

Cahier de l'EFS n°17

Fabien FÉCHEROUILLE

MÉMOIRE INSTRUCTEUR

FÉDÉRAL DE SPÉLÉOLOGIE, 2015

LA MORT ANNONCÉE DE LA LAMPE À ACÉTYLÈNE : ET APRÈS ?



LA MORT ANNONCÉE DE LA LAMPE À ACÉTYLÈNE : ET APRÈS ?

L'objectif de l'étude est de fournir des clés pour aider le spéléologue à choisir à bon escient non seulement son éclairage de secours mais aussi son moyen de chauffage. Il pourra ainsi, au vu des tests réalisés et de leurs résultats, adapter ses moyens à ses objectifs et à sa pratique.



SOMMAIRE

Introduction : Courte histoire de l'éclairage en spéléologie	06
1 - Le contexte du projet	08
La lampe à acétylène en tant que principal mode d'éclairage, et l'éclairage électrique en tant que secours	08
- La lampe à acétylène supplantée par l'éclairage électrique	09
- Objectif de l'étude	09
L'enjeu de l'étude	10
- De l'importance d'un éclairage de secours performant	11
- De l'importance d'un moyen de chauffage performant	11
2 - Les moyens mis en œuvre	12
Protocole et mise en œuvre des points chauds (PC)	12
- La confection et l'installation du point chaud	12
- La durée des tests	12
- Première série de tests	13
- Deuxième série de tests	14
Protocole et mise en œuvre des tortues	14
- Le matériel utilisé	14
- La confection des tortues	14
- L'installation des sondes	14
- Les moyens de chauffe utilisés	14
3 - Le résultat des tests et leur interprétation	15
Analyse des résultats des points chauds (PC)	15
- Ecart en termes d'élévation de la température	16
- Ecart en termes d'abaissement de l'hygrométrie et en termes de rayonnement	18
- Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie	18
- Effet des différents moyens de chauffe sur la condensation	23
- De l'importance de la circulation de l'air	24
- Types de fonctionnements caractéristiques des points chauds	26
Analyse des résultats des Tortues (TT)	27
- Tortue sans moyen de chauffe (tests 1 et 2)	28
- Tortues avec moyens de chauffage dynamiques (tests 3 à 7)	28
- Tortues avec moyens de chauffage statiques (tests 8 et 9)	31
- Tortues avec poncho spéléo	32
- Assis avec acéto sous le bras (test 12) (j'aurai mis le test 12 en test 2 en référence au test 1)	32
- Debout avec une circulation restreinte (test 13)	32
- Ecart en termes de déperdition calorifique	32
4 - Apports complémentaires à l'analyse	35
L'aspect physiologique	35
La température corporelle humaine	36
L'hypothermie	36
Le changement d'état	37

La toxicité des gaz dégagés	37
L'état psychologique	37
La tenue	37
La nutrition	38
La toxicité humaine et rique	38
- L'acétylène	38
- La bougie	38
- Les autres procédés	39
- Les LEDs	39
L'impact environnemental	39
- L'acétylène	39
- Les LEDs	39
- Les autres procédés (bougies)	39
- La spéléo	40
Hypothèses de calcul	40
- Calculs théoriques sur les différents produits de combustion	40
- Résultats	40
5 - Eléments de synthèse pour faire son choix	41
Disposer d'un éclairage de secours performant (leds) - caractéristiques indispensables et risques	41
- Etanchéité de la lampe	41
- Accessibilité	41
- Autonomie	41
- Puissance	41
Disposer d'un moyen de chauffage performant selon les situations	41
- Moyens statiques	41
- Moyens dynamiques	42
- Avantages et inconvénients des divers moyens de chauffage non testés par nos soins	43
Conclusion	44
Annexes	45
Annexe 1 : Réalisation d'une bougie de secours	45
Annexe 2 : quelques récits	49
- Exploration dans le scialet du Playnet sur le Vercors.	49
- Extrait d'une histoire Belge	49
- Histoire de crue dans le Vercors dans l'Antre des Daminés en 2013	50
Crédits	51
Bibliographie	51
- Publications	51
- Ouvrages	51
- Quelques liens Internet pour se procurer la cire	51

COURTE HISTOIRE DE L'ECLAIRAGE EN SPELEOLOGIE

C'est il y a plus de 40 000 ans que débute la spéléologie, avec nos ancêtres du paléolithique moyen et l'Homme de Néandertal. Ils s'aventurent alors sous terre, munis de torches. Les nombreuses représentations rupestres et autres empreintes de pas sont les témoignages de ces artistes explorateurs d'un autre temps.



*Norbert Catesret - A ses débuts -
Source societe-explorateurs.org*



*Norbert Catesret - anniversaire au fond du gouffre Raymonde
- Source societe-explorateurs.org*

Il faut attendre 1888 et Edouard-Alfred Martel pour voir se développer la spéléologie : il réalise alors ses explorations à l'aide d'une simple bougie collée sur son chapeau par de la cire fondue et une lampe à pétrole.

En 1836, Edmund Davy découvre le gaz acétylène mais ce n'est qu'en 1892 que H. Moissan met au point le procédé de fabrication du carbure de calcium, ce qui permet, un an plus tard, l'utilisation de l'acétylène dans divers domaines. En 1910, les fabricants développent de nombreux modèles de lampes à carbure, notamment en France (Arras) et en Allemagne (Wolf), les premiers éclairages souterrains avec générateur à acétylène font leur apparition dans le secteur minier (autre que les mines de charbon).

Apparaissent aussi les premières lampes de casque pour égoutier. Robert de Joly construit des lampes frontales électriques ou à acétylène, pour libérer les mains lors de l'exploration souterraine en spéléologie, et c'est après 1926 que Norbert Casteret décide de se moderniser en adoptant l'acétylène et les lampes électriques.

Depuis, la lampe à acétylène n'a cessé d'évoluer par l'ingénieux bricolage des spéléologues. Elle a été pendant de nombreuses années non seulement leur plus fidèle éclairage principal mais aussi une source de réconfort grâce à son générateur placé sous le bras ou entre les jambes au cours des longues heures d'attente et à sa flamme, lors de tortues ou de points chauds.

Parallèlement, l'apparition de l'électricité s'accompagne de la création d'un système autonome d'éclairage reposant sur l'utilisation de batteries : la lampe de poche. Ainsi, la fameuse pile carrée alimentant une ampoule filament de 4,5V équipe plusieurs générations de casques spéléo, en complément de l'acéto. En 1973, Petzl sort le premier éclairage mixte du commerce : la lampe orange avec acétylène ; la grande révolution de l'allumeur piezo facilite l'allumage de l'acéto, remplaçant l'allumette ou le briquet pour allumer la flamme.

L'avancée technologique développe les ampoules halogènes pour la lampe de poche, qui remplacent rapidement l'ampoule traditionnelle du casque vers 1987. Petzl remplace la lampe de ses casques par l'éclairage « laser » équipé d'une ampoule halogène. Celle-ci présente l'avantage d'un faisceau beaucoup plus puissant en utilisant les mêmes piles. Cependant, elle est bien plus consommatrice d'énergie : le choix entre voir loin mais sur un temps court ou voir longtemps mais à courte distance se pose...

L'évolution de l'éclairage électrique essaie de répondre à ce dilemme. La Duo Petzl présentée en 1994, et qui équipe les casques « explorer » en 1996, y répond grâce à la mixité de l'éclairage proposé (ampoule filament + ampoule halogène) et à l'utilisation de piles rondes AA (permettant l'utilisation de piles accu rechargeables). Mais la question d'une grande autonomie n'est toujours pas réglée.

Dans les années 2000, Petzl lance la TIKKA, la première lampe frontale à leds et, dans la foulée, les premiers modules

leds pour duo : en 2002, modules 3 et 5 leds, en 2003 en 8 leds et en 2005 en 14 leds : un des premiers éclairages leds où l'on peut réellement se passer de l'acétylène. L'arrivée de leds puissantes apporte une réponse satisfaisante à la question de l'autonomie tout en conservant un éclairage électrique performant. L'éclairage acétylène et sa bonne vieille dudule voient ainsi arriver le déclin irrémédiable de son utilisation. Certains spéléologues commencent à passer au « tout électrique ». L'évolution des ampoules leds marque un virage dans l'éclairage souterrain : tout comme la corde a remplacé l'échelle, l'éclairage à leds supplante l'acétylène.

1 – LE CONTEXTE DU PROJET

L'évolution des pratiques spéléologiques et du matériel de progression, le remplacement de la lampe acétylénique par les éclairages électriques à leds nous amènent à revoir notre équipement et à nous poser des questions que jusqu'alors nous ne nous posions pas !

LA LAMPE A ACETYLENE EN TANT QUE PRINCIPAL MODE D'ECLAIRAGE, ET L'ECLAIRAGE ELECTRIQUE EN TANT QUE SECOURS.

Auparavant, le spéléo disposait de deux éclairages indépendants (électrique et acéto), ces deux éclairages utilisant deux systèmes d'énergie distincts, le carbure de calcium et les piles électriques. On parlait alors d'éclairage mixte. Ce n'est plus le cas aujourd'hui... avec les leds, de nombreux spéléos passent au « tout électrique » et oublient qu'une lampe n'est pas infaillible. Prévoir des accus supplémentaires n'est pas suffisant, un deuxième éclairage électrique (de secours) performant est également indispensable au cas où... Avant, on pouvait bricoler son acéto et son générateur, par exemple, en mettant directement la buse sur le tuyau de sortie du générateur pour continuer à progresser.

Avec les leds, il n'est plus possible de procéder à de tels bricolages. L'idée de connecter l'ampoule directement avec la pile, qui était envisageable avec les bornes plus et moins de la pile carrée, ne l'est plus avec les piles rondes et accumulateurs d'énergie, et l'étanchéité des systèmes des lampes moulées rend même impossible leur ouverture.

La lampe acétylène comme éclairage principal était capable de produire une lumière diffuse pour la progression, fonctionnant plutôt bien, mais avec de nombreux désagréments : la flamme pouvait s'éteindre au premier choc du générateur lors de la reptation dans un boyau ou sous une bonne douche dans un puits, ou il y avait encore la difficulté de déchauler à tout moment le générateur. En cas de panne d'eau ou de carbure, l'éclairage électrique était là !

Ces premiers éclairages électriques avaient donc comme fonction de constituer l'éclairage de secours. Nombre de spéléologues ont pu sortir de cavités à la seule lumière de leur lampe électrique (ils se trouvaient bien heureux de l'avoir).

Avec la venue des ampoules halogènes, le spéléologue commence à voir loin, avec un faisceau lumineux concentré, mais la consommation électrique est élevée. De ce fait, en cas de défaillance de l'acéto, l'éclairage électrique ne permet pas de progresser longtemps.

Il constitue un simple éclairage d'appoint et non de secours, incapable de palier la défaillance de la bonne vieille dudule. Comme énoncé précédemment, avec l'apparition de lampes mixtes fabriquées par des clubs spéléo tels que l'ASN puis la commercialisation de la fameuse Duo de Petzl (la première

lampe mixte manufacturée, une lampe dont les premières versions sont équipées d'une ampoule à filament 6V et d'une ampoule halogène), la fonction de lampe électrique de secours est à nouveau retrouvée.

Dans les années 2000, la Duo voit une seconde évolution avec les multi-leds, enfin les mono led s'imposent par leur performance et leur autonomie. La lampe à acétylène est progressivement abandonnée, ce qui conduit le spéléo à se retrouver sans éclairage de secours.

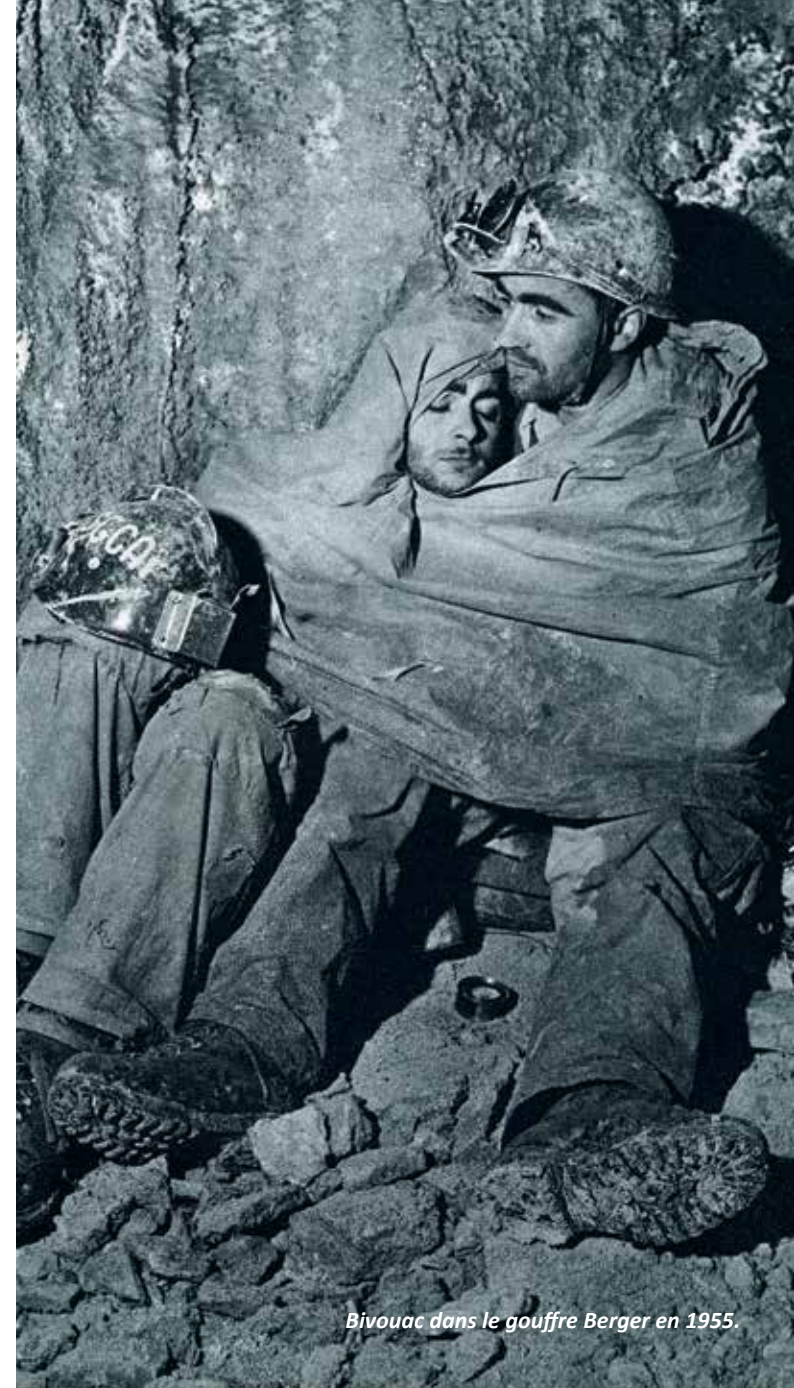
La lampe à acétylène supplantée par l'éclairage électrique

Les spéléologues ont longtemps cherché à s'affranchir de leur lampe à acétylène. Au commencement, avec l'évolution des leds en tant que moyen d'éclairage, le spéléo dispose d'un éclairage suffisant pour progresser dans les cavités, avec, pour les premières lampes amateur, un nombre de leds allant jusqu'à 24 et pour les premières commercialisées, jusqu'à 5 leds (Petzl) ou bien 3 leds montées sur un culot d'ampoule à vis.

Le bond technologique des leds sonne le glas de la lampe à acétylène : les premières mono leds performantes de 1 à 3 W et l'apparition des lampes étudiées pour la spéléo comme la LIII, ou la Scurion, ou encore d'autres produites par des industriels, adaptées au casque mais pas conçues spécifiquement pour la spéléologie.

La sensibilisation des spéléologues à l'environnement joue un rôle également. Même si la couleur de la flamme acétylénique nous apportait un éclairage efficace, elle produisait des résidus de combustion qui polluaient les roches et les concrétions, sans compter la chaux des générateurs largement laissée sur place par des spéléologues peu soucieux de la pollution (physique ou visuelle). Quant aux piles et aux accus, le problème du recyclage se pose. Pour les piles, leur remplacement avant qu'elles ne soient totalement usées amène à une surconsommation de celles-ci avec un coût et bien souvent, elles finissent enfouies avec les déchets ménagers. Pour les accus, les piles rechargeables classiques montrent une autonomie très courte, les NI-CA ont légèrement plus d'autonomie mais une mémoire à toute épreuve (en effet, si vous rechargez vos accus avant leur total déchargement, l'autonomie initiale des accus est perdue. De plus, le nombre de cycles de rechargement est restreint), les Ni-MH présentent des progrès en gommant quelques-uns des inconvénients de leurs prédécesseurs. Toutefois, si une pile du commerce a une tension de 1,5V, la plupart des accus possède une tension de 1,2V, ce qui ne leur procure pas la grande autonomie recherchée pour l'éclairage en spéléologie.

Parallèlement à cela, les difficultés de se procurer du carbure et le fait de le trouver de moins bonne qualité qu'avant contribue au déclin rapide des lampes à acétylène, et ce n'est qu'avec l'apparition des accus Li-ion que le problème est réglé. Des accus sans mémoire avec un voltage de 3,7V qui va de pair avec les dernières Leds et permettant



Bivouac dans le gouffre Berger en 1955.

un nombre de cycles de charge élevé. Se pose toutefois la question de leur recyclage.

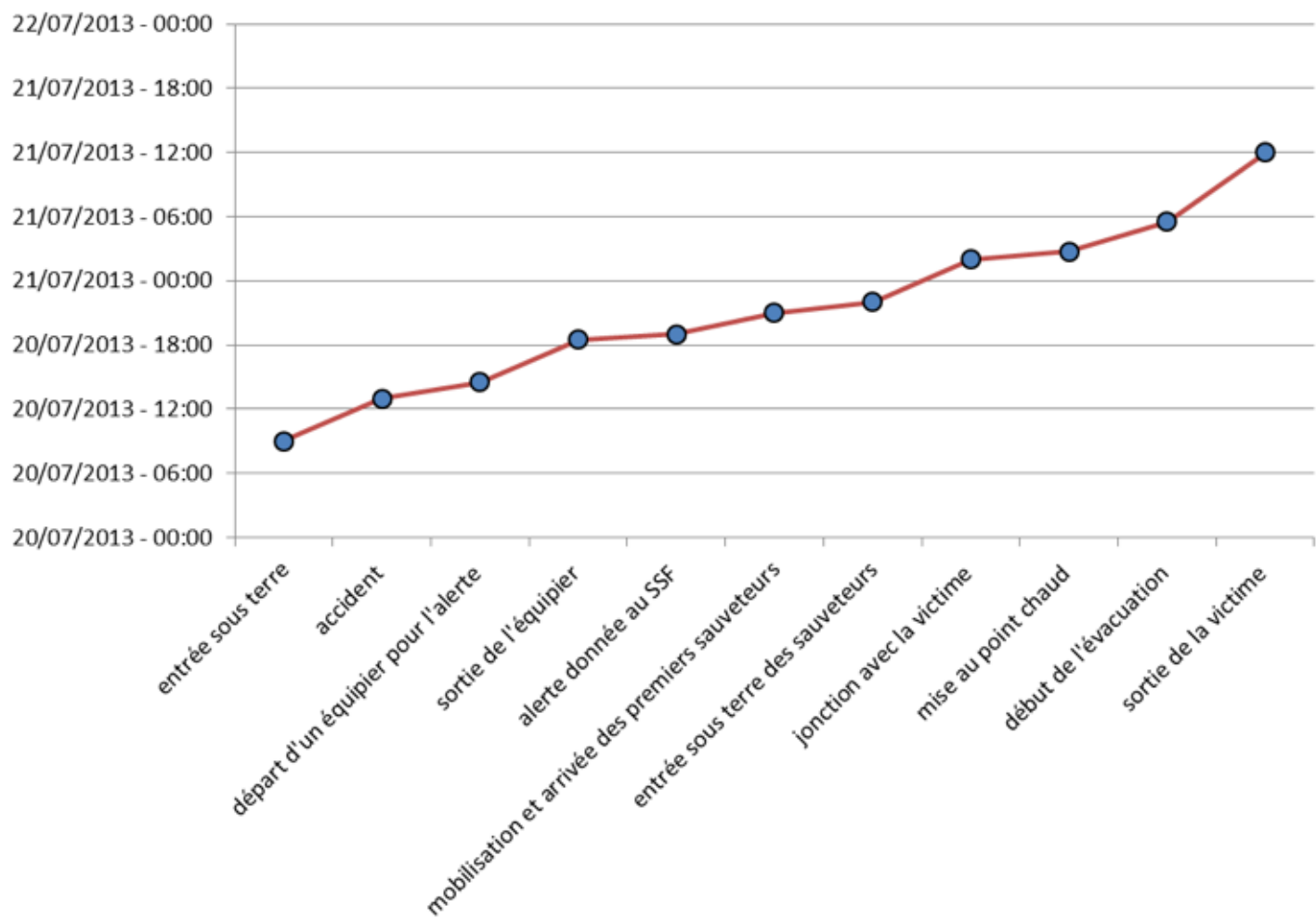
En conséquence, les dernières évolutions des éclairages électriques en termes de performance, d'autonomie et de prix, font que la majorité des spéléologues ont franchi le pas !

Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude est de fournir des clés pour aider le spéléologue à choisir à bon escient non seulement son éclairage de secours mais aussi son moyen de chauffage. Pour cela de nombreux tests ont été réalisés, afin de comparer les moyens de chauffe (bougie, acéto, ...) ainsi que les moyens de protection (point chaud, tortue,...). Il pourra ainsi, au vu des tests réalisés et de leurs résultats, adapter ses moyens à ses objectifs et à sa pratique.

L'ENJEU DE L'ETUDE

Pour mieux comprendre, voici une petite échelle de temps pour un secours moyen.



Ce graphique a pour but de donner une meilleure idée d'un secours déclenché pour un accident. Il indique qu'entre le moment où le spéléologue se blesse et l'arrivée du premier sauveteur, il s'écoule près de douze heures, puis encore dix heures supplémentaires avant sa sortie.

Dans le cas d'un incident, le temps est le même au début soit huit heures trente, puis de cinq à six heures pour sortir, selon l'état physique. Ce qui signifie que plus le blessé est loin de l'entrée ou que la progression est longue et plus il lui faut patienter et prendre son mal en patience.

Ce temps d'attente indicatif peut être beaucoup plus important si un secours est déclenché suite à une mise en charge d'un réseau (équipe coincée par une crue) ou si la cavité n'est pas facile d'accès (réseau alpin par exemple).

Quoi qu'il en soit, pour assurer une attente dans les meilleures conditions et ne pas amoindrir le moral des spéléologues subissant un incident, il est indispensable de disposer dans l'équipe de moyens d'éclairage opérationnels et également de moyens de chauffage, adaptés à la hauteur des objectifs d'exploration et d'engagement.



De l'importance d'un éclairage de secours performant

Une panne d'éclairage intervient rarement dans les moments idéaux : lors du repas avec les autres, en progression horizontale proche de la sortie du trou ou dehors. Grâce à la LEM (loi des emmerdements maximum), la panne d'éclairage se produit le plus souvent au plus mauvais moment : lors de la progression sur corde, ce qui devient délicat lorsque l'éclairage de secours se trouve au fond du kit - surtout si c'est celui du copain - en progression en opposition avec un bon kit longé, lors d'une escalade, lors d'un méandre étroit, ou encore, ce qui devient encore moins drôle, en progression aquatique. En bref, nombre de situations qui, si l'éclairage de secours n'est pas facilement accessible en un seul geste pour l'allumer, peuvent devenir tendues.

L'éclairage de secours permet d'éviter une fausse manipulation sur corde à un fractionnement, une chute, une glissade ou la possibilité de s'égarer si l'éclairage n'est pas assez puissant pour voir correctement et si l'on se retrouve isolé des autres dans l'obscurité. Il faut alors s'attendre à un long moment de solitude.

L'éclairage de secours est l'élément clef qui permet de pallier la défaillance de l'éclairage principal. En conséquence, on doit se poser ces questions : mon éclairage de secours me permet-il de rejoindre la sortie en toute autonomie et en toute sécurité ? Cette question peut être déclinée ainsi : est-il suffisamment puissant pour voir au-delà de mes propres bottes ? Dispose-t-il d'une autonomie suffisante ? Est-il étanche ? Est-il facilement accessible et utilisable ?

De l'importance d'un moyen de chauffage performant

La lampe à acétylène fournissait de la lumière, ce qui était déjà bien ! Son générateur ou son bec permettaient également de disposer d'un bon moyen de chauffage. Nous pouvions nous réchauffer lors d'une attente ponctuelle en glissant le générateur sous le bras ou entre les jambes, et si l'attente se faisait plus longue, nous pouvions utiliser sa flamme en nous couvrant d'une couverture de survie (c'est ce qu'on appelle «faire la tortue»). Mais surtout, en cas d'incident ou d'accident, il était possible de mutualiser ses moyens en réalisant un point chaud réchauffé par la seule flamme d'une lampe à acétylène, système couramment utilisé encore par le spéléo secours. Il suffit de lire « la crue sous terre » de Stéphane Jaillet (Cahier de l'EFS n°10, 2004) pour comprendre que le phénomène peut survenir, et ce, plus vite qu'on ne le croit. Les récits de personnes bloquées sous terre par des crues alors qu'elles ne s'y attendaient pas nous informent que la pire chose qui peut arriver est de se retrouver bloqué, mouillé et sans moyen de nous réchauffer.

Il a aussi été démontré que, lors d'un accident sous terre, le simple fait d'installer une victime dans un point chaud augmente considérablement ses chances de survie, sans compter l'impact sur son état psychologique.

Avec la mise au placard de l'acétylène, le spéléo ne dispose plus de moyen de chauffe avec lui et cela peut conduire à des situations délicates d'attente voire être source de sur-accident. Il est donc nécessaire de pallier cette situation en proposant un moyen de chauffe performant.

Ce dernier peut être pensé de façon à être mutualisé (point chaud) et adapté à la sortie (durée, classique, explo, initiation, nombre de participants...).

2 - LES MOYENS MIS EN ŒUVRE

Pour la réalisation de cette étude, plusieurs tests sont effectués pour observer les effets des divers moyens de chauffage et des différents types de protection.

La durée moyenne d'une séance de tests est de plus de douze heures, ce qui demande la réalisation de plusieurs séances pour obtenir une cohésion des résultats.

Ces tests sont tous réalisés dans la même cavité (la Combe aux Prêtres (21)), au même endroit, en reproduisant des circonstances similaires quel que soit le test (spéléologues mouillés jusqu'à la taille).

Dans cette partie, il s'agit de décrire les protocoles utilisés et la mise en œuvre des différents tests : tout d'abord pour les points chauds, puis pour les tortues.

Protocole et mise en œuvre des points chauds (PC)

Ces tests ont été réalisés dans le gouffre de La Combe aux Prêtres en Côte d'or le 26 août et le 22 septembre 2012. Deux séries de tests sont effectuées. Une immersion identique est pratiquée par chaque occupant du point chaud au début de chaque test lors des deux séries.

La confection et l'installation du point chaud

Le point chaud installé dans la cavité se situe à 20m de l'arrivée de la base des puits, dans l'amont de la rivière, sur une « plage » en hauteur à 80 cm de la rivière en rive droite, lors d'un débit moyen.

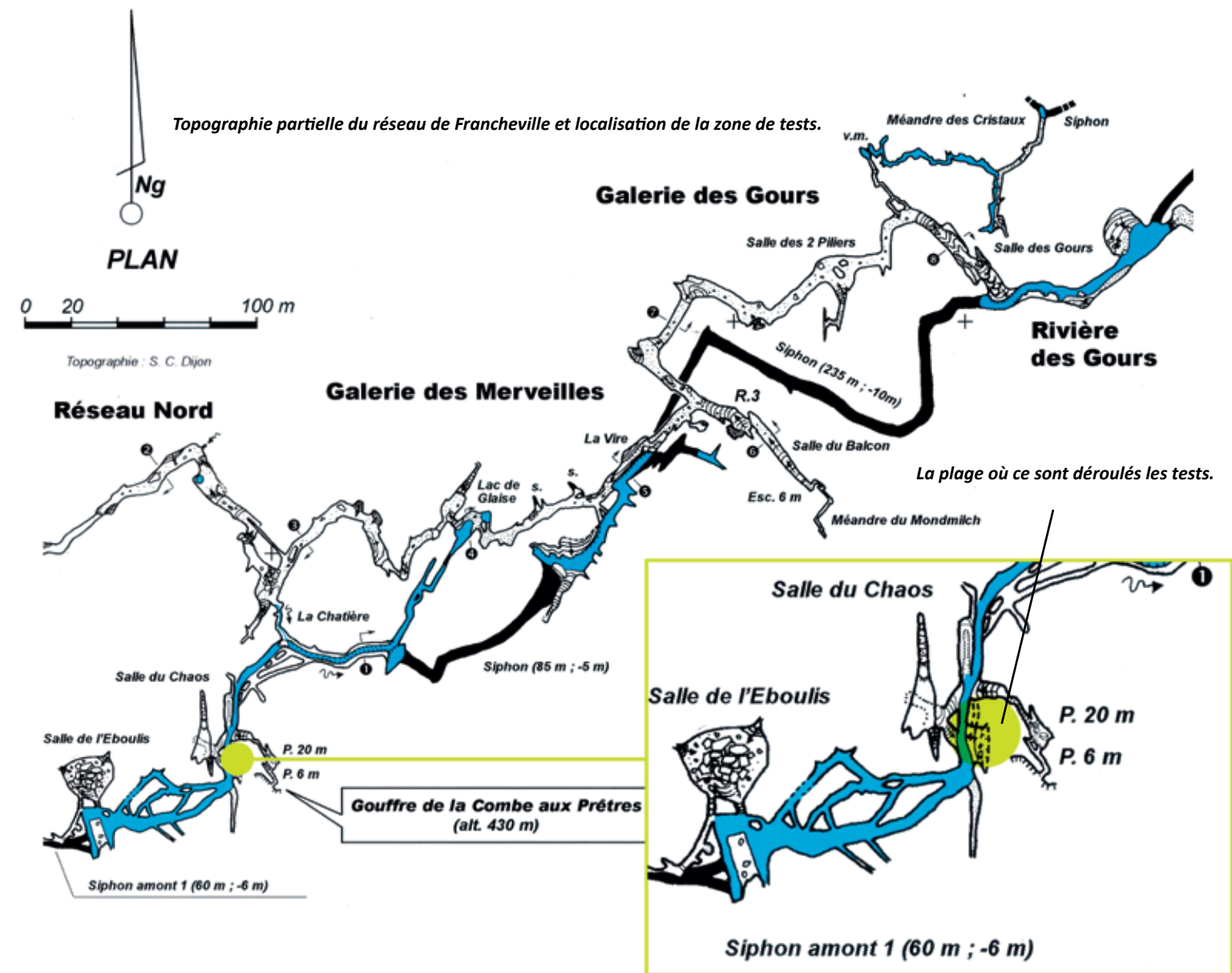
Il est conçu à l'aide de six couvertures de survie épaisses (neuves pour moitié, usagées pour l'autre moitié), de deux cordelettes pour l'ossature et de plusieurs pinces à linge et mousquetons pour fixer les couvertures sur cette ossature. Le volume de ce point chaud est de : longueur 2,0 m x largeur 1,0 m x hauteur 0,9 m, soit un volume de 1,80 m³ (Figure 4).

A l'intérieur, au sol, une simple couverture de survie épaisse recouvre la roche mère. Une cheminée d'évacuation de 9 cm de diamètre est réalisée en partie haute à l'aide d'un manchon PVC de façon fixe.

Pour chaque test, deux personnes (un homme et une femme pour le premier et deux hommes pour le second) se trouvent dans le PC à chaque extrémité de celui-ci, sans contact direct avec les sondes. Les sources de chaleur utilisées se trouvent toutes à 0,35 m de la sonde la plus proche et sont posées au sol.

La durée des tests

Pour le point de départ de chacun de ces tests, la température initiale est de 12 °C (plus ou moins 0,5°C), ce qui nécessite la remise en température du PC à 12°C après chaque test. Pour chaque test, une durée de trois heures est prévue lors de la première séance. Au vu du déroulement de ceux-ci, il apparaît que deux heures de test sont suffisantes pour arriver à une stabilisation de la température. La durée des tests est de deux heures pleines sans interruption ni ouverture du PC pour les deux séances.



Première série de tests / Les sondes utilisées

Pour ces tests, trois sondes de marque KIMO sont utilisées avec une acquisition toutes les trente secondes (Figure 4) :

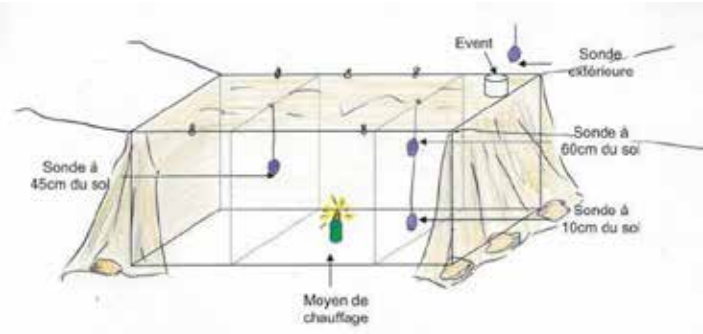
- Une sonde KH 200 mesurant la température et l'hygrométrie est disposée dans la cavité à environ deux mètres du point chaud et à 1,1 m du sol, soit à 2,0 m environ au-dessus du niveau de la rivière. Elle est en contact avec son support par la base.
- Une sonde KT 200 mesurant la température à l'intérieur du point chaud est fixée en hauteur par une cordelette située aux deux tiers de la longueur du PC, en son axe sur la largeur et à 10 cm du sol.
- Une sonde KH 200 mesurant la température et l'hygrométrie est située comme la KT 200 dans le PC mais à une hauteur de 60 cm.

Les tests réalisés / PC avec comme source de chaleur :

1. Celle des spéléologues se trouvant à l'intérieur durant trente minutes.

2. Spéléologues plus deux bougies type chauffe-plat du commerce allumées durant trente minutes.
3. Spéléologues plus deux mèches de la bougie trois mèches de marque MTDE neuve allumées pour une durée de 2h00.
4. Spéléologues plus une lampe à acétylène avec son générateur - la lampe à acétylène de marque Petzl Ariane - (configuration comme si retirée du casque mais chargée neuve, avec un fonctionnement normal) est allumée en début de test pour une durée de 2h00, et fixée sur un support (pierre) à l'aide d'une ficelle.
5. Spéléologues plus une bougie spéléo (BAM) fabriquée conformément au document de réalisation (annexe 1) avec 250 g de cire, allumée en début de test pour une durée de 2h00.

Pour l'ensemble de ces tests, trois mesures de débit d'air par fil chaud à l'intérieur du PC au niveau de la cheminée sont réalisées.



- Deuxième série de tests / Les sondes utilisées**
- Pour ces tests, cinq sondes de marque KIMO sont utilisées avec une acquisition toutes les trente secondes :
- Une sonde KH 200 mesurant la température et l’hygrométrie est disposée dans la cavité à environ deux mètres du point chaud et à 1,1 m du sol, soit à 2 m environ au-dessus du niveau de la rivière. Elle est en contact avec son support par sa base.
 - Une sonde KT 200 mesurant la température à l’intérieur du point chaud est fixée en hauteur par une cordelette située aux deux tiers de la longueur du PC, en son axe sur la largeur et à 10 cm du sol.
 - Une sonde KH 200 mesurant la température et l’hygrométrie est située comme la KT 200 dans le PC mais à une hauteur de 60 cm.
 - Une sonde KH 200 se situe à l’extérieur du point chaud à 5 cm de la cheminée.
 - Une sonde KT 200 mesurant la température à l’intérieur du PC est fixée en hauteur par une cordelette située à un tiers de la longueur du PC, en son axe sur la largeur et à 45 cm du sol

- Les tests réalisés / PC avec comme source de chaleur les spéléologues et :**
1. Une bougie MTDE neuve avec2 des 3 mèches allumées pour une durée de 2h00.
 - 2.La lampe à acétylène de marque Petzl Ariane (configuration comme si retirée du casque mais chargée neuve, avec un fonctionnement normal) allumée en début de test pour une durée de 2h00, et fixée sur un support (en l’occurrence, une pierre) à l’aide d’une ficelle.
 - 3.La bougie spéléo (BAM) fabriquée conformément au document de réalisation (voir annexe 1) avec 250g de cire allumée en début de test pour une durée de 2h00.

Protocole et mise en œuvre des tortues

Ces tests ont été réalisés dans le gouffre de La Combe aux Prêtres en Côte d’Or (le 26 décembre 2012). Niveau d’eau dans la rivière de la combe : rivière en décrue le débit à Val Suzon au 26/12 était d’environ 1,2m³/s.

Les tests ont lieu à 20 m de l’arrivée de la base des puits, dans l’amont de la rivière, sur une « plage » en hauteur à 80 cm de la rivière en rive droite. Quatre séries de tests sont réalisées.

Trois volontaires se prêtent aux différents tests, les trois spéléologues sont de sexe masculin et mouillés jusqu’à la taille (immersion avant chaque test).

- Le matériel utilisé**
- trois sondes de marque KIMO KT 200 mesurent la température avec deux sonde déportées
 - une sonde de marque KIMO KTR 300 mesure la température ambiante de la cavité
 - un thermomètre fil
 - une caméra thermique marque TESTO modèle 875
 - tortue réalisée à l’aide de couverture de survie épaisse
 - poncho spéléo réalisé par Annette Van Houtte (fabrication artisanale)

La confection des tortues
Elles sont réalisées à l’aide de couvertures de survie neuves et usagées, de façon conventionnelle avec une fermeture sur le devant maintenue par les mains, et pour le poncho spéléo, selon les recommandations d’usage.

Sur le sol (roche mère), un kit est disposé avec, à l’intérieur, un morceau d’isolant Armaflex (mousse isolante) de 22 mm d’épaisseur.

Une cheminée d’évacuation en partie haute est réalisée durant chaque test.

L’installation des sondes
Pour ces tests, trois sondes de marque KIMO sont utilisées avec une acquisition toutes les trente secondes :

- une sonde KTR 300 mesurant la température, est disposée dans la cavité à environ deux mètres des tests et à 1,1 m du sol et donc à environ 2 m au-dessus du niveau de la rivière en contact avec son support par sa base.
- trois sondes KT 200 mesurant la température avec six sondes déportées sur le corps de chaque cobaye soit une sur l’abdomen et une sur la poitrine. Toutes les sondes sont placées sur le corps directement (une photo de chaque cobaye est faite pour le placement des sondes). Le boîtier, qui lui aussi mesure la température, est fixé sur le casque des cobayes, du côté gauche.

- Les moyens de chauffe utilisés**
- lampe à acétylène et son générateur
 - bougie spéléo (BAM)
 - bougie du commerce MTDE
 - bougie chauffe-plat
 - chaufferette de corps longue durée (24h) GRABBER à usage unique
 - chaufferette de mains GRABBER
 - chaufferette de mains réutilisable VAUDE

3 -LE RESULTAT DES TESTS ET LEUR INTERPRETATION

Les effets des différents moyens de chauffe et de protection thermique.

En premier lieu, les résultats des tests en points chauds mettent en relief l’effet des différents moyens de chauffage sur l’élévation de la température, l’abaissement de l’hygrométrie, le rayonnement, la condensation, tout en pointant l’importance de la circulation de l’air.

En second lieu, les résultats des tests sur les tortues pointent les écarts en termes de déperdition calorifique en fonction des moyens de protection, de l’efficacité du confinement, et de l’environnement.

Analyse des résultats des Points Chauds

Le Tableau 1 ci-dessous synthétise les tests effectués en point chaud (PC).

Test n°	Moyen de chauffe	Commentaire	Durée (min)
1	Aucun moyen de chauffe	La chaleur est celle des spéléologues se trouvant à l’intérieur.	23
2	2 bougies chauffe-plat	Spéléologues plus deux bougies type chauffe-plat du commerce allumées.	37
3	2 mèches bougie MTDE	Spéléologues plus deux mèches de la bougie trois mèches de marque MTDE neuve allumées.	45
4	Lampe acétylène	Spéléologues plus une lampe à acétylène avec son générateur : la lampe à acétylène de marque Petzl Ariane (configuration comme si retirée du casque mais chargée neuve, avec un fonctionnement normal) est allumée en début de test, et fixée sur un support (pierre) à l’aide d’une ficelle.	26
5	Bougie améliorée maison (BAM)	Spéléologues plus une bougie spéléo fabriquée conformément au document de réalisation (annexe 1) avec 250 g de cire, allumée en début de test.	57
3b	2 mèches bougie MTDE	Deux mèches de la bougie trois mèches de marque MTDE neuve allumées.	122
4b	Lampe acétylène	La lampe à acétylène de marque Petzl Ariane (configuration comme si retirée du casque mais chargée neuve, avec un fonctionnement normal) allumée en début de test, et fixée sur un support (en l’occurrence, une pierre) à l’aide d’une ficelle.	134
5b	Bougie améliorée maison (BAM)	La bougie spéléo fabriquée conformément au document de réalisation (voir annexe 1) avec 250g de cire allumée en début de test.	124

Ecart en termes d'élévation de la température

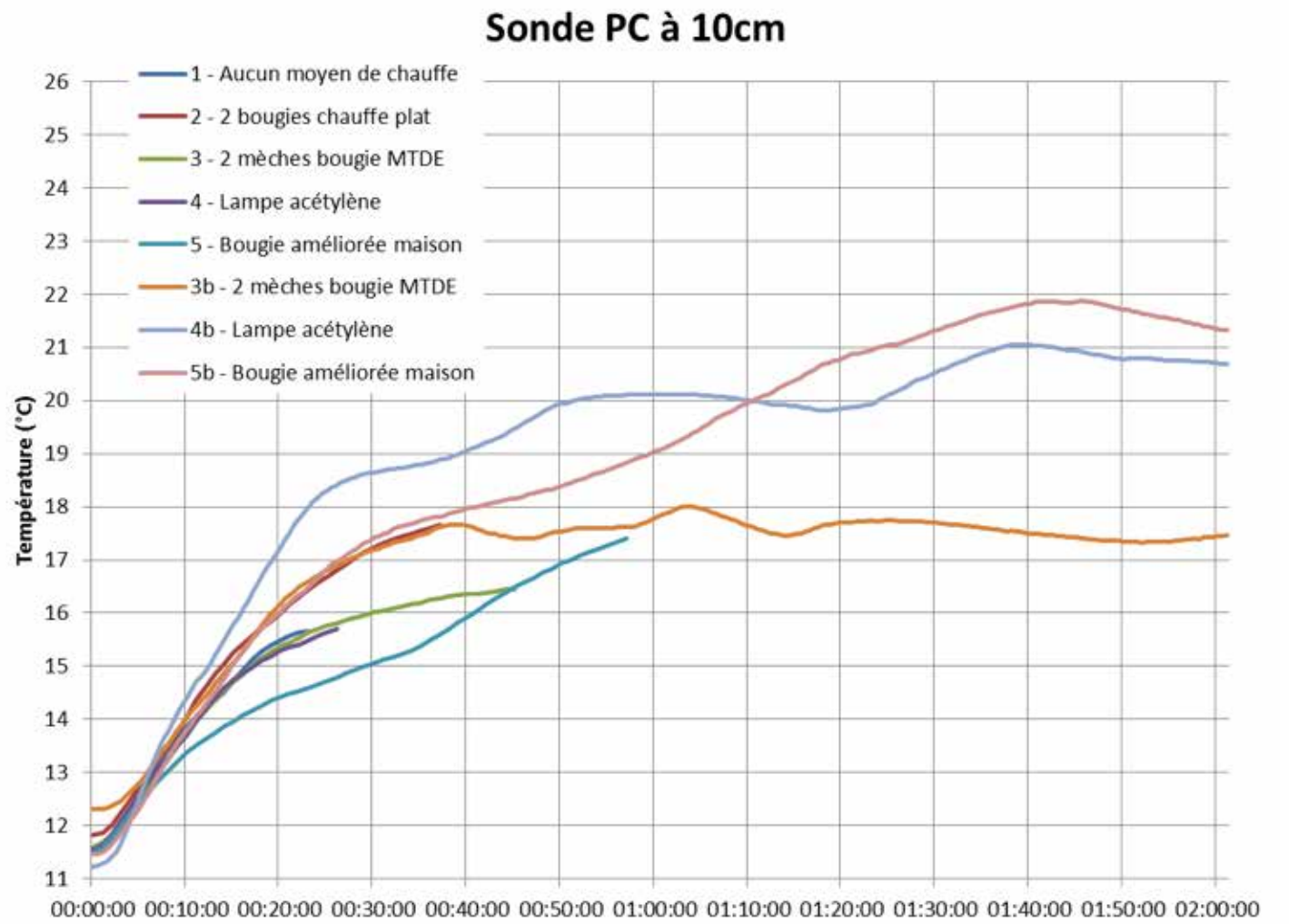
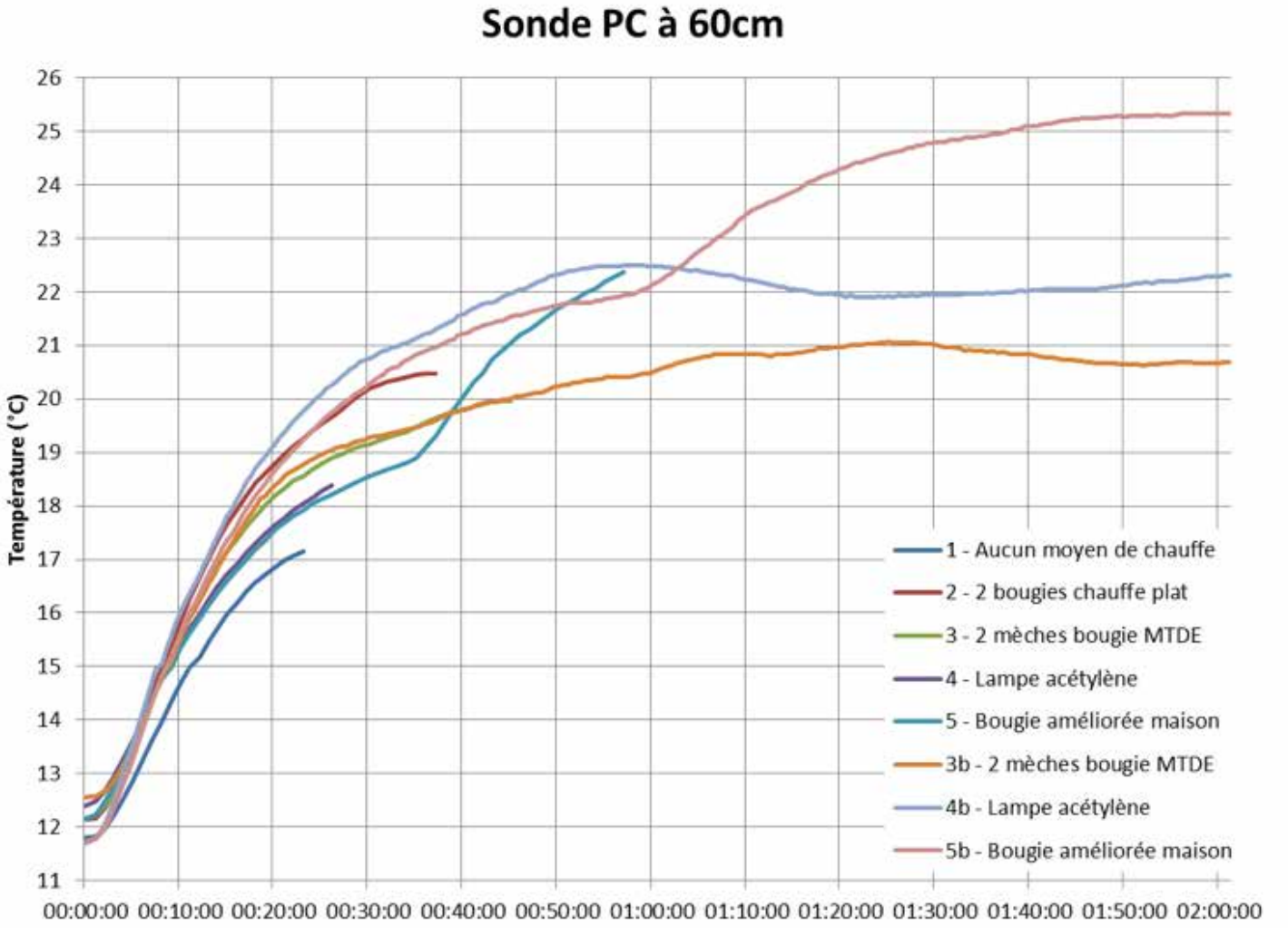
La Figure 5 et la Figure 6 présentent les évolutions de température pour la sonde PC à 60 cm et à 10 cm du sol.

- Les valeurs de référence sont celles obtenues avec deux personnes dans le point chaud, sans moyen de chauffage. Nous notons une légère augmentation de la température à l'intérieur de celui-ci, la chaleur étant apportée par les spéléologues.
- Avec deux bougies chauffe-plat, la différence est de trois degrés par rapport à l'absence de moyen de chauffage à 60cm. L'élévation de température étant proche de la stabilisation (évolution très lente), il est jugé pertinent de ne pas poursuivre le test plus longtemps (moins de 40min).
- La bougie MTDE suit une pénible progression puis une difficile stabilisation, avec toutefois des températures atteintes légèrement supérieures aux bougies chauffe-plat.
- Pour la lampe à acétylène, apparaît une deuxième progression régulière mais moins rapide que la première puis s'ensuit une stabilisation après un abaissement de la température dû au générateur à l'intérieur duquel une couche de chaux se dépose sur le carbure de calcium, ce qui diminue son rendement. La progression de la température est ensuite proportionnelle à la façon dont est géré le générateur (ouverture de pointeau, secousses). Lors des tests, nous ne cherchons pas l'économie, sans toutefois faire fonctionner le générateur de façon excessive. Les températures atteintes deviennent confortables, avec plus de 22°C.
- Pour la bougie améliorée maison, les courbes de progression sont beaucoup plus franches et la progression a lieu en deux temps, l'une d'une heure environ, ce qui permet une mise en température. Durant ce temps, la paraffine monte en température et se liquéfie sur plusieurs centimètres puis, une nouvelle progression aussi franche que la première due à cette montée en température (ce n'est plus seulement la mèche en carton qui brûle qui produit des calories, mais plutôt les vapeurs de paraffine) et enfin, une réelle stabilisation de la température (la seule pour ces trois tests) à plus de 25°C.

Si, avec la bougie MTDE (Figure 5), la température maximum atteinte est de 21°C pour une puissance de 100W, elle est de 22,5°C avec la lampe à acétylène pour une puissance de 120W et de 25,3°C avec la bougie améliorée maison pour 140W de puissance à 60 cm du sol et pour une température extérieure de 9,5°C. Les écarts de température sont bien liés à la puissance (en Watts) développée par chaque moyen de chauffage et les deux personnes dans le point chaud. Cette puissance est calculée grâce à la température et le pourcentage d'humidité relative (%RH) extérieur et intérieur ainsi que le taux de renouvellement d'air dans le PC (volume en m³/h).



Il est vrai que les écarts de température commencent à être importants à 60 cm du sol sur deux heures avec plus de 5°C. Si l'on observe les températures à une hauteur de 10 cm du sol (Figure 6) (où vous êtes couchés dans le PC), celles-ci montrent que la température atteint 17,9°C avec la bougie MTDE, 20,7°C avec la lampe à acétylène et 21,4°C avec la bougie spéléo. Ainsi, si l'écart entre BAM et acéto n'est peut-être pas significatif à 10 cm du sol (0,7°C), il est bien marqué à 60 cm du sol (2,8°C) et l'écart devient plus significatif encore avec la bougie MTDE avec près de 4°C.



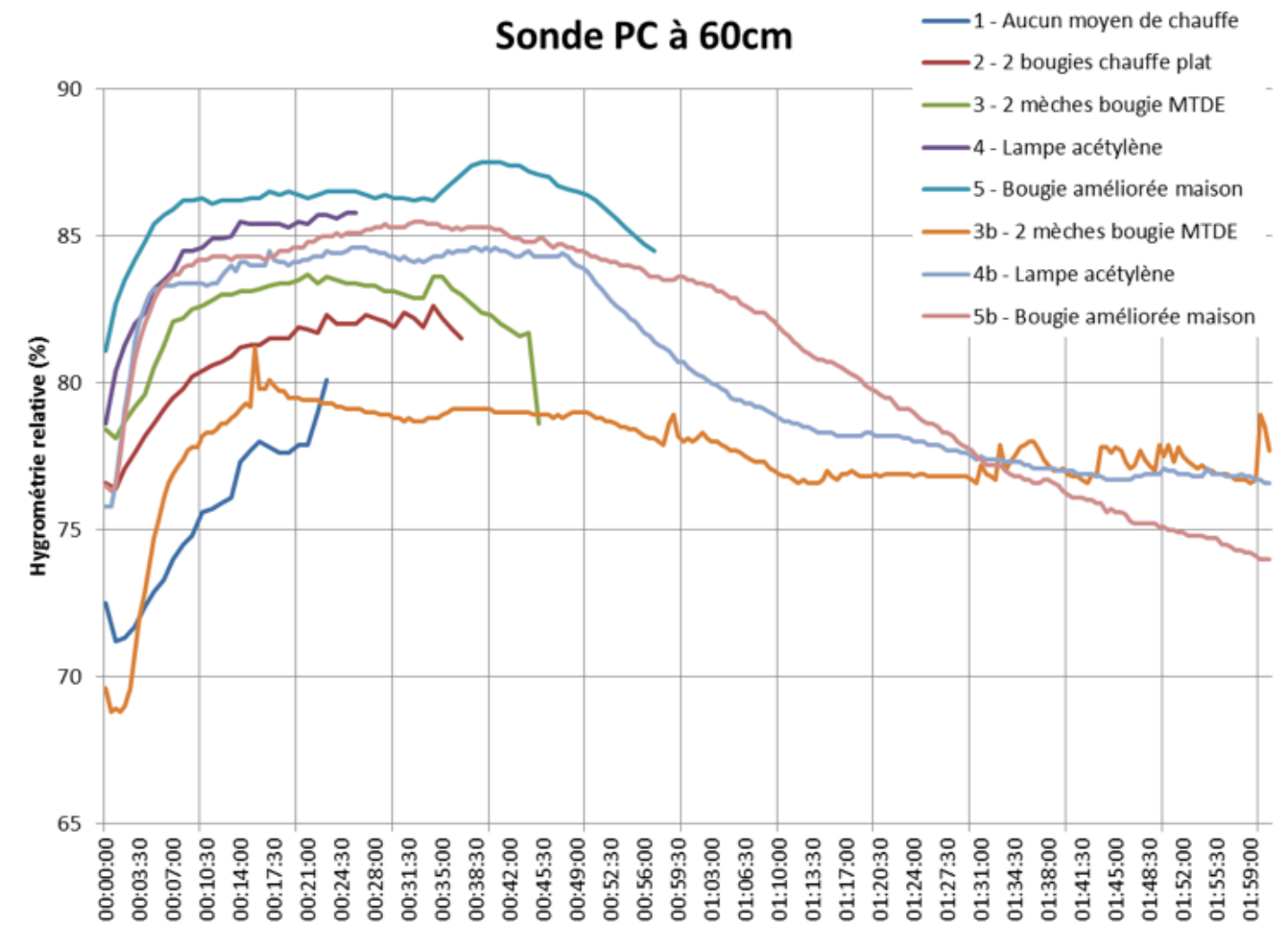


Figure 7 : évolution d'hygrométrie (sur les deux séances de tests), dans le PC à 60 cm du sol.

Ecarts en termes d'abaissement de l'hygrométrie

La Figure 7 présente l'évolution d'hygrométrie dans le PC à 60 cm du sol.

%RH = pourcentage d'humidité relative. L'humidité relative de l'air (ou degré d'hygrométrie ou degré hygrométrique) correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturée (ou tension de vapeur) à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions.

On peut voir ici que sur l'ensemble des mesures d'hygrométrie relevées lors des tests, 2 courbes la 4b et la 5b montrent un abaissement de l'hygrométrie et que sur ses deux courbes, seule la 5b baisse significativement. Mais pour mieux comprendre et analyser ces données, nous sommes obligés de faire une relation directe entre le taux d'hygrométrie et la température dans le point chaud et ce à deux hauteurs importantes : 60cm du sol et 10cm du sol. Quand nous nous trouvons dans un point chaud nous sommes généralement assis ou allongés. Ce qui fait que la

partie haute de notre corps est à environ 60 à 80 cm du sol alors que nos jambes sont, elles, au sol d'où l'intérêt de prendre comme référence ces deux hauteurs. Et ce que nous allons pouvoir mettre en évidence plus bas, est que cette corrélation est primordiale pour bien comprendre le phénomène et sa répercussion sur les occupants du point chaud.

Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie

Que ce soit sans moyen de chauffage (Figure 8) ou avec deux bougies chauffe-plat (Figure 9) le taux d'hygrométrie relative augmente de façon proportionnelle à celle de la température sur des tests courts et à 60cm du sol, par contre la température à 10cm du sol reste excessivement basse et n'est donc pas confortable.

A cause de cette température basse à 10 cm du sol avec un taux d'hygrométrie important, nous restons mouillés et nous avons froid (voir : le changement d'état page : 41). L'énergie demandée à notre corps pour évaporer l'eau de nos vêtements et la température basse fait qu'il est possible de rentrer rapidement en hypothermie.

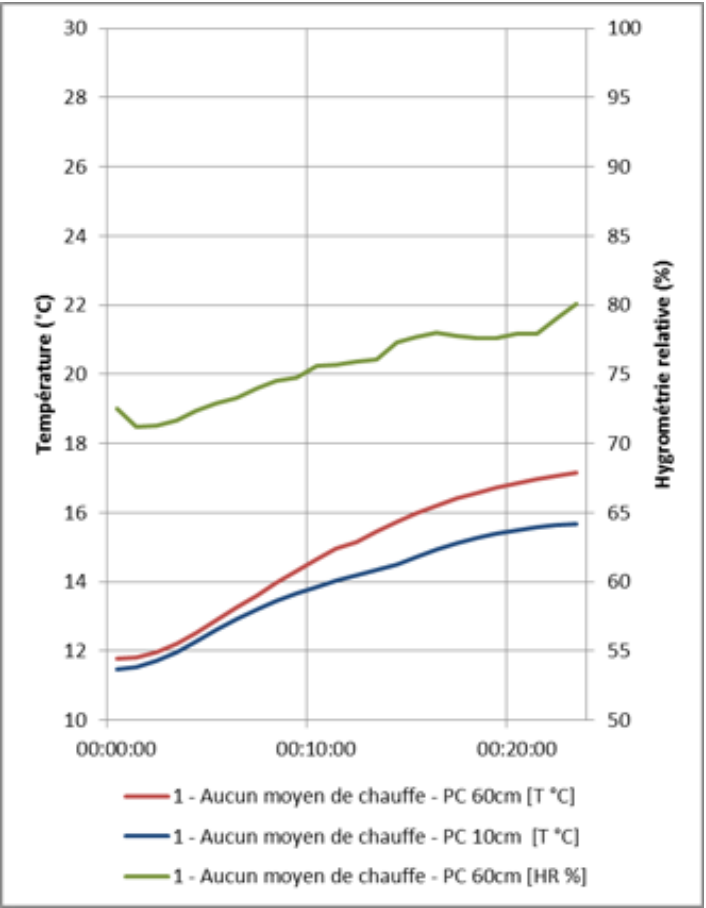


Figure 8 : Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie (Aucun moyen de chauffe, sonde PC à 60 cm et 10 cm)

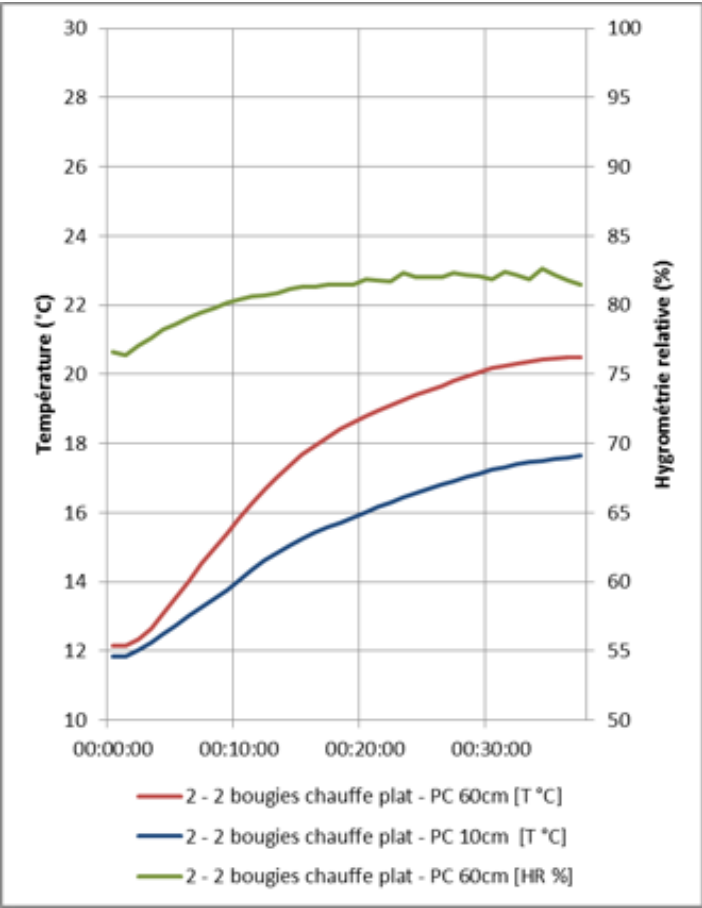


Figure 9 : Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie (2 bougies chauffe-plat, sonde PC à 60 cm et 10 cm)

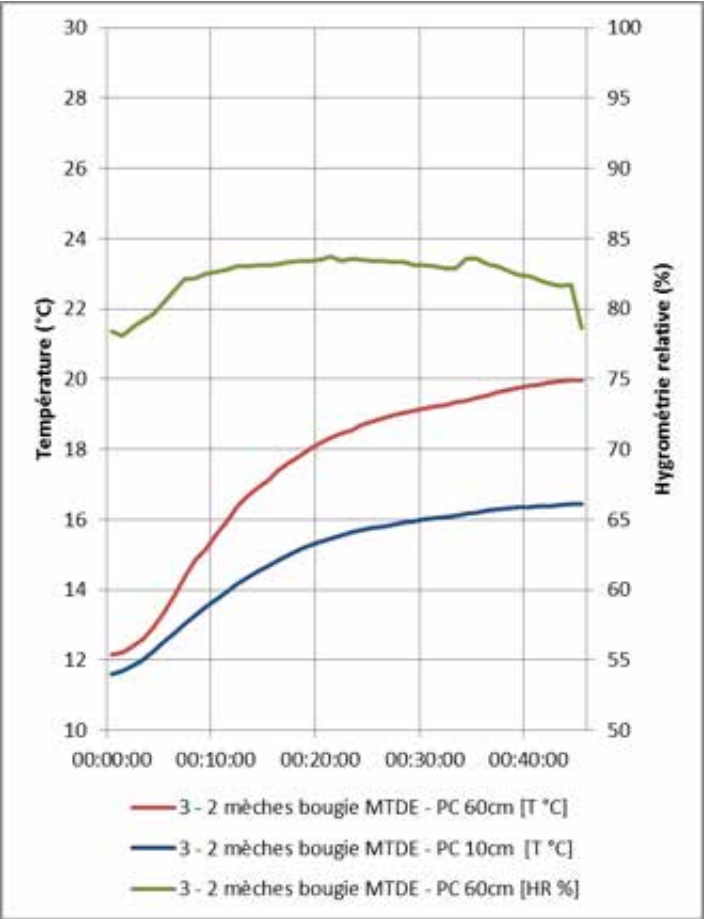


Figure 10 : Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie (bougie MTDE 2 mèches, sonde PC à 60 cm et 10 cm, test court)

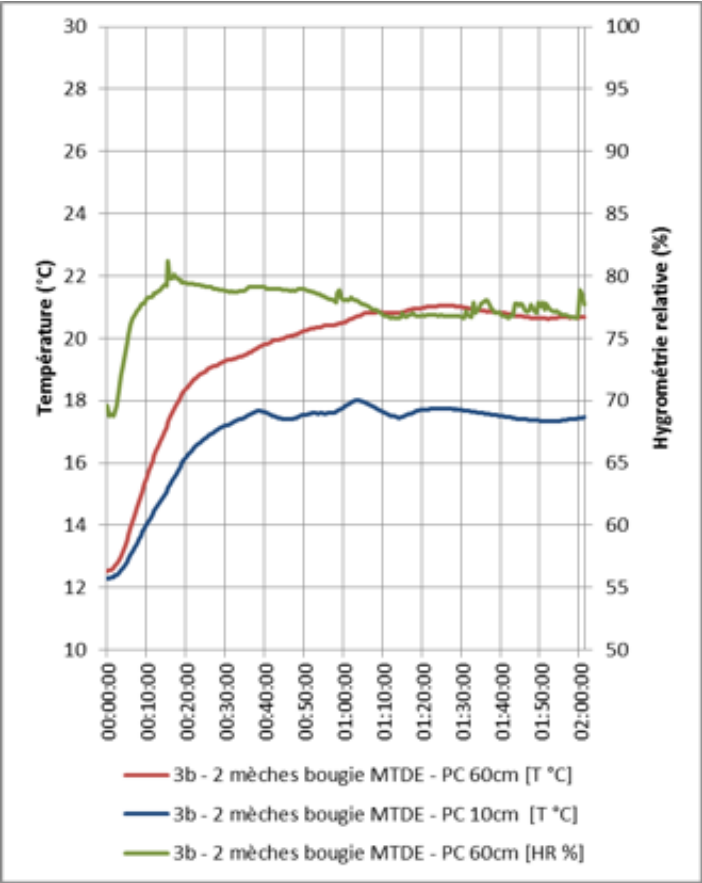


Figure 11 : Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie (bougie MTDE 2 mèches, sonde PC à 60 cm et 10 cm, test long)



Positionnement de la sonde de température et d'hygrométrie au dessus de l'évent.

Si, avec la bougie MTDE, nous observons une augmentation modérée de la chaleur au sein du PC, elle peut suffire à ne pas avoir trop froid. Avant les tests, nous nous sommes mouillés jusqu'en haut des cuisses et nous avons un peu froid aux jambes, ce qui se fait ressentir lorsque nous ressortons du PC après les deux heures de tests, en partie pour les même raisons que celles expliquées page précédente. Quelques minutes sont nécessaires pour dissiper l'engourdissement. Pour mieux comprendre il suffit juste de regarder l'écart de température entre les sondes placées à 60cm et à 10cm du sol. De plus, le %RH, malgré quelques fluctuations, ne diminue pas : cela indique que la température dans le PC ne monte pas suffisamment haut pour dissiper une plus grande quantité de vapeur d'eau.

Par contre, avec la lampe à acétylène, nous n'avons pas la même sensation, la température au niveau du sol étant plus élevée, et le %RH chutant au bout d'une heure avec un écart de près de 10% entre la mesure maxi et mini. Ce qui signifie qu'avec la lampe à acétylène, la température s'élève suffisamment afin de permettre une plus grande élimination de vapeur d'eau. Nous avons commencé à sécher significativement pendant ce test, et nous n'avons pas subi le même engourdissement par le froid. On voit bien sur les tests courts et longs, que la mise en température et l'évolution du taux d'hygrométrie sont presque identiques.

Avec la bougie améliorée maison, nous observons des similitudes avec la lampe à acétylène si ce n'est que le %RH chute de façon beaucoup plus marquée, de par un meilleur assèchement de l'air et donc des spéléologues.

Pour la lampe à acétylène, le début d'abaissement du %RH commence au bout de 45 min alors que pour la BAM, il débute au bout de seulement 35 min, ce qui aurait pour conséquence de permettre de nous sécher presque totalement rapidement.

On note aussi l'importance d'une bonne ventilation du point chaud car s'il y a une baisse du %RH, c'est aussi lié à la circulation de l'air produite par l'élévation de la température interne du PC. En son absence, serait observé un effet « cocote minute » avec une forte condensation sur les parois. Dans les deux derniers tests (acéto et BAM), le rapport ventilation/chauffage est bon car non seulement le %RH baisse mais la diminution de la condensation sur les parois est notable, jusqu'à sa disparition partielle.

Comme pour la lampe à acétylène, avec la BAM, on constate aussi sur les tests courts et longs, que la mise en température et l'évolution du taux d'hygrométrie sont presque identiques.

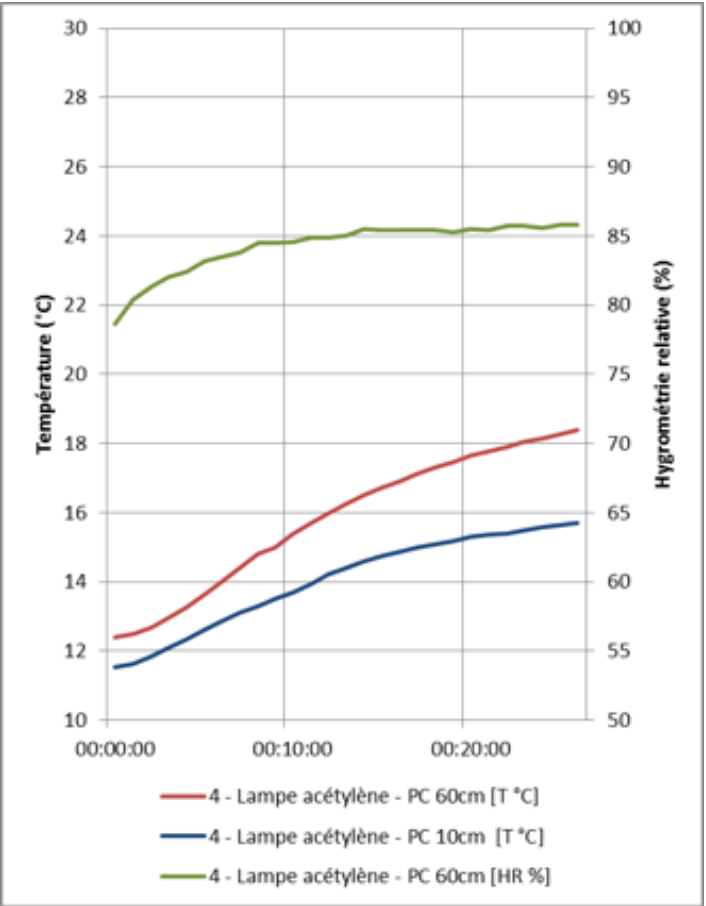


Figure 12 : Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie (Lampe acétylène, sonde PC à 60 cm et 10 cm, test court)

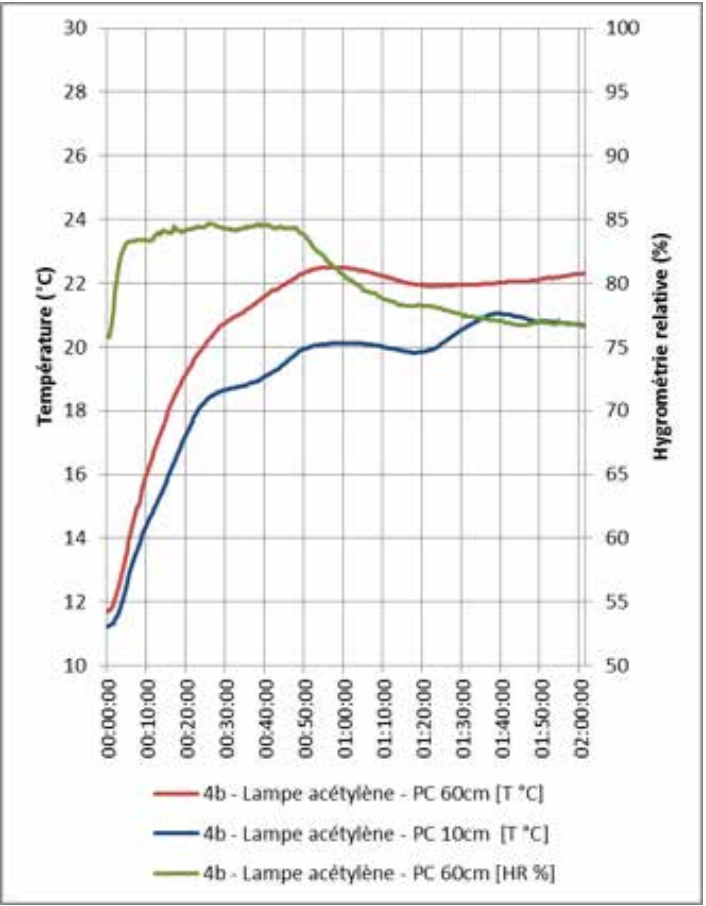


Figure 13 : Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie (Lampe acétylène, sonde PC à 60 cm et 10 cm, test long)

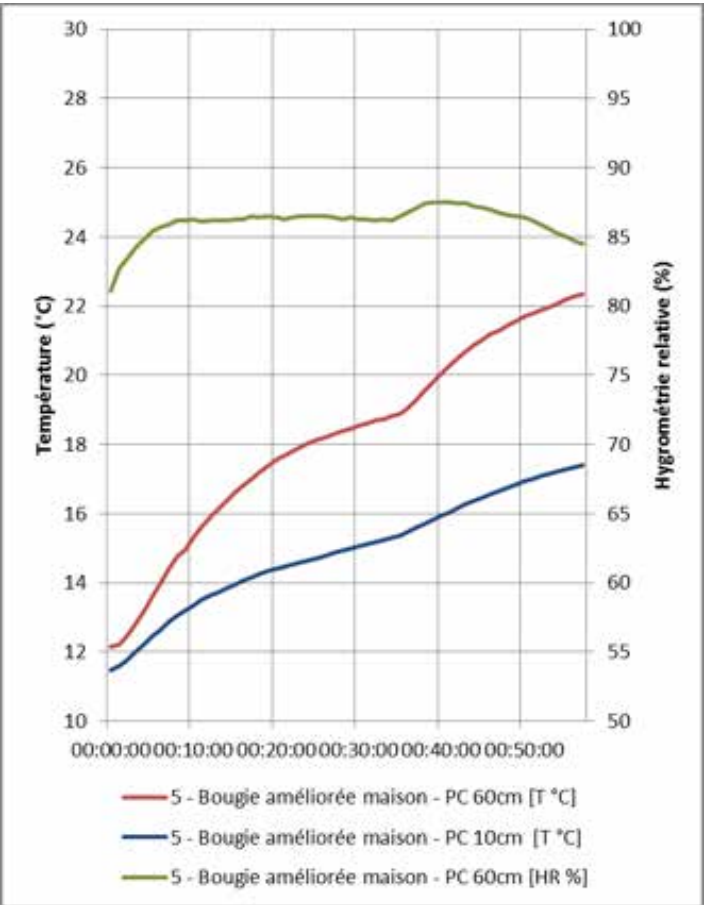


Figure 14 : Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie (Bougie améliorée maison, sonde PC à 60 cm et 10 cm, test court)

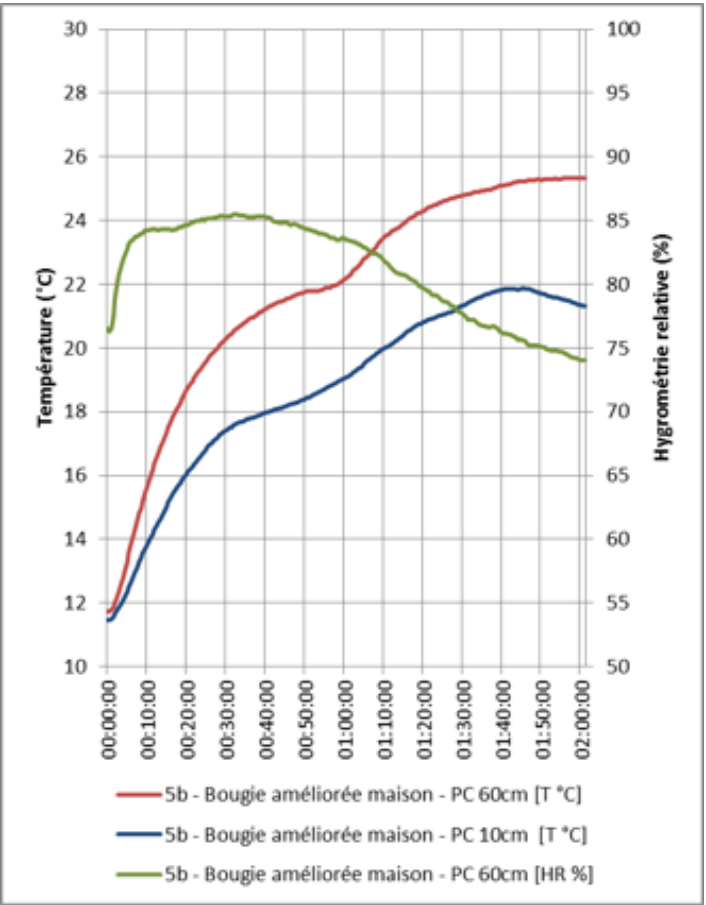


Figure 15 : Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie (Bougie améliorée maison, sonde PC à 60 cm et 10 cm, test long)

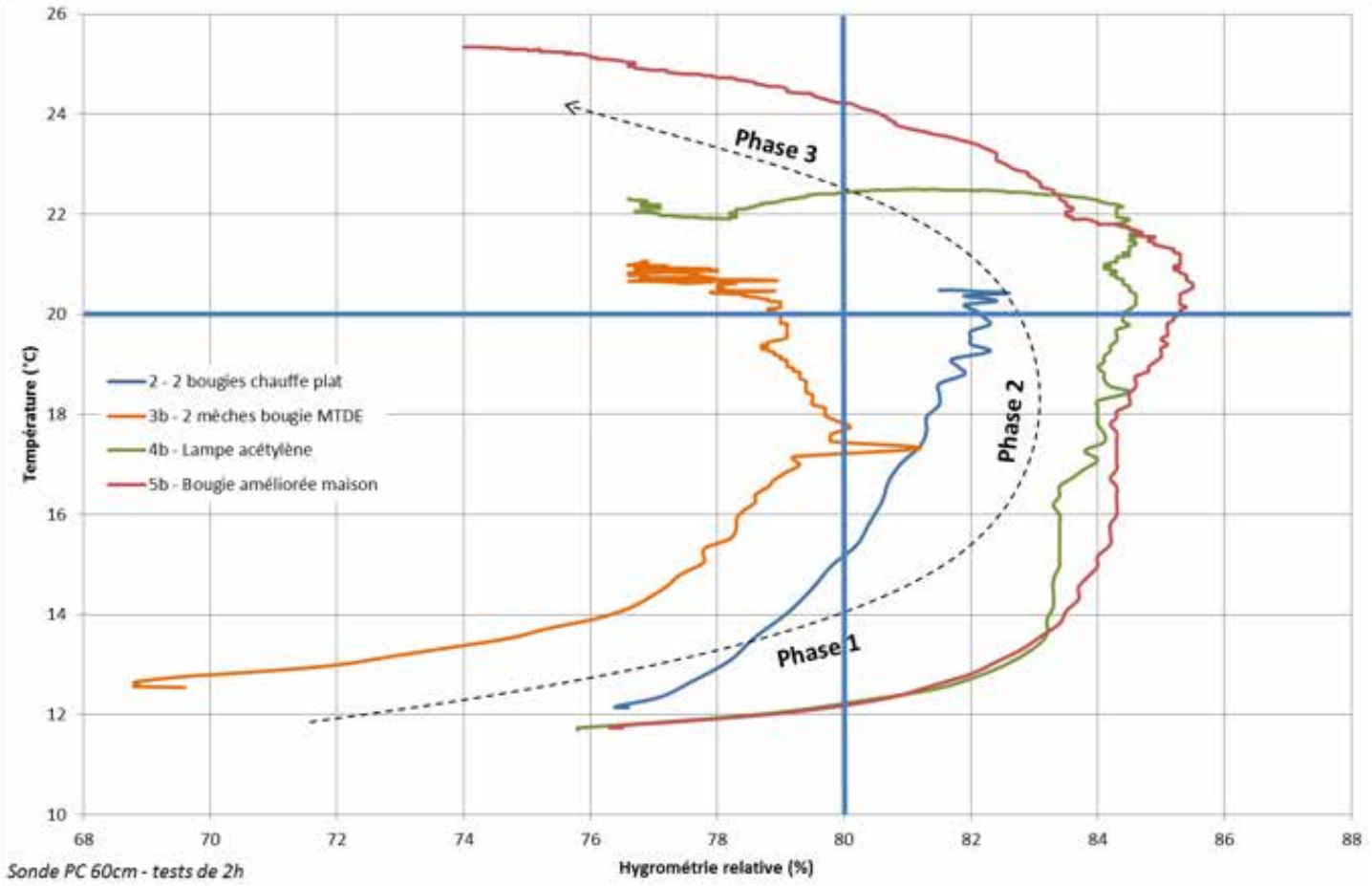


Figure 16 : Evolutions comparées de la température et de l'hygrométrie pour les tests en point chaud (sonde à 60 cm)

La comparaison de l'évolution de la température et de l'hygrométrie en s'affranchissant de l'évolution temporelle permet d'analyser leur évolution conjointe (Figure 16). On distingue ainsi trois phases :

1. Augmentation importante et rapide de l'hygrométrie pour une faible augmentation de température
2. Stabilisation de l'hygrométrie à des valeurs élevées, et augmentation importante de la température.
3. Selon la performance du moyen de chauffe : forte diminution de l'hygrométrie, stabilisation ou légère augmentation de la température.

Sur cette base, d'après les résultats obtenus et les sensations des opérateurs, on peut ainsi tenter de définir des couples de domaines température-hygrométrie.

		Hygrométrie relative (%)		
		<50%	50-80%	>80%
Température (°C)	>20°C	Confort avec risque de déshydratation progressive	Confort optimal : thermique et hydrique (séchage)	Confort thermique mais pas de séchage
	10-20°C	-	Conditions acceptables de manière transitoire	
	<10°C	Trop froid		

Tableau 2 : essai de définition de domaines de température-hygrométrie

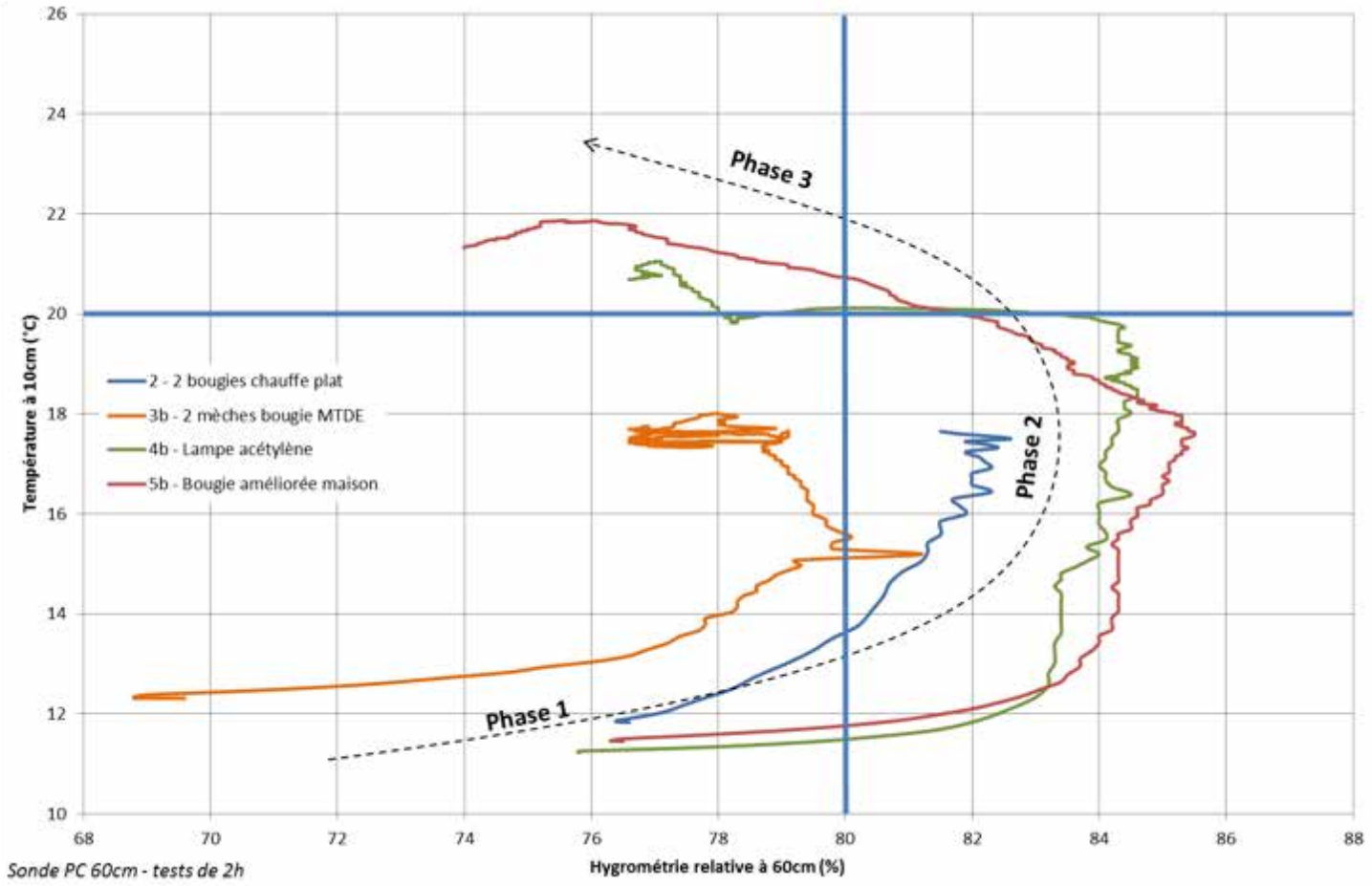


Figure 17 : Evolutions comparées de la température à 10 cm et de l'hygrométrie à 60 cm pour les tests en point chaud

Il convient toutefois d'être prudent sur l'utilisation de ce tableau, car lors d'attentes, les spéléologues sont le plus souvent allongés ou ont les membres inférieurs à la base du PC. Les températures à la base du point chaud sont bien plus faibles et apportent un manque de confort non négligeable. Ne disposant pas de mesure d'hygrométrie à 10 cm, nous considérerons celle-ci homogène dans le point chaud, afin de la comparer à la température mesurée à 10 cm (Figure 17).

Dans ce cas on constate aisément que les conditions confortables ne sont plus réunies avec la bougie MTDE, et le sont tout juste pour l'acétylène. Cela est directement lié à la puissance du mode de chauffage choisi : un chauffage performant pourra assurer des températures confortables dans l'ensemble du volume du point chaud, alors qu'un moyen de chauffage plus modeste ne chauffera que la partie supérieure du point chaud (ce que font péniblement des bougies chauffe-plat).

Pour les tests plus courts il n'a été possible d'observer que la phase 1, voire la phase 2, mais rarement la phase 3, pourtant la plus pertinente en cas d'attente prolongée.

Ecarts en termes de rayonnement

Par ailleurs, avec la bougie MTDE, aucun effet de rayonnement n'est ressenti, celui-ci étant trop faible. A contrario, avec la lampe à acétylène et la bougie spéléo, une forte sensation de chaleur est ressentie dès leur allumage, due au rayonnement. Dès le début, la couleur blanche combinée au réflecteur de la lampe à acétylène

permet cet effet alors que quelques minutes sont nécessaires pour connaître des effets similaires avec la BAM. Le rayonnement thermique est un transfert d'énergie sous forme d'ondes (ici infrarouge). Il peut être observé, par exemple, lorsque l'on est dehors et que le soleil est caché par des nuages. Apparaît alors un ressenti de froid bien que la température ambiante ne bouge pas.

Effet des différents moyens de chauffe sur la condensation

- Bougie MTDE : on constate la présence de condensation sur les parois du PC.

- Lampe à acétylène : idem si ce n'est le besoin de martyriser son générateur afin de décoller la chaux des morceaux de carbure de calcium, ce qui nécessite de devoir rallumer la flamme de temps en temps lors de cette manipulation.

- Bougie spéléo : du fait de la diminution rapide du %RH à l'intérieur du PC, une grande partie de la condensation sur les parois disparaît, et l'on constate que la partie de la couverture de survie épaisse qui sert de toit au PC chauffe (pas au point de fondre bien sûr). Dans le cas d'un PC de forme différente, il faut veiller à ce que le moyen de chauffage soit suffisamment éloigné. Par ailleurs, les précautions doivent être prises pour éteindre la bougie sans se brûler, en évitant de faire couler de la cire chaude sur les doigts.

De l'importance de la circulation de l'air

Une petite cheminée en PVC d'un diamètre de 9 cm est confectionnée dans l'un des angles du PC reproduisant celle que l'on laisserait en temps normal. En effet, que ce soit en réalisant une tortue ou un point chaud, il est nécessaire de prévoir une aération en partie haute pour évacuer les gaz de combustion du moyen de chauffage, mais aussi pour recycler l'air vicié par la respiration des occupants du point chaud. Un être humain moyen consomme près de 6 litres d'air par minute au repos et peut consommer plus de 120 litres par minute lors d'efforts physiques intenses. Par conséquent, une personne qui bouge plus ou moins pendant une heure d'attente dans un PC consomme 0,36 m³/h. Ceci ne tient pas compte la « consommation » de l'air par le moyen de chauffage.

Grâce à la réalisation de cette cheminée, la vitesse moyenne mesurée par un anémomètre à fil chaud (sur bougie MTDE, acéto et BAM) est de 0,42 m³/s. Avec le diamètre de la cheminée, on peut calculer un volume d'air échangé (surface x vitesse par seconde x 3600 pour obtenir un volume/h), ce qui donne un volume de renouvellement de 9,5 m³/h. Le volume d'air total du point chaud (soit 1,9 m³) est donc renouvelé 5 fois par heure environ. Dans un habitat, la préconisation pour l'entrée d'air est de 30m³/h par pièce principale si inférieure à 18 m². Le code du travail demande 25m³/h d'air neuf par personne quelle que soit la taille de la pièce, ces taux de renouvellement permettent

de ne ressentir aucune gêne liée au CO₂. Le cumul d'air consommé par les occupants du point chaud (ou d'une tortue) en plus du moyen de chauffe doit amener à un taux de renouvellement d'air neuf suffisant : celui-ci sera déterminé par le nombre d'occupants dans le point chaud et du ou des moyens de chauffage mis en œuvre en gardant un minimum de renouvellement égal à 3 fois le volume du point chaud par heure.

Dans ce cas, le taux de renouvellement est suffisant car des tests ont montré qu'il permet d'évacuer à la fois les gaz de combustion du moyen de chauffage et le gaz carbonique produit par les occupants du point chaud.

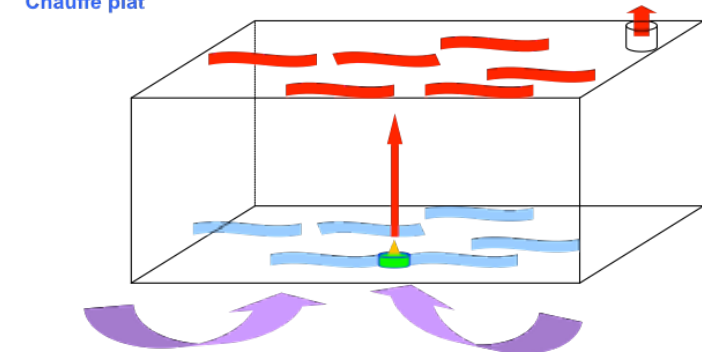
Plusieurs tests avec mesure de l'oxygène ont été réalisés par le SSF 68 dans un point chaud avec deux personnes et une lampe à acétylène comme moyen de chauffage. Les résultats obtenus montrent que le taux de O₂ reste stable avec une bonne oxygénation de 20,4% en moyenne (le taux moyen de O₂ contenu dans l'air est de 20,93%) mais seule une étude plus poussée prenant en compte un plus large spectre de gaz pourrait donner plus d'informations voire écarter certains moyens de chauffe. Dans un paragraphe ultérieur, une étude théorique sur la production des gaz par les principaux moyens de chauffage sera présentée (cf. « La toxicité des gaz dégagés »). La combustion et la respiration produisent plusieurs gaz. Certains ont des effets sur l'organisme (maux de tête, fatigue, essoufflement,

souffle court etc...), d'autres ou les mêmes à plus faible dose peuvent avoir des effets plus pervers comme d'agir sur l'état psychologique et de générer une dépression passagère. Pour les cas les plus graves, surtout lors de l'utilisation de réchaud à gaz couplée à une ventilation limitée ou absente, un décès par asphyxie peut survenir.

Les fuites du gaz acétylène doivent être prises en compte, car en petite concentration, elles peuvent provoquer vertiges, nausées, une incoordination motrice puis éventuellement une perte de connaissance. En utilisation normale, l'odeur de l'acétylène en cavité a toujours été présente de façon limitée. Par contre, lorsque l'on se mouche, on constate que des particules noires issues d'une mauvaise combustion (bec qui fume) ont été respirées. Toutefois, c'est lorsque la flamme est éteinte, en particulier lors du retour en voiture à la maison, après l'exploration, que le pourcentage de gaz devient important, le générateur continuant de produire de l'acétylène en milieu confiné (dans le kit), d'autant plus lorsque les fenêtres de la voiture sont fermées.

La rapidité d'apparition des signes cliniques est fonction de la dose inhalée : un mélange contenant 50 % d'acétylène peut être toléré moins de 5 minutes sans trouble de conscience et un mélange à 10 % une demi-heure environ. Mais ce qui est valable pour l'acétylène l'est aussi pour les autres gaz car chaque moyen de chauffage par combustion émet ses propres rejets, plus ou moins toxiques selon le produit et la dose.

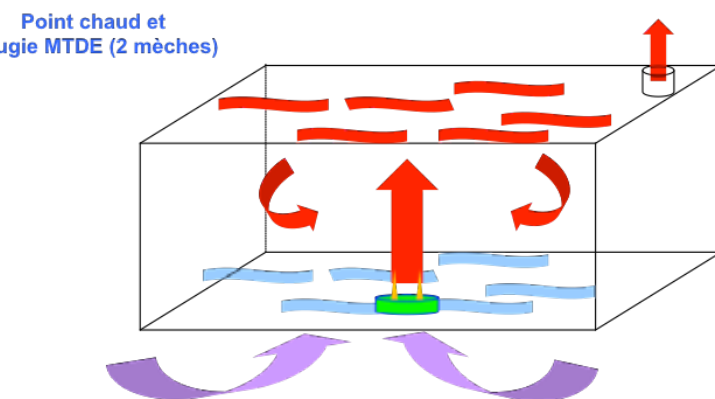
Point chaud et
Chauffe plat



Légende
 courant d'air très froid
 nappe froide
 nappe chaude

Figure 18 : Effet de la bougie chauffe-plat dans le point chaud

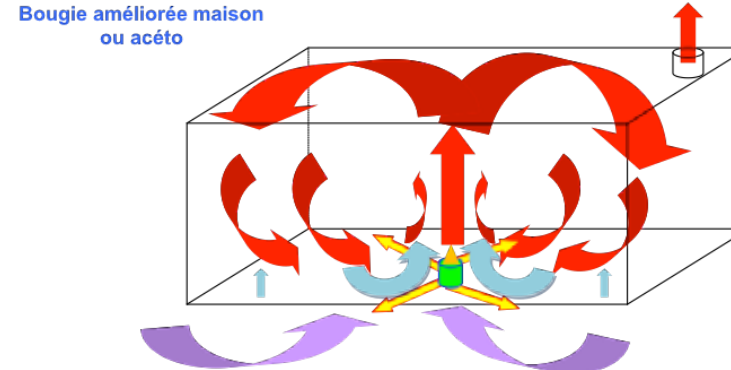
Point chaud et
Bougie MTDE (2 mèches)



Légende
 courant d'air chaud
 courant d'air très froid
 nappe froide
 nappe chaude

Figure 19 : Effet de la bougie MTDE (2 mèches) dans le point chaud

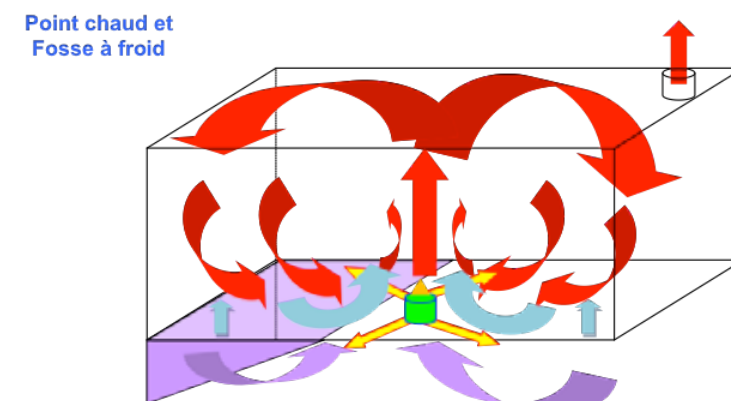
Point chaud avec
Bougie améliorée maison
ou acéto



Légende
 courant d'air chaud
 courant d'air froid
 courant d'air très froid
 rayonnement bougie

Figure 20 : Effet de la bougie améliorée maison (BAM) ou de l'acétylène dans le point chaud

Point chaud et
Fosse à froid



Légende
 courant d'air chaud
 courant d'air froid
 courant d'air très froid
 rayonnement bougie
 fosse à froid

Figure 21 : Effet de la fosse à froid dans le point chaud



Prise de température par thermomètre à fil. Les sondes de température et d'hygrométrie sont visibles dans le point chaud : elles sont éloignées de la source de chaleur pour éviter toute fausse mesure.

Types de fonctionnements caractéristiques des points chauds

Nous allons voir sur les différentes figures qui précèdent (cf page 24-25) l’impact direct des moyens de chauffage sur la diffusion de l’air dans les points chauds.

La flamme d’une bougie chauffe-plat (Figure 18) ne dégage pas suffisamment de chaleur pour produire un effet sur la chaleur ambiante et sa diffusion dans le point chaud. Les fortes déperditions calorifiques des couvertures de survie utilisées pour la réalisation du point chaud, l’absence d’isolation thermique et le renouvellement d’air absorbent le peu de chaleur produit par ce moyen de chauffage.

Contrairement aux moyens de chauffage puissants, le débit de production d’air chaud est ici insuffisant, comparativement au débit d’air sortant du point chaud. De plus, ce manque de chauffage important ne permet qu’une répartition de la chaleur par diffusion thermique. Il en résulte qu’une part minime d’air chaud reste dans le point chaud provoquant une légère élévation de température et ce uniquement en partie haute du PC.

Avec les deux mèches d’une bougie MTDE (Figure 19), la chaleur dégagée par celle-ci est un petit peu plus forte mais toujours insuffisante pour compenser les pertes calorifiques du PC. Dans ce cas, en plus d’une répartition par diffusion thermique, une légère convection peut apparaître, entraînant de légers courants de brassage de l’air du PC. On note une légère augmentation de la température, mais subsistent une nappe d’air froid en bas et une nappe d’air chaud en haut. Le mouvement d’air chaud n’est pas suffisant pour obtenir une bonne répartition de la chaleur.

Un moyen de chauffage plus puissant compense les déperditions calorifiques et produit, grâce à sa chaleur, un effet de cheminée : l’air chaud s’élève et en se refroidissant, redescend. En s’élevant, il attire derrière lui l’air froid qui se réchauffe à son tour, puis monte et redescend comme sur la Figure 20. Il s’agit d’un moyen de chauffage par diffusion thermique et par convection puissante, ce que ne permet pas la bougie MTDE.

Le fait de disposer d’un moyen de chauffage puissant permet de créer un autre phénomène, le rayonnement, issu soit de la flamme et de son déflecteur pour l’acéto, soit de la flamme et du contenant pour la BAM.

Le rayonnement signifie qu’à température égale, s’il n’y a pas de soleil, vous avez froid et que si le soleil apparaît, vous avez chaud.

Afin d’optimiser au maximum son point chaud, on doit tenir compte du phénomène décrit précédemment selon lequel l’air chaud monte et l’air froid descend.

Comme l’indiquent les Figure 18 à Figure 20, persistent une nappe chaude et une nappe froide. L’air le plus froid reste en partie basse et l’air chaud en partie supérieure.

Afin d’augmenter considérablement son confort, éviter l’engourdissement et augmenter la température de son point chaud, la réalisation d’une fosse à froid est nécessaire (Figure 21). Pour cela, il faut utiliser le relief ou creuser un trou sur 1/3 de la surface du point chaud et d’une profondeur de vingt à trente centimètres de profondeur, dans la mesure du possible à l’intérieur du point chaud et les couvertures de survie doivent joindre le sol sur le pourtour de la fosse à froid et du PC. On conservera toutefois une petite ouverture au droit du point le plus bas, dix à quinze centimètres au-dessus de la fosse à froid pour le renouvellement d’air.

Précisions sur l’extinction des moyens de chauffage

Si l’on décide de déplacer le PC ou de repartir :
- la bougie MTDE peut être éteinte facilement en soufflant dessus, puis une ou deux minutes suffiront pour pouvoir la déplacer, car la faible quantité de cire en fusion ne met pas très longtemps à se figer.

- pour la lampe à acétylène, si elle est accrochée sur un casque, il n’est pas forcément nécessaire de l’éteindre. Mais, si elle doit être rangée dans un kit, son réflecteur devra être manié avec précaution, car il est relativement chaud et met une ou deux minutes à refroidir.

- pour la bougie spéléo, il n’est pas question de l’éteindre en soufflant dessus, car l’importance de la flamme oblige à souffler fortement et la cire en fusion risque d’être projetée et provoque la dispersion de beaucoup de fumée. Le couvercle doit donc être utilisé pour l’extinction de la flamme et pour contenir la fumée produite suite à l’extinction de la flamme, en prenant soin, si l’on veut la déplacer de suite, de ne pas se brûler avec le contenant. Puis, pour la ranger, il faut attendre que la cire de celle-ci soit totalement figée. Lors des tests, après deux heures d’utilisation de la bougie, le temps de démonter le PC est nécessaire avant de la ranger soit cinq à dix minutes.

Analyse des résultats des Tortues (TT)

Test des divers systèmes individuels

N° du test	durée	type de test	position	moyen de protection	type de chauffage	N° sonde	cobaye
1	1h00	référence	assis dos à la paroi	aucun	aucun	T9	Vincent
2	34'	référence	assis dos a la paroi	couverture de survie épaisse	aucun	T10	Julien
3	1h00	avec moyen de chauffe	assis non adossé à la paroi	couverture de survie épaisse	bougie chauffe-plat	T12	Fabien C.
4	1h00	avec moyen de chauffe	assis non adossé à la paroi	couverture de survie épaisse	bougie MTDE	T12	Fabien C.
5	1h00	avec moyen de chauffe	assis dos à la paroi	couverture de survie épaisse	acéto générateur au sol	T9	Vincent
6	1h00	avec moyen de chauffe	assis dos à la paroi	couverture de survie épaisse	bougie BAM	T10	Julien
7	1h00	avec moyen de chauffe	assis non adossé à la paroi	couverture de survie épaisse	acéto générateur entre les jambes	T12	Fabien C.
8	1h00	avec moyen de chauffe	assis dos à la paroi	couverture de survie épaisse	chaufferette de corps à usage unique sur l'abdomen	T9	Vincent
9	1h00	avec moyen de chauffe	assis dos à la paroi	couverture de survie épaisse	chaufferette de corps réutilisable sur l'abdomen	T10	Julien
10	1h00	avec moyen de chauffe	assis dos à la paroi	poncho spéléo	acéto générateur au sol	T9	Vincent
11	1h00	avec moyen de chauffe	assis dos à la paroi	poncho spéléo	bougie BAM	T10	Julien
12	1h00	avec moyen de chauffe	assis non adossé à la paroi	aucun	générateur acéto Type ARIANE sous le bras	T12	Fabien C.
13	1h00	avec moyen de chauffe	debout circulation restreinte	aucun	chaufferette de main placée sur la nuque tenue par le repli de la cagoule	aucune	Fabien F.

Assise dans le froid et l’humidité, la personne a froid, ne peut se réchauffer et ne sèche pas. Le fait d’être adossé à la paroi augmente la déperdition de chaleur. On note aussi une légère dégradation de la température au niveau de la tête. Au bout de trente minutes, la personne commence à ressentir des fourmillements, donc une dégradation de son état. Le corps humain favorise toujours les organes vitaux au détriment des autres ; dans l’ordre : la tête, le cœur, les poumons, d’abord puis le foie, les reins, et en tout dernier les membres (bras, jambes) : ce qui peut vite amener à une hypothermie.

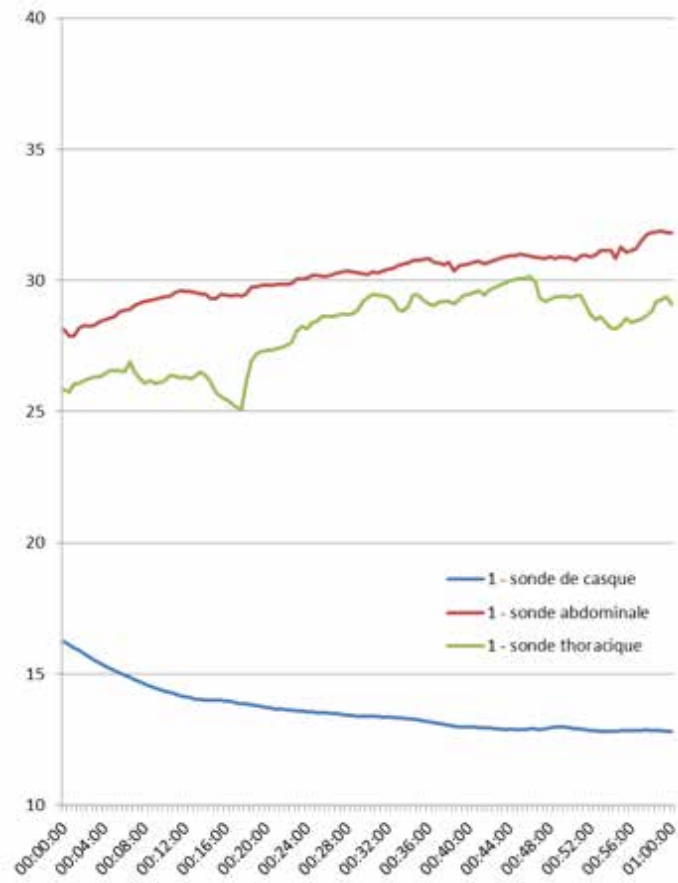


Figure 22 : Test de référence sans moyen de chauffe sans couverture de survie (test 1)

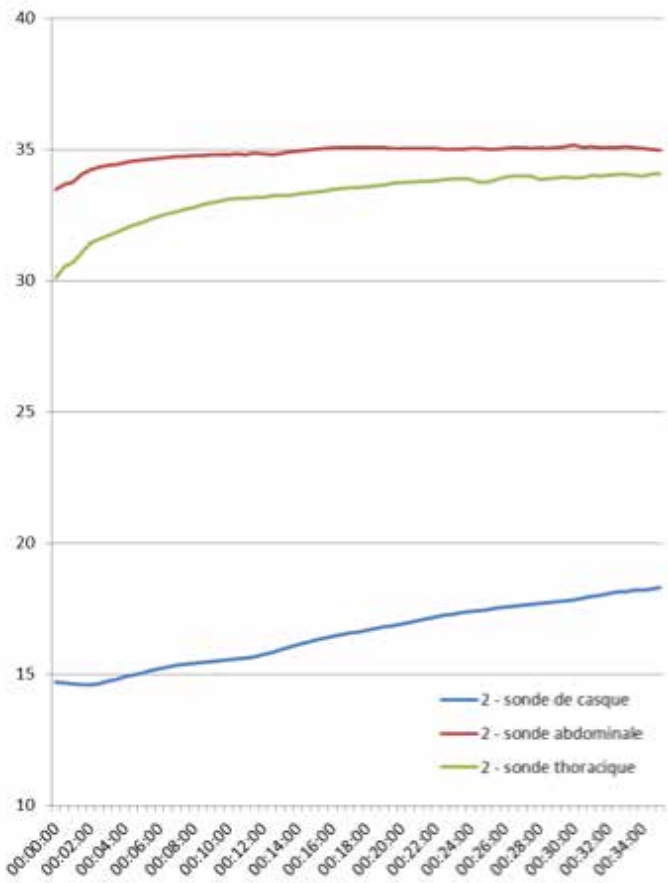


Figure 23 : Test de référence sans moyen de chauffe avec couverture épaisse (test 2)

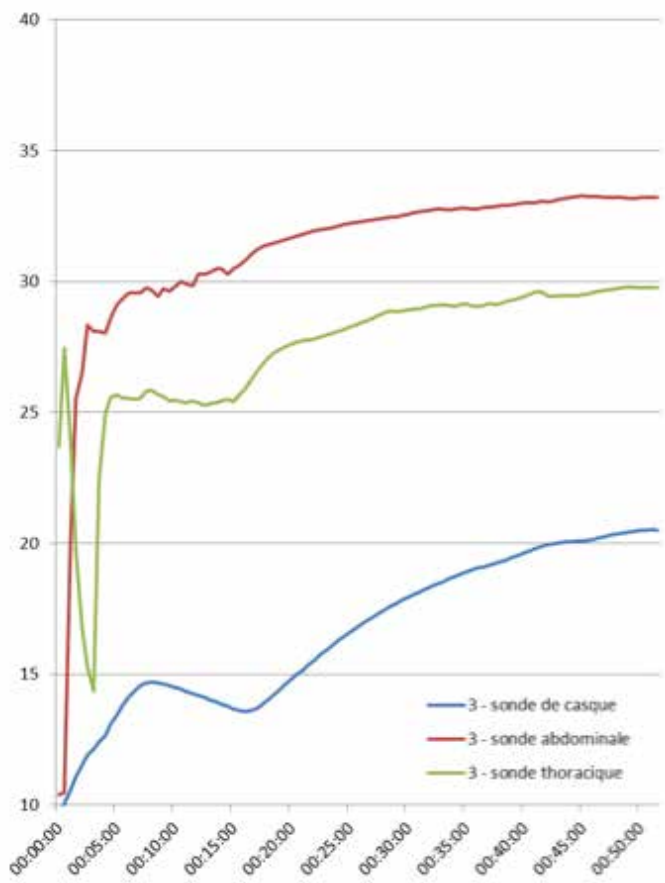


Figure 24 : Test de référence avec couverture de survie et bougie chauffe-plat (test 3)

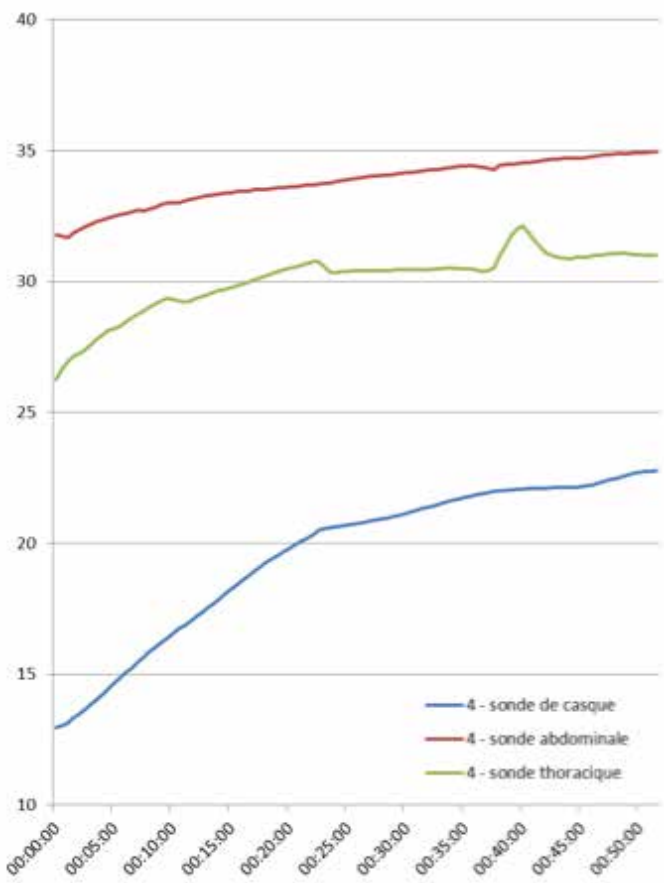


Figure 25 : Test de référence avec couverture de survie et bougie MTDE (test 4)

Tortue sans moyen de chauffe (tests 1 et 2)

Bien que ne disposant pas de moyen de chauffage, une personne disposant d’une simple couverture de survie arrive à gagner près de 5°C en faisant la tortue (Figure 23), et sa température corporelle reste plus stable. En effet, au vu de la Figure 23, on constate que la courbe de température lors du test 1 n’est pas stable : elle fluctue beaucoup et la température du sujet a du mal à augmenter pour finir à peine à 30°C, alors que pour le test 2, la température corporelle du sujet est plus stable et s’élève rapidement pour se stabiliser à 34°C en à peine 12min.

La couverture de survie apporte un réel plus. Cependant, la personne ne doit compter que sur la chaleur produite par son corps pour lutter contre le froid et l’humidité. Elle doit utiliser une grande quantité de sa propre énergie pour maintenir une température corporelle suffisante, ce qui, dans le cas d’une longue période d’attente, conduit à une dégradation de son état.

Tortues avec moyens de chauffage dynamiques (tests 3 à 7)

Si l’on compare le test 4 (deux mèches allumées d’une bougie MTDE) au test 3 (une bougie chauffe-plat) (Figure 24 et Figure 25), on constate une nette amélioration de la température qui passe de 20°C à près de 23°C au niveau du casque et dépasse 31°C au niveau du torse, contre 29°C avec la bougie chauffe-plat. La personne se trouvant sous la tortue ressent ainsi une sensation de chaleur qui lui permet une attente de courte durée pas trop pénible, en limitant sa consommation énergétique.

Si l’on compare le test 4 (deux mèches allumées d’une bougie MTDE) au test 3 (une bougie chauffe-plat) (Figure 24 et Figure 25), on constate une nette amélioration de la température qui passe de 20°C à près de 23°C au niveau du casque et dépasse 31°C au niveau du torse, contre 29°C avec la bougie chauffe-plat. La personne se trouvant sous la tortue ressent ainsi une sensation de chaleur qui lui permet une attente de courte durée pas trop pénible, en limitant sa consommation énergétique.



Les conditions de test à la plage lors des tests de tortue (ici avec des couvertures de survie).

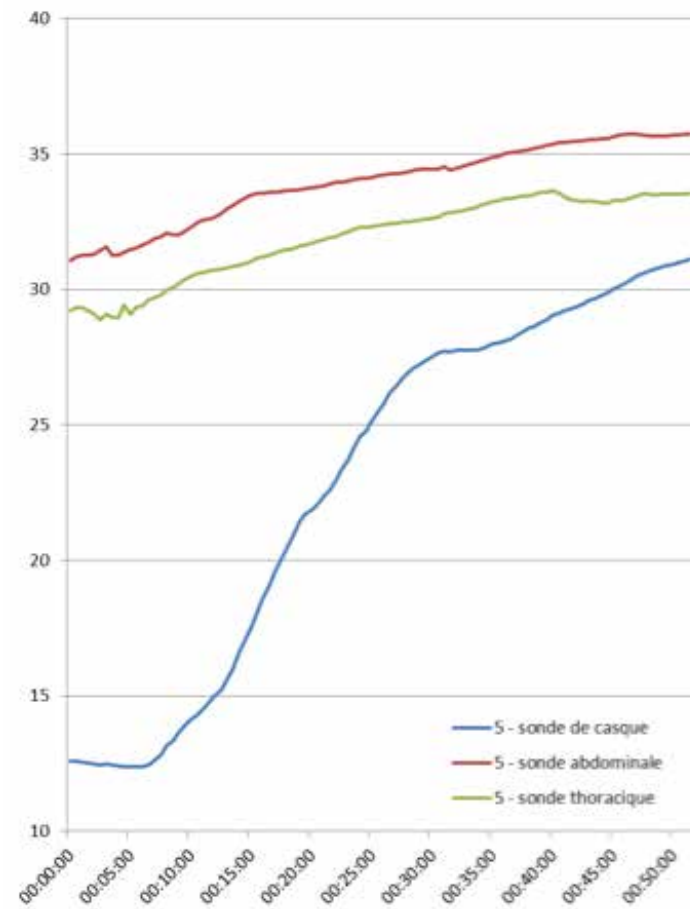


Figure 26 : Test de référence avec couverture de survie et lampe acétylène (test 5)

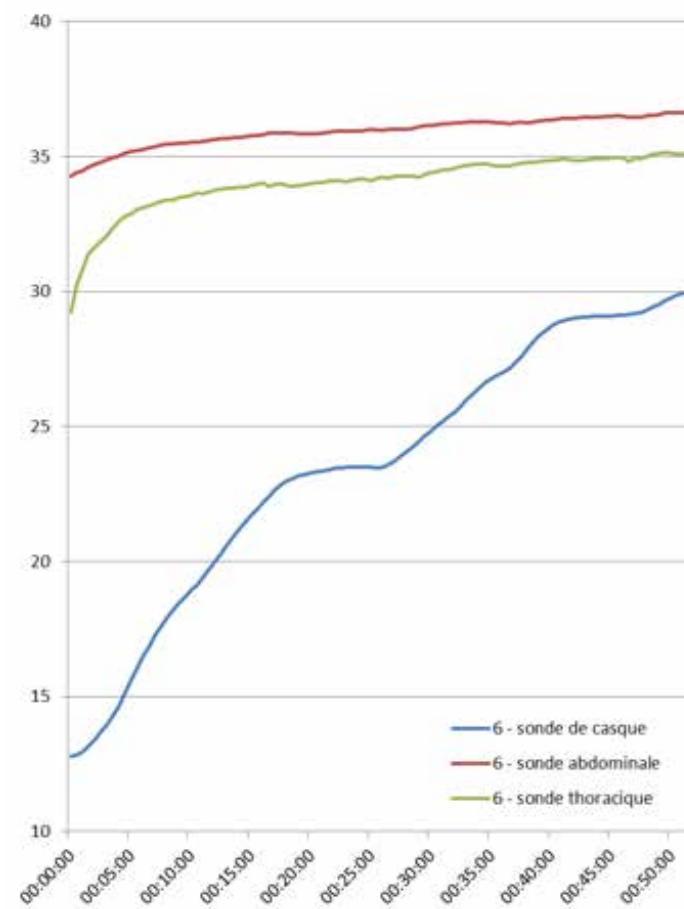


Figure 27 : Test de référence avec couverture de survie et bougie BAM (test 6)

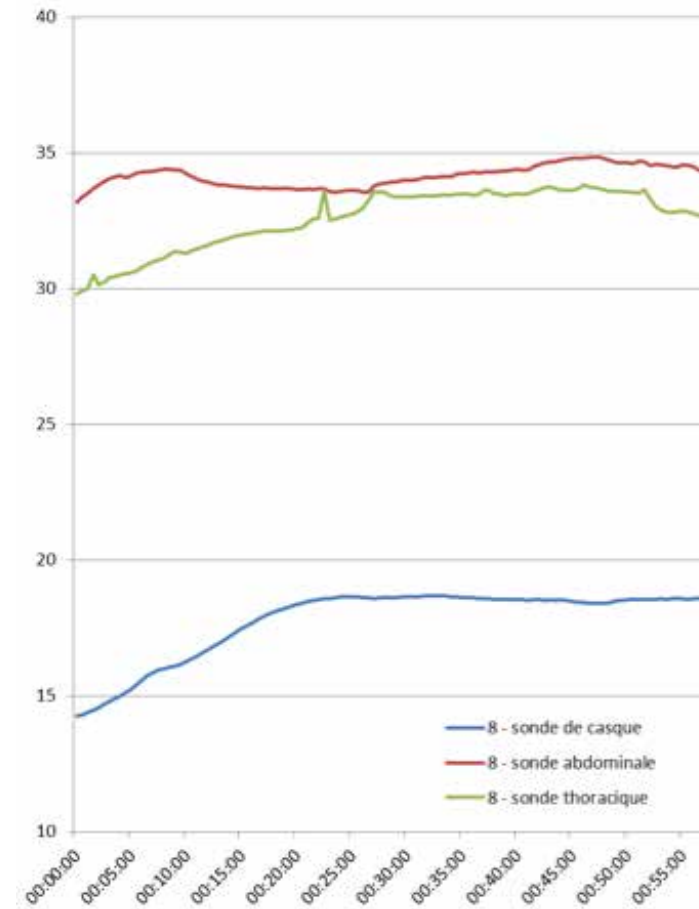


Figure 29 : tortue classique avec chaufferette de corps usage unique (test 8)

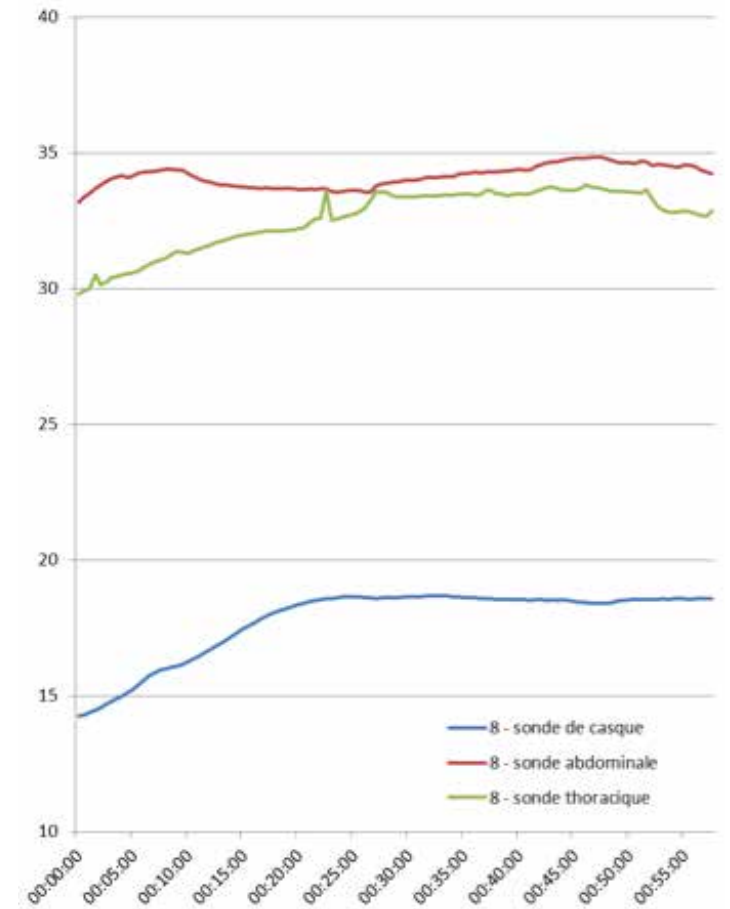


Figure 30 : tortue classique avec chaufferette de corps réutilisable (test 9)

Avec l'acéto, on observe une rapide élévation de température de la tortue et de la chaleur corporelle. Pour les tests 5 et 7 (Figure 26 et Figure 28), les courbes de température corporelle sont quasiment les mêmes. La position du générateur a une influence assez nette sur la température corporelle, elle progresse plus rapidement, mais finit au même niveau pour les deux tests. Grâce à ce réel apport calorifique, la personne peut se sécher, elle compense les défauts présentés précédemment.

Avec la BAM (test 6, Figure 27), la température obtenue est légèrement plus élevée qu'avec l'acéto, de l'ordre de 2°C, ce qui donne pratiquement les mêmes performances que l'acéto, sachant que, du fait de sa performance, le besoin de confinement de la tortue est moins important.

Quelques changements sont observés par rapport aux deux tests précédents : une élévation de la température corporelle plus rapide et une plus grande stabilité de celle-ci. Elle s'élève de plus 2°C.

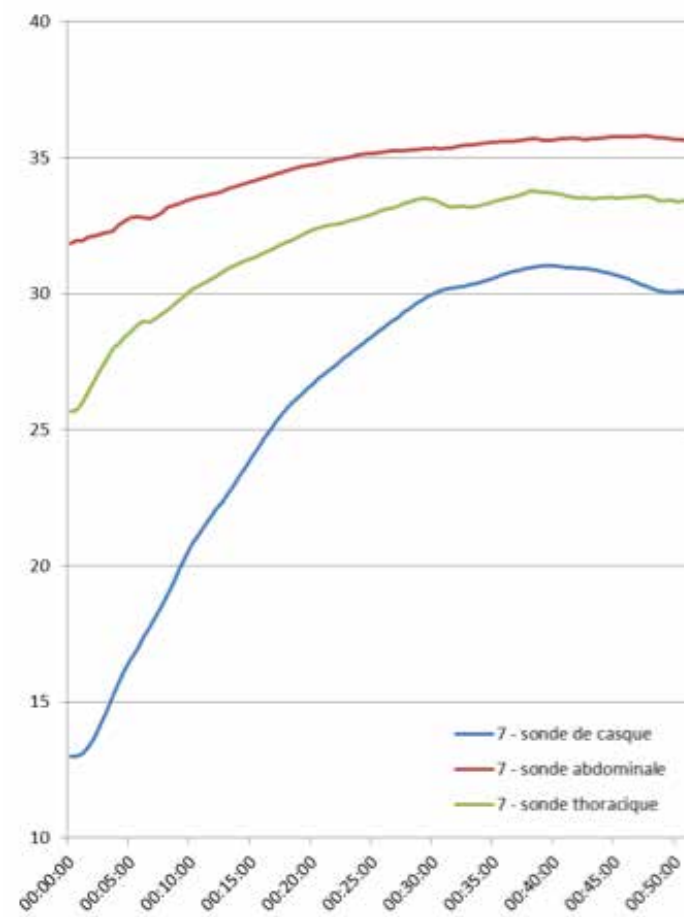


Figure 28 (en bas à gauche) : Test de référence avec couverture de survie et lampe acétylène (test 7)

Tortues avec moyens de chauffage statiques (tests 8 et 9)

On note ici, par rapport aux tests 1 et 2, que la présence d'un petit moyen de chauffage permet un léger gain de température ambiante mais pas suffisamment pour que la personne ait un apport en température qui compense ses déperditions calorifiques. La Figure 30 montre une température assez régulière, la personne bénéficie d'un apport en calories qui varie selon le moyen de chauffage utilisé (ici des chaufferettes), mais on constate aussi qu'elle ne peut se sécher pour deux raisons :

- Comme pour les points chauds étudiés précédemment, l'absence de moyen de chauffage ambiant ne permet pas d'abaisser l'hygrométrie (voir page 16).
- Pour se sécher, l'eau doit être transformée en vapeur d'eau, ce qui nécessite un changement d'état et donc un besoin en calories. En l'absence de moyen dynamique (bougie, acéto), c'est au corps de les fournir.

Ce qui a pour effet d'obliger le corps à fournir des calories supplémentaires, et donc à puiser dans ses réserves. Ce phénomène est bien sûr encore plus important lorsque les conditions de survie sont précaires comme indiqué précédemment.



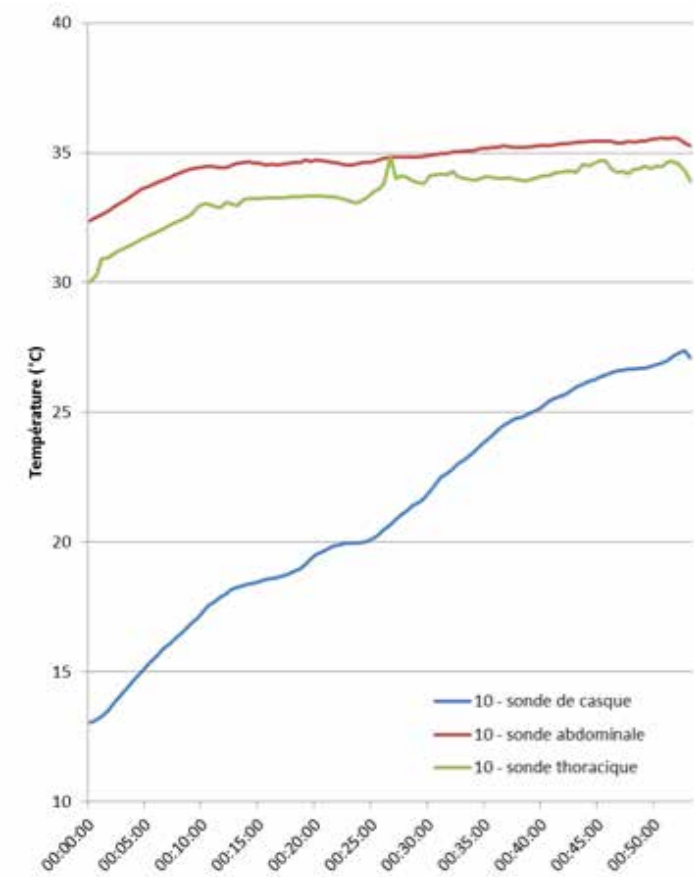


Figure 31 : Tortue avec poncho spéléo et lampe acétylène (test 10)

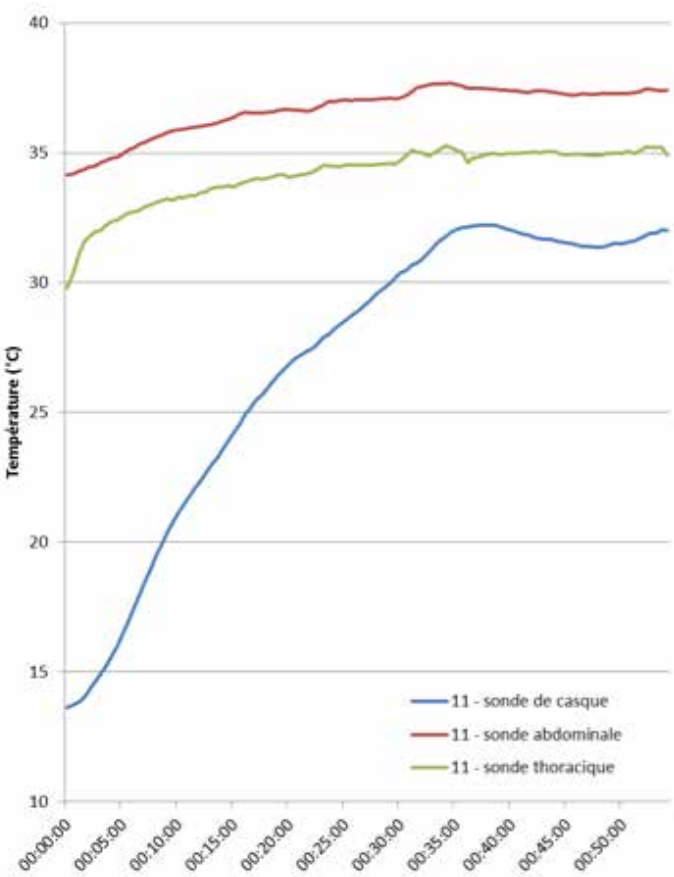


Figure 32 : Tortue avec poncho spéléo et bougie améliorée maison (test 11)

Tortues avec poncho spéléo (tests 10 et 11)

Avec le poncho spéléo, on observe une performance supérieure comparée à celle de la tortue en couverture de survie (Figure 31 et Figure 32). Les deux mains sont libres et l'on obtient un meilleur confinement, ce qui permet d'ajuster la flamme de l'acéto et donc d'économiser du carbure sans abaisser ses conditions de survie. Avec le moyen de chauffage utilisé dans le test 10 (lampe acétylène, Figure 31), la température est proche de celle obtenue avec la couverture de survie. La différence réside dans le confort supplémentaire apporté par le poncho spéléo, en évitant les ruptures de confinement (il ne s'ouvre pas lors des mouvements éventuels ou des déplacements). Dans le test 11 (BAM, Figure 32), on note une très forte augmentation de la chaleur ambiante et corporelle, parfois même trop importante contrairement à la couverture de survie. Il n'y a pas de déperdition de chaleur due à la rupture du confinement et contrairement à l'acétylène, pas de possibilité de régler la puissance de la flamme, il est nécessaire d'adapter la BAM en amont (à la maison) aux moyens que vous utilisez sous terre en adaptant la mèche de celle-ci.

Assis avec acéto sous le bras (test 12)

Peu de changement en comparaison du test 1, à l'exception qu'il n'y a pas de couverture de survie. Avec le générateur sous le bras (test 12), il est apporté toutefois quelques calories supplémentaires directement sur le passage d'une veine ou artère principale. En effet, sous le bras, entre les jambes, ou au niveau de l'aîne passent des voies veineuses.

Placer le générateur sur l'une de ces zones a pour effet de vous réchauffer. Qui n'a pas ressenti cette sensation d'être réchauffé de l'intérieur en se mettant dans l'une ou l'autre de ces configurations. C'est ce qui empêche ou diminue les frissons si l'on se trouve à l'abri des courants d'air. La présence du générateur induit une légère augmentation de la température corporelle due à son apport calorifique. Durant toute la durée du test, aucune sensation de froid ou de frisson.

Debout avec une circulation restreinte (test 13)

Le test 13 est quant à lui plus particulier car l'apport calorifique de la chaufferette conjointe à celle de la cagoule permet une attente dans de bonnes conditions dans le cas où vous n'êtes pas complètement statique. Elle permet une augmentation significative des conditions de survie et d'attente, ce qui nécessite de rester modérément actif (pas de graphique).

Ecarts en termes de déperdition calorifique

Les zones en rouge correspondent aux zones les plus chaudes (supérieur à 32°C), alors que plus la couleur tend vers le bleu foncé, plus la zone est froide (moins de 17°C). Enfin, le violet représente les zones très froides (inférieur à 10°C).

Les diverses images thermiques suivantes permettent de se faire une idée concrète des déperditions de chaleur mais attention tout de même car les échelles de température varient d'une imagerie à l'autre.

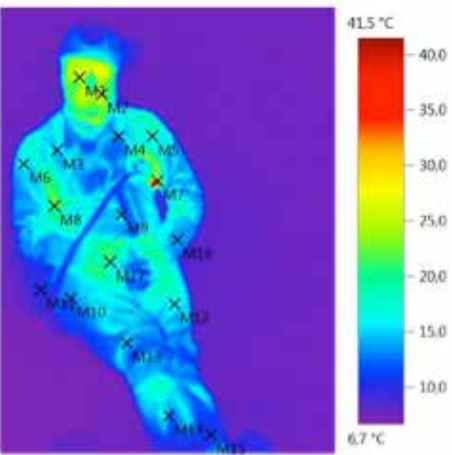


Figure 33 : assis avec acéto sous le bras (test 12)

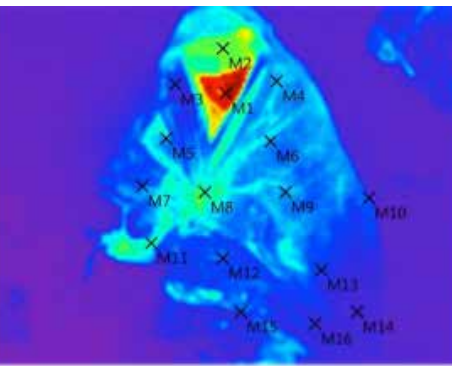


Figure 34: tortue classique avec chaufferette de corps réutilisable (test 9)

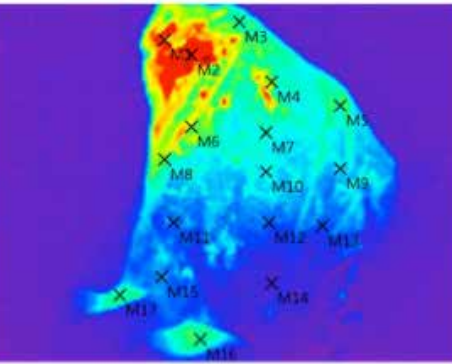


Figure 35 : tortue classique avec acéto au sol (test 5)

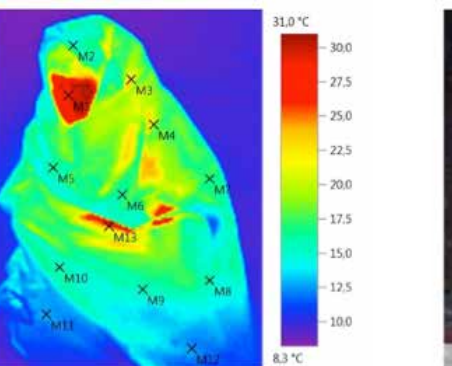


Figure 36 : tortue poncho spéléo avec acéto au sol (test 10)

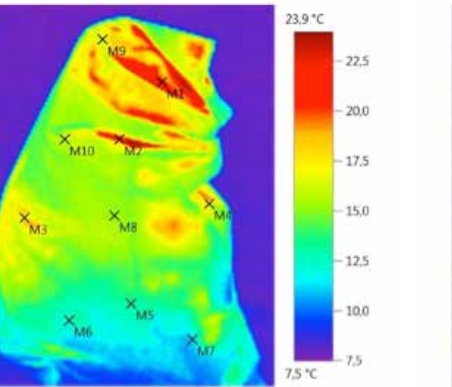


Figure 37 : tortue poncho spéléo avec BAM (test 11)

Test tortue (après s'être mouillé !). Le capteur de température est fixé sur le casque ainsi que les câbles de sonde

On constate, sur les imageries thermiques, de très nombreuses zones froides sur une personne sans protection (couverture de survie ou poncho) et une déperdition calorifique au niveau du visage (Figure 33). Alors qu'avec un poncho spéléo (Figure 36), les zones plus chaudes sont observées en surface du poncho, ce qui signifie que la personne qui se trouve sous le poncho est dans une bulle chaude.

La comparaison des deux imageries thermiques de la tortue avec la couverture de survie et de la tortue avec le poncho spéléo montre que la répartition de la chaleur est nettement meilleure pour le poncho spéléo, de par sa conception et le confinement qu'il génère. Pour la couverture de survie, le manque de confinement dû au fait qu'il faut la tenir jointe fait apparaître une zone froide en partie basse et une chaleur croissante en remontant vers la tête (voir les points de température sur les rapports d'imagerie).

Le moyen de chauffage est à définir en fonction de la protection utilisée et de sa qualité (couverture de survie ou poncho spéléo), qui rend le confinement plus ou moins efficace. En d'autres termes, moins il y a de déperdition calorifique, moins on a besoin d'un moyen de chauffage puissant.

Le moyen utilisé pour s'isoler du sol a un rôle important car tout contact avec le sol entraîne des déperditions calorifiques. Entre une simple couverture de survie et un kit de cordes, l'isolation ne sera pas identique.

La nature de la cavité et le lieu dans lequel on se situe jouent un rôle primordial : au sein d'une même cavité, il est possible d'être obligé d'attendre dans un méandre avec du courant d'air dans une zone humide, rivière ou en bas d'une cascade, dans de grandes salles ou bien même bloqué sur corde suite à une crue. Selon la région, les températures peuvent varier ; la température et l'environnement des cavités d'Ardèche, de celles du Vercors ou de Savoie diffèrent.

4 - APPORTS COMPLEMENTAIRES A L'ANALYSE

Bien que les tests soient réalisés dans un même lieu et en même temps, certains paramètres physiologiques des participants sont à prendre en compte, car nous ne sommes pas tous égaux face au froid. Se retrouver contre paroi impacte considérablement les résultats, car elle absorbe une grande quantité de calories. Quel que soit le type d'abri PC ou TT, il est nécessaire de chercher à s'isoler du sol et de la paroi, comme on peut le constater sur les imageries thermiques ci-dessus ainsi que sur les différentes courbes du graphique ci-après.

Dans les points chauds, il est très intéressant de comparer les différentes températures observées en fonction de la hauteur des sondes dans le PC (voir dans le graphique PC ci-dessous) car on est plus facilement couché dans un point chaud que debout (sauf s'il le permet), et que nos jambes sont la dernière partie qui est maintenue chaude par le corps. Donc, plus il fait chaud au sol, et plus vous êtes isolé de celui-ci, mieux vous vous sentez. Cela évite d'une part l'engourdissement des jambes et les fourmis, et d'autre part, cela vous permet de vous sécher si vous êtes mouillé. On constate que la courbe de température corporelle est étroitement liée à la température ambiante. Les cas les plus marquants sont les tests 1 et 5 (Figure 23 et Figure 26). En effet, elle passe de 12,5°C au premier test à 32°C au second. Parallèlement, la température corporelle passe de 31,5°C à 35°C.

On voit aussi très nettement sur les imageries thermiques que le visage est une source importante de déperdition de chaleur. Outre les images des tortues, sur la dernière (test 12, Figure 33), les parties du corps dont la chaleur est plus forte sont nettement visibles.

L'aspect physiologique

Le corps humain agit par ordre d'importance pour le maintien en température des organes vitaux (cœur, cerveau, etc...) avec en priorité la tête. Pour cela, il agit au détriment des membres (jambes, bras). Par conséquent, le simple fait de disposer d'une cagoule diminue de 50% les déperditions calorifiques.

Après analyse des données et des ressentis des participants, ces tests permettent de constater qu'à partir de 22°C ambiants, la personne commence à être dans des conditions de survie acceptables et à partir de 25°C, les conditions de survie sont confortables. Attention, nous parlons bien ici de conditions d'attente dans un milieu hostile froid, humide et dans le cas d'une personne mouillée soit par l'eau (rivière, écoulement etc...) soit par la transpiration. Se sécher au préalable peut considérablement améliorer les conditions de survie, en évitant une grande perte d'énergie voire une hypothermie.

Sur les différents tests, plusieurs variables sont mises en évidence : attente courte/attente longue, cavité sèche/cavité humide et aquatique, taille du groupe, physiologie de la personne qui peut évoluer en fonction de la fatigue (celle liée à la sortie mais également celle qui s'est accumulée au cours de la semaine), de son alimentation et de son état psychologique (le moral).

Il est indispensable de prendre en compte tous ces facteurs afin de sélectionner au mieux le moyen de chauffage et ne pas oublier que quand tout va bien, on peut soulever des montagnes, mais quand ça se gâte, la vraie nature de l'être humain se révèle.

Sachant cela, vous pouvez donc sélectionner à bon escient votre moyen de chauffage en vous rappelant que qui peut le plus, peut le moins.

La température corporelle humaine

L'être humain est un organisme homéotherme, ce qui signifie que sa température corporelle est quasiment constante.

On considère généralement que la température usuelle du corps humain est de 37,0 °C, cependant cette valeur dépend de l'endroit du corps où est faite la mesure, de l'heure de la journée et du niveau d'activité de la personne. Une température corporelle normale se situe entre 36,1 °C et 37,8 °C.

Les échanges de chaleur qui se produisent chez un individu entre son corps et l'environnement sont tous envisagés par les lois de la thermodynamique :

La chaleur s'écoule toujours d'un milieu à haute température vers un milieu à basse température, ce qui se produit habituellement pour le corps au contact de son environnement. Les échanges de chaleur se réalisent par évaporation, par conduction, par convection, par rayonnement.

L'évaporation est sensible à l'humidité, les autres modes d'échange thermique ne le sont pas.

Les pertes de chaleur du corps humain se répartissent comme suivent :

- rayonnement, environ 40 % ;
- évapotranspiration, environ 25 % ;
- convection, environ 20 % ;
- conduction, environ 10 % ;

Pertes par rayonnement

Le corps se refroidit par rayonnement dans la mesure où il se trouve dans un environnement qui est plus froid que lui.

Pertes par la transpiration cutanée

La fonction principale de la transpiration animale chez les homéothermes est la régulation thermique par évaporation. La transpiration retire un certain nombre de calories de l'organisme (L'évaporation d'un litre de sueur absorbe 500 Kcalories.) La transpiration est accrue par l'élévation de température, par la sécheresse de l'air, par les mouvements de l'air, par l'échauffement de la peau, elle est diminuée par l'air froid, par la stagnation de l'air, par l'humidité de l'air et par le refroidissement de la peau.

Pertes par la transpiration pulmonaire

De la vapeur est exhalée par la respiration. De plus, les volumes d'air introduits dans les poumons par la respiration se trouvent ordinairement à une température plus basse que celle du corps, ce qui provoque un refroidissement de celui-ci (Voir convection).

Pertes par la conduction ou par convection

Les pertes de chaleur par conductivité thermique supposent que les corps qui touchent celui de l'homme se trouvent à une température plus basse que lui, et parmi ces corps, c'est l'air atmosphérique qui le plus constamment est la cause de ce refroidissement, par convection (une forme de conduction). La perte de chaleur par conduction est extrêmement limitée chez l'homme pour les raisons suivantes :

- l'homme dont la peau est nue se couvre d'enveloppes artificielles, les vêtements, qui jouissent des mêmes propriétés (Isolation vestimentaire) ;
- les parties de surface du corps qui sont en contact avec un corps froid se refroidissent rapidement, la circulation devient lente ou presque nulle et la transmission de chaleur s'arrête ou devient très lente. Par exemple, la peau d'un corps plongé dans un bain froid devient rapidement pâle, presque aussi froide que le bain lui-même. En cela, elle est presque réduite à la condition de membrane inerte, conduisant très mal la chaleur et servant d'enveloppe au reste du corps.

L'hypothermie

L'hypothermie peut résulter d'une exposition prolongée à une ambiance froide, comme l'air extérieur en hiver, d'un séjour prolongé dans une eau froide (rivière souterraine), ou bien d'une dérégulation de l'organisme. En ambiance froide, l'hypothermie est une complication courante pour une personne victime d'un accident ou d'un malaise.

On parle d'hypothermie lorsque la température centrale est inférieure à 35 °C :

- de 37 à 35 °C : normothermie ;
- de 35 à 34 °C : hypothermie modérée ;
- de 34 à 32 °C : hypothermie moyenne ;
- de 32 à 25 °C : hypothermie grave ;
- en dessous de 25 °C : hypothermie majeure.

Les symptômes :

- T° 35 à 32 °C : frissons, vasoconstriction, baisse de la tension artérielle, respiration rapide, pouls rapide
- T° < 32 °C : troubles de conscience, contraction pathologique du couple musculaire diffuse, pupilles contractées, ralentissement du cœur
- T° < 30 °C : coma, pupilles dilatées, respiration lente, bradycardie, hypotension, « état de mort apparente »

En dessous de 28 °C il y a un risque d'arrêt cardiaque par fibrillation ventriculaire.

Le changement d'état

Un changement d'état est une transition de phase lors du passage d'un état de la matière à un autre. Les trois principaux états de la matière sont : solide, liquide et gazeux. Le changement d'état d'un corps pur est provoqué par une modification de sa pression, de sa température et/ou de son volume.

Voici celui qui nous intéresse : le passage de l'état liquide à l'état de gaz, la vaporisation

- Ce changement d'état se fait à température et pression constantes : 100 °C pour l'eau pour une pression atmosphérique de 1015 hPa (pression moyenne sur Terre).
- L'évaporation est la même transformation mais à température ambiante (une flaque d'eau disparaît car l'eau s'évapore : l'eau liquide se transforme en vapeur d'eau).
- La transformation inverse se nomme condensation ou liquéfaction : elle s'effectue toujours à la même température que la vaporisation.

Le principal rapport avec la spéléologie est que thermiquement s'il y a évaporation, il y a abaissement de la température du liquide résiduel : c'est comme cela que la transpiration refroidit le corps. Sauf que si l'on est mouillé (rivière, transpiration, ...) on a encore plus froid lors du séchage.

La toxicité des gaz dégagés

Si avant, nous ne nous posions pas de questions, le fait de rechercher un palliatif à la lampe à acétylène nous amène à la considérer comme base de référence. Elle a donc subi nombre de tests. Jusqu'à présent, seul le SSF, par le biais de la médicalisation en point chaud, s'est intéressé aux dégagements toxiques éventuels des moyens de chauffage, qui présentent pour la plupart d'entre eux des désagréments.

La pollution émise par la lampe acétylène qui nous semble évidente est le noir de fumée que l'on inhale et qui est généreusement restitué dans nos mouchoirs en sortant des cavités. Il contiendrait des composés cancérogènes et serait un risque lors de fortes expositions (COMED).

Un autre problème lié à l'utilisation de la lampe à acétylène est constitué par les résidus de carbure de calcium. Après contact avec de l'eau, la chaux éteinte contenue dans les générateurs que l'on retrouve disséminée pollue les cavités.

Par ailleurs, des études effectuées sur l'air intérieur en laboratoire ont mesuré divers polluants émis par la combustion de bougies (COV, aldéhydes, carbone suie, particules ultrafines, HAP). Ce type d'étude poussée n'est pas possible en PC car il nécessiterait des moyens coûteux de prélèvements et d'analyses. Il est plus utile de mesurer les polluants les plus représentatifs de la combustion des sources de chaleur et de la respiration des occupants tels que le dioxyde de carbone (gaz carbonique), mais également la diminution du taux d'oxygène, afin de s'assurer du bon renouvellement de l'air.

L'état psychologique

S'il y a bien un élément fondamental dans le cadre d'une attente sous terre quelle qu'elle soit, c'est bien le moral, et là nous ne sommes pas égaux non plus. Si certains font preuve d'un moral d'acier, pour d'autres faire face à chaque nouvelle difficulté s'apparente à gravir le Mont Blanc.

L'environnement dans lequel évolue le spéléologue est un milieu hostile tant physiquement que moralement et nombreux sont ceux qui en font fi, tant que tout va bien en tout cas, car lorsque l'incident ou l'accident se produit, la donne change et il devient important de pouvoir se réchauffer auprès d'une quelconque source de chaleur.

Se retrouver auprès de cette source de chaleur apporte aussi cette sensation de bien-être et de sécurité, et constitue de ce fait un acteur privilégié pour le moral. Quand le moral va tout va.

La couleur jaunâtre de la flamme d'une bougie ou d'une acéto est plus réconfortante que la lueur froide d'une led, elle rappelle le feu de cheminée chaud et confortable.

La tenue

La tenue joue aussi dans le facteur d'attente car selon que l'on est mouillé, sec, bien équipé en sous combi et combi, moins bien équipé ou avec des tenues inadaptées, l'attente et les besoins en calories ne sont pas les mêmes.

Par ailleurs, si une combinaison néoprène permet de longues immersions dans une eau froide, elle n'est pas de bonne compagnie lors d'une attente prolongée, tout comme les chaussons néoprène. Dans ce cas, le premier moyen pour se réchauffer est de se changer et de bien garder à l'esprit qu'une hyperthermie est aussi dangereuse qu'une hypothermie même s'il est plus facile de se refroidir que de se réchauffer.

La nutrition

Elle joue aussi un rôle important tant sur le plan physiologique que physique, elle est source de réconfort et de soutien moral. Elle est aussi la garante d'une bonne condition physique pour sortir. A vous de l'adapter au type de sortie et aux participants de la sortie. Attention au raisonnement où l'on pense que « petite sortie » rime avec très peu ou rien à manger. En fonction de la nature de la cavité, et s'il y a le moindre risque de se faire bloquer, l'attention est de mise. Le fait d'absorber des aliments chauds ou du moins quelque chose de chaud en fin de repas permet d'économiser des calories, car tout ce que le corps ne réchauffe pas constitue autant de calories conservées. Pour débiter la digestion, le corps doit d'abord mettre en température le contenu de l'estomac à 37,5°C. Boire de l'eau chaude permet d'augmenter la température des aliments absorbés en l'absence d'un repas chaud.

La toxicité humaine

L'acétylène

Largement utilisé avant la généralisation de l'électricité, il est très peu toxique à faible concentration. De même densité que l'air, c'est un gaz parfaitement inodore. Son odeur alliée caractéristique est liée aux impuretés contenues dans le carbure de calcium quand celui-ci est utilisé pour le produire.

C'est un gaz instable, extrêmement inflammable (dès 300°C) et explosif spontanément sous certaines conditions de pression, pour une concentration dans l'air entre 2,2% et 85%.

L'acétylène est un dépressur du système nerveux central (effet narcotique). L'intoxication aiguë donne maux de tête, vertiges, nausées, incoordination motrice, perte de connaissance puis un coma éventuellement convulsif. Un mélange à 50% d'acétylène peut être bien toléré pendant 5 minutes, un mélange à 10% pendant 30 minutes. A titre anecdotique, un mélange entre 20% et 85% d'acétylène dans l'oxygène a été utilisé comme anesthésique général. L'intoxication chronique ne montre aucun effet durable : fatigue, maux de tête, somnolence, douleurs gastriques, irritation bronchique (peut-être liée aux impuretés). De manière générale, ce n'est pas un gaz irritant.

La dose admissible doit rester inférieure à 2,5%, soit environ 1/10ème de la limite inférieure d'explosibilité. Le traitement d'une intoxication aiguë se résume à l'oxygénothérapie normobare, avec ventilation assistée si nécessaire, et à des soins de réanimation standard.

Rassurons-nous, il y a très peu de chances d'observer de tels phénomènes en spéléo. Le risque majeur de l'acétylène peut surtout venir d'accidents : brûlure par la flamme (du spéléo comme de la corde), explosion d'une « bite » à carbure mal fermée suivie de l'incendie du kit et de son

contenu (accident non exceptionnel), voire explosion d'une lampe.

Pour l'utilisation en point chaud, ménager toujours une ventilation haute et basse, qui permet l'élimination des produits de combustion (dioxyde et monoxyde de carbone).

La combustion incomplète de l'acétylène, fréquente en spéléo, produit du noir de carbone. Quand on se mouche après une sortie, on retrouve ce noir sur le mouchoir : ce sont les particules arrêtées par la muqueuse nasale. Mais ces particules très fines vont également atteindre les poumons et les alvéoles pulmonaires. Elles peuvent, sur des durées longues et des absorptions massives, favoriser l'apparition de cancers du poumon. Les études sont très discordantes, la cancérogénicité pourrait être liée aux impuretés du type HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques qui sont des cancérogènes reconnus). Le CIRC, Centre International de Recherche sur le Cancer, a confirmé la classification du noir de carbone en catégorie 2B (agent peut-être cancérogène pour l'homme). La pratique spéléo ne paraît pas entrer dans ce cadre et il n'y a pas lieu d'avoir des craintes irraisonnées sur le sujet.

En complément, signalons la toxicité de la chaux, résidu de la production d'acétylène à partir du carbure de calcium. Le déchaulage de la lampe à carbure expose à manipuler de la chaux hydratée, dite « éteinte », par opposition à la chaux « vive » faite d'oxyde de calcium non hydraté. La chaux vive est très corrosive mais elle n'est pas concernée ici. La chaux éteinte est irritante pour la peau, surtout les muqueuses oculaires (dont la cornée) et accessoirement les voies respiratoires si on inhale les poussières. En cas de problème, il faut laver la peau et faire un lavage oculaire abondant et prolongé pour les yeux. Le port de gants est recommandé pour la manipulation, protections oculaires éventuelles. La valeur maximale d'exposition recommandée est de 5mg/m³.

La bougie

Elle est faite de paraffine (N° CAS 8002-74-2), produit pétrolier, dont la composition chimique peut varier selon le produit. Les vapeurs de paraffine peuvent être irritantes pour les voies respiratoires et les muqueuses oculaires (présence d'aldéhydes). Ces vapeurs ont une valeur limite d'exposition recommandée de 2mg/m³. L'exposition industrielle chronique à ces vapeurs de paraffine chauffée peut occasionner des troubles respiratoires : dyspnée, toux, expectoration, pneumonie lipoidique, fibrose interstitielle et alvéolite. L'insuffisance respiratoire est répertoriée au tableau des maladies professionnelles n°36 du régime général.

Quand elle brûle par l'intermédiaire de la mèche, ce phénomène de chauffage est très limité. Pour l'utilisation en point chaud, il n'y a probablement pas de problème d'irritation respiratoire à craindre. La règle de laisser une ventilation haute et basse évite la concentration éventuelle de vapeurs toxiques.

Le plus grand risque lié à la paraffine est le risque de brûlure cutanée, par la flamme ou par déversement de paraffine liquide (température de fusion 45-100°C). Attention à d'éventuelles projections oculaires. La combustion, comme toute flamme, libère du dioxyde et du monoxyde de carbone, d'où la nécessité de la ventilation du point chaud.

Les autres procédés

Le gaz, les essences diverses, l'alcool, ainsi que l'acétylène et la bougie, émettent les mêmes produits de combustion (dioxyde et monoxyde de carbone) mais de manière majorée, et présentent les mêmes risques de brûlures. Leur utilisation doit donc être réservée au chauffage des aliments et non au chauffage d'un point chaud.

- gaz butane : risque asphyxique. Sa combustion incomplète libère en plus du noir de carbone
- essences et pétrole : leur toxicité est liée à la présence plus ou moins importante de composés benzéniques, variables selon le produit
- alcool : qu'il soit liquide, solide ou gélifié, sa toxicité est liée à sa composition, variable selon les produits.

A titre d'exemple, l'alcool à brûler du commerce peut comporter 10% de méthanol, produit très toxique s'il est ingéré, les tablettes de Méta (métaldéhyde) peuvent donner des convulsions mortelles en cas d'ingestion et certaines tablettes contenant de l'hexaméthylènetétramine peuvent donner des réactions allergiques.

Les LEDs

Elles présentent un risque essentiellement oculaire lié à la dominante bleue de leur spectre. La très forte puissance du rayon lumineux peut occasionner des brûlures rétinienne graves et irréversibles et, dans le meilleur des cas, un éblouissement pénible, ressenti dans nombre de circonstances. Il est nécessaire d'adapter la puissance de l'éclairage en fonction des besoins, de la diminuer dans les sorties de groupes, de ne pas regarder en face son interlocuteur et d'éviter les lampes puissantes auprès des enfants qui sont plus fragiles. Les lampes « jaunes » devraient être moins néfastes.

Attention, si aujourd'hui, l'éclairage à leds est rentré dans les mœurs, les leds modernes et performantes de plus de 1W sont classées comme des lasers de classe 2, ce qui signifie qu'une exposition directe longue ou répétitive de la rétine de l'œil peut causer des lésions oculaires graves et irréversibles.

Il est donc nécessaire d'avoir la plus grande prudence lors de la progression en équipe ou lorsque l'on se regroupe pour faire le point ou manger. Si avant, on devait faire attention de ne pas brûler la corde avec sa flamme d'acéto, on doit faire dorénavant attention de ne pas brûler les yeux de ses camarades ou les siens en changeant les piles ou accus. (valable également pour l'éclairage principal).

En conclusion :

- Les moyens d'éclairage et de chauffage en spéléo n'occasionnent pas de risques majeurs pour l'être humain, mais nécessitent une éducation et une formation technique précise.
- Ne pas oublier, en l'absence malencontreuse de moyen de chauffage, que la chaleur humaine reste une excellente source et la première à utiliser. Le plus simple est donc de serrer contre soi et d'entourer de ses bras la personne en risque d'hypothermie ! Et à plusieurs c'est encore mieux...

L'impact environnemental

L'acétylène

Il peut être polluant sous deux aspects :

- Le noir de carbone se dépose sur les concrétions et les parois avec d'inesthétiques dépôts noirs. On retrouve le même genre de pollution dans les édifices religieux où brûlent en permanence des cierges. La sur fréquentation de certaines cavités est le facteur majeur de cette pollution.

- La chaux en elle-même n'est pas particulièrement polluante. La pollution qu'elle induit est essentiellement visuelle lorsque du déchaulage sauvage est pratiqué à l'entrée ou à l'intérieur des cavités. La chaux « vive » est utilisée en agriculture pour le traitement des sols et la chaux « éteinte » dans le bâtiment pour la confection des mortiers et enduits.

Rajoutons également les fortes énergies nécessaires à fabriquer le carbure de calcium.

Le mouvement « Acéto, non, merci ! » repose sur ces deux aspects dans la mesure où une alternative crédible et accessible vis-à-vis de l'acétylène existe désormais. Si tout le monde peut être d'accord avec le principe, force est de constater que l'effet polluant reste finalement assez limité aux aspects visuels et patrimoniaux de certaines cavités et sans doute à la faune locale. Les campagnes de nettoyage de cavités montrent que cette pollution est heureusement en grande partie réversible, mais au prix de nombreuses heures de travail.

Les LEDs

Elles posent un souci bien différent qui est la pollution chimique liée à la fabrication des matériaux constitutifs des ampoules et des accus, et leur recyclage en fin de vie. Sans oublier que l'électricité nécessaire à leur recharge provient majoritairement du nucléaire ou de centrales thermiques...

Les autres procédés (bougies)

Ils ne présentent pas de risques environnementaux en rapport avec l'utilisation en spéléo. La seule remarque concerne leur nature d'énergie fossile directe ou indirecte.

La spéléo
Sous ces aspects d’éclairage et de chauffage, la spéléo n’échappe donc pas à la règle que toute activité humaine est polluante, même si son impact sur l’environnement reste limité, dans le cas où les règles élémentaires sont respectées.

Terminons sur une notion très subjective, l’aspect psychologique de l’acétylène. Outre son caractère historique, son coût très modeste et sa rusticité d’emploi, on peut sans doute affirmer qu’une flamme en papillon sur le casque est aussi totémique pour le spéléo que la chauve-souris ! Synonyme de lumière vivante, d’éclairage diffus non fatigant, de chaleur, de fraternité quand c’est le copain qui rallume la flamme dans un geste symbolique d’inclinaison de la tête. Le soin apporté à la lampe à carbure, la relation fusionnelle avec elle, faite d’engueulades, de brutalité parfois mais aussi de mille précautions et attentions lors de son allumage, de sa manipulation et son entretien.

Le vieux spéléo n’abandonnera sûrement pas sa vieille lampe à carbure sans une immense nostalgie de ses jeunes années ou spéléo, « dudule » et « bite » à carbure (sans commentaire !) ont vécu ensemble les mêmes aventures et les mêmes galères...
Bien sûr, il en sera tout autrement pour les nouvelles générations qui auront bien du mal à comprendre cet attachement digne de notre cerveau reptilien...

Hypothèses de calcul

Calculs théoriques sur les différents produits de combustion

Lampe à acétylène
La consommation est supposée basse à 14 l/h. Celle-ci peut être augmentée à environ 21 l/h en modifiant le réglage.

Bougie Améliorée Maison (BAM)
Elle est constituée de 80% de paraffine et de 20% d’acide stéarique. Il a été constaté expérimentalement qu’environ 20% de matière ne brûlent pas sans doute à cause des impuretés et d’une transformation chimique du combustible à haute température. Cela donne une consommation constatée de 18 g de matière brûlée par heure.

	Lampe acétylène	BAM 100% paraffine	BAM 20% ac. stéarique	MTDE (2 mèches)
Consommation	14 l/h	18 g/h	18 g/h	12 g/h
P (W)	200	212	207	141
VO² (l/h)	-35.0	-43.4	-77.2	-29.0
VCO² (l/h)	28.0	28.6	51.0	19.0
VH²O (l/h)	14.0	29.7	52.2	19.8

Tableau 3 : Avancement des réactions, produits et consommations par heure de fonctionnement (P(W)= puissance en Watt, VO²= volume d’oxygène, VCO²=volume de gaz carbonique, VH²O=volume d’eau)

BAM à 100% de paraffine
Pour comparaison, le calcul est réalisé pour une bougie en paraffine pure en retenant la même consommation que ci-dessus à 18 g/h.

Bougie commerciale MTDE
La fiche du fabricant donne une masse de 215 g pour cette bougie et une autonomie de 18h avec deux mèches sur trois allumées. Si nous supposons que tout le combustible brûle (hypothèse la plus favorable) cela donne une consommation de 12 g/h. Nous avons de plus supposé que la bougie était constituée de paraffine pure.

Hypothèses de calcul :
- l’oxygène est en excès : la combustion est parfaite ;
- tous les gaz sont considérés parfaits, c’est-à-dire que, théoriquement, ils répondent à la loi des gaz parfaits, peu importe les conditions de température et de pression.

Résultats
- L’avancement des réactions ainsi que les produits sont donnés pour une heure de fonctionnement.

La lampe à acétylène et la BAM ont des puissances comparables, ce qui explique des courbes de montée en température dans le point chaud très semblables. La bougie MTDE avec deux mèches allumées est moins performante, comme constaté dans les tests. D’un point de vue théorique, elle devrait avoir des performances égales aux autres moyens de chauffe avec trois mèches allumées.

Si l’on ne considère que la combustion de l’acétylène, c’est le moyen de chauffage le plus efficace, qui consomme le moins d’oxygène et qui produit le moins de CO² et d’eau. Cet avantage est à tempérer par rapport à tous les points négatifs : encombrement, dangers liés au carbure, pollutions diverses...

D’après ces calculs, une BAM en paraffine pure devrait, à puissance égale, produire moins de gaz. L’ajout d’acide stéarique dont le point de fusion est plus élevé permet de garder une cire moins liquide pendant la combustion. Cela peut être important pour des bougies classiques et éviter qu’elles se déforment. Ce mélange est préférable à une paraffine pure pour une utilisation en spéléologie, il permet d’avoir une cire plus stable, lors de la combustion de la BAM, la quantité de cire en fusion sera moins importante et se dégradera moins vite.

5 - ELEMENTS DE SYNTHESE POUR FAIRE SON CHOIX

Disposer d’un éclairage de secours performant (leds) : caractéristiques indispensables et risques

Si nous voulons rester cohérents, si la lampe principale de progression est capable de résister à une certaine immersion dans l’eau, la lampe de secours doit faire de même et permettre de pouvoir progresser en toute sécurité.

Etanchéité de la lampe
Les lampes électriques que nous utilisons répondent majoritairement aux contraintes du milieu souterrain. Elles sont relativement étanches et répondent à certaines normes : IP 67 à 69 ou IPX7 à 9, les deux veulent dire la même chose. Dans IP 67 par exemple, le premier chiffre indique l’étanchéité à la poussière, le second l’étanchéité à l’eau. Dans le cas de IPX 7, on ne donne que la résistance à l’immersion (la première lettre n’étant plus nécessaire), c’est-à-dire qu’elles sont capables de résister à une immersion de trente minutes à 1 m pour IPX7 et à 2m pour IPX8 et plus de limite sauf celle du constructeur pour IPX 9.

Accessibilité
Et surtout, un éclairage de secours doit être rapidement accessible ; il ne se trouve donc pas au fond du kit du collègue ! Il se situe sur le spéléo, soit autour de son cou, soit sur son casque ou encore dans son kit perso de ceinture en veillant à ne pas s’en séparer !!!

Utilisation
Quel que soit le moyen d’accessibilité choisi pour son éclairage de secours, il est évident que lors de son utilisation, il devra vous permettre de progresser en toute sécurité, les deux mains libres sans risque de le perdre. Le mieux étant de prévoir de quoi le fixer sur le casque, s’il ne s’y trouve pas en permanence.

Autonomie
Il doit aussi vous permettre de sortir de la cavité en cas de défaillance de votre éclairage principal et donc de disposer d’une autonomie suffisante et éclairer suffisamment. Si je suis à huit heures de la sortie, mon éclairage de secours doit me le permettre, je vais proscrire comme éclairage de secours toutes les lampes puissantes qui éclairent loin mais dont l’autonomie ne dure pas plus d’une heure à une heure et demie.

Puissance
Au même titre, une petite lampe frontale à leds qui éclaire juste mes bottes ne me permet pas de sortir en toute sécurité. Il est alors bon de posséder un éclairage de secours d’une puissance minimum de 40 lumens pour une frontale et éventuellement 10 lumens pour une lampe torche de qualité (concentration de son faisceau lumineux).

Disposer d’un moyen de chauffage performant selon les situations

Il s’agit de comparer les avantages et les inconvénients des divers moyens de chauffage testés : d’une part, les moyens statiques (couvertures de survie, ponchos) et d’autre part, les moyens dynamiques (bougies, lampes acéto, chaufferettes). Sont également présentés les moyens de chauffage non testés par nos soins (réchauds).

Pour les moyens statiques, la possibilité d’une utilisation individuelle ou collective, leur solidité, leur encombrement, leur isolation constituent des éléments à apprécier.

Pour les moyens dynamiques, leur utilisation individuelle ou collective, leur pouvoir calorifique, leur poids, leur encombrement et leurs dégagements gazeux sont à apprécier.

Moyens statiques
La couverture de survie légère
- Utilisation individuelle ou collective
- Très fragile, se déchire facilement surtout lors des points chauds
- Utilisation unique
- Doit être séchée après immersion
- Peu encombrante
- Isole moyennement

La couverture de survie lourde
- Utilisation individuelle ou collective
- Solide
- Peut être réutilisée
- Parfaite pour la tortue ou le point chaud
- Légèrement encombrante
- Pas évidente à plier seul dans les lieux étroits
- Pas de confinement stable lors de tortue

Le poncho spéléo
- Utilisation individuelle ou collective mais nécessite sa détérioration pour un usage collectif (confection de point chaud)
- Facile à utiliser
- Solide
- Rangement aisé
- Légèrement encombrant
- Très bon confinement
- Permet de bouger et de se déplacer sans rupture de confinement (tortue)

La couverture de survie épaisse rouge

- Utilisation individuelle ou collective
- Plus épaisse que toute autre (proche bâche)
- Très solide
- Moins pratique à utiliser (plus raide)
- Encombrante
- Pas évidente à plier seul dans les lieux étroits
- Pas de confinement stable lors de tortue
- Très bon pouvoir isolant

MOYENS STATIQUES						
	indiv.	collectif	facile	efficacité calorifique	durée utilisation	perfor-mance
couverture de survie légère	oui	oui	oui	faible	unique	faible
couverture de survie lourde	oui	oui	oui	bon	longue	bonne
poncho spéléo	oui	Par détérioration	oui	très bon	longue	bonne
couverture de survie rouge alu	oui	oui	non	très bon	longue	très bonne

Moyens dynamiques

La bougie chauffe-plat :

- Utilisation individuelle
- Très faible pouvoir calorifique et autonomie
- Facile à trouver dans le commerce et pas chère
- Faible poids

Remarque : les bougies dites « longue durée » sont encore moins performantes que la bougie chauffe-plat.

La bougie MTDE :

- Utilisation individuelle
- Prix élevé
- Efficace à partir de 2 mèches allumées pour une autonomie de 12h environ
- Meilleur rendement que les bougies chauffe-plat
- Peu encombrante
- Intéressante pour une attente type « tortue » mais pas recommandée pour un point chaud

La lampe à acétylène :

- Utilisation individuelle ou collective
- Nécessite de l'eau
- Lourde et encombrante
- Performance en termes calorifiques, autonomie de 6-8h avec une charge (en fonction des modèles)
- Possède son système d'allumage
- Polyvalente (peut servir d'éclairage)
- Intéressante pour un point chaud
- Adaptée à la tortue car permet un réglage de puissance

La bougie améliorée maison :

- Utilisation individuelle ou collective
- Très bon rendement et efficacité calorifique (le meilleur des systèmes de chauffe testés)
- Encombrement limité
- Autonomie de 7h mini
- Nécessite de la cire de qualité
- Bien adaptée pour un point chaud
- Chauffe beaucoup pour la tortue (en version 33cl)
- Bien adaptée pour mutualiser un moyen de chauffe pour plusieurs tortues face à face
- Volume et forme peuvent être adaptés
- Risques de brûlure à l'extinction

La chaufferette de corps réutilisable :

- Utilisation individuelle
- Fragile, nécessite d'être réactivée dans de l'eau chaude après utilisation
- Courte durée
- Produit contenu toxique
- Rapport poids puissance médiocre

La chaufferette de corps ou de main usage unique :

- Utilisation individuelle
- Ne supporte pas d'être trop humide (réaction chimique avec l'humidité ambiante)
- Date de péremption
- Nécessite une attention particulière dans son transport et stockage
- De durée et de qualité variables
- Performance aléatoire pour une même marque et même modèle
- Rapport poids puissance médiocre

Avantages et inconvénients des divers moyens de chauffage non testés par nos soins

Réchaud à gaz :

- Utilisation individuelle ou collective
- Consommation variable selon le gaz
- Fort pouvoir calorifique
- Mauvaise dispersion calorifique
- Nécessite une plaque de diffusion
- Favorise la condensation
- Fort dégagement gazeux nocif
- Difficile de gérer sa consommation sous terre
- Permet de faire chauffer des liquides

Réchaud à alcool liquide :

- Utilisation individuelle ou collective
- Consommation variable selon l'alcool
- Bon pouvoir calorifique
- Mauvaise dispersion calorifique
- Nécessite une plaque de diffusion
- Favorise la condensation
- Fort dégagement gazeux nocif
- Risque de renversement et d'inflammation du produit
- Difficile de gérer sa consommation sous terre
- Permet de faire chauffer des liquides

Réchaud à alcool solide ou gel :

- Utilisation individuelle ou collective
- Fort pouvoir calorifique
- Mauvaise dispersion calorifique
- Nécessite une plaque de diffusion
- Favorise la condensation
- Fort dégagement gazeux nocif
- Permet de faire chauffer des liquides
- Bon rapport poids performance
- Le débit ne peut être réglé

A part pour l'acétylène, le bon fonctionnement des autres moyens nécessite un bon moyen d'allumage : briquet, allumette et il faut bien penser à le protéger de façon étanche : tube étanche, sac plastique zip etc... les briquets électroniques (piezo) semblent mieux réagir à l'humidité que les briquets à pierre.

MOYENS DYNAMIQUES								
	indiv.	collectif	facile	pouvoir calorifique	durée d'utilisation	nocivité	poids	performance
bougie chauffe-plat	oui	non	oui	très faible	courte	faible	10 g	très faible
bougie MTDE	oui	oui	oui	faible	12h	faible	180 g	très faible
lampe acétylène	oui	oui	moyen	fort	6 à 8h	moyenne	1kg100	bonne
BAM	oui	oui	oui	très fort	7 à 8h	moyenne	250gr	très bonne
chaufferette de corps réutilisable	oui	non	oui	faible	4h	nul	150 gr	faible
chaufferette de corps ou de main usage unique	oui	non	oui	moyen	4h à 12h	nul	62 gr	moyenne peu fiable
réchaud à gaz	oui	oui	moyen	très fort	variable selon les cartouches et le gaz	forte	variable	moyenne
réchaud à alcool liquide	oui	oui	moyen	très fort	Variable selon le volume	forte	variable	moyenne
réchaud à alcool solide ou en gel	oui	oui	moyen	très fort	variable selon le produit	forte	variable	moyenne

A photograph of a man lying down, covered by a shiny, reflective thermal blanket. He is looking directly at the camera with a slight smile. A small white card with the words 'HOME SWEET HOME' printed on it is placed on his bare chest. He is wearing a dark long-sleeved shirt. The background shows more of the thermal blanket and some red and orange gear.

Finalement, certains testeurs apprécient le point chaud !

Enfin, certains testeurs apprécient le point chaud !

Si à ce jour, nous sommes entrés dans l'ère de la LED, que nous réserve l'avenir ?

L'évolution même des matières textiles et des sous-combinaisons va aujourd'hui vers davantage d'efficacité. Les anciens se rappelleront du bon vieux réxovil avec une sorte de molleton blanc à l'intérieur et alu à l'extérieur, qui quand il était sec faisait transpirer plus que le désert, et qui, mouillé, glaçait le sang, et dans tous les cas, démangeait grandement. Aujourd'hui, nous disposons de sous-combinaisons avec lesquelles nous pouvons barboter ponctuellement dans l'eau et ne pas avoir froid si l'on bouge suffisamment. Il est fort probable que l'on connaisse une importante avancée en la matière avec de nouveaux textiles intelligents.

RÉALISATION D'UNE BOUGIE DE SECOURS

ANNEXE #1

Voici le matériel nécessaire à la réalisation de cette bougie.

- Deux canettes de 33 cl en aluminium
- Une pince bec long
- Une agrafeuse
- Une paire de ciseaux
- Un morceau de bois rond
(ici le manche d'une cuillère en bois)
- Un moyen pour découper les canettes
(ici une petite perceuse avec disque à meuler en bout)
- De quoi faire fondre et couler la cire
- Un morceau de carton de 2 à 3 mm d'épaisseur
- 300g de cire de bonne qualité
- Un morceau de toile émeri
(papier de verre pour le métal)



Quelques précisions avant de continuer :

Le carton (type carton alvéolé d’emballage) va servir à confectionner la mèche. Son épaisseur devra mesurer entre deux et trois millimètres et sa largeur devra être égale à la hauteur de la canette.

Le carton utilisé a l’avantage de se trouver facilement et de ne rien coûter. Mais surtout, du fait des alvéoles contenues entre sa couche extérieure et intérieure, il permet d’augmenter le pouvoir de chauffe par un effet de tirage et de diffusion de la cire en fusion sur la mèche.

Pour la cire, l’utilisation d’une cire de qualité, composée de 80% de paraffine et 20% de stéarine, est conseillée afin de limiter les dégagements nocifs ou inconfortants lors de son utilisation. Elle présente pour sa part le meilleur rapport qualité prix. Il est également possible de se procurer de la cire végétale, mais là, prudence, le point de fusion d’une cire de colza ou de soja est très bas, elle se liquéfie à plus basse température, ce qui entraîne une forte consommation de cire et un risque de mauvaise combustion.

Pour la cire d’abeille (assez chère) ou de la cire de fond de ruche (chez un apiculteur), c’est leur forte odeur qui est difficilement supportable, et en milieu confiné, elle devient vite désagréable et sa combustion tend à se dégrader avec sa montée en température.

A ce jour, la cire donnant le meilleur résultat est la cire de palme, pour laquelle le point de fusion est élevé. Ainsi, une faible quantité de cire se retrouve en fusion dans le contenant (de 2 à 3 cm max), avec un bon pouvoir calorifique. L’impact écologique de la production de cette cire peut être un élément de choix, mais elle se trouve être la mieux adaptée à la confection des BAM. C’est elle, à ce jour, qui permet d’obtenir les meilleurs résultats.

Le coût varie selon la cire choisie entre 6€ et 11€ le kg de cire.

Pour le corps de la bougie

Commencer par découper le dessus de la première canette avec le disque à meuler (photo 2). Il est important de couper en conservant la partie inclinée. Pratiquer des incisions sur tout le tour de la canette, à l’aide de la perceuse, jusqu’à la partie inclinée de la canette (photo 3) puis rabattre les petites lamelles obtenues afin d’obtenir des bords non tranchants (photo 4). Avec la pince à bec long, pratiquer des plis pour restreindre le haut de la canette afin de permettre l’emboîtement de la pièce du dessus (photo 5).

Photo 2 - coupe du corps de la bougie



Photo 3 - entailles sur le bord de la canette



Photo 4 - rabattre les bords de la canette vers l’intérieur



Photo 5 - rétreinte du bord



Pour le couvercle

Sur la seconde canette, découper la canette à 5 centimètres du fond pour en faire le couvercle (photo 7). Il est conseillé de prendre le temps d’ôter les bavures et d’atténuer les bords tranchants avec de la toile émeri en faisant attention à ne pas se couper les doigts.

Assemblage du corps et du couvercle

Le rétreint de corps de la bougie doit lui permettre d’être coiffée par le couvercle (photo 8).

Photo 6 - rappel des étapes successives de la confection du corps de la bougie



Photo 7 - découpe du couvercle



Photo 8 - corps de bougie plus couvercle



Confection de la mèche

Pour la confection de la mèche, découper le carton à la hauteur de la canette moins 1 centimètre, toujours perpendiculairement aux alvéoles.

Puis rouler le carton autour du manche de la cuillère parallèlement aux alvéoles (elles doivent être disposées parallèlement au grand axe de la mèche).

Prélever un morceau de ce carton formé pour réaliser une mèche de 2cm de diamètre. Lors de l’agrafage, conserver un espace de 3 à 4 mm entre les deux bords (photo 9).

Nota : de la longueur du morceau de carton avant l’agrafage dépend le front de flamme et donc sa puissance. C’est en modifiant la surface enflammée de la mèche (le carton) que la puissance de la BAM peut être modifiée.

Cet espace entre les deux bords du carton a pour fonction de permettre à la cire en fusion de pouvoir pénétrer à l’intérieur de la mèche. Cela permet d’éviter le phénomène de combustion de la cire à l’intérieur de la mèche qui aurait pour effet d’augmenter la fusion en profondeur de la cire à l’extérieur de la mèche et par conséquent de réduire la durée de vie de la bougie.

Photo 9 - confection de la mèche



Remplissage de la bougie avec la cire

Faire fondre la cire, puis la faire couler progressivement dans la canette (photo 10), en veillant à ce que la mèche reste au centre. Il est préférable de couler en plusieurs passes (3 au moins) la cire et de la laisser prendre au fur et à mesure, pour éviter un trop grand phénomène de retrait de la cire qui risquerait de créer des bulles.

La remplir en laissant 5 millimètres sous le sommet de la mèche jusqu'à prise complète.

Lorsque la cire est complètement figée, allumer une première fois la bougie une minute puis l'éteindre avec le couvercle (photo 11). Le fait de l'allumer une première fois permet de faire monter la cire dans la mèche et de la rendre étanche. Elle pourra ainsi séjourner dans l'eau et être rallumée sans problème.

Il est important d'utiliser le couvercle pour l'éteindre à chaque fois, et attendre que la cire soit figée pour la ranger.

Si le spéléologue ne dispose pas d'une lampe à acétylène, il est nécessaire de disposer d'un moyen pour allumer la bougie, conditionné dans un étui étanche.

Photo 11 - premier allumage



En conclusion

Cette bougie est rapide à réaliser, pour un coût entre 1€50 et 3€. Elle est très efficace et pallie parfaitement à l'absence de lampe à acétylène sous terre, en permettant au spéléologue de disposer de quoi tenir bon en cas de coup dur, pour un poids de 250g par bougie. A vous de jouer !

Photo 10 - coulée de la cire



Photo 12 - moyens d'allumage



Photo 13 - les bougies en action



ANNEXE #2

Exploration dans le Scialet du Playnet dans le Vercors.

Une équipe de deux personnes s'engage dans la cavité avec pour objectif de poursuivre une exploration d'un secteur du réseau. Pour ce faire, ils doivent récupérer une partie du matériel d'escalade dans un autre secteur de la cavité non loin de là. Arrivés à l'embranchement, ils déposent leur matériel perso dont ils n'ont pas besoin. L'aller-retour qu'ils ont à faire se comptant en minutes, il ne leur semble alors pas pertinent de prendre leur petit kit perso « lot de secours » (lampe, chauffelette...). Ils repartent donc pour aller récupérer à quelques dizaines de mètres de là, le matériel à prendre datant de la précédente explo. Une fois sur place, ils rassemblent le matos d'escalade dont ils ont besoin et profitent de l'occasion pour visiter la galerie qui a été faite en première quelques jours plus tôt. Rapidement, ils se séparent, chacun prenant une direction différente pour chercher une suite que les prédécesseurs auraient pu oublier. Et là, alors que l'un des spéléos progresse dans la grosse galerie, tout d'un coup plus de lumière (pourtant l'accu est chargé !) ! Il tente de le rallumer : rien. Pas grave se dit-il, je vais prendre mon éclairage de secours : mais il est resté dans le mini kit à quelques minutes de là !!

Tant bien que mal, aidé de sa montre pour la lumière, il trouve à se caler pour attendre son compère parti dans le passage bas étroit. Une attente qui ne devrait pas durer puisque l'équipier est juste allé jeter un coup d'œil ! Cinq minutes puis cinq de mieux qui font dix et les minutes défilent... Après une attente interminable dans le noir et le froid de deux heures, enfin un filet de lumière apparaît suivi de son coéquipier, le soulagement enfin ! Moralité : ne jamais se séparer de son éclairage de secours !

Extrait d'une histoire Belge

Après être sortis du long méandre, nous scindons notre équipe en deux ; deux repartent par le chemin effectué pour demander de l'aide et nous restons à deux à la base des puits (accès classique du Trou Bernard). L'endroit est plus humide que le méandre, des petits filets d'eau (entre le goutte à goutte et le filet quasi continu) suintent à la base du puits. Le sol n'est absolument pas plat ; la partie la plus ouverte et avec le plus grand volume est la plus humide et aussi la plus escarpée. La partie venant du méandre est plus sèche mais un courant d'air y est constant. Une anfractuosité à côté de l'entrée du méandre présente l'intérêt d'être subhorizontal, hors du courant d'air et éloignés de la partie humide de la base du puits. Comme nous disposons du sachet de secours de la personne qui est restée avec moi, de ma couverture de survie, de la couverture de survie laissée par un de ceux ayant rebroussé chemin, du kit avec une corde supplémentaire, nous décidons très vite d'essayer de monter le point chaud soit à l'entrée du méandre en ayant l'idée d'obturer le courant d'air ou dans le creux à proximité de ce dernier. Le sachet de secours mentionné contient deux bougies chauffe-plat, une cordelette, un briquet et une couverture de survie. Nous ne voyons absolument pas comment utiliser la cordelette pour maintenir la couverture de survie contre une paroi ou pour former une tente. De plus, nous n'avons que deux bougies et pas de lampe acétylène (le réseau étant étroit j'ai décidé auparavant de descendre sans), nous savons sans même faire d'essai qu'il sera difficile de chauffer tout le point chaud tant attendu. Après les efforts consentis pour sortir du méandre tous mes vêtements (sous-vêtements, sous-combinaison et combinaison) sont humides ; j'ai donc très vite froid.

Mon acolyte me passe une bougie et le briquet pour que je me mette en « tortue » afin de regagner quelques degrés. Je sors ma couverture de survie, elle a pris l'eau et les surfaces argentée et dorée se délitent, se déchirent ; impossible de la déplier sans qu'elle ne parte en morceaux. Les deux autres couvertures de survie sont du même modèle. Quelques essais pour s'installer à l'entrée du méandre nous font changer d'avis, même s'il est impossible de s'allonger de tout notre long dans le creux celui-ci sera privilégié. Je me mets en tortue avec la couverture de survie de mon partenaire d'attente. J'ai du mal à bien rabattre la couverture pour empêcher les courants d'air, j'ai besoin de bouger souvent, je n'arrive pas à bien maintenir la bougie entre mes doigts (je n'ai pas suffisamment de place pour me mettre en tailleur avec la bougie entre les jambes). La bougie au bout de quelques courtes minutes me brûle les doigts tout en ne me réchauffant pas. Au bout de trois fois j'abandonne l'idée de pouvoir me réchauffer en faisant la tortue. Je bouge pour avoir le moins froid possible. Puis nous faisons un essai, une personne dans le creux et une autre sur une sorte de margelle entre l'entrée du méandre et le renforcement après avoir réparti la corde, le kit et nos baudriers respectifs pour s'isoler du sol. J'utilise alors la couverture de survie supplémentaire ; l'endroit est très bas de plafond et il faut se contorsionner pour arriver à déplier la couverture, du coup elle se déchire en plusieurs endroits. Je n'ai toujours aucune source de chaleur et froid. De plus, la position est très vite inconfortable. Nous décidons alors de nous coller à deux dans l'anfractuosité sur le kit, la corde et les baudriers en essayant d'utiliser les deux couvertures de survies partiellement superposées. L'endroit est un tube, il faut choisir sur quel côté s'allonger et ne plus bouger. Les pieds et le bas des

jambes ne reposent pas sur le sol et sont dans le vide. La chaleur de mon acolyte me permet de ne pas perdre encore en température bien que mes vêtements soient toujours mouillés. J'ai somnolé plusieurs heures ainsi, prise de secousses par moment, le côté au sol totalement ankylosé à ne plus le sentir (le bras, la jambe, le bassin et une partie du tronc). C'est cet engourdissement après plusieurs heures qui me fera bouger pour me remettre en station debout et faire circuler le sang. Quelques minutes après nous entendons du bruit, les secours arrivent. Le soda et la soupe sont les bienvenus. Seule la chaleur corporelle m'a permis de ne pas trembler de froid. Depuis, j'ai revu mon petit matériel de secours : couverture de survie totalement argentée, chauffeuses (pieds, mains et corps), bougie (mais sans conviction sur leur pouvoir calorifique), cordelette, pastilles pour purifier l'eau, barre d'encas.

Histoire de crue dans le Vercors dans l'Antre des Damnés en 2013

Je me suis retrouvée bloquée sur corde, en opposition dans une faille, à coté d'une cascade en crue, pendant trois heures et demies, dans le Goudurix, p 205 de l'Antre des Daminés, Vercors. Je ne pouvais plus continuer la remontée. La corde passait derrière une arête et le fractio juste sous le jet de la cascade battait contre la paroi. Je suis monté en oppo dans la faille, et j'ai pu libérer la corde. Je l'ai retendue sur mes bloqueurs. L'eau était très froide. Et il en arrivait par paquet entier, en rebond et chute de +/-100m de puits. Calée dans la faille, j'étais sur le bord du jet, et là je ne la ressentais plus que comme s'il me pleuvait fort dessus. J'avais du mal à respirer, je tremblais

déjà de froid malgré l'effort de la remontée. Je me suis obligée à me calmer, et j'ai compris qu'il fallait que je me mette en mode de survie. Il fallait sortir la couverture de survie épaisse que je garde dans mon dos. La passer par dessus la tête, entourer la corde tendue et la rabattre partout autour de moi. J'avais mon mini-kit dans un kit vide (nous déséquipions), une chance, j'ai pu me le mettre sous les fesses, mais toujours longé à moi. Le vent de la cascade me soulevait la couverture de survie, et il m'a bien fallu une demi heure pour arriver à tout caler, sans rien lâcher, en tremblant comme une feuille, dans un vacarme effroyable, et la peur constante de craquer. J'avais un trou béant de 100m sous les pieds que la couverture ne pouvait pas couvrir. Un courant d'air glacial arrivait de là. Je me suis décidée à ouvrir mon mini-kit et à tout déballer pour trouver ma bougie, bien sûr tout au fond. Ça m'a pris environ vingt minutes. De suite allumée, je ne ressentais plus d'arrivée d'air froid. Je tenais la bougie entre mes mains et j'essayais de l'immobiliser. Le calcul était vite fait ; orage 30min + bassin d'absorption 30min + passage de crue 1h + décrue 1h = 3h/3h30/4h à tenir. J'ai fait plein de calcul mental comme ça pour me garder les idées claires. Je passais la petite flamme dans l'ouverture de mes manches et contre ma poitrine. Je respirais son air chaud. Mais je ne pouvais rien faire pour mon dos. J'ai sorti des habits du mini-kit et comme je ne pouvais pas les mettre, je les ai calés entre mes genoux ankylosés et la paroi. J'ai pu manger un peu, et me rouler une clope énorme, mouillée, mais réconfortante. J'avais deux briquets et tous deux marchaient ; un était enveloppé avec la bougie, l'autre à l'envers dans la

poche de ma combi. Quand j'étais sûre d'entendre la décrue, il me fallait absolument repartir, j'avais trop peur de m'évanouir. Le fractionnement semblait solide dans le faisceau de ma scurion, j'ai repris confiance et j'ai tout rangé. Tout le puits était équipé dans la goulotte, et je savais que je prenais le risque de croiser une « tonche » sur la corde. Mais j'étais plus amochée qu'elle sûrement. La politesse la ferait sûrement tenir pour mon passage ; je devais maintenant sortir ! En haut du puits après +/-120m de remontée, je tremblais encore, mais les amis sont arrivés avec un thermos et leurs cœurs chauds et gros comme ça ! Voici quelques mois que cela est arrivé. En écrivant ce texte, j'ai revécu l'expérience, mais je ne vois pas ce que j'aurai pu faire de mieux. J'avais ma bougie « neuf heures », ma couverture épaisse, une montre étanche, des briquets, à manger. Aujourd'hui si je vais en cavité classe IV, je prends soit une acéto soit une grosse bougie, et l'équipe a un réchaud et un point chaud quelque part. Mais c'est dans le cas où nous sommes sur le sol. Mais sur corde, même confortablement installée sur un rebord en pente de dix centimètres, en oppo dans une faille, on ne sort pas le réchaud. Et je ne suis pas sûre que j'aurai pu tenir une grosse bougie entre mes mains tremblantes pendant trois heures. Une acéto aurait produit trop de CO², (je me suis déjà intoxiquée en faisant une tortue) je ne pouvais pas ventiler sans me remouiller. Et il y a la flamme à gérer, ça aurait voulu dire enlever le casque ; pour le mettre où ? Et qu'est-ce qui me protégeait la tête du froid et des éventuelles pierres ? Il n'y a que des chauffeuses qui auraient pu m'aider. Faut que je pense à m'en acheter.

CREDITS

Texte : Fabien Fécheroulle
Participation de : Pascale Vivancos, Vincent Schneider
Texte sur La toxicité humaine et environnementale : Jean-Pierre Buch, Médecin fédéral national
Texte sur les hypothèses et constatations expérimentales sur le fonctionnement des lampes : Alexandre Zappelli
Photos : Vincent Schneider
Mise en page : Michel Ribera (agence-terraterre.com)
Dessin : Pascale Vivancos
Corrections et relecture : Pascale Vivancos, Nathalie Loza, Gaël Monvoisin, Judicaël Arnaud, Gérard Cazes, Alexandre Zappelli, Pierre-Bernard Laussac, Vincent Biot

Ceux qui ont souffert pour ces tests :
Vincent Schneider, Pascale Vivancos, Julien Ginguené, Fabien Couturier, Fabien Fécheroulle.

Pour les documents ou recherches :
Christophe Gauchon, Pascale Vivancos, Eric Zipper

Historique Petzl :
Alain Maurice

Récit d'aventure :
Pierre-Bernard Laussac, Béatrice, Dominique Franck

Aide matériel :
Mondo-bougies, Cévennes évasion

Définitions diverses :
Wikipédia



BIBLIOGRAPHIE

- Quelques documents annexes utiles et/ou complémentaires :
- Publications**
- Le réseau souterrain de Francheville, Spéléo Club de Dijon (2010).
 - société-explorateurs.org
 - « Les moyens de réchauffer une victime et les gaz produits dans les points chauds secours » du SSF 68.
 - Topographie de la Combe aux prêtres, extraits de la monographie du réseau de Francheville du CDS 21.
 - Nicolas Clément, 1998, « La spéléologie hivernale », les cahiers de l'EFS n° 8.
 - Stéphane Jaillet, 1999, « La crue sous terre », les cahiers de l'EFS n° 10.
 - Michel Abadie, 2007, « Alternative à la classique couverture de survie », Info EFS n° 52 .
 - Rémy Limagne, 2010, « Cette fois, on y est », Spelunca N° 120, 4 pages. Lien : <http://ecole-francaise-de-speleologie.com/groupe-detude-technique-get/262-spelunca-120/download>.
 - Jean-Pierre Buch, analyse de l'étude du groupe spéléologique auvergnat de M. de Roy André sur l'utilisation d'un chauffage portatif bulletin de la COMED N° 45. Lien : http://comed.ffspeleo.fr/docs_comed/feuilles_de_liaison/Comed%20infos%2045.pdf.
 - Jean-François Balacey, 2011, « L'éclairage à leds en spéléologie », Spelunca n°121

Ouvrages

- Norbert Casteret, 1973, « Les grandes heures de la spéléologie », Librairie académique Perrin

Quelques liens Internet pour se procurer la cire

- www.mondo-bougies.com
- www.madecoamoi.fr
- www.afairesoimeme.com

Toutes les données sont issues de tests réalisés dans le cadre du mémoire instructeur de Fabien Fécheroulle sauf celles mentionnées.

Données disponibles sur demande à : fabienf@neuf.fr

*Lampe à acétylène ou à LED :
telle est la question de l'homo speleus ?*

