

Pratique de la cardiofréquencemétrie en spéléologie et canyonisme

par Drs Jean-Noël DUBOIS, Patrick GUICHEBARON et Jean-Pierre BUCH

LE CONTEXTE

En 2003, la commission médicale (CoMed) réalisait une étude sur la mortalité d'origine cardiovasculaire en spéléologie. Publiée en 2007 dans *Spelunca*, elle relevait des décès non traumatiques, quasi totalement inconnus avant 1995 (hormis les états d'épuisement et le syndrome du harnais), dont l'hypothèse de mort subite cardiaque semblait la plus probable. Depuis cette étude, d'autres décès identiques sont survenus. La moyenne d'âge des fédérés en 1965 était de 25 ans, elle est de 43 ans en 2018 (45 ans pour les hommes, 37 ans pour les femmes), cette quarantaine décennie étant une période où apparaissent beaucoup de pathologies, entre autres cardiovasculaires. Pour aller plus loin, nous devons caractériser l'intensité des contraintes physiologiques de nos activités, leur sollicitation, leur « pénibilité ».

Le reflet le plus précis de l'effort physique est la mesure de la fréquence cardiaque car elle augmente de manière linéaire avec l'intensité de l'effort, traduisant ce que subit le corps lors d'une activité physique.

Spéléologie et canyonisme sont des activités basées sur l'endurance, durant plusieurs heures voire dizaines d'heures, comportant des phases d'intensité maximale, se déroulant dans un milieu très particulier et inhabituel : pour la spéléologie, obscurité, froid et humidité ; pour le canyonisme, l'eau vive ; pour la plongée, les contraintes physiques des gaz et de la pression qui se surajoutent à la progression en milieu souterrain.

Une étude de cardiofréquencemétrie lors de remontée sur corde en salle, avait déjà attiré notre attention. Dans celle-ci, des pratiquants pouvaient atteindre leur fréquence cardiaque maxima théorique (FCMT), calculée selon la formule d'Astrand « 220 - âge », voire même la dépasser... Le risque cardiaque était bien présent, ce qui nous amena à lancer une étude sur la cardiofréquencemétrie en pratique de terrain. L'un de nous (P. G.) avait déjà réalisé des mesures dans une grande cavité, nous donnant une très bonne base de travail.

Cinq années aux multiples aléas auront été nécessaires pour réaliser plus de 200 enregistrements, dans différentes cavités et canyons, dans diverses situations (cavités engagées, cavités courantes, JNSC), chez des pratiquants de tous âges et niveaux. Ce travail nous permet de répondre aux deux questions initiales :

- la spéléologie et le canyonisme ont-ils une ou des contraintes physiologiques pouvant faire craindre un risque médical ?
- quelles recommandations pratiques en tirer et quels enseignements pour le certificat médical ?

Modalités pratiques

Le matériel

Le choix s'est porté sur les capteurs thoraciques émetteurs-récepteurs de la marque Polar, répondant aux particularités de la progression spéléologique, assortis des logiciels *ProTeam 2* et *ProPulse Ergo Plus*.

Le protocole

Il comporte un recueil des données qui seront nécessaires à l'analyse :

- données médicales : âge, sexe, poids, taille, antécédents personnels et familiaux, prise de médicaments, consommation de tabac et d'alcool, état de santé estimé le jour de la mesure, fréquence cardiaque de repos ;
- données d'environnement : classification de la cavité,

température, humidité, présence de gaz carbonique ;

- données techniques : connaissance de la cavité, portage de kit, ancienneté de la pratique en années, estimation du nombre de sorties par an, type de pratique habituelle (classique, engagée), autres activités sportives pratiquées (occasionnelle, régulière), ressenti de stress, ressenti de fatigue et quand.

La feuille de recueil d'activité

Élément clé de la mesure, une fiche papier et un crayon permettent à la personne de noter les horaires de progression en fonction des obstacles à franchir. La segmentation du tracé permet ensuite d'analyser chaque phase séparément, en plus de l'analyse globale.

Paramètres

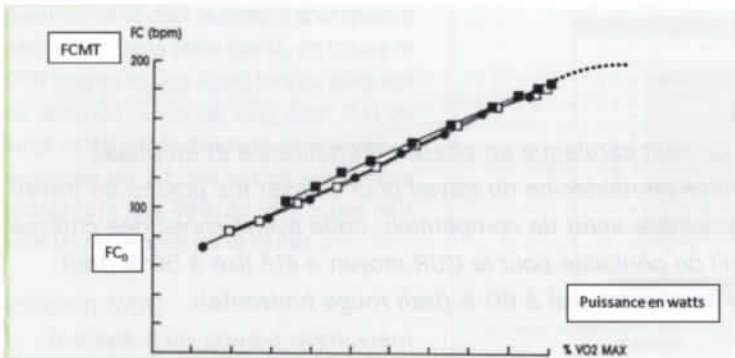
Les principales indications de la cardiofréquencemétrie sont la médecine du sport, la médecine de rééducation fonctionnelle, la médecine du travail et l'ergonomie. Chaque spécialité a développé des indicateurs spécifiques à ses objectifs, parfois différents, mais le plus souvent très proches, et complémentaires.

En médecine du sport, les indicateurs utilisés ont généralement

pour but de planifier un entraînement et sont axés (bien que ces notions soient actuellement discutées) sur la notion de seuils ventilatoires¹.

Ne pouvant calculer ces seuils, qui nécessitent une installation de laboratoire de médecine du sport, nous avons tenu compte, comme de nombreux auteurs, du parallélisme entre VO_2 ² et CCR et la prise en compte du CCR 99

Enregistrements



Relation entre puissance de l'effort et fréquence cardiaque d'après H. MONOD (modifié)

qui représente la charge cardiaque aux fréquences cardiaques élevées.

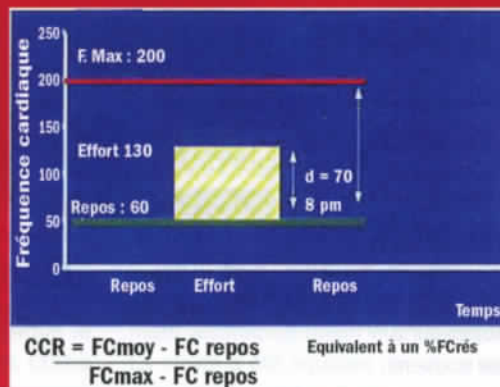
En médecine du travail et ergonomie, de nombreux indicateurs existent pour étudier la charge physique de travail, la dépense énergétique du sujet, et la pénibilité induite. La pratique de la spéléologie est une activité potentiellement intense, et non compétitive. Dans ce contexte, il nous a paru pertinent de retenir les indicateurs utilisés dans le monde professionnel.

Il nous semble que le seuil des 80 % de la FCMT soit également un bon critère de référence, ce n'est pas en soi une limite indépassable, mais le début d'une zone de prudence. La durée cumulative passée au-delà de cette limite est un élément qui nous semble important à considérer pour quantifier l'intensité de l'effort pour un individu donné pour l'activité exercée.

Quels sont les paramètres utilisés ?

- **Fréquence cardiaque de repos** FCR (servant à calculer les coûts cardiaques).
- **Fréquence cardiaque maximale théorique FCMT.**
- **Fréquence cardiaque moyenne FCM** de la sortie.
- **Pourcentage du temps de sortie passé au-delà de 80 % de la FCMT.** Très parlant et surligné en rouge sur la courbe enregistrée sur le logiciel *ErgoPlus*.
- **CCA, coût cardiaque absolu** (FC moyenne - FCR).
- **CCR (coût cardiaque de crête) moyen** (en %). Le CCR moyen est une estimation

Coût cardiaque relatif



$$\text{CCR} = \frac{\text{FC}_{\text{moy}} - \text{FC}_{\text{repos}}}{\text{FC}_{\text{max}} - \text{FC}_{\text{repos}}}$$

Equivalent à un %FCrés

de la capacité aérobie maximale, équivalent du pourcentage de VO_2 max utilisé en physiologie du sport, la VO_2 étant la consommation d'oxygène mesurée lors de la pratique d'une activité physique. Différentes études suggèrent que la charge acceptable de travail pour huit heures est de 30 à 40 % de VO_2 max. Au-delà de 40 %, on peut parler de pénibilité. Le CCR permet de fixer des limites à ne pas dépasser sur huit heures : ≤ 50 % pour un sujet sain. Au-delà de 60 % on atteint le seuil de production des lactates (phase anaérobie) et au-delà de 80 % le seuil d'accumulation des lactates.

- **CCR 99 (en %).** Le CCR 99 correspond au coût cardiaque de crête dépassé pendant 1 % de l'activité (soit environ 5 mn) = indice de choix pour définir la « pénibilité de crête » d'une activité et caractériser son profil cardiaque, il est recommandé de ne pas aller au-delà de 60 %.
- **Le score selon Meunier.** Pour chaque activité, les scores des participants ont été regroupés sur un même abaque avec le CCR 99 en ordonnée et le CCR moyen en abscisse, ce qui permet, selon le Pr Meunier de classer les activités en « acceptable/plutôt lourd/excessif ».

Spéléologie

- **Sorties des membres du club de spéléologie / Topi Pinnuti** de Bastia (Corse); soit en cavités locales avec des profondeurs allant de -30 m à -117 m, soit lors du congrès annuel 2015 de la FFS (Préalpes de Grasse) et lors du camp 2017 dans l'Hérault; ainsi que dans la grotte de Lano (Lano, Corse) lors des Journées CoMed 2015 et à l'occasion des JNSC 2016 sur une population d'initié(e)s. Quarante-sept enregistrements ont été réalisés chez 36 personnes (15 hommes et 21 femmes); pour l'analyse, dans un souci d'homogénéité, les enregistrements ont été regroupés par type de cavité ou niveau de pratique.
- **Appréciation de la charge physique en milieu extrême:** explorations hivernales d'une cavité alpine à grande profondeur (-850 m) et de grande amplitude horaire (> 24 h) avec bivouac le plus souvent.

Ces évaluations commencées en 2012 (et terminées en 2017) concernent 14 spéléologues d'un interclub, de sexe masculin, âge moyen de 44 ans au moment des mesures (de 17 ans à 57 ans). Engagement dans une cavité d'envergure en cours d'exploration. Une trentaine d'enregistrements ont été réalisés.

Canyonisme

La CoMed a tenu un stand lors du Rassemblement interfédéral canyon (RIF) en 2015 à Ghisonaccia (Corse). Vingt-deux enregistrements concernant six canyons dont un de nuit. Les participants pratiquaient tous régulièrement à des niveaux plus ou moins élevés. Durée des sorties trois à sept heures avec des marches d'approche ou de sortie de trente minutes à une heure. Quatre enregistrements ont pu également être réalisés lors d'une sortie initiation.

Plongée souterraine

Une plongée profonde (fond de cavité à -852 m) dans le siphon terminal du collecteur d'un grand réseau alpin. Plongée profonde en solo intégral, en hivernale, en première. Durée de la plongée: 45 min, profondeur atteinte -35 m.

Résultats

AIDE À LA COMPRÉHENSION DES DIAGRAMMES

Le diagramme retenu pour présenter les niveaux de coût cardiaque en phases d'endurance et en phase dynamique est celui dit « abaque de Meunier » utilisé en médecine du travail pour classer les postes de travail. Dans le cas de notre population, considérée comme hors sport de compétition, nous avons choisi des critères plus élevés : pour les phases d'endurance, le seuil de pénibilité pour le CCR moyen a été fixé à 50 % (trait rouge vertical) et pour les phases dynamiques, le seuil a été fixé à 60 % (trait rouge horizontal).

Spéléologie

Le CCR est au-delà de la valeur de 50 % pour le tiers des sujets (10/28) et tous les sujets ont un CCR 99 > 60 %.

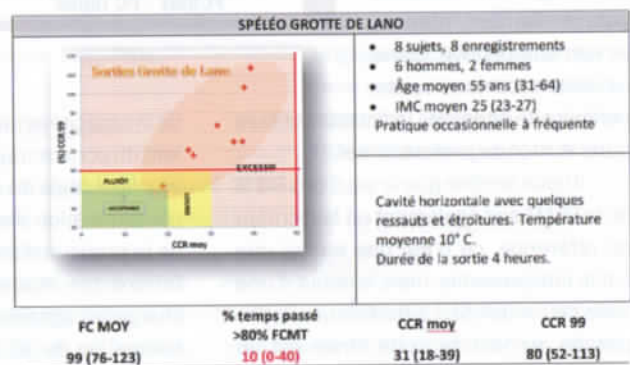
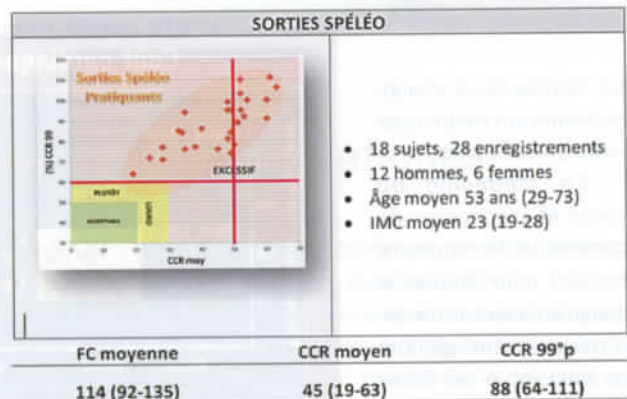
Le graphe montre une grande hétérogénéité dans sa répartition, ceci étant lié aux différents types de cavités parcourues et au niveau de pratique.

Grotte de Lano (horizontale)

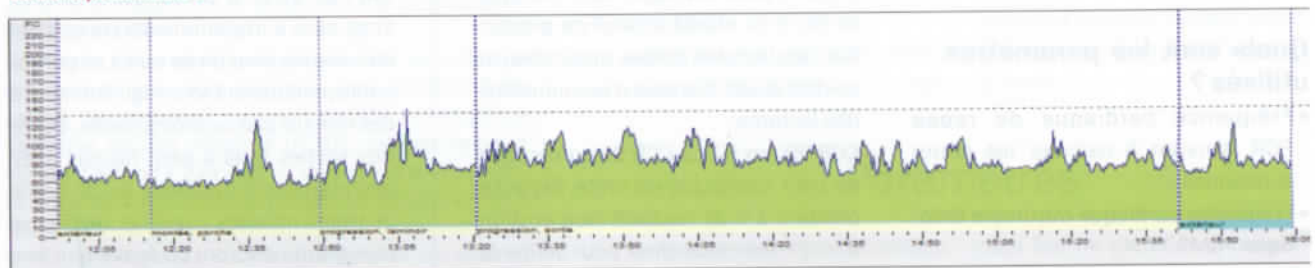
Nous sommes dans une cavité horizontale, sans puits ni fractionnements, l'engagement physique étant lié essentiellement à quelques étroitures ponctuelles et un laminoir d'une quinzaine de mètres de long. Le coût cardiaque global est moins important avec une FC moyenne de 99, un CCR inférieur au seuil de pénibilité mais un CCR 99 supérieur à 60 % pour la quasi-totalité des sujets. Trois sujets se trouvent aux extrémités des analyses :

- Homme de 53 ans avec une pratique régulière et intensive de la spéléologie. FC moyenne à 78 bpm³, CCR à 19 et CCR 99 à 52 et n'ayant jamais dépassé 80 % de sa FCMT. Il s'agit d'un sujet endurant bien entraîné avec une bonne adaptabilité à l'effort (cardiofréquencemétrie 1).
- Homme de 64 ans spéléologue confirmé mais avec peu de pratique. FC moyenne à 123, CCR à 35 et CCR 99 à 74. La limite de 80 % de la FCMT est dépassée dans 40 % de temps de la sortie (cardiofréquencemétrie 2).

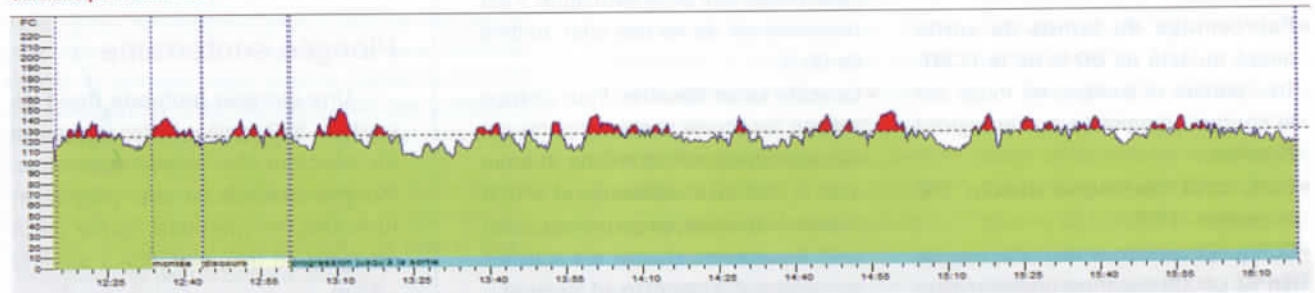
Le logiciel d'analyse ProPulsesErgo permet le découpage de séquences lors de la sortie et ainsi de pouvoir calculer les



Cardiofréquencemétrie 1



Cardiofréquencemétrie 2



paramètres de coût cardiaque pour chaque séquence. Dans cette cavité, on trouve le CCR moyen le plus élevé lors du passage du laminoir (15 m de long pour 2 m de large et 40 cm de haut), avec une valeur moyenne de 74, les autres séquences présentent des valeurs identiques aux valeurs moyennes de la sortie.

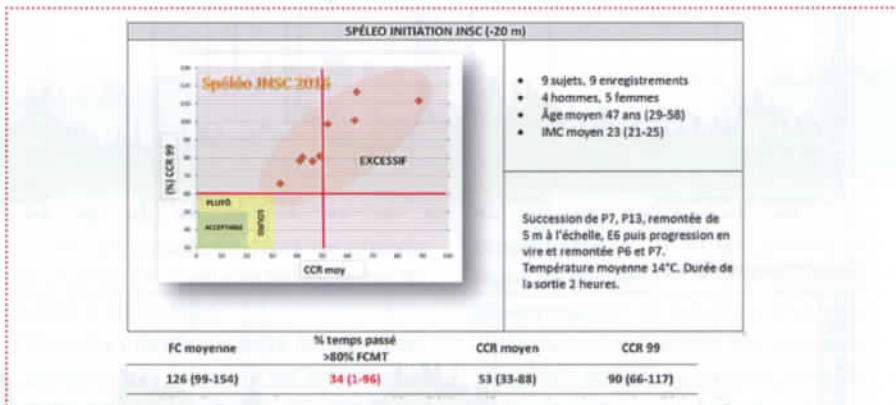
Initiation JNSC

Il s'agit d'un groupe découvrant les techniques de spéléologie alpine par une initiation de deux heures avant de descendre sous terre. Cinq d'entre eux pratiquaient une activité sportive (montagne, aviron, course à pied, canyon).

La FC moyenne est globalement plus élevée (126 *versus* 114) que la moyenne des pratiquants confirmés; le CCR également (53 *versus* 45); ainsi que le CCR 99 (99 *versus* 88). Le temps passé au-delà des 80 % de la FCMT varie de 7 à 67 %, ce qui signifie une grande variabilité des sujets dans l'adaptabilité à l'effort. Cela se vérifie dans les courbes.

- Femme de 52 ans, ayant pratiqué le canyon. FC moyenne à 99 bpm, CCR à 33, CCR 99 à 66 et ayant dépassé sa FCMT dans moins de 1 % du temps de la sortie (**cardiofréquencemétrie 3**).
- Homme de 56 ans, prédiabétique et prenant un traitement antihypertenseur, pratiquant l'aviron et le sport en salle. FC moyenne à 154, CCR à 88, CCR 99 à 112 avec 96 % du temps de la sortie passé au-delà de 80 % de sa FCMT (**cardiofréquencemétrie 4**).

Là aussi nous avons découpé la sortie en séquences afin de calculer le CCR s'y rattachant. Sans surprise, c'est la remontée du puits de sortie, un P7, qui entraîne le CCR le plus élevé, 30 % de plus que la valeur moyenne.



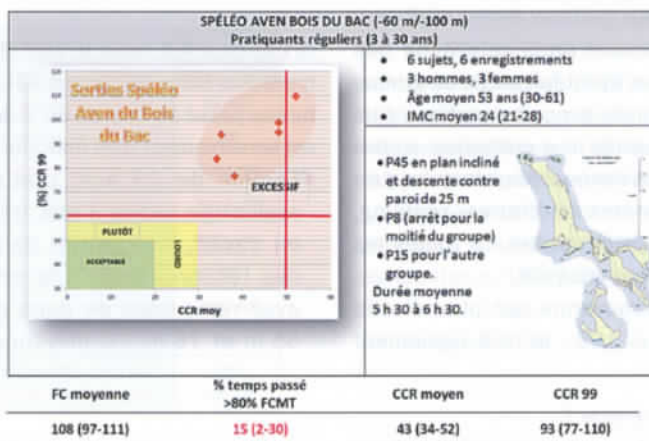
Aven du Bois du Bac (spéléologues pratiquants)

Enregistrements réalisés au cours d'une visite de type « classique » par des spéléologues pratiquant régulièrement (avec des anciennetés variables, de 3 à 30 ans). La cavité rassemble ce que l'on rencontre fréquemment dans les sorties de club, puits de moins de 30 m, remontées d'une dizaine de mètres, progression en vire et quelques passages de fractionnement techniques (plein vide ou déporté).

La FC moyenne du groupe reste peu élevée, 108 bpm, avec un CCR supérieur

| | CCR moy |
|--------------------|---------|
| Descente P7 | 45 |
| Descente P13 | 54 |
| Descente vire MC | 54 |
| Montée échelle E5 | 62 |
| Vire | 63 |
| Montée E6 | 65 |
| Remontée demi P13 | 65 |
| Remontée P7 sortie | 68 |

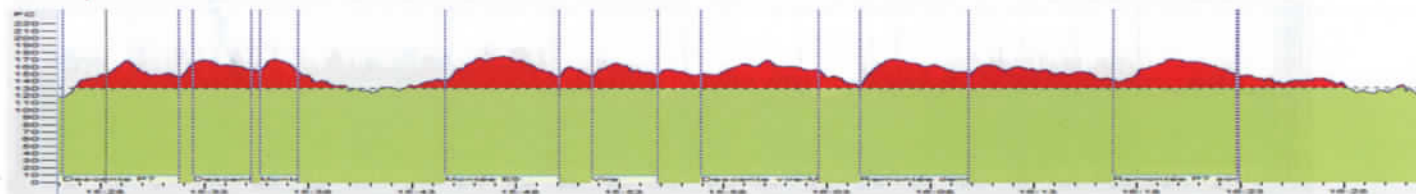
à 40 % et un CCR 99 très au-dessus de la valeur recommandée. Tous les membres ont dépassé 80 % de leur FCMT, là aussi avec des valeurs extrêmes liées au niveau de pratique et à l'aisance à passer les fractionnements.



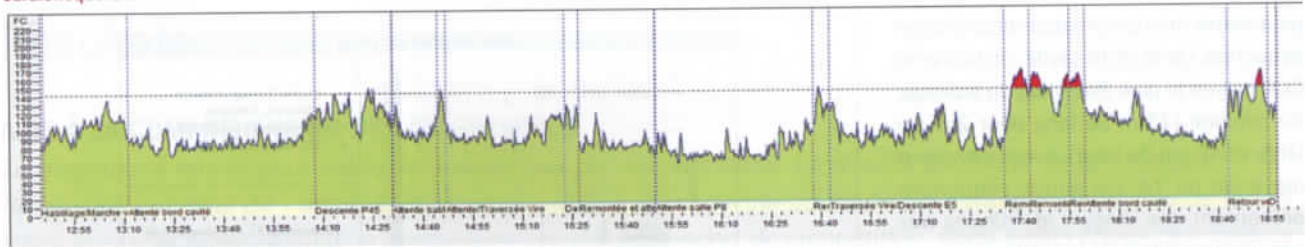
Cardiofréquencemétrie 3



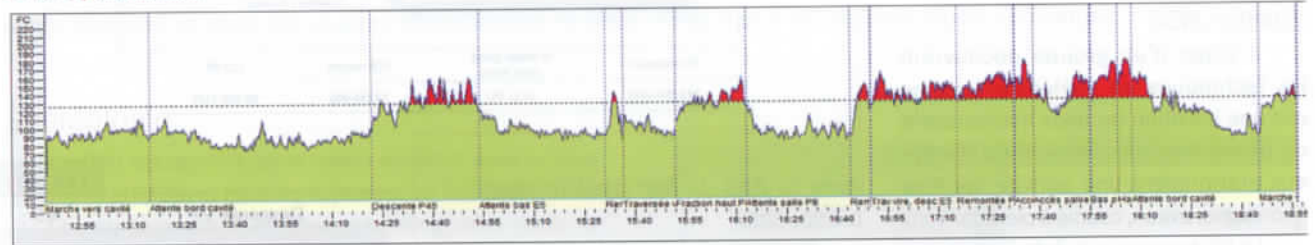
Cardiofréquencemétrie 4



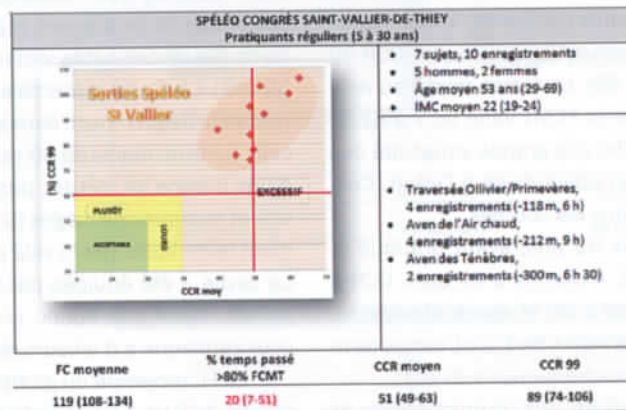
Cardiofréquence-métrie 5



Cardiofréquence-métrie 6



- Femme de 41 ans, pratiquant régulièrement la spéléologie depuis trois ans, sportive. FC moyenne à 97, CCR à 34, CCR 99 à 84 et ayant dépassé 80 % de sa FCMT pendant 5 % de la sortie (cardiofréquence-métrie 5).
- Femme de 61 ans, pratiquante mais peu à l'aise en technique de spéléologie alpine. FC moyenne à 111, CCA à 52, CCR 99 à 110 et 30 % du temps au-delà de 80 % de sa FCMT (cardiofréquence-métrie 6).



Préalpes de Grasse (spéléologues pratiquants)

On retrouve dans ce groupe des spéléologues ayant fait partie du groupe précédent mais avec une pratique plus engagée, cavités plus profondes, sorties de durée plus élevée, difficultés techniques plus fréquentes (étroitures, *ramping*, sorties de puits étroites...). Toutes les cavités étaient équipées.

La FC moyenne est plus élevée (119 *versus* 108), le CCR également

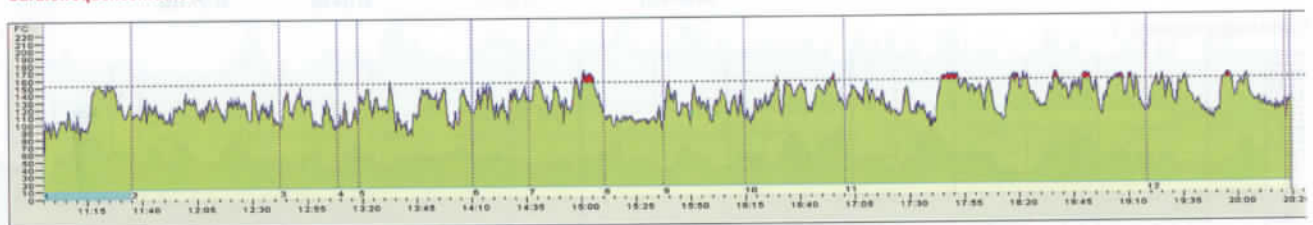
(51 *versus* 43) mais le CCR 99 légèrement plus faible (89 *versus* 93). Le temps moyen passé au-delà de 80 % de la FCMT est sensiblement plus important.

- Femme de 29 ans, pratiquant la spéléologie depuis 3 ans, très à l'aise en cavité, enregistrée dans l'aven des Ténébres jusqu'à la cote -300, avec remontées de puits de 40 m, 55 m et 76 m. FC moyenne à 125,

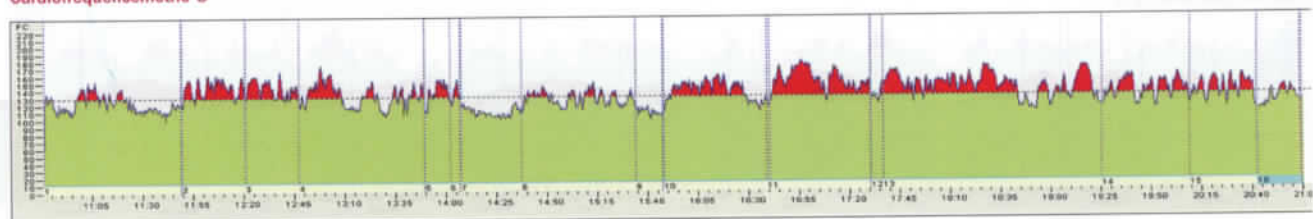
CCR à 50 et CCR 99 à 78. Seulement 8 % au-delà de 80 % de sa FCMT (cardiofréquence-métrie 7).

- Homme de 58 ans, avec une pratique régulière, dans la cavité de l'aven de l'Air chaud, physiquement éprouvante et sortie de longue durée (10 h). FC moyenne à 134, CCR à 63, CCR 99 à 106 et 51 % au-delà de 80 % de sa FCMT (cardiofréquence-métrie 8).

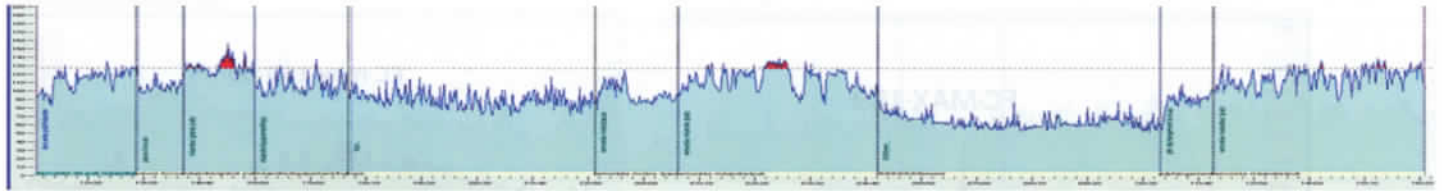
Cardiofréquence-métrie 7



Cardiofréquence-métrie 8



Cardiofréquence 9



Appréciation de la charge physique en milieu extrême; explorations hivernales d'une cavité alpine à grande profondeur (-850 m) et de longue durée (> 24 h)

Quatorze spéléologues d'un interclub, de sexes masculins, âge moyen de 44 ans au moment des mesures (de 17 ans à 57 ans). Engagement dans une cavité d'envergure en cours d'exploration (gouffre perte de la Muraille de Chine, massif de Platé, Arâches-la-Frasse/Haute-Savoie).

1) Le profil global de progression est coûteux

Exemple de progression d'un homme de 48 ans, entraîné, lors d'une sortie d'exploration de 26 heures, avec bivouac. Les données des compagnons de cordée sont parfaitement reproductibles. Le coût cardiaque absolu moyen (CCA) de la sortie est supérieur à 30 bpm = activité jugée pénible. Le coût cardiaque relatif moyen est supérieur à 30 % = astreinte cardiaque élevée (cardiofréquence 9).

Si l'on regarde en détail les phases de progression, quelques enseignements méritent d'être tirés :

- Dans les très grands puits, le coût énergétique de la descente est identique à celui de la montée (n° 1/7/10). Cela n'est pas très étonnant, du fait notamment de l'engagement lié au passage des fractionnements « plein gaz », aux pendules, au matériel spécifique interdisant la moindre faute (corde de faible diamètre, exclusion des descendeurs autobloquants), à l'énergie parfois nécessaire pour se délonger. Inversement, la montée aux bloqueurs est plus rassurante, et surtout plus calme car « il faut durer ».
- La progression en méandre et le franchissement d'un gros P100 (n° 3), arrosé, technique et engagé, entre -600 et -700 génèrent les coûts cardiaques les plus élevés de la sortie, retrouvés chez la plupart des participants.
- Sans surprise, les activités les moins pénibles sont la réalisation de la

topographie (n° 5) et les phases de repos au bivouac (n° 8 et 9). La phase de sommeil (n° 8), très caractéristique sur la courbe, permet, bien que courte, de récupérer correctement pour la remontée du lendemain.

2) Le coût énergétique d'une sortie peut varier en fonction de l'âge, de l'expérience et du niveau d'entraînement

Quelle est l'influence des facteurs âge et expérience sur la gestion cardiaque de la sortie ?

Deux sujets sont comparés lors de la même sortie commune au fond du réseau (quatre participants), de type découverte et sortie « photo ». Quarante ans les séparent (Sujet A: 57 ans, spéléologue très expérimenté / Sujet J: 17 ans, jeune spéléologue prometteur). L'équipe franchira la cote des -800, dormira au bivouac à -500, et sortira après vingt-quatre heures passées sous terre.

Les fréquences cardiaques

Les FC de crête (maximale de l'effort) sont assez proches (174 contre 181), et témoignent d'un régime passager de très forte montée de FC chez notre senior (11 points de plus que la FCMT [163]).

La valeur de FC qui n'est dépassée que pendant 1 % du temps (FC 99^e percentile) est identique (162/163) mais forcément plus impactante pour notre senior car au niveau de sa FCMT.

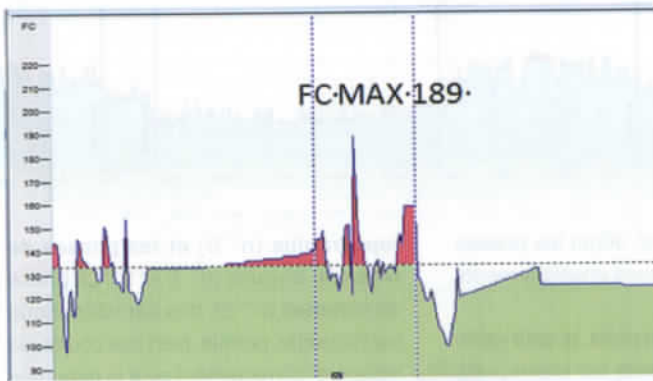
| N° | Durée | FC Mini (bpm) | FC crête | FC Moyenne | CCA | % CCR | %CCR crête | Activité | Profondeur (m) |
|----|----------|---------------|----------|------------|-----|-------|------------|---------------------------|----------------|
| 1 | 02:08:20 | 81 | 138 | 114 | 51 | 46,8 | 68,8 | descente de puits méandre | 0 à -500 |
| 2 | 01:00:40 | 94 | 135 | 106 | 43 | 39,4 | 66,1 | pause bivouac/matériel | -500 |
| 3 | 01:31:00 | 98 | 159 | 128 | 65 | 59,6 | 88,1 | méandre/grand puits | -500 à -700 |
| 4 | 02:01:20 | 87 | 140 | 107 | 44 | 40,4 | 70,6 | méandre/équipement/topo | -700 à -830 |
| 5 | 05:10:25 | 65 | 127 | 91 | 28 | 25,7 | 58,7 | topo | -830 à -750 |
| 6 | 01:46:15 | 79 | 129 | 97 | 34 | 31,2 | 60,6 | remontée rivière/pause | -700 |
| 7 | 04:14:10 | 83 | 142 | 114 | 51 | 46,8 | 72,5 | remontée méandre/puits | -700 à -500 |
| 8 | 05:54:10 | 51 | 100 | 64 | 1 | 0,9 | 33,9 | sommeil | -500 |
| 9 | 01:08:45 | 51 | 110 | 89 | 26 | 23,9 | 43,1 | pdj/rangement bivouac | -500 |
| 10 | 04:28:45 | 83 | 141 | 115 | 52 | 47,7 | 71,6 | remontée méandre/puits | -500 à 0 |

Cardiofréquence 10

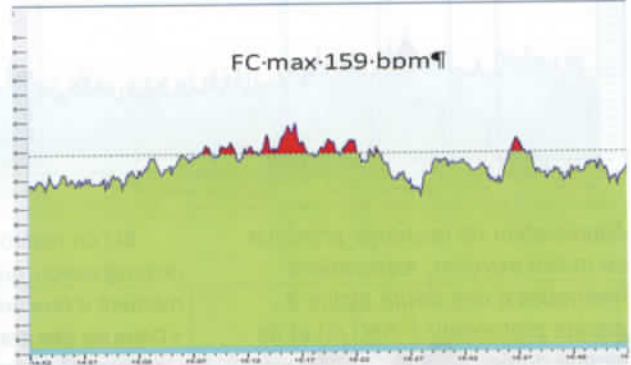


Cardiofréquence 11





Cardiofréquence 12



Cardiofréquence 13

Les coûts cardiaques

Le **coût cardiaque absolu** est significativement plus élevé chez notre senior (46) (cardiofréquence 10) que chez son jeune ami (35) (cardiofréquence 11). Il représente le **coût énergétique de la sortie**.

Le **coût cardiaque relatif moyen** reflète bien la pénibilité de l'activité quel que soit le sujet (entraîné ou non, jeune ou ancien). Il est bien plus élevé chez le senior/jeune (48,4 contre 29,7) et prouve que celui-ci, malgré toute son expérience, a puisé bien plus d'énergie dans ses réserves (coût énergétique 20 points plus élevé).

Le **CCR 99** définit la pénibilité de crête de l'activité, il est dépassé chez le jeune (66 %) mais surtout chez le senior (99 %).

Pourcentage du temps de sortie passé au-delà de 80 % de la FMT (en rouge), 35 % pour notre ancien (sujet A) et 1 % chez le junior (sujet J), cf courbes ci-dessus.

Au total, la comparaison par âge sur une même sortie engagée est riche d'enseignements. Si les différents indicateurs de FC sont peu discriminants chez nos deux sujets (l'effort est soutenu et important dans les deux cas), **les coûts cardiaques révèlent un niveau de sollicitation bien plus élevé chez le senior** (coût énergétique, pourcentage de VO₂ max, sollicitation des mécanismes aérobie, puis mixte puis anaérobie).

Le bon niveau physique de base, l'expérience du sujet, sa gestion des difficultés, l'entraide et la cohésion de l'équipe ont permis à cette sortie de se dérouler sans incident. *Chi va piano va sano e va lontano* devrait être un adage de toute progression engagée en milieu souterrain.

Il n'en reste pas moins que c'est dans ce genre de situation à très forte sollicitation cardiovasculaire et métabolique que le suivi médical (validé par un certificat) trouve tout son sens.

3) Les accidents physiologiques avec montée très importante de la fréquence cardiaque

La cardiofréquence est également très utile pour illustrer des situations sortant de l'ordinaire, que l'on peut qualifier d'incidents physiologiques.

■ Conséquence d'une presque noyade

Fin janvier 2013, une crue (pluie sur neige à 2000 m) surprend l'équipe au fond du réseau. La remontée au bivouac (de -800 à -500) se fait dans des conditions très difficiles et stressantes. Lors du franchissement d'un P17, heureusement équipé hors-crue (rappel guidé) car sinon infranchissable, une vague de crue particulièrement violente surprend un équipier de 56 ans, qui suffoque sous la violence de l'eau. Cela se traduit par un pic de FC très élevé chez ce sujet alors en « mode survie » pour récupérer de l'impact (inhalation plus ingestion) et franchir les quatre derniers mètres qui le séparent de la sortie du puits (cardiofréquence 12).

■ Conséquence d'un incident technique dans un P100

Lors d'une exploration au fond du réseau, un équipier se trouve en difficulté à la cote -660 au passage d'un fractionnement à la descente d'un P100 technique (multiples pendules du fait d'un

équipement hors crue pour s'éloigner de la rivière). Sa poignée bloqueur (Basic) sortie pour se rapprocher de l'amarrage se retrouve bloquée sous le nœud et est très difficile à enlever. S'ensuivent quelques minutes d'efforts explosifs, en plein milieu d'un grand puits, pour se tirer de ce mauvais pas et continuer la descente.

La FC max de la sortie est atteinte lors de cette difficulté technique à la descente.

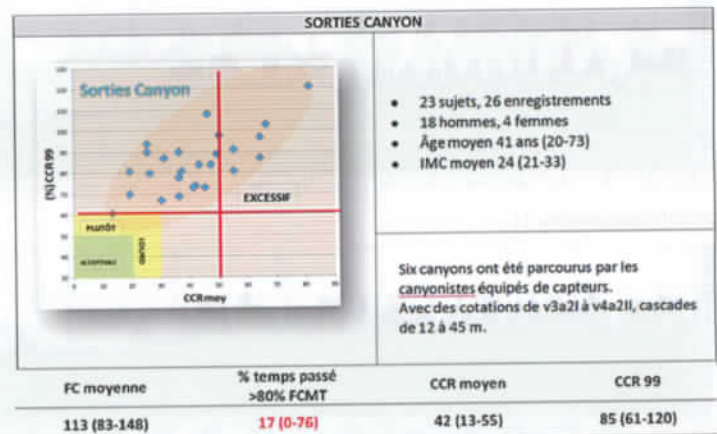
Là encore les paramètres de coûts cardiaques de cet épisode qui n'a duré que huit minutes sont particulièrement élevés, et témoignent d'un effort en force pure (faisant appel au métabolisme anaérobie) dans un contexte de stress (cardiofréquence 13).

Canyonisme

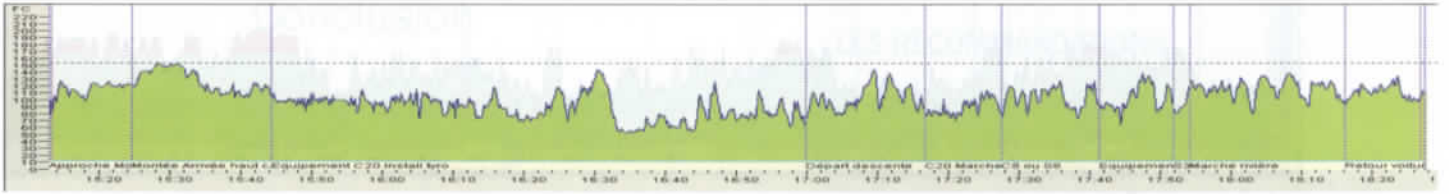
| | SPÉLÉO | CANYON |
|--------|--------|--------|
| FC moy | 114 | 113 |
| CCR | 45 | 42 |
| CCR 99 | 88 | 85 |

Si l'on compare aux 28 enregistrements réalisés en sorties spéléologiques, les valeurs sont sensiblement identiques.

Nous avons pu isoler deux groupes, un de six canyonistes pratiquants réguliers et une sortie initiation de quatre personnes.



Cardiofréquence 14



Cardiofréquence 15



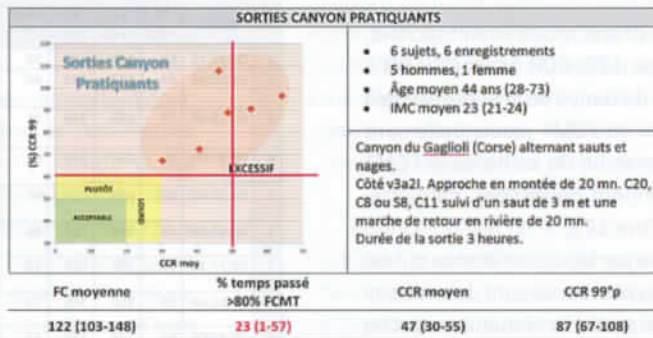
Sorties pratiquants

| Activité | CCR-moy |
|-----------------------------|---------|
| C20-Descente | 38 |
| S3 | 38 |
| Équipt-descente-C11 | 39 |
| C20-Installation-Tyrolienne | 43 |
| S8-ou-C8 | 43 |
| Marche-rivière | 52 |
| Montée | 64 |

Les valeurs peuvent sembler surprenantes, FC moyenne supérieure aux valeurs du groupe entier et à celle des initiés, de même pour le CCR et le CCR 99. La dispersion du groupe a peut-être une explication, il faut savoir que le rassemblement canyon a été très festif et que certaines soirées précédant la sortie se sont terminées tardivement...

L'analyse par blocs montre que les phases les plus exigeantes sont la marche d'approche et la marche de retour en rivière.

- Homme de 28 ans pratiquant régulier, sportif aguerri, cordiste. FC moyenne de 103, CCR à 30, CCR 99 à 67, n'a pas dépassé 80 % de sa FCMT (**cardiofréquence 14**).
- Homme de 61 ans, moniteur canyon, pratiquant régulier en spéléologie. FC moyenne à 133, CCR 64 et CCR 99 de 97, a dépassé 80 % de sa FCMT pendant 57 % de la sortie (**cardiofréquence 15**).

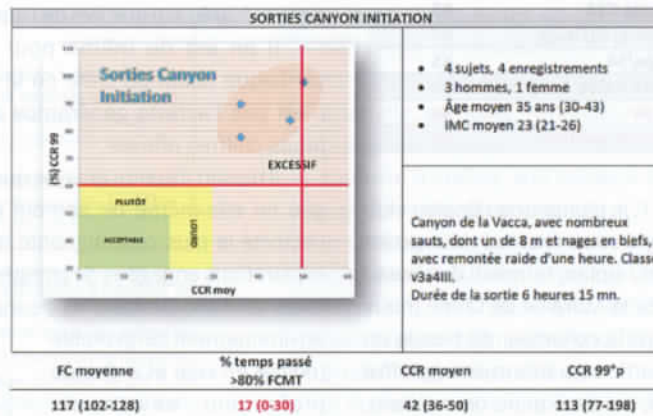


Sorties initiation

Quatre personnes ayant très peu de pratique de canyoning ou remontant à plusieurs années. Canyon sans difficulté majeure si ce n'est sa marche de sortie très raide. Les valeurs sont moins élevées que lors des initiations en spéléologie. Elles sont cependant sensiblement plus élevées que les valeurs de l'ensemble des

canyonistes, notamment pour le CCR 99 (113 versus 87).

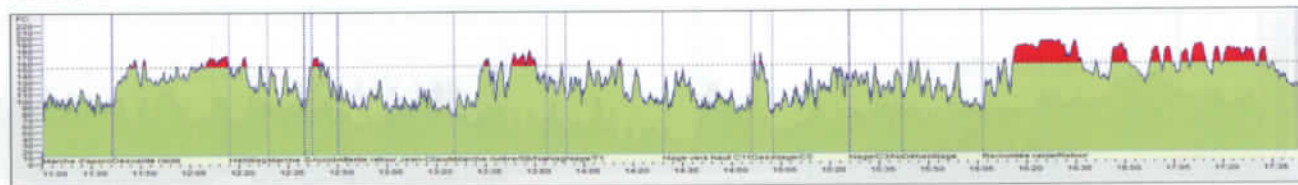
- Homme de 30 ans, sportif, ayant pratiqué un peu de canyoning dix ans en arrière. FC moyenne à 102, CCR 36 et CCR 99 à 77: 3 % du temps passé au-delà de 80 % de sa FCMT (hors du canyon, lors de la marche de retour) (**cardiofréquence 16**).



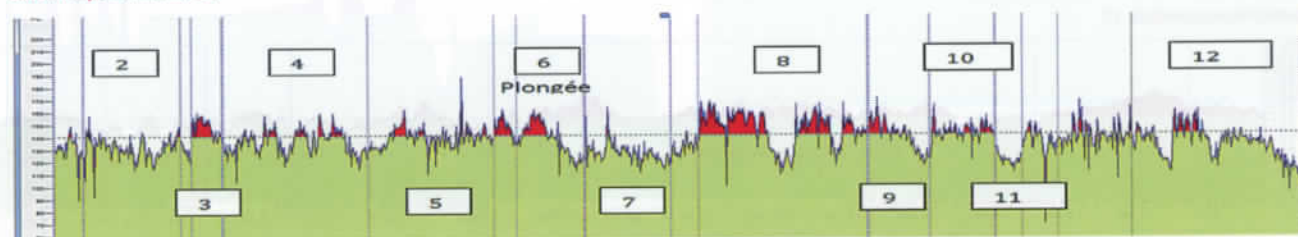
Cardiofréquence 16



Cardiofréquence 17



Cardiofréquence 18



■ Femme de 30 ans, modérément sportive. FC moyenne 128, CCR 50 et CCR 99 à 198! 23 % du temps de la sortie au-delà de 80 % de sa FCMT (essentiellement lors de la marche de sortie où la FCMT a été largement dépassée) (cardiofréquence 17).

L'analyse par blocs confirme ce qui est évident sur la courbe, ce sont dans ce cas la marche de sortie, la séquence marche en rivière, la nage en bief et la descente raide (à la limite de la désescalade) qui entraînent les CCR les plus élevés.

| N° | durée | FC mini | FC crête | FC moy. | Delta FC | CCA | % CCR | % CCR crête | Phase d'activité | niveau CCR crête |
|----|----------|---------|----------|---------|----------|-----|-------------|-------------|---|------------------|
| 1 | 00:19:15 | 61 | 196 | 134 | 59 | 26 | 38,2 | 129,4 | équipement salle d'entrée du vestiaire au bivouac (0-500) | >60% |
| 2 | 01:03:48 | 63 | 197 | 133 | 60 | 25 | 36,8 | 130,9 | méandre Tibet libre + puits Gengis Khan | >60% |
| 3 | 00:19:48 | 74 | 168 | 148 | 31 | 40 | 58,8 | 88,2 | du GK au siphon - 852 | >60% |
| 4 | 01:35:09 | 45 | 198 | 136 | 61 | 28 | 41,2 | 132,4 | préparation plongée | >60% |
| 5 | 01:23:03 | 63 | 203 | 139 | 66 | 31 | 45,6 | 139,7 | plongée siphon - 887 | >60% |
| 6 | 00:45:06 | 45 | 199 | 138 | 62 | 30 | 44,1 | 133,8 | récupération post plongée | >60% |
| 7 | 00:57:12 | 53 | 205 | 126 | 68 | 18 | 26,5 | 142,6 | du fond à - 700 | >60% |
| 8 | 01:51:06 | 59 | 210 | 145 | 73 | 37 | 54,4 | 150,0 | remontée GK (-700 à -600) | >60% |
| 9 | 00:40:09 | 62 | 174 | 139 | 37 | 31 | 45,6 | 97,1 | remontée méandre Tibet libre | >60% |
| 10 | 00:42:54 | 96 | 189 | 143 | 52 | 35 | 51,5 | 119,1 | pause repas bivouac | < 50% |
| 11 | 00:17:36 | 105 | 132 | 119 | -5 | 11 | 16,2 | 35,3 | remontée grands puits (-500/0) | > 60% |
| 12 | 02:43:21 | 45 | 202 | 134 | 65 | 26 | 38,2 | 138,2 | | |

Plongée profonde (fond de cavité)

| | CCR moy |
|------------------------|---------|
| Approche horizontale | 20 |
| Nage/C5 | 34 |
| Déshabillage | 35 |
| Marche Blocs | 39 |
| Nage/C3/Nage/Marche | 40 |
| Nage | 42 |
| Descente C11 | 43 |
| Marche Rivière/S8/Nage | 45 |
| Nage/S4 | 45 |
| Descente Raide | 49 |
| S4 | 58 |
| Remontée très pentue | 60 |

En 2017, le plongeur du Spéléo-club du Mont-Blanc concrétise un vieux projet de plongée du siphon terminal du réseau du gouffre de la Muraille de Chine (nous sommes dans le collecteur du bassin de Flaine). La sortie sera très rapide (gouffre déjà équipé, solide équipe de soutien), d'une quinzaine d'heures en aller-retour (sans bivouac). Durée de la plongée 45 mn, profondeur atteinte 35 m, en première, en solo intégral (cardiofréquence 18).

Faits saillants

Le coût cardiaque absolu (coût énergétique de la sortie) est plus élevé

lors de la progression en méandre et dans la descente d'un grand puits à -600 (n° 3) que lors de la plongée en elle-même (n° 6).

Le coût cardiaque relatif moyen (CCR), pourcentage de VO₂ max, est également plus élevé lors des progressions en méandre et franchissements de grands puits (n° 3/8/10) que lors de l'immersion.

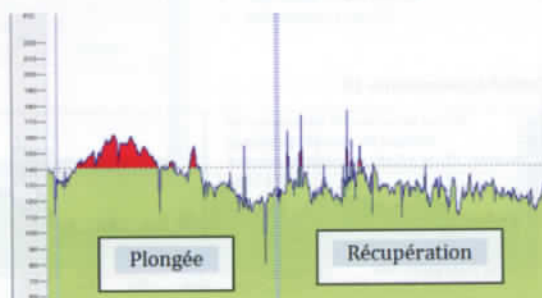
Il en est de même pour le coût cardiaque relatif de crête où la plongée n'est pas l'activité génératrice des plus hauts chiffres relevés.

Il ressort de cette analyse que la plongée en elle-même ne semble pas être l'activité la plus contraignante dans des explorations engagées de plongée souterraine en fond de trou, et ce malgré un environnement défavorable (pointe en solo et à grande profondeur, eau froide, stress de la première). Les phases les plus exposées se situent en amont lors des progressions en méandre et des grandes verticales, et en aval, plus précisément au début de la remontée (méandre et puits, n° 8/

9/10). Il convient de protéger et d'assister le plongeur tout particulièrement dans ces phases de progression. Un arrêt prolongé au bivouac lors de la remontée n'aurait sans doute rien changé dans ce cas (n° 12) progression lente, limitation du temps d'exposition sous terre (cardiofréquence 19).

La plongée : la seconde phase de la plongée révèle une baisse notable de la fréquence cardiaque, pour laquelle plusieurs hypothèses peuvent être émises : bradycardie au froid liée à l'exposition faciale (dont le plongeur a souffert, plongée en combinaison humide), vasoconstriction ? Relâchement et détente de retour de pointe ?

Cardiofréquence 19



Conclusion

À notre connaissance c'est le premier travail concret de ce type pour nos activités.

Les résultats obtenus dans notre étude montrent que spéléologie et canyonisme, bien que n'apparaissant pas dans les divers classements d'activités sportives, relèvent d'une pénibilité forte, classée comme « excessive » selon les normes de travail.

Dans l'ensemble, que ce soit en spéléologie ou en canyonisme (quoique légèrement plus faible pour celui-ci), on peut chiffrer la sollicitation physique comme forte (le coût cardiaque). L'effort est soutenu et fractionné, avec un niveau élevé lors des phases en endurance et des phases dynamiques pouvant être très intenses. Cependant, à l'instar d'autres sports d'endurance, comme le cyclisme et la course à pied, ils peuvent développer les capacités d'adaptation cardiaque à l'effort, avec tous ses effets bénéfiques. Avec un énorme avantage, celui de solliciter tous les groupes musculaires.

Les phases les plus critiques pour la spéléologie sont les puits (y compris à la descente) et les étroitures; pour le canyon, ce sont la marche d'approche (aller et retour) et le parcours en rivière; pour la plongée souterraine nous avons peu de données, mais il semble que l'équipement et le début de la plongée soient les phases les plus intenses.

À ces phases il faut rajouter le stress (facteur très important), les incidents de parcours et les conditions générales de l'exploration

(engagement de la cavité ou du canyon, température ambiante, temps passé).

Il ne faut évidemment pas oublier un facteur de variabilité majeur, l'individu en tant que pratiquant... ! Entre un pratiquant très entraîné, voire professionnel, et un amateur occasionnel, entre une cavité horizontale sans difficultés et un gouffre alpin très engagé, tous les intermédiaires existent.

On peut se faire plaisir quel que soit le niveau de pratique, gratter dans un abri-sous-roche ou « faire » un moins 1000...

Nos activités comportent donc un grand nombre de paramètres variables selon l'individu et les circonstances de la pratique, dont la résultante physiologique est plus complexe que les pratiquants ne l'imaginent en général. Prudence et lucidité restent les bases d'une pratique en sécurité.

Pour garder une marge de sécurité face à tous ces paramètres, il est conseillé de ne pas dépasser la fréquence cardiaque correspondant à 80 % de la fréquence maximale théorique, en tout cas le moins longtemps possible.

À titre d'exemple concret, un individu de 50 ans a une FMT de 170, il lui sera donc conseillé de ne pas dépasser la fréquence de 136 pulsations par minute.

Bibliographie

GUILLEMAN, J.-L. (2003) : Étude comparative de trois méthodes de remontée sur corde en spéléologie. Groupe d'études techniques de l'EFS, Mémoire instructeur- *Spelunca* n° 90, 2003.
BUCH, J.-P. ; VALENTIN, G. ; VIDAL A. DRS (2007) : Mortalité cardio-vasculaire en spéléologie. - *Spelunca* n° 107, p 5-9.

1. SV1 – le seuil « d'adaptation ventilatoire », à partir duquel on commence à travailler en endurance, qui se situe en général aux alentours de 60 % de la VO_2 max ; appelé aussi « seuil aérobie » ou seuil lactique, point pour lequel la concentration sanguine en lactate augmente rapidement, de 2 à 4 mmol/l –, et SV2 – seuil « d'inadaptation ventilatoire » à partir duquel on commence à travailler en résistance. Il se situe au-delà de 80 % de la VO_2 max ou à environ 85 % de la FCM (fréquence cardiaque maximale), appelé aussi « seuil anaérobie » ou seuil d'accumulation des lactates, au-delà de 4 mmol/l ; à partir de ce seuil, l'organisme s'épuise très rapidement et il faut rester en dessous de ce seuil pour éviter de s'épuiser.
2. La consommation maximale d'oxygène ou VO_2 max est le volume maximal d'oxygène qu'un organisme aérobie, en général, ou le sujet humain en particulier peut consommer par unité de temps lors d'un exercice dynamique aérobie maximal. Chez l'humain, le ou la VO_2 max s'exprime habituellement en litres de dioxygène par minute.
3. Battements par minute.

Le compte rendu complet de cette étude avec 19 références bibliographiques est consultable et téléchargeable sur le site de la CoMed à l'adresse suivante : http://comed.ffspeleo.fr/docs_comed/feuilles_de_liaison/CoMed_Infos%20n_56_%202019.pdf

LES RECOMMANDATIONS

Pour ce qui est de l'individu :

- il faut tenir compte des divers facteurs de santé comme l'âge, les pathologies, l'état de santé et la forme physique du moment, l'hygiène de vie, les facteurs de risque cardiovasculaire ;
- tenir compte du niveau technique et de l'entraînement ;
- s'hydrater très régulièrement et s'alimenter le mieux possible avant, pendant et après l'effort ;
- supprimer tabac et alcool (ou à défaut les limiter, en particulier avant, pendant et après l'effort) ou toute autre conduite addictive ;
- attention à la prise de médicaments ou de compléments alimentaires (dopage caché) ;
- ménager ses efforts, s'échauffer, faire des pauses, s'entraîner régulièrement dans l'année y compris hors cavité (falaise, salle).

Pour ce qui est de la pratique :

- adapter la cavité ou le canyon au niveau technique du ou des pratiquants, en s'alignant sur la personne la plus fragile ;
- maîtriser et appliquer les règles techniques permet de s'économiser physiquement ;
- avoir un équipement technique et vestimentaire adapté à la cavité ;
- être lucide sur ses capacités, limiter ses ambitions et savoir renoncer si nécessaire ;
- après une plongée souterraine, éviter les efforts intenses juste après et pendant les heures qui suivent, ce qui n'est pas sans incidences pour la plongée « fond de trou ».

Pour ce qui est du certificat médical de non contre-indication :

- le pratiquant ayant un ou des facteurs de risque cardiovasculaire (antécédents cardiaques familiaux proches, hypertension artérielle, surpoids, hyperlipémie, diabète, tabagisme, stress), doit faire le point sur sa capacité à l'effort, son médecin étant seul juge des moyens appropriés ;
- le pratiquant ayant une pathologie cardiovasculaire (troubles du rythme, insuffisance coronaire, infarctus, AVC, artériopathie) nécessite un bilan approfondi, et doit rester prudent dans sa pratique ;
- le pratiquant indemne et en « bonne santé apparente » doit connaître ses limites physiologiques. À partir de quarante ans, un bilan général et cardiologique est fortement conseillé.