant) et une pression des gaz d'explosion réduite. La PETN a donc perdu une grande partie de sa brisance et devient un explosif médiocre, cependant cette brisance reste suffisante pour les microtirs.

Les risques de cette pratique ne sont pas à négliger, car la PETN est un explosif très sensible (Sensibilité au choc : 3 J ; au frottement : 44 N ; à l'électricité statique : 0,06 J), soit 100 fois plus au choc et au frottement qu'une gélatine standard [Urban p.16]!

11.2.8. Les explosifs «prototypes »

Il existe des mélanges explosifs très brisants et suffisamment sensibles pour exploser dans des trous inférieurs à Ø12 mm [Urban] [Quin]. Certains d'entre eux ayant même un bilan d'oxygène positif. Ils ne sont malheureusement pas commercialisés en Suisse. Leur utilisation permet d'obtenir d'excellentes performances et un dégagement de gaz toxiques faibles (bilan d'oxygène positif) à performances égales : pour résumer, des performances inégalables pour les microtirs en milieux confinés. Cependant, leur fabrication requièrent des connaissances spécifiques et leur importation est évidemment illégale.



11.3. Conclusion

Le choix de l'explosif idéal est primordial afin de travailler avec des concentrations de CO raisonnables. Selon le type de minage, des explosifs différents doivent être utilisés :

- Pour les forages de gros diamètre (≥ 12 mm) la gotthardite 100 (ou un autre explosif à bilan d'oxygène positif) ou le cordeau détonant sont les explosifs à utiliser. Pour les cavités non ventilées, seule la gotthardite devrait être utilisée en raison de son faible dégagement de gaz nocifs (CO et NOx) et de ces bonnes performances.
- Pour les trous ventilés et des forages de petit diamètre, le cordeau détonant 24 g/m est idéal. Si la cavité n'est pas ventilée, nous n'avons pas trouvé d'explosifs vendus en Suisse ayant un diamètre critique suffisant pour effectuer des microtirs. Quant au reconditionnement des cordons détonants (je le répète : illégal et dangereux), nous ne pouvons que le déconseiller : le risque de s'intoxiquer gravement au CO est souvent moins grand que celui de finir satellisé avec sa réserve de PETN [Urban p.16].
- Dans le cas de charges appliquées, il faudrait éviter d'utiliser des explosifs plastiques à bilan d'oxygène négatif, mais plutôt un explosif à bilan d'oxygène positif en augmentant la charge de 30% (Ces explosifs étant souvent irremplaçable).



12. Mesures

12.1. Introduction

Pour ces mesures, nous avons fait exploser, sans confinement (cas défavorable), différentes charges explosives dans un endroit rigoureusement clos de 15m³ de volume (température : 12°C). Immédiatement après l'explosion, la concentration de CO a été mesurée au moyen d'un appareil Dräger Pac III.

Les charges suivantes ont été testées :

- Amorce électrique HU instantanée, Dynamit Nobel (Troisdorf).
- Amorce électrique + 20 cm de cordeau 24 g/m (4,8 g de PETN).
- Amorce électrique + une charge tubée Ø7 mm en aluminium de 5 g de PETN.
- Amorce électrique + une charge tubée Ø7 mm en polyéthylène(300 mg) de 5 g de PETN.
- Amorce électrique + une charge tubée Ø7 mm en polyéthylène de 5 g d'un explosif prototype.
- Amorce électrique + une charge tubée Ø7mm en aluminium de 5 g de Plastex (Attention : diamètre inférieur au diamètre critique ! N'explose pas forcément).
- Amorce électrique + une charge de 5 g d'explosif commercial à bilan d'oxygène positif (Gotthardite 100).
- Amorce électrique + une charge tubée Ø8 mm en aluminium de 5 g d'explosif brisant spécial.
- 5 g de poudre noire.
- 1 mètre de mèche à combustion lente.

Avec ces mesures, nous avons pu évaluer la concentration de CO produite par grammes d'explosif et par mètres cubes pour les différents produits utilisables lors de microtirs. Pour les tirs avec des charges, le CO dégagé par l'amorce a été soustrait.

12.2. Résultats

| Type d'explosif | Quantité | Concentration de CO [ppm] |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Amorce électrique | 1 amorce | 8 ppm |
| Plastex | 2,5 grammes | 41 ppm - 1 amorce = 33 ppm |
| Cordeau 24 g/m | 7,5 cm (5 g total 3,15 g PETN) | 67 ppm - 1 amorce = 59 ppm |
| PETN dans tube en PE | 3 grammes (PE 0,2 grammes) | 23 ppm - 1 amorce = 15 ppm |
| PETN dans tube en aluminium | 3 grammes | 19 ppm - 1 amorce = 11 ppm |
| PETN-NIME dans tube en PE | 3 grammes | 23 ppm - 1 amorce = 15 ppm |

De ces valeurs, on extrait la valeur G_{CO} des explosifs exprimée en $ppm \cdot m^3/g$. Pour cela, nous soustrayons le gaz produit par le détonateur, et nous ramenons la concentration à une quantité standard d'explosif.

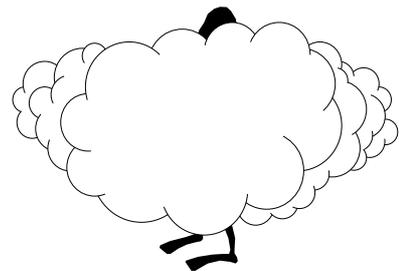
Pour retrouver la concentration de CO, il faut effectuer l'opération suivante :

$$C_{CO} = G_{CO} \frac{M}{V} \quad \text{Avec :}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M : \text{masse d'explosif [g]} \\ V : \text{Volume de dissolution en [m}^3\text{]} \\ C_{CO} : \text{Concentration de CO [ppm]} \\ G_{CO} : \text{production spécifique de CO [ppm} \cdot \text{m}^3\text{/g] ou [ppm} \cdot \text{m}^3\text{/charge]} \end{array} \right.$$

Voici les valeurs G_{CO} obtenues pour différentes matières explosives à partir des mesures précédentes:

| Type d'explosif | G_{CO} MAX |
|--------------------|--|
| Amorce électrique | 120 $ppm \cdot m^3$ /unité |
| Cordeau 24 g/m | 320 $ppm/g \cdot m^3$ |
| Plastex | 200 $ppm \cdot m^3/g$ |
| PETN | 75 $ppm \cdot m^3/g$ |
| Explosif prototype | 75 $ppm \cdot m^3/g$ |
| Carouche Hilti | 30 $ppm \cdot m^3$ /Cartouche depuis [Reg28] |



Exemple : le mineur Oshu fait exploser 0,6 mètres de cordeau 24 g/m ($0,6 \cdot 24 = 14,4$ g de PETN) à l'aide à l'aide de 2 détonateurs dans un volume de 25 m^3 . On utilise les G_{CO} suivants :

- Cordeau 24g/m : $320 \text{ ppm} \cdot \text{m}^3/g$
- Détonateur : $120 \text{ ppm} \cdot \text{m}^3/\text{unité}$

On obtient donc :

$$C_{CO} = \frac{320 \cdot 14,4}{25} + \frac{120 \cdot 2}{25} = \frac{4608 + 240}{25} = 194 \text{ ppm}$$

Le CO se trouvant dans le lieu du minage sera donc, après dilution, à une concentration voisine de la limite ceiling.

12.3. Analyse des résultats

Les explosifs à bilan d'oxygène négatif produisent beaucoup de CO. Les explosifs à bilan d'oxygène positif produisent nettement moins de CO ; ils devraient être utilisés dans tous les cas où leur emploi est possible.

Comme attendu, le cordeau détonant est l'explosif dégageant le plus de CO. Un facteur 4,3 par rapport à la PETN.

La différence des gaz émis entre les charges de PETN et le cordeau montre qu'il ne faut pas reconditionner de la PETN (dangereux et interdit). Mais nous évaluons que le cordeau, est au moins deux fois plus efficaces que les charges de PETN reconditionnées. Ce qui donne seulement un dégagement de CO au maximum 2 fois supérieur à performances égales. Le risque est-il plus grand de s'intoxiquer au CO ou d'exploser lors des manipulations de PETN ? De plus le cordeau est nettement plus simple à manipuler.

L'explosif prototype a un dégagement de CO faible pour d'excellentes performances. Il a l'avantage d'exploser dans les forages de petits diamètres.

12.4. Conclusion

Pour les trous de petits diamètres, le cordeau détonant est selon nous le moyen le plus sûr est le plus efficace pour le minage, même s'il s'agit de l'explosif qui produit le plus de CO.

Les explosifs à bilan d'oxygène négatif (mesure non effectuée pour des raisons techniques), et particulièrement la Gotthardite devrait être utilisés pour les trous de plus gros diamètre, car leur bilan d'oxygène positif fait que la production de CO est plus faible. Dommage qu'ils ne puissent pas être utilisés comme charge pour des microtirs à cause du diamètre critique trop élevé.

L'explosif «prototype PETN-NIME» surpuissant donne le même dégagement de CO que la PETN reconditionnée. Par contre ses performances sont nettement supérieures si la PETN n'est pas comprimée. En utilisation comme charge lors de microtirs en cavités non ventilées serait excellente, notamment pour le sauvetage ; dommage qu'il ne soit pas commercial. La « dynamite gomme A » (explosif non disponible en Suisse dont le diamètre critique est de 2 mm) donnerait certainement des résultats excellents.



13. Conclusion

L'utilisation d'explosif à l'air libre ne pose normalement pas de problèmes liés au monoxyde de carbone. Par contre en minage dans des milieux confinés (minage souterrain, puits, tranchées profondes et locaux fermés), une grande prudence est nécessaire, mais une bonne connaissance de la problématique permet facilement d'éviter les accidents.

Les symptômes d'intoxication au CO à connaître sont :

- Céphalées
- Grande fatigue
- Nausées
- Vertiges
- Perte de connaissance (troubles de la conscience)
- Vomissements (Intoxication grave)

Si plusieurs personnes montrent ces symptômes, il faut systématiquement penser à une intoxication au CO ! Il faut alors en premier lieu procéder à l'évacuation de la (les) victime(s) hors de l'atmosphère toxique. Le traitement spécifique de l'intoxication est l'oxygénothérapie.

Les règles suivantes devraient toujours être respectées lors de minages en milieu confinés :

- Travailler en respectant les normes d'exposition (exposition permanente et plafonds).
- Utiliser si possible des explosifs à bilan d'oxygène positif.
- Connaître le G_{CO} de l'explosif utilisé afin d'évaluer correctement la production de CO avant le minage.
- Ne jamais aller directement après l'explosion, mais attendre que les gaz se dilue (règle très empirique : 1 minute/gramme)
- S'éloigner suffisamment pour que le CO puisse se dissoudre dans le volume d'air supplémentaire.
- En cas de doutes concernant la concentration de CO, évacuer la zone à risque ou effectuer une vérification
- Toujours vérifier la concentration de CO après des minages importants (l'atmosphère peut être contaminée pendant de longues périodes)
- Signaler à l'entrée de la grotte la présence de gaz dangereux (Tir de mines, attention gaz)

Dans les cavités ventilées, il est possible d'utiliser du cordeau détonant pour les microtirs. Pour les tirs normaux, il faut utiliser évidemment un explosif à bilan d'oxygène positif ; nous conseillons un explosif comme la Gotthardite qui produit peu de gaz nocifs (CO et NOx).

Dans les cavités non ventilées, il n'y a pas de solution miracles, si ce n'est d'appliquer les principes permettant de réduire l'exposition au CO, comme l'utilisation d'une ventilation artificielle. Des mesures de gaz sont obligatoires.

Il ne faudrait pas récupérer de la PETN dans le cordeau détonant !



14. Lexique

TWA : Time-weighted average (Valeur moyenne pondérée dans le temps). Pour la norme TWA, la moyenne est calculée sur une exposition de 8 heures

½ vie de la liaison HbCO: Temps pour que la moitié du CO se trouvant dans le sang soit libéré par l'organisme.

Diamètre critique : diamètre minimum pour que l'explosion se propage.

PETN : tetranitrate de pentahéthritol, penthrite, nitropenta. Explosif très brisant, à bilan d'oxygène négatif. C'est l'âme du cordeau détonant, l'explosif secondaire des détonateurs et l'explosif principal de certains explosifs plastiques.

TNT : trinitrotoluène. Explosif militaire très brisant. Il a un bilan d'oxygène fortement négatif. Sa fumée d'explosion est noirâtre.

Microtirs : charges inférieures à 10 grammes dans des forages de petits diamètre.

Minitirs : charges supérieures à 10 grammes dans des forages de petits diamètre.

15. Bibliographie

[SSF] E. David, Les gaz, SSFSTA061, Spéleo Secours Français, 1997.

[ROC] France Rocourt, Toxicité des gaz d'explosifs, 1987.

[GUI] France Guillaume, Thierry Miguët et Albert Oyhancabal, A propos de la toxicité des fumées de tirs d'explosifs en spéléologie, Spelunca 33, p. 16-21, 1989.

[LAFARG] A. Lafarguette, J.M. Ostermann, T. Pelissie, Etude de la toxicité des gaz d'explosifs en spéléologie, COMED de la FFS, 1992.

[SSF2] Manuel désobstruction secours, fédération française de spéléologie.

[Sans] Eric Sanson, Exercice de désobstruction en cavité non ventilée, Spéleo Secours Isère, 2001.

[Merck] Merck Index .

[Patty] Patty's Industrial Hygiene and Toxicology, vol. 2c, Wiley-interscience publication, New York.

[Hirsch] Hirschler, Carbon monoxide and human lethality: fire and non-fire studies, Elsevier science publishers LTD, 1993, England.

[Dep] Health & Safety at work. Carbon monoxide poisoning: causes and prevention, Department of employment, 1971, England.

[UNEPW] « Environmental health criteria 13. Carbon Monoxide », United Nations environment Programme & World Health Organisation, 1979, United Kingdom.

[Lech] Pierre Lechanteur, Etude sur la faisabilité d'opérations de prévention de l'intoxication oxycarbonnée dans l'habitat, Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux, 1992.

[Nas] Carbon Monoxide, National Academy of Sciences, 1977, Washington.

[Urban] Tadeusz Urbanski, Chemistry and Technology of Explosives, vol. 1 à 4, Pergamon Press, 1984, USA.

[Quin] Jean Quinchon, Les poudres, propergoles et explosifs, Technique & Documentation, 1982, Paris.

[CLQ] Les spéléologues du Causse de Limoges-En-Quercy, « Désobstruction à l'explosif », Imprimerie GRAPHO 12, 1992.

[LOE] Loi et Ordonnance fédérale sur les substances explosibles, 1977 et 1980.

[Reg28] Cartouches HILTI, Regards 28.

Pour les internautes, des informations intéressantes peuvent être trouvées sur les sites suivants :

<http://xxx.osha.gov/>

<http://www.osha-slc.goc/>

<http://response.restoration.noaa.gov/comeo/locs/expguide.html>

<http://www.cdc.gov/niosh>

<http://www-sante.ujf-grenoble.fr/SANTE/Paracelse/protocol/co/co3.html>

<http://www.appligos.com/samu68/articles/intoxcogdpublic.html>

<http://www.caruschem.com/CRLTAIR.HTML>

<http://dwhl.de/english/index.htm>

<http://www.r2d3.com/lst319.html>

<http://www.r2d3.com/lst321.html>

16. Remerciements

Nous remercions les personnes qui nous ont aidés à réaliser ce travail et celles qui nous fourniront des remarques intéressantes.

17. Contacts

Pour toutes informations complémentaires ou d'inévitables corrections, contactez :



Michel Demierre
tél: +41 79 636 86 35 (Mobile)
e-mail: michel@techt.ch



ATTENTION !!!

Malgré la rigueur avec laquelle cette publication a été écrite, elle peut contenir des erreurs ou des inexactitudes. Elle ne peut être utilisée qu'à titre indicatif et ne peut pas être utilisée comme référence pour des expositions au monoxyde de carbone. Seule une mesure effectuée avec un matériel adéquat permet l'utilisation correcte de ces données.