

PRATIQUE DE LA CARDIOFRÉQUENCEMÉTRIE EN SPÉLÉOLOGIE ET CANYONISME

D^{rs} Jean-Noël Dubois, Patrick Guichebaron, Jean-Pierre Buch

INTRODUCTION / HISTORIQUE

Dans les années 2000, le D^r Jean-Michel Ostermann, président de la *CoMed* à cette époque, est intrigué par le signalement de décès d'origine non traumatique dans les publications du Spéléo-Secours Français (SSF) et propose d'étudier ce problème.

Les causes de décès avant les années quatre vingt-dix étaient essentiellement traumatiques (chutes du spéléo ou chutes de pierres) ou parfois par épuisement physiologique. Depuis 1995, apparaissent des décès qui ne rentrent pas dans ces deux catégories.

Un groupe de travail de trois médecins (J.-P. Buch, G. Valentin et A. Vidal) s'est alors constitué en 2007 pour essayer de caractériser ces décès. L'étude des données du SSF et de l'assurance fédérale a retrouvé 18 décès entre 1987 et 2003, soit environ 5 % des décès, avec une moyenne d'âge de 43,8 ans (ou 46,7 si l'on excepte un cas particulier de décès à l'âge de 15 ans). L'étude a été difficile en raison de données malheureusement éparses et très incomplètes.

Malgré ces difficultés, l'hypothèse retenue pour ces décès était compatible avec une mort subite, d'origine cardiaque probable, en sachant que des pathologies coronariennes peuvent être rapportées à une activité physique même après la fin de celle-ci, dans les vingt-quatre heures qui suivent, événement qui échappera alors à toute enquête.

La conclusion de cette étude insistait évidemment sur la prévention médicale, avec un suivi régulier des pratiquants, la spéléologie étant une activité jugée à forte contrainte physiologique.

Comme le disait le D^r Thierry Coste, ancien président de la *CoMed* lui aussi, « *La spéléologie ne protège pas des maladies cardiaques* »...

Lors de cette étude, nous avons été très frappés par des mesures de cardiofréquencemétrie faites lors de montées sur cordes en salle. Cette étude, publiée dans *Spelunca* en 2007^{1,2}, affichait des fréquences cardiaques pouvant atteindre, voire dépasser, la fréquence cardiaque maximale théorique (FCMT), évaluée, selon la formule d'Astrand, à « 220 – âge ».

Dès cette époque, faire une étude de cardiofréquencemétrie en spéléologie, et cette fois-ci sur le terrain réel, était apparu comme une suite logique de l'étude sur la mortalité cardiovasculaire. Le projet en était resté là, jusqu'en 2010 où il est remis à l'ordre du jour. Il devient plus concret en 2012 et finalement opérationnel en 2014 avec l'achat du matériel.

P. Guichebaron avait déjà fait des enregistrements en 2012, mais le vrai développement s'est fait à partir de 2015, en spéléologie et en canyonisme, avec quelques tracés en plongée souterraine. Le total des enregistrements à l'heure actuelle est de 201 tracés.

1- BUCH J.-P., VALENTIN G., VIDAL A. D^{rs}, « Mortalité cardio-vasculaire en spéléologie », *Spelunca* n°107, p 5-9, 2007

2- BUCH J.-P., OSTERMANN J.-M., VALENTIN G., VIDAL A. D^{rs}, « Mortalité cardio-vasculaire en spéléologie », *Cardio&sport* n°6, p.23-26

LE CONTEXTE

Fort de cette étude de 2003, il apparaît que la spéléologie semble solliciter fortement le système cardiovasculaire, en tout cas beaucoup plus que le pratiquant ne l'imagine ou ne le ressent. L'interrogation s'est naturellement étendue au canyonisme et à la plongée souterraine.

Un facteur supplémentaire nous a poussés à cette étude : le vieillissement de la population des pratiquants. En 2017, la moyenne d'âge des pratiquants fédérés est de 41,7 ans, mais elle est de 43,7 ans pour les hommes et 36,3 ans pour les femmes.

Plus particulièrement pour les hommes, cette quatrième décennie est bien celle où beaucoup d'affections cardiovasculaires se révèlent, sans oublier les troubles métaboliques qui les accompagnent souvent et les fameux « facteurs de risque cardiovasculaires »... Pour rappel, outre l'hérédité, le sexe (masculin) et l'âge, il s'agit du tabagisme, de l'hypertension artérielle, des troubles métaboliques (diabète et dyslipidémies), du surpoids (obésité) et de la sédentarité, du stress, et de l'alcool consommé de manière excessive (supérieur à 3 verres par jour chez l'homme et supérieur à 2 verres par jour chez la femme).

Nous avons donc deux raisons objectives de lancer cette étude, qui prend d'autant plus d'importance après l'instauration du certificat annuel de non contre-indication, désormais obligatoire depuis un décret d'août 2016.

Mais comment étudier concrètement cette sollicitation, dans des activités qui peuvent se pratiquer à des niveaux très variables ? Comment trouver des critères homogènes en fonction de l'âge, du genre, du niveau technique, de la difficulté de la cavité ou du canyon, de la température, de la présence de gaz carbonique ?

Plusieurs milliers d'enregistrements auraient été nécessaires pour que l'étude soit valable statistiquement... ! Nous en avons réalisés plus de 200, ce qui est déjà important. Et en physiologie humaine, qu'elle soit appliquée à la médecine du sport ou du travail, il est courant par contre de tirer des enseignements parfaitement valides à partir d'un nombre restreint de cas, sous réserve que le nombre de points de mesures soit suffisamment grand.

La cardiofréquencemétrie est le seul examen qui nous permette facilement de mettre en évidence cette sollicitation, au travers des variations de la fréquence cardiaque, et, *in fine*, de caractériser la « pénibilité » de l'activité.

Les seuls paramètres concrets connus dans ce domaine sont des critères liés au travail, évidemment assez éloignés de la pratique sportive, elle-même intégrant la mesure de la fréquence cardiaque dans une kyrielle de paramètres physiologiques, différents d'une activité sportive à une autre, et de ce fait assez inhomogènes et peu comparables d'un sport à l'autre. Les scores de pénibilité en milieu professionnel ne sont donc pas complètement transposables, mais ils nous donnent une indication malgré tout objective de notre pratique potentiellement intense, mais non compétitive.

C'est dans cet état d'esprit que nous avons réalisé cette étude. Elle nous permet de quantifier la sollicitation cardiaque, le coût cardiaque de l'effort, sa pénibilité et d'approcher le risque cardiovasculaire de la pratique. Tout ceci pour mieux comprendre et caractériser l'activité, mais surtout pour être utile au pratiquant et à son médecin, en appuyant les modalités de la prévention médicale et technique sur des mesures physiologiques concrètes.

MODALITÉS PRATIQUES

1) Le matériel

Le choix d'un seul capteur thoracique émetteur et récepteur du signal (système mono bloc par ceinture émetteur/enregistreur) a été dicté par la particularité de la progression spéléologique où des mouvements complexes rendent aléatoires les relevés des systèmes classiques avec ceinture émettrice et montre réceptrice



(arrêts accidentels des enregistrements liés à la progression sous terre).

Le choix du matériel s'est finalement porté sur les capteurs thoraciques de la marque *POLAR*, assortis de ses logiciels *ProTeam 2* et *ProPulse Ergo Plus*, système déjà utilisé professionnellement par deux médecins, P. Guichebaron et J.-N. Dubois. Le matériel est distribué par *Cardisport*. Le coût de revient pour le système complet, une licence et dix capteurs, a été en 2014 d'un peu plus de 9 000 € (en ayant bénéficié de remise). Le budget est donc important.

2) Le protocole

Il est expliqué oralement et par écrit aux pratiquants volontaires, avec un recueil des données qui seront nécessaires à l'analyse :

- données médicales : identité, date de naissance, sexe, poids, taille, tabagisme, antécédents personnels et familiaux, prise de médicaments, consommation 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.

3) 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. On peut ainsi marquer sur le tracé brut d'exportation les différentes phases de progression et leurs horaires. La division du tracé permet l'analyse de chaque phase séparément, en plus de l'analyse globale.

4) Points positifs

- Le capteur est résistant aux chocs, il est étanche et résiste à une pression de 3 bars, soit — 20 m.
- La pose est facile, le port ne gêne pas les mouvements. Il peut être porté de nombreuses heures, sa capacité de mémoire étant très large.
- Si les données sont correctement renseignées et que le capteur est bien resté en contact, le tracé sera analysable dans tous ses détails. Le logiciel d'analyse est très performant, il fournit automatiquement tous les indices chiffrés et un rapport de synthèse complet sur *Word*.



5) Points négatifs

- Le coût de revient du matériel est assez cher.
- L'installation informatique est un peu complexe avec deux étapes de mots de passe. Les deux logiciels ne demandent pas de connaissances informatiques particulières, mais leurs interfaces ne sont pas d'une ergonomie très intuitive. *ProTeam 2* transfère les données des capteurs à l'ordinateur, *ProPulse Ergo Plus* analyse le tracé. Ils agissent en interaction, et nécessitent le branchement d'une base spécifique qui doit être reconnue par l'ordinateur. Le système est donc très verrouillé, complexe et la licence est monoposte. Il nous a posé pas mal de soucis dont le dernier en date est l'incompatibilité d'un des logiciels avec *Windows 10*, sans alternative malgré un logiciel datant de 2014.



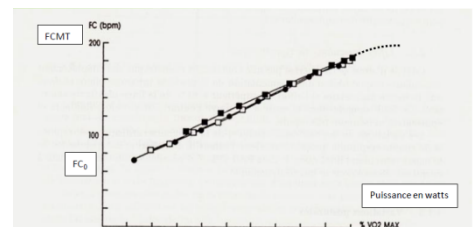
- Le temps nécessaire à la saisie des données individuelles dans le logiciel, à l'exportation des tracés et à leur analyse est très long.
- En raison des divers mouvements du tronc, le capteur peut parfois glisser ou ne plus faire contact, même si la ceinture est assez tendue.
- L'expérience montre qu'il faut idéalement avoir une personne qui recueille tous les renseignements avant d'équiper le pratiquant, sinon il manque la plupart des données, et une personne qui accompagne la sortie pour noter les horaires précis, sinon les tranches horaires sont trop larges et manquent de précision pour l'analyse fine. La mise en place est donc assez complexe également.
- La fréquence cardiaque de repos, fondamentale pour analyser le tracé, est une donnée très difficile à obtenir dans les conditions habituelles de nos activités. Plusieurs méthodes sont possibles : faire un tracé de référence lors d'une nuit complète, mesurer la fréquence cardiaque au lever trois jours de suite, mesurer la fréquence cardiaque durant 10 mn de repos strict et au calme avant l'équipement ou enfin confier la mesure au logiciel qui indique automatiquement le premier percentile de la fréquence cardiaque mesurée. Cette dernière est la plus simple mais sans doute la plus discutable car elle nécessite également 5 à 10 mn de repos avant le début de l'activité (en sachant que le facteur stress est important à ce moment-là) et que de longues pauses au cours de l'activité peuvent fausser ce choix.
- Nous avons découvert toutes ces difficultés à chaque étape à nos dépens. Globalement, l'étude de la cardiofréquence est n'est pas une affaire simple et elle est très chronophage.

PARAMETRES

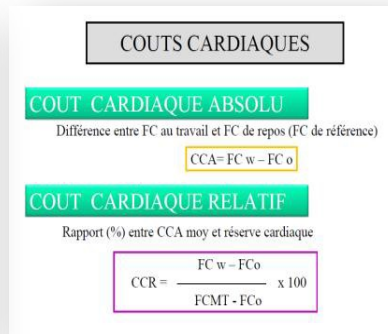
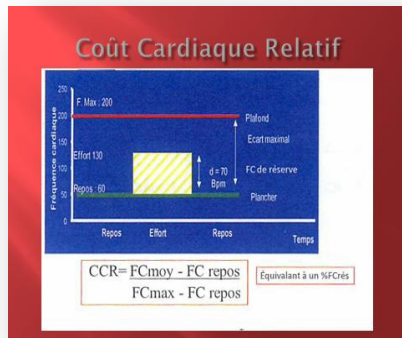
1) Critères utilisables

Les indicateurs chiffrés suivants nous sont fournis par le logiciel *ProPulsesErgo* :

- Fréquence cardiaque : La fréquence cardiaque varie de façon significative avec l'effort. Il y a une relation directement proportionnelle entre VO₂, FC et Puissance musculaire
 - FCR (fréquence de repos le plus souvent mesurée avant l'activité, avec les réserves citées plus haut)
 - FCMT (fréquence cardiaque maximale théorique), calculée selon la formule d'Inbar (FCMT = 205,8 – 0,685 x âge)
 - FC moyenne
 - FC de crête : valeur instantanée la plus élevée du tracé
 - FC Delta (FC crête - FC moyenne)
 - Pourcentage du temps de sortie passé au-delà de 80 % de la FMT
- Coût cardiaque :
 - CCA, coût cardiaque absolu (FC moyenne – FCR)
 - CCR moyen (en %), coût cardiaque relatif, (CCA/FCMT-FCR). Le CCR est l'équivalent du pourcentage de VO₂ max utilisé en physiologie du sport, c'est une très bonne estimation de la capacité aérobie maximale. La VO₂ est la consommation d'oxygène mesurée lors de la pratique d'une activité physique Elle est le principal déterminant de la performance lors d'une activité sportive d'endurance
 - CCR crête (en %) = FC crête-FCR/FCMT-FCR
 - CCR 99 = (FC 99-FCR)/FCMT-FCR. La FC 99^e percentile : valeurs les plus élevées du tracé (valeur de FC dépassée pendant 1 % du temps de l'activité soit environ 5 minutes pendant lesquels les efforts sont les plus importants au cours de l'activité).



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



- Indice de pénibilité ou score selon Meunier³, diagramme exprimant la pénibilité d'un poste de travail en fonction du CCR moyen et du CCR 99 et grille de pénibilité (score Frimat calculé suivant 5 paramètres).

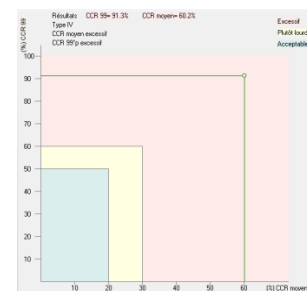
Calculs, grille de pr. PFRIMAT (fc de réf:60)

Cotation	FC moyenne (bpm) = 122	FC crête (bpm) = 156	Delta FC (bpm) = 34	CCA (bpm) = 62	CCR (%) = 60
6	117	151	40 et +	33-35	20 et +
5	105-109	140-143	35-39	25-29	25-29
4	100-104	130-133	30-34	20-24	20-24
2	95-99	120-123	25-29	15-19	15-19
1	90-94	110-113	20-24	10-14	10-14

Score total (28) : 24,25

Niveaux de pénibilité :

>25	Exhaustion dur
23-24	Traité dur
21-22	Dur
19-20	Pénible
15-18	Supportable
13-14	Léger
10-12	Traité léger
0-9	Aucune contrainte



- Indice de Banister⁴ : Temps intégral des pulsations cardiaques d'entraînement (TRIMPS) qui est le produit de la durée de l'exercice et de l'intensité selon la FC. $TRIMPS = D \times CCR \times k \times e^{(n \times CCR)^5}$. D est la durée de la sortie, k et n des coefficients variables selon le genre. Il minimise les efforts intenses, mais l'intégration du temps écoulé permettrait de comparer des sorties de durées sensiblement identiques. Au cours d'une même sortie, il permet de comparer les participants entre eux sous forme de TRIMPS/min (temps écoulé).

2) Critères utilisés

Les principales indications de la cardiofréquence-métrie sont la médecine du sport, la médecine de rééducation fonctionnelle (réentraînement à l'effort après un accident cardiaque par exemple), la médecine du travail et l'ergonomie. Chacune de ces spécialités a développé des indicateurs spécifiques à leurs 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, pour améliorer des performances ou avant compétition par exemple, et sont axés (bien que ces notions soient actuellement discutées) sur la notion de seuils ventilatoires, 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 VO₂ 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 VO₂ max ou à environ 85% de la FCM

3- « Abaque de modélisation et de classification des profils cardiaques des postes de travail selon les coûts cardiaques relatifs moyen et crête », d'après Ph. MEUNIER © Copyright, *Cahiers de Médecine Interprofessionnelle (CAMIP)*, 1997 ,3, pp. 287-293, 2000 ,4, p. 409-416

4- BANISTER E. W., CALVERT T. W., SAVAGE M. V., BACH T., "A systems model of training for athletic performance". *Aust. J. Sports Med.* 7(3): 57-61, 1975

5- MACDOUGALL J. D., WENGER H.A., GREEN H.J., "Physiological Testing of the High Performance Athlete". 2nd Edition. Champaign, IL: Human Kinetics, pp. 403-422., 1991

(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.

Ne pouvant calculer ces seuils, qui nécessitent une installation de laboratoire de médecine du sport (test d'effort incrémenté sur un ergomètre), nous avons tenu compte, comme de nombreux auteurs, du parallélisme entre VO₂ et CCR et la prise en compte du CCR 99 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.

- FCR (servant à calculer les coûts cardiaques)
- FCMT (id°)
- **FC moyenne**
- **Pourcentage du temps de sortie passé au-delà de 80% de la FMT.** Très parlant car surligné en rouge sur la courbe enregistrée sur le logiciel *ErgoPlus*.

- CCA (servant à calculer le CCR)
- **CCR moyen (en %).** Le CCR moyen est une estimation de la capacité aérobie maximale. Différentes études suggèrent que la charge acceptable de travail pour huit heures est de 30 à 40 % de VO₂ max (Astrand et Rodahl, 1986 ; Bink 1962 ; Rodgers et al., 1986 ; Saha et al. 1979). 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 sain⁶. Au-delà de 60 % on atteint le seuil de production des lactates (phase anaérobie) et au-delà de 80 % le seuil d'accumulation des lactates⁷.
- **CCR 99 (en %).** Le CCR 99 correspond au coût cardiaque de crête dépassé pendant 1 % de l'activité = 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 %⁸.
- **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 moy en abscisse, ce qui permet, selon Meunier de classer les activités (dans le cas de l'analyse d'une situation de travail) en « acceptable/plutôt lourd/excessif »

6- BOUDET G., CHAMOIX A., « Validation en chambre calorimétrique de la mesure de la charge physique de travail par la fréquence cardiaque », *Arch. Mal. Prof. Env.*, p.580, 2005
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjbtOb19b3eAhWKy4UKHSwsB6QQFjAAegQICRAB&url=http%3A%2F%2Fwww.em-consulte.com%2Fen%2Farticle%2F73633&usg=AOvVaw0K_juasYQPuCDsANs6zUj

7- LEMOINE J.-L., VANHEULE S., *Cardiofréquence-métrie et travail*, ASMIS, 2015
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=14&ved=2ahUKEwjP74T31K3eAhUORBoKHSf1B4wQFjANegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fgemsto.free.fr%2FRepriseaccCV25sept15%2FCardiofreqmetrie.-25sept15.SVanheule.pdf&usg=AOvVaw1epSmBOnKCglQm_-leMsFs

8- id°

ENREGISTREMENTS

- **Spéléologie**

- **Sorties des membres du club de spéléologie I Topi Pinnuti** de Bastia (Corse), soit en cavités locales avec des profondeurs allant de – 30 m à – 117 m (gouffres de Cast.1, Cast.3, aven *I Luminelli*, aven *A Buga di a Cutina*), soit lors de camp annuel sur le massif des pré-alpes de Grasse au-dessus de Saint-Vallier-de-Thiery lors du congrès annuel 2015 de la FFS (aven des Ténèbres, traversée Ollivier/Primevères) et lors du camp 2017 dans l’Hérault (aven du Bois du Bac) ; ainsi que dans la grotte de Lano (Lano/Corse) lors des Journées *CoMed* 2015 sur les membres du Comité Technique et à l’occasion des JNSC 2016 sur une population d’initié(e)s dans le gouffre de Cast.1 (Oletta/Corse). 47 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 (janvier et février) d’une cavité alpine à grande profondeur (– 850m) 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 (gouffre perte de la Muraille de Chine, massif de Platé, Arâches-la-Frasse/Haute-Savoie). Une trentaine d’enregistrements ont été réalisés.

- **Canyonisme**

La *CoMed* a tenu un stand lors du Rassemblement Infédéral canyon (RIF) en 2015 à Ghisonaccia (Corse). Après appel à volontariat, 22 enregistrements concernant six canyons dont un de nuit. Les 19 participants pratiquaient tous régulièrement à des niveaux plus ou moins élevés. À noter cependant que la pose des capteurs s’est faite en notre absence et que le recueil des phases de progression a souffert de nombreux manques. Durée des sorties trois à sept heures avec des marches d’approche ou de sorties de trente minutes à une heure. Quatre enregistrements ont pu également être réalisés lors d’une sortie initiation.

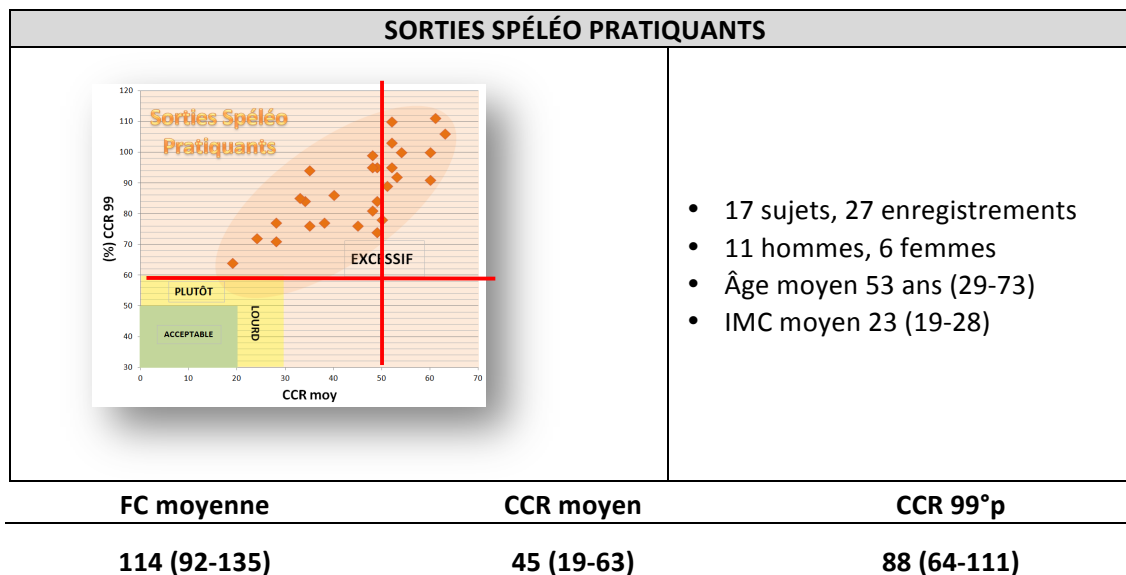
- **Plongée souterraine**

Une plongée profonde (fond de cavité à – 800) dans le siphon terminal, dans le collecteur d’un réseau. Plongée profonde en solo intégral, en hivernal, en première. Durée de la plongée 45 min, profondeur atteinte 35 m.

RÉSULTATS

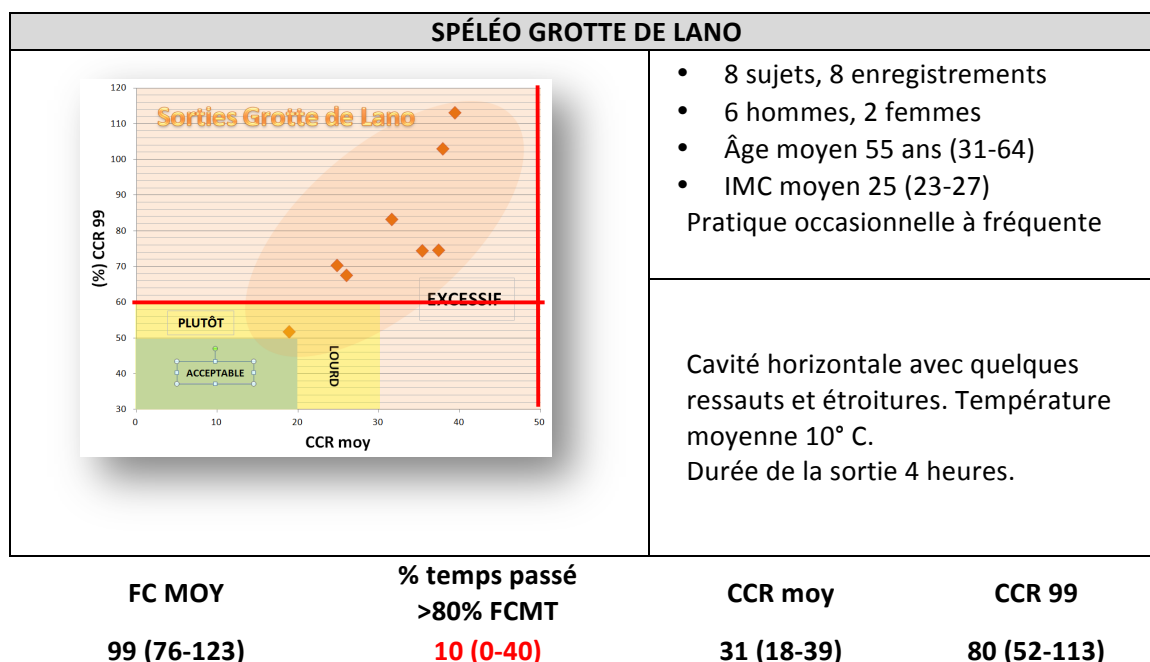
SPELEOLOGIE

Sorties des membres du club de spéléologie I Topi Pinnuti de Bastia (Corse)



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 %.

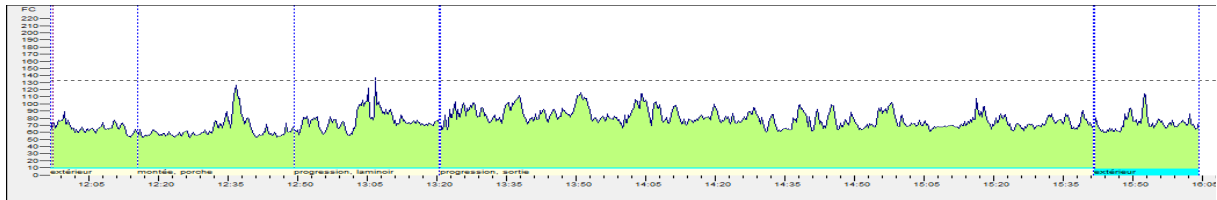
Le graphe montre une grande hétérogénéité dans sa répartition, celle-ci étant liée aux différents types de cavités parcourues et au niveau de pratique.



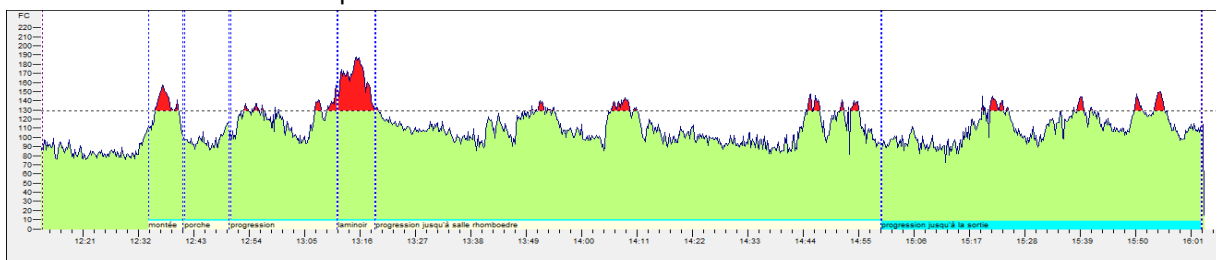
Nous sommes dans une cavité horizontale, sans puits ni fractionnements, l'engagement physique étant lié essentiellement à quelques étroitures ponctuelles et un laminoir d'une quinzaine de mètres

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 à 60 % pour la quasi-totalité des sujets. Trois sujets se trouvent aux extrémités des analyses :

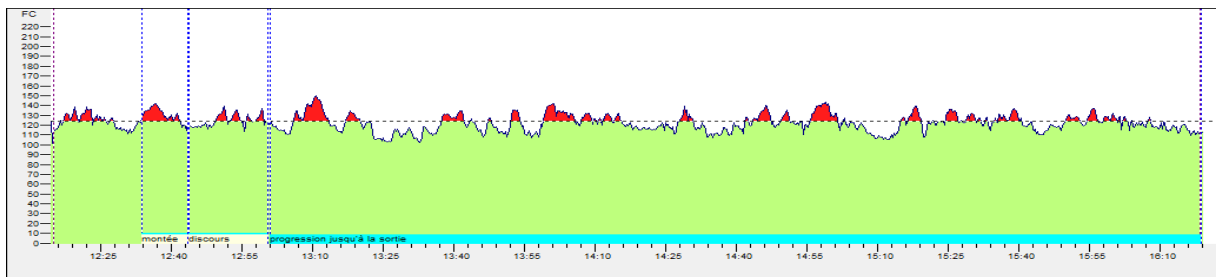
- Homme de 53 ans avec une pratique régulière et intensive de la spéléologie. FC moy à 78 bpm, CCR à 19 et CCR 99 à 52 et n'ayant jamais dépassé 80 % de sa FCMT. Il s'agit d'un sujet endurant bien entraîné avec une bonne adaptabilité à l'effort.



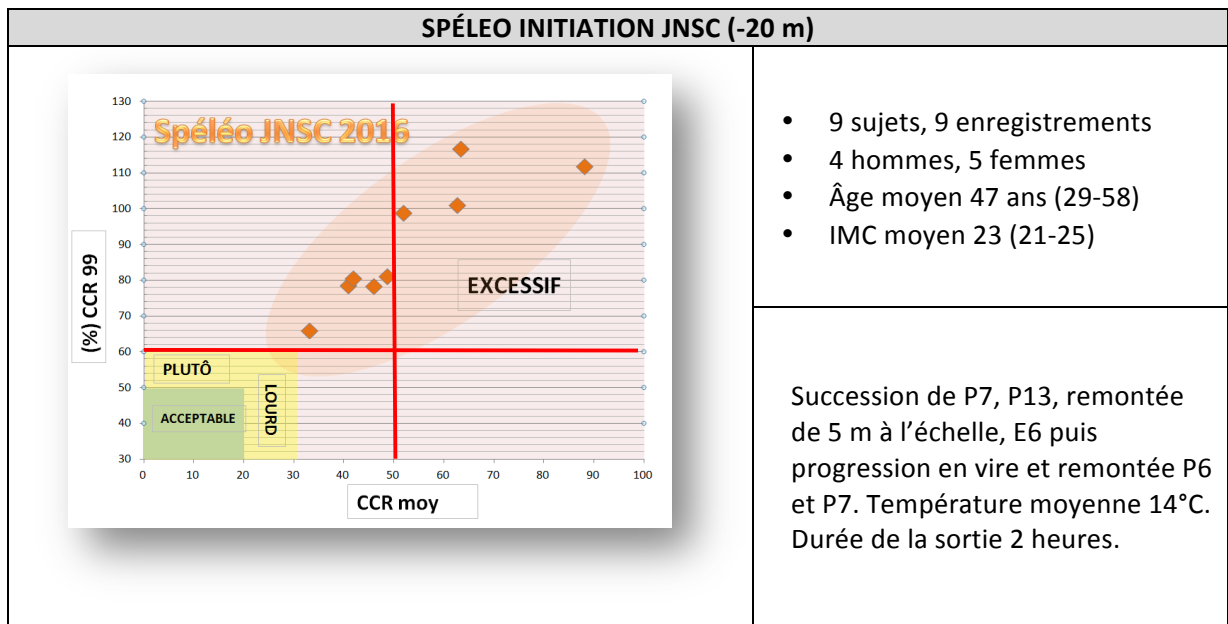
- Femme de 58 ans spéléologue depuis de nombreuses années mais pratiquant peu. La FC moy est à 111, le CCR à 39 et le CCR 99 à 113 ! La limite de 80 % de la FCMT est dépassée dans 17 % de temps de la sortie.



- Homme de 64 ans également spéléologue confirmé mais avec peu de pratique. FC moy 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.



Le logiciel d'analyse *ProPulsesErgo* permet le découpage de séquences lors de la sortie et ainsi pouvoir calculer les paramètres de coût cardiaque pour chaque séquence. Dans cette cavité, on trouve le CCR moy 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.

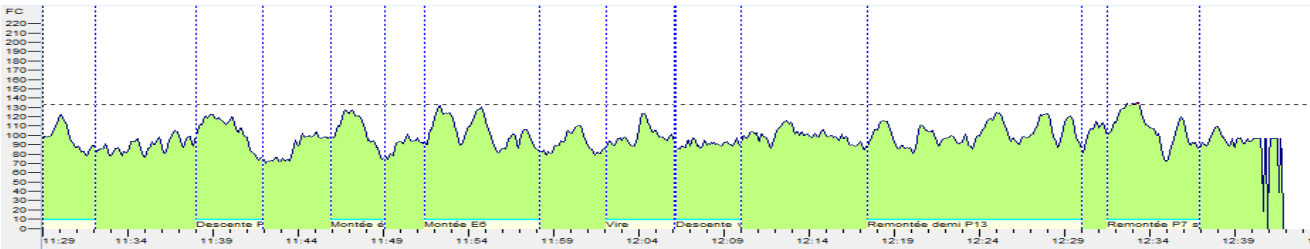


FC moyenne	% temps passé >80% FCMT	CCR moyen	CCR 99
126 (99-154)	34 (1-96)	53 (33-88)	90 (66-117)

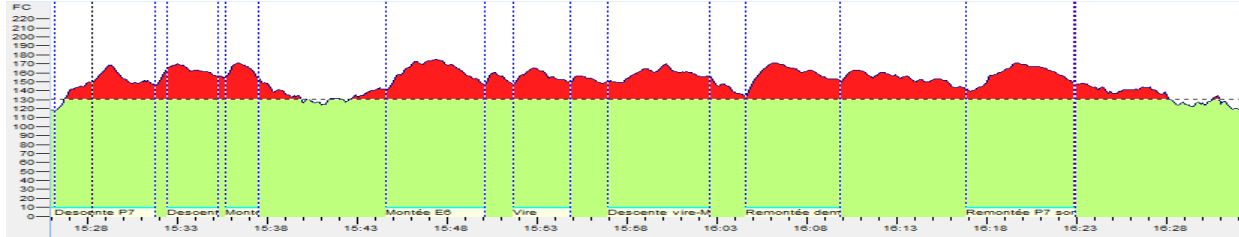
Il s'agit d'un groupe n'ayant jamais pratiqué la spéléologie, découvrant les techniques de spéléologie alpine par une initiation de deux heures avant de descendre sous terre. Cinq d'entre eux pratiquaient une activité sportive (montagne, aviron, *running*, canyon).

La FC moy 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 moy à 99 bpm, CCR à 33, CCR 99 à 66 et ayant dépassé sa FCMT dans moins de 1 % du temps de la sortie.

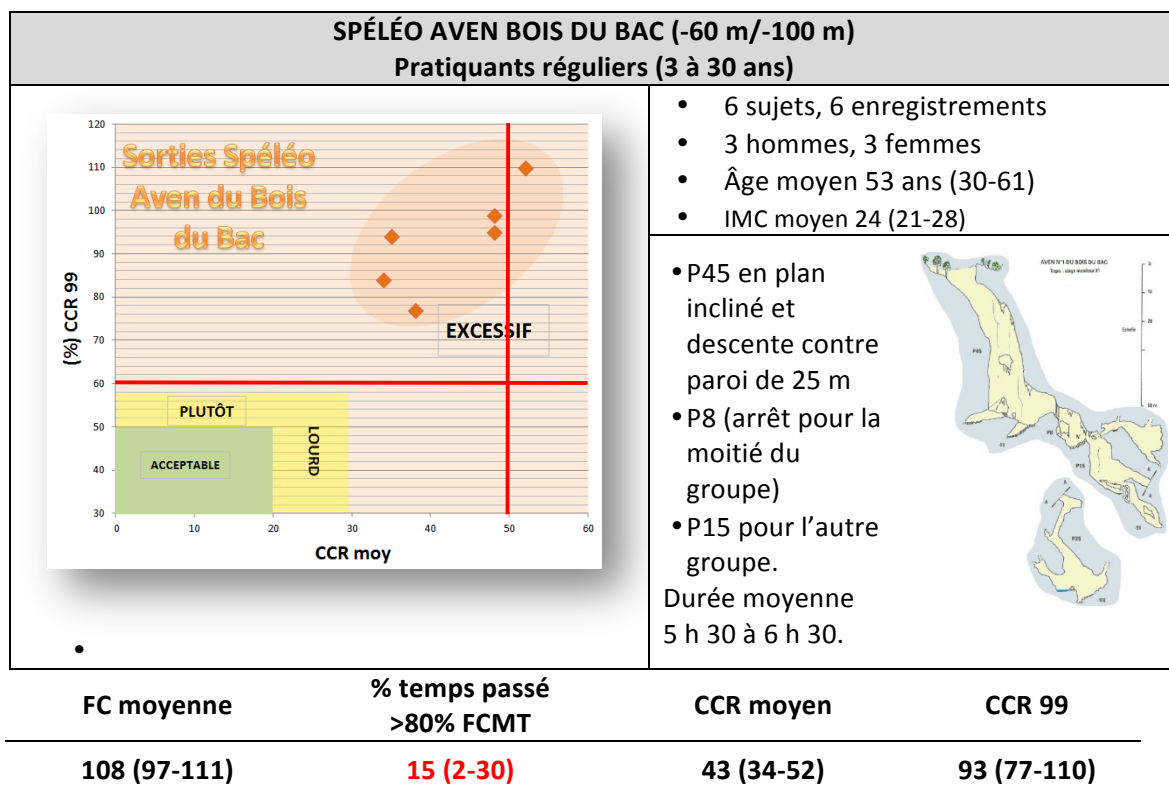


- Homme de 56 ans, prédiabétique et prenant un traitement antihypertenseur, pratiquant l'aviron et le sport en salle. FC moy à 154, CCR à 88, CCR 99 à 112 avec 96 % du temps de la sortie passé au-delà de 80 % de sa FCMT.



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.

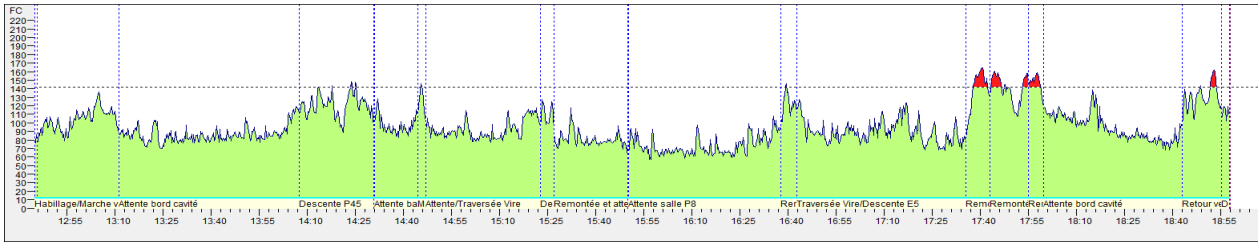
	CCR moy
Descente P7	45
Descente P13	54
Descente vire MC	54
Montée échelle E5	62
Vire	63
Montée E6	65
Remontée demi P13	65
Remontée P7 sortie	68



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 cavité a été équipée par deux sujets jeunes, ayant une bonne pratique (leur coût cardiaque a d'ailleurs été modéré).

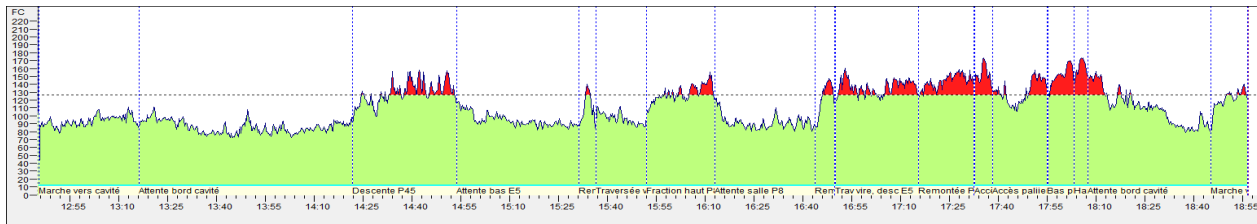
La FC moy du groupe reste peu élevée, 108 bpm, avec un CCR supérieur à 40 % et un CCR 99 très au-dessus de la valeur recommandée. Tous les membres ont dépassé 80 % de leur FCMT, là aussi avec des valeurs extrêmes liées au niveau de pratique et à l'aisance à passer les fractionnements.

- Femme de 41 ans, pratiquant régulièrement la spéléologie depuis trois ans, sportive. FC moy à 97, CCR à 34, CCR 99 à 84 et ayant dépassé 80 % de sa FCMT pendant 5 % de la

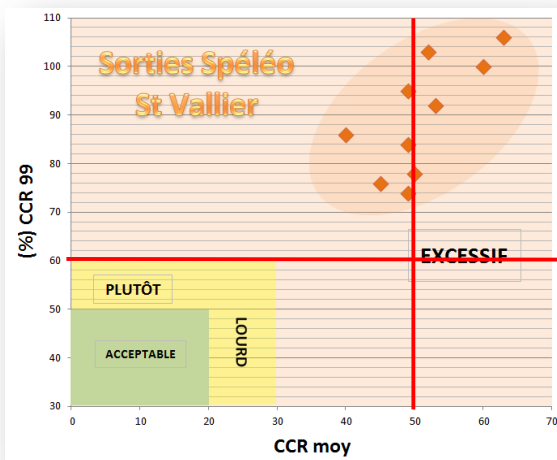


sortie.

- Femme de 61 ans, pratiquante mais peu à l'aise en technique de spéléologie alpine. FC moy à 111, CCA à 52, CCR 99 à 110 et 30 % du temps au-delà de 80 % de sa FCMT.



SPÉLÉO CONGRÈS SAINT-VALLIER-DE-THIEY Pratiquants réguliers (5 à 30 ans)



- 7 sujets, 10 enregistrements
- 5 hommes, 2 femmes
- Âge moyen 53 ans (29-69)
- IMC moyen 22 (19-24)

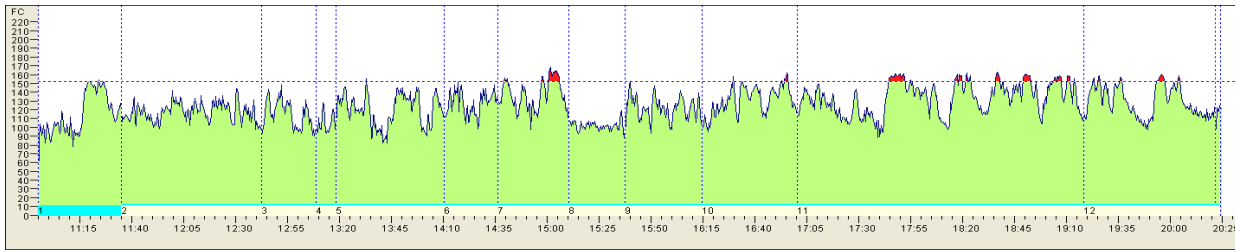
- Traversée Ollivier/Primevères, 4 enregistrements (-118 m, 6 h)
- Aven de l'Air chaud, 4 enregistrements (-212 m, 9 h)
- Aven des Ténèbres, 2 enregistrements (-300 m, 6 h 30)

FC moyenne	% temps passé >80% FCMT	CCR moyen	CCR 99
119 (108-134)	20 (7-51)	51 (49-63)	89 (74-106)

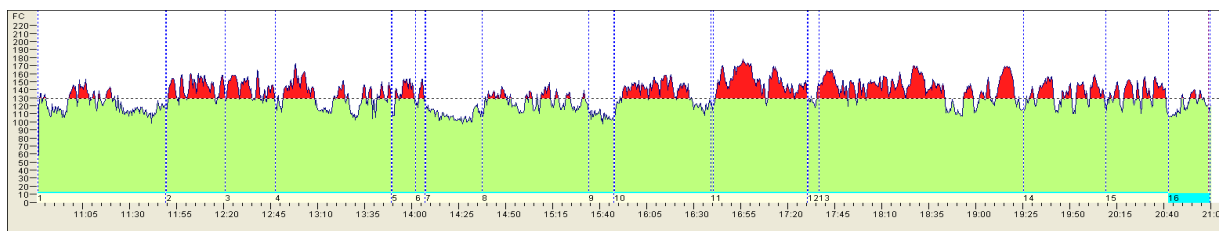
On retrouve dans ce groupe des spéléologues ayant fait partie du groupe précédent mais avec une pratique plus engagée, cavités plus profondes, sorties de durée plus élevée, difficultés techniques plus fréquentes (étroitures, *ramping*, sorties de puits étroites...). Toutes les cavités étaient équipées.

La FC moy 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 spéléo depuis 3 ans, très à l'aise en cavité, enregistrée dans l'Aven des Ténèbres jusqu'à la côte — 300, avec remontées de puits de 40, 55 et 76 m. FC moy 125, CCR à 50 et CCR 99 à 78. Seulement 8 % au-delà de 80 % de sa FCMT.



- 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. FC moy à 134, CCR à 63, CCR 99 à 106 et 51 % au-delà de 80 % de sa FCMT.



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

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 (gouffre perte de la Muraille de Chine, massif de Platé, Arâches-la-Frasse/Haute-Savoie).

Certains ont bénéficié d'un bilan type évaluation de médecine sportive avec examen clinique, électrocardiogramme de repos, et réalisation d'une épreuve d'effort sous maximale (test d'Astrand) dont voici les résultats :

	sujet 1	sujet 2	sujet 3
	52 ans/83 kg	40 ans/94 kg	48 ans/72kg
Puissance (watts)	240	270	270
FC max atteinte (bpm)	155	170	160
TA max atteinte	230/110	180/100	180/110
VO2 l/min	4,9	4,7	5,3
VO2 ml/min/kg	43,3	41,5	63,4

Les résultats physiologiques (ramenés à l'âge) des sujets 1 et 3 sont très bons. Le sujet 2 est en état de forme moyenne au moment du test et est pénalisé par son poids (résultat simplement bon)

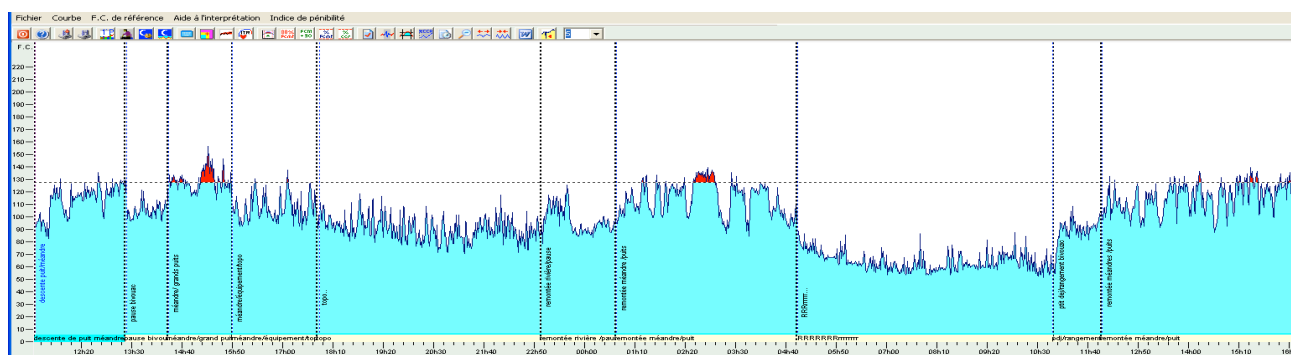
Les faits saillants

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.

Données en FC de l'enregistrement	
F.C.M.T.	172
FC de référence	63
FC mini	51
FC crête	159
FC moyenne	98
FC delta	61
FC médiane	100
FC 99° Percentile	138
Indices de coûts cardiaques	
CCA	35
CCR %	32,1
Niveau de pénibilité	26 point(s):Extrêmement dur

Le coût cardiaque absolu moyen (CCA) de la sortie est supérieur à 30 battements par minutes (bpm) = activité jugée pénible



Le coût cardiaque relatif moyen est supérieur à 30 % = astreinte cardiaque élevée

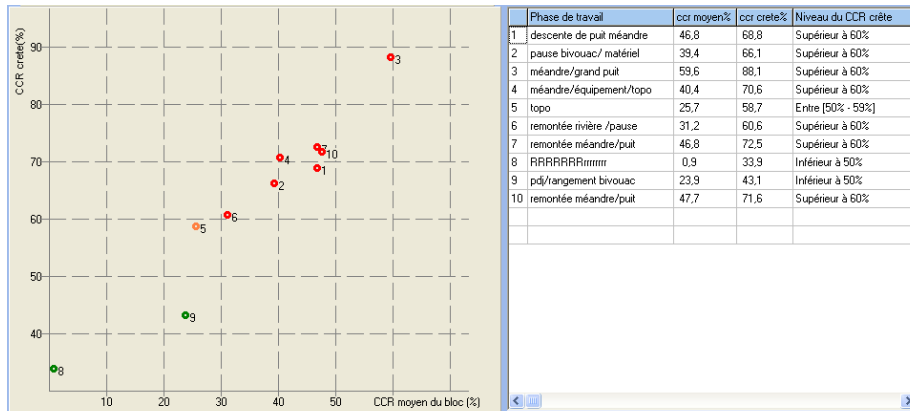
N°	Durée	FC Mini (bpm)	FC crête	FC Moyenne.	CCA	% CCR	%CCR crête	Activité	Profondeur (m)	Niveau du CCR crête
1	02:08:20	81	138	114	51	46,8	68,8	descente de puits méandre	0 à -500	> 60%
2	01:00:40	94	135	106	43	39,4	66,1	pause bivouac/matériel	-500	> 60%
3	01:31:00	98	159	128	65	59,6	88,1	méandre/grand puits	-500 à -700	>60%
4	02:01:20	87	140	107	44	40,4	70,6	méandre/équipement/topo	-700 à -830	>60%
5	05:10:25	65	127	91	28	25,7	58,7	topo	-830 à -750	[50% - 59%]
6	01:46:15	79	129	97	34	31,2	60,6	remontée rivière/pause	-700	>60%
7	04:14:10	83	142	114	51	46,8	72,5	remontée méandre/puits	-700 à -500	>60%
8	05:54:10	51	100	64	1	0,9	33,9	sommeil	-500	<50%
9	01:08:45	51	110	89	26	23,9	43,1	pdj/rangement bivouac	-500	< 50%
10	04:28:45	83	141	115	52	47,7	71,6	remontée méandre/puits	-500 à 0	>60%

Si l'on regarde en détails 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^{os} 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 (57 ans, spéléo très expérimenté, 17 ans jeune spéléo prometteur). L'équipe franchira la côte des – 800, dormira au bivouac à – 500, et sortira après vingt-quatre heures passées sous terre.

	Sujet A (Âgé) 57 ans	Sujet J (Jeunot) 17 ans
FRÉQUENCES CARDIAQUES		
FCMT	163	203
FC de repos	68	85
FC mini	59	74
FC réserve (FCMT- FC repos)	95	118
FC crête (max)	174	181
FC moyenne	114	120
FC delta	60	61
FC médiane	120	121
FC 99° Percentile	162	163
INDICES DE COÛTS CARDIAQUES		
CCA	46	35
CCR %	48,4	29,7
CCR 99° Percentile	98,9	66,1
Indice de Banister	1299,0 trimps	562,5 trimps
Niveau de pénibilité (Frimat)	30 points/Extrêmement dur	30 points/Extrêmement dur
Niveau de pénibilité (Meunier)	14 points/Très lourd	14 points/Très lourd

Les fréquences cardiaques

FC Maximale théorique (FCMT = 220- âge) et de repos (la FC est minimale à l'âge de 25 ans, et donc plus élevée à 17 ans) sont bien évidemment plus basses chez le sujet plus âgé.

Les FC de crête (maximale de l'effort) sont par contre 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) ce qui illustre au passage l'approximation individuelle et connue de ce dernier paramètre).

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

La FC delta (FC crête – FC moyenne) représente l'accélération cardiaque au cours d'un effort. Elle est identique chez nos deux sujets (60/61) mais représente le double de ce qui est toléré dans le monde du travail (FC delta > 30 = pénibilité excessive).

Les coûts cardiaques

Le coût cardiaque absolu (CCA= FC moyenne – FC repos) est significativement plus élevé chez notre senior (46) que chez son jeune ami (35). Il représente le **coût énergétique de la sortie**. Le monde du travail considère un poste pénible lorsque le CCA est > 30 bpm.

Le coût cardiaque relatif moyen (CCR % = CCA*100/FC réserve) constitue une estimation de la **capacité aérobie maximale**, et correspond au pourcentage de **VO2 max utilisé** pendant la sortie. Il 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, dont la limite en milieu de travail est de 60 %. Cet indicateur est dépassé chez le jeune (66 %) mais surtout chez le senior (99 %).

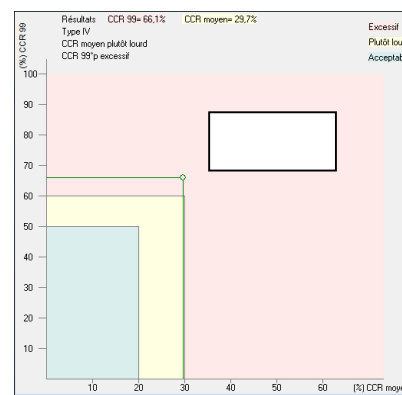
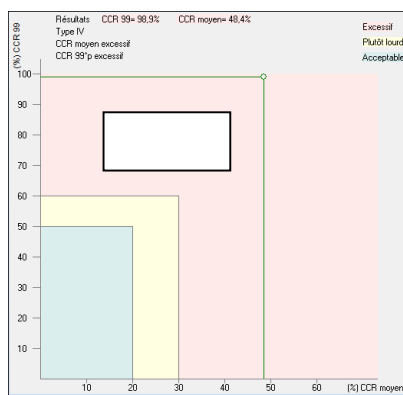
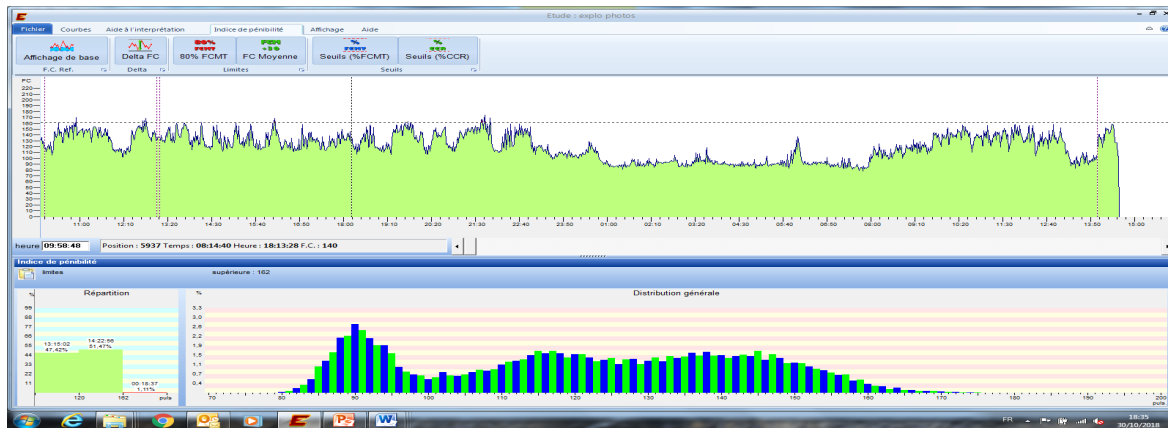
L'indice de Banister (Temps intégral des pulsations cardiaques d'entraînement - TRIMPS) qui est le produit de la durée de l'exercice et de l'intensité selon la FC, est deux fois et demi plus élevé chez notre senior expérimenté.

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-dessous.

Sujet A



Sujet J



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 passer sans incident. *Chi va piano va sano e va lontano* devrait être un adage de toute progression engagée en milieu souterrain.

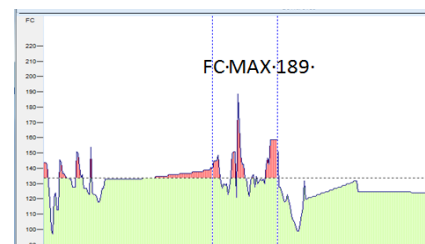
Il n'en reste pas moins que c'est dans ce genre de situation à très forte sollicitation cardiovasculaire et métabolique que le suivi médical (validé par un certificat) trouve tout son sens.

3/Les accidents physiologiques avec montée très haute de fréquence cardiaque

La cardiofréquencemétrie est également très utile pour illustrer des situations sortant de l'ordinaire, que l'on peut qualifier d'incidents physiologiques. Bien entendu, il ne s'agit pas d'artefacts de mesure qui ont été préalablement enlevés.

✓ **Conséquence d'une presque noyade**

Fin janvier 2013, une crue (pluie sur neige à 2 000 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.

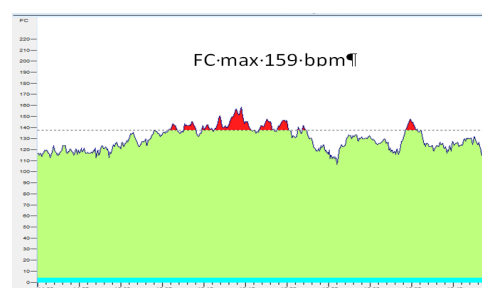
Il faut noter la encore que la notion de Fréquence Cardiaque Max théorique (220- âge) trouve ses limites puisqu'elle est dépassée de 25 points (189 mesuré contre 164 prédit) dans ce cas précis, chez un sujet par ailleurs traité pour hypertension artérielle...

	Ensemble sortie	Incident
CCA	39	82
CCR%	35 %	74 %
CCR 99	84,7	119,8
FC moyenne	95	140

Notons également que cet incident qui n'a duré que quelques minutes a fait exploser les seuils des paramètres physiologiques mesurés (coûts cardiaques).

✓ Conséquence d'un incident technique dans un P100

Lors d'une exploration au fond du réseau, un équipier se trouve en difficulté à la côte - 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'en suivent quelques minutes d'efforts explosifs, en plein milieu d'un grands puits, pour se tirer de ce mauvais pas et continuer la descente.

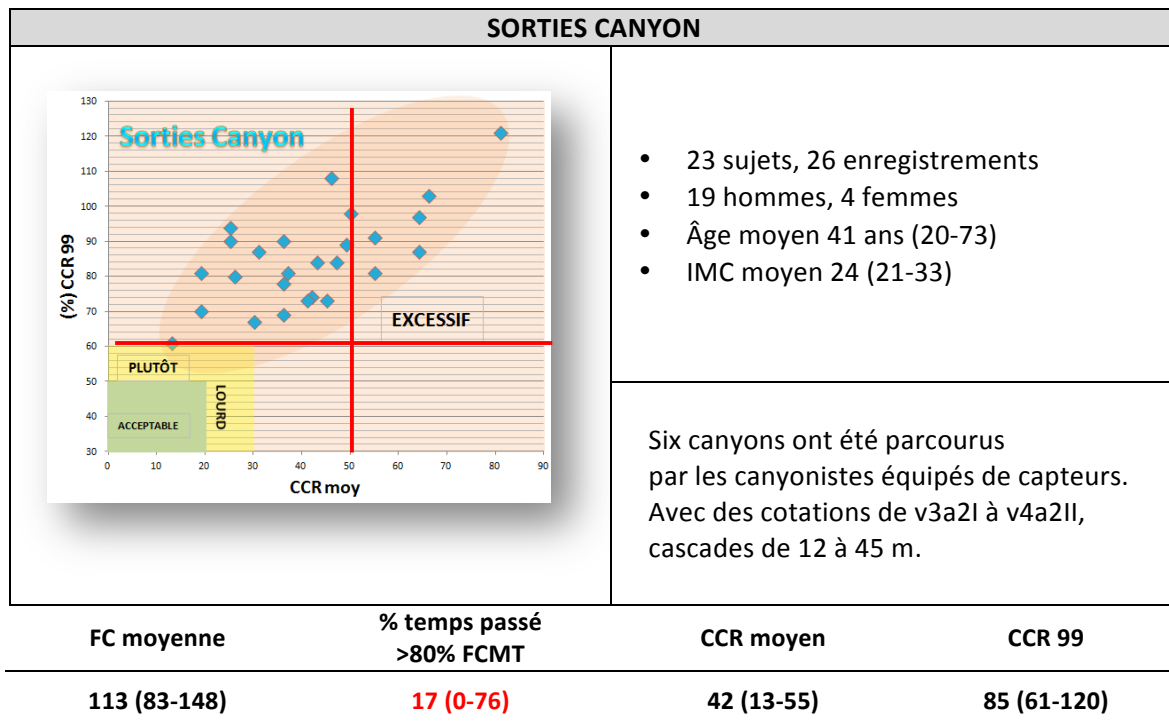


La FC max de la sortie est atteinte lors de cette difficulté technique à la descente.

	Ensemble sortie	Incident
CCA	35	79
CCR%	32,1 %	72,5 %
CCR 99	68,8	88,1
FC moyenne	98	142

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.

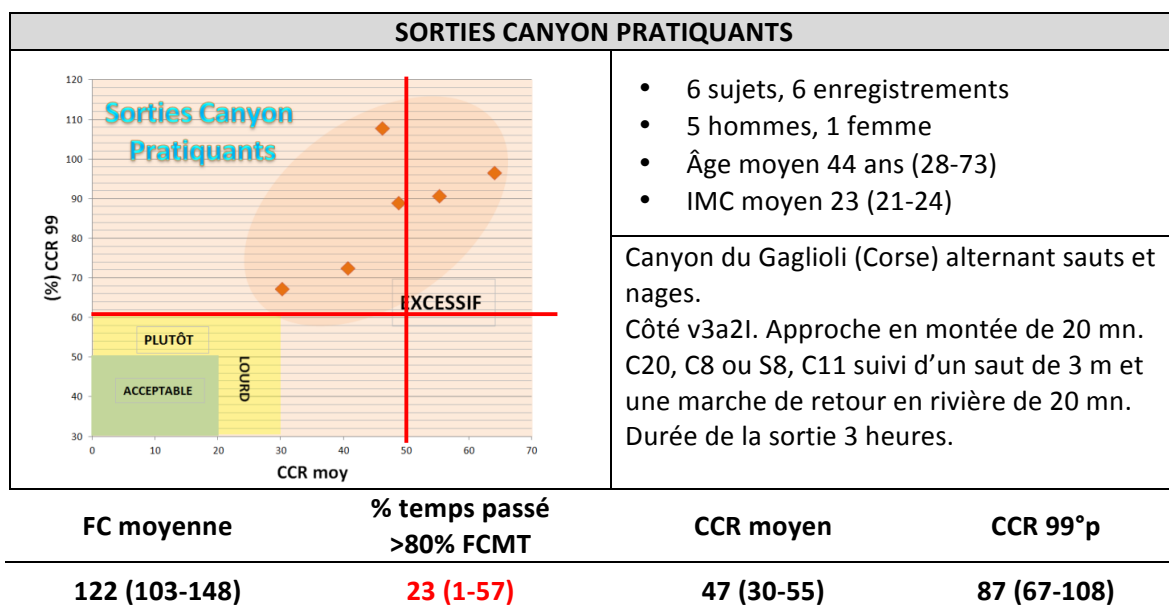
CANYONISME



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

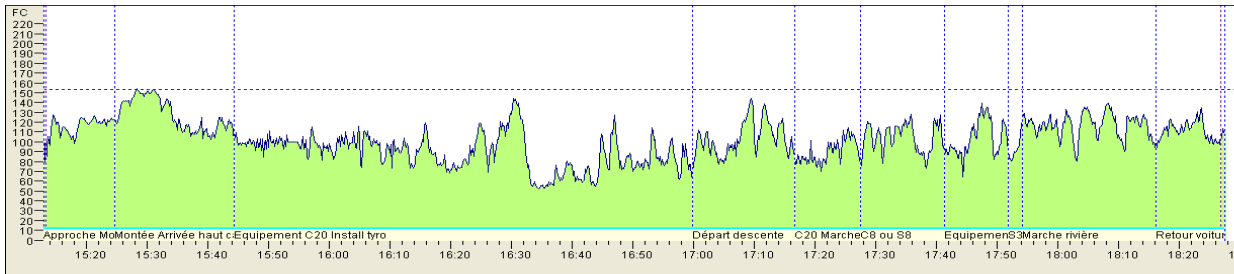
	SPÉLÉO	CANYON
FC moy	114	113
CCR	45	42
CCR 99	88	85

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

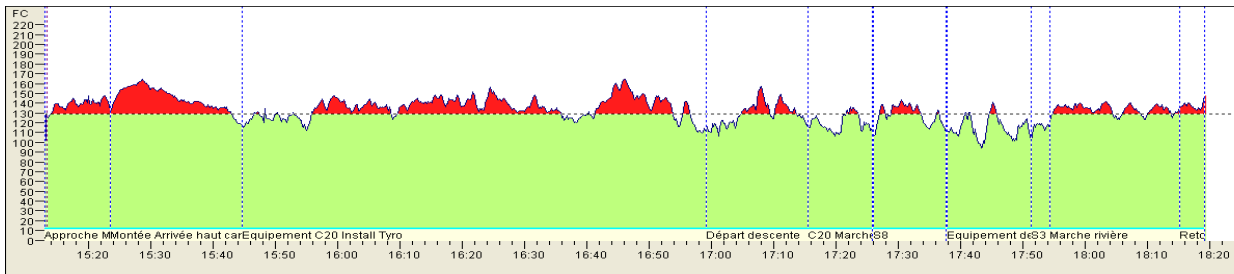


Les valeurs peuvent sembler surprenantes, FC moy supérieure aux valeurs du groupe entier et à celle des initiés, de même pour le CCR et le CCR 99. La dispersion du groupe a peut être une explication, il faut savoir que le rassemblement Canyon a été très festif et que certaines soirées précédant la sortie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

- Homme de 28 ans pratiquant régulier, sportif aguerri, cordiste. FC moy de 103, CCR à 30, CCR 99 à 67, n'a pas dépassé 80 % de sa FCMT.

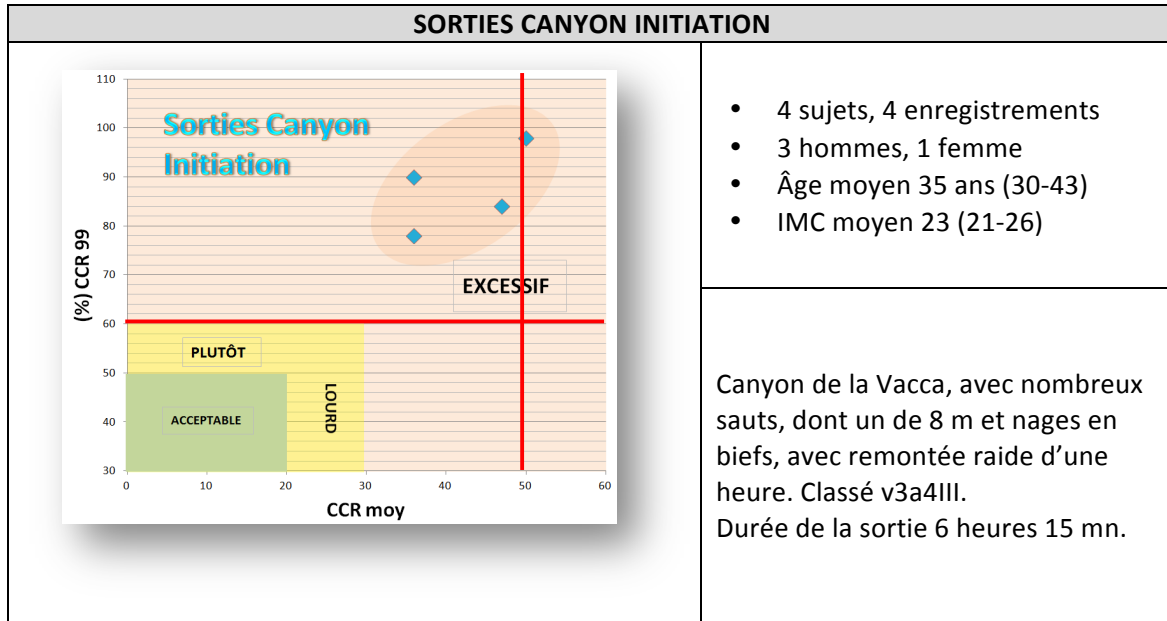


- Homme de 61 ans, moniteur canyon, pratiquant régulier en spéléologie. FC moy 133, CCR 64 et CCR 99 de 97. A dépassé 80 % de sa FCMT pendant 57 % de la sortie.



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

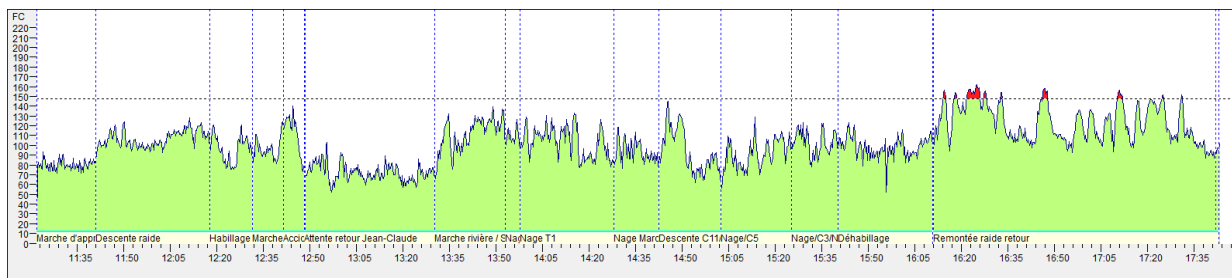
	CCR moy
C20 Descente	38
S3	38
Équipt descente C11	39
C20-Installation Tyrolienne	43
S8 ou C8	43
Marche rivière	52
Montée	64



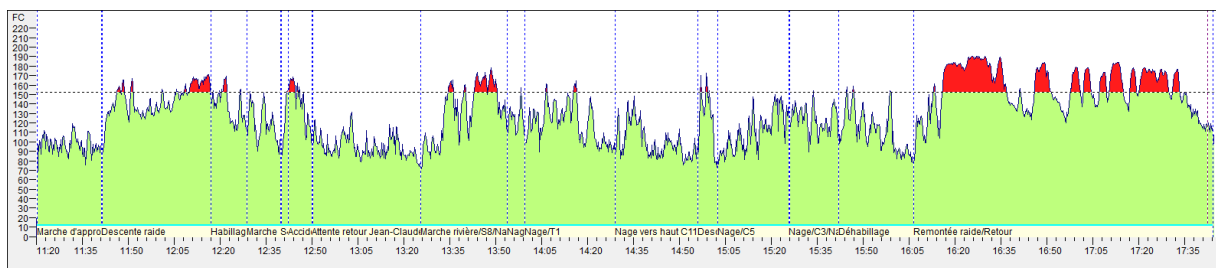
FC moyenne	% temps passé >80% FCMT	CCR moyen	CCR 99°p
117 (102-128)	17 (0-30)	42 (36-50)	113 (77-198)

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 pentue. Les valeurs sont moins élevées que lors des initiations spéléo. Elles sont cependant sensiblement plus élevées que les valeurs de l'ensemble des canyoningistes, notamment pour le CCR 99 (113 versus 87).

- Homme de 30 ans, sportif, ayant pratiqué un peu de canyoning dix ans en arrière. FC moy 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).



- Femme de 30 ans, modérément sportive. FC moy 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).



Plongée

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.

3

5

	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

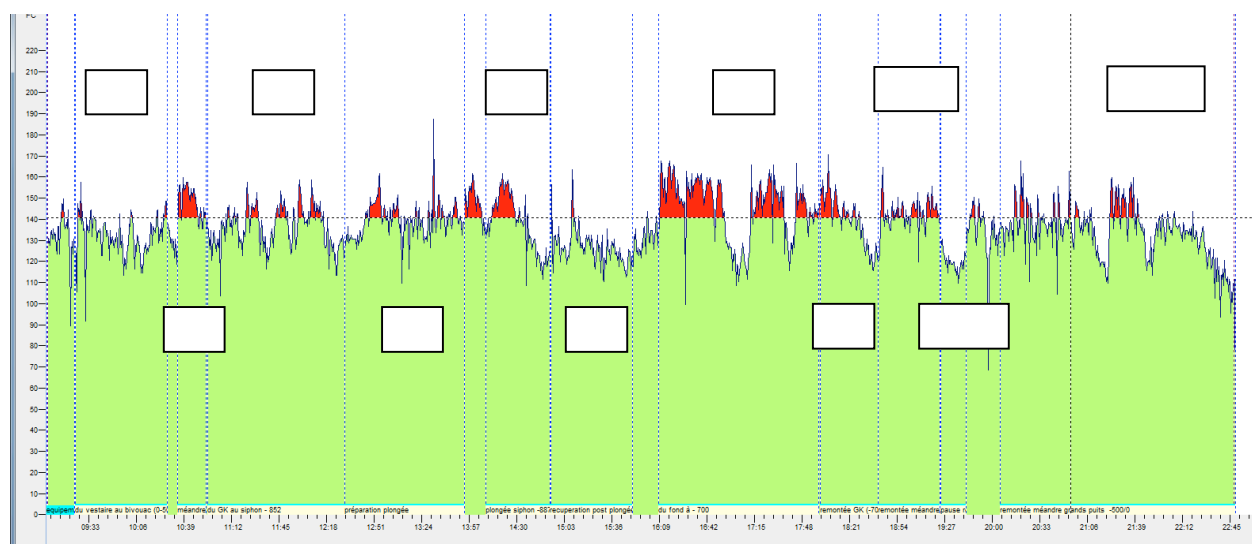
PLONGÉE PROFONDE (FOND DE CAVITÉ)

En 2017 le plongeur du club (Spéléo Club du Mont-Blanc) concrétise un vieux projet de plongée du siphon terminal du réseau (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).

Il s'agit d'une plongée profonde (— 35 m) en solo intégral, en hivernal, dans le collecteur du réseau, en première. Durée de la plongée 45 mn, profondeur atteinte 35 m.

À noter que l'équipement fourni (système monobloc ceinture enregistreur *Polar team 2*) n'avait jamais été testé à de si grandes profondeurs (à la connaissance du fournisseur).

Ci-dessous le graphe de la sortie :



Les différentes phases de progression :

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

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 grands puits à - 600 (N° 3) que lors de la plongée en elle-même (N° 6).

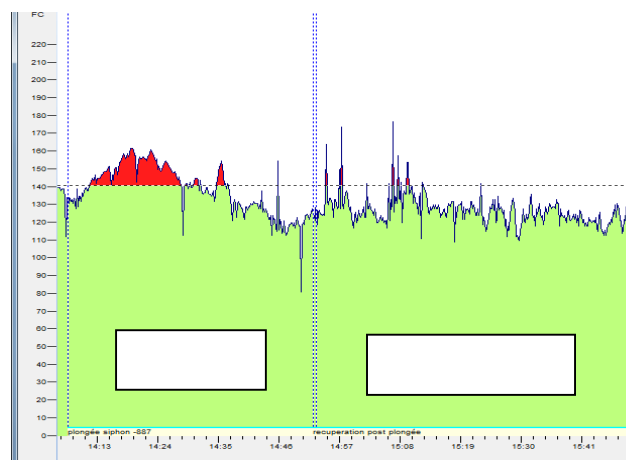
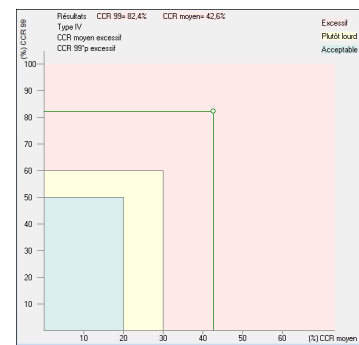
Le coût cardiaque relatif moyen (CCR), pourcentage de VO2 max est également plus élevé lors des progressions en méandre et franchissements de grands puits (N°s 3/8/10) que lors de l'immersion.

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°s 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. Des douleurs dans l'articulation du genou à la remontée ont fait craindre l'apparition de bords, non confirmés par la suite (douleur méniscale d'origine mécanique).



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 ?

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

PÉNIBILITÉ ?

Spéléologues avec des formations de médecine du travail et de médecine du sport pour un d'entre nous, nous avons abordé cette étude de la pénibilité potentielle en spéléologie et canyonisme à l'aune de nos connaissances, en utilisant les outils mis à notre disposition dans notre quotidien professionnel pour évaluer la pénibilité d'un poste de travail. Le terme de pénibilité est en effet très utilisé dans les textes réglementaires touchant la santé au travail.

Pénibilité et travail ont des connotations très péjoratives pour des activités de loisirs volontaires et en principe salutaires. Si l'on veut éviter ce terme de pénibilité, on peut le remplacer par l'intensité de l'activité ou la « sollicitation cardiaque », reflet du « coût cardiaque » mesuré.

Spéléologie, canyonisme et plongée souterraine sont-elles des activités de loisir à forte sollicitation cardiaque ?

- Il existe une classification des sports selon leurs exigences physiques, tenant compte des composantes statiques (la résistance) et dynamiques (l'endurance) du sport, celle de Mitchell et collaborateurs⁹. Spéléologie et canyonisme ne sont pas mentionnées dans cette classification et il est difficile de trouver un sport comparable. L'escalade, activité que l'on peut considérer comme la plus proche, est cotée à forte composante de résistance, le triathlon à forte composante d'endurance. Nos activités associent de manière forte et constante des phases de résistance et d'endurance, on peut donc les considérer comme une activité physiquement exigeante en général. En pratique, cette classification est peu utilisable pour des recommandations pratiques du sport loisir.
- Un ouvrage *Avis d'experts, Coronaropathies et activités sportives*¹⁰, publié en 2011, a élaboré une classification plus pragmatique des sports : « conseillés, tolérés ou indifférents, ou à éviter voire déconseillés » pour la Pratique d'une Activité Sportive chez les coronariens (p.13). Le « canyonning » y est classé dans les sports tolérés et la spéléologie dans les sports déconseillés. Mais ces recommandations s'appliquent à une population ayant présenté un accident coronarien, chez qui une récurrence sous terre pourrait être fatale.
- Une troisième approche pour mesurer l'intensité de l'activité est celle des MET, ou équivalent métabolique (*Metabolic Equivalent of Task*), utilisés dans les épreuves d'effort. Une classification liste l'intensité des efforts, qu'ils soient professionnels, domestiques ou sportifs. Un MET est approximativement la dépense d'O₂ au repos (3,5 ml d'O₂/kg/min). Il faut alors estimer la VO₂ max au moyen de tests d'effort maximal ou sub-maximal (test de Léger-Boucher, de Cooper, etc.).

Ici encore, la spéléologie n'entre pas dans ces tableaux, qui vont de 0,9 pour le sommeil à 18 pour la course à pied soutenue à 17,5 km/h. Un effort est réputé intense ou lourd au dessus de 7 MET, comme les sports d'équipe, le ski de fond, la randonnée en montagne, les sprints intermittents, etc. On pourra en déduire que spéléologie et canyonisme font *a priori* partie de cette catégorie.

9- MITCHELL J. H., MARON B. J., EPSTEIN S. E., "16th Bethesda Conference: Cardiovascular abnormalities in the athlete: recommendations regarding eligibility for competition.", *J Am Coll Cardiol.*; 6 (6):1186-232, 1984

10- GERS (Groupe Exercice Réadaptation Sports) de la Société Française de Cardiologie.
<https://www.google.com/search?q=avis+d%27experts+coronaropathies&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b>

Nos résultats

Les résultats obtenus dans notre étude montrent que spéléologie et canyonisme relèvent d'une pénibilité forte, classée comme « excessive » selon les normes de travail.

Il est sûr qu'un sujet bien entraîné peut aller largement au-delà de 80 % de CCR (85-90% de VO₂ max sans souffrir). Bien entraîné on peut courir 10 km à 95 % de sa fréquence cardiaque maximale théorique, un semi marathon à 90 %, un marathon à 80-85 %. Mais il s'agit d'un effort plutôt continu et peu fractionné, de plus un marathon dure entre deux et quatre heures selon les coureurs, une grosse sortie spéléo ce peut être douze heures voire plus.

Les coureurs sont des gens ayant le plus souvent une hygiène de vie très calibrée et s'entraînant en général très régulièrement. Ce qui n'est sans doute pas le cas de la majorité des spéléos, sans compter l'âge qui grimpe...

Il est normal qu'une activité physique augmente le rythme cardiaque, sinon les muscles manqueraient d'oxygène et on resterait affalés..., mais il n'y a pas de frontière nette entre cette augmentation normale et le risque de survenue d'une pathologie. Autrement dit, quelle fréquence cardiaque peut-on accepter sans majoration du risque ?

Difficile de répondre précisément et de fixer un seuil valable pour tous, car cela peut varier d'un individu à l'autre et selon les conditions concrètes au moment de l'activité : état de santé, fatigue, stress, température de la cavité, présence de gaz carbonique, etc.

Sorties spéléologiques, Le CCR est au-delà de la valeur de 50 % pour un tiers des sujets et au-dessus de 40 % pour la majorité ; tous les sujets ont un CCR 99 supérieur à 60 %. Une sortie en cavité horizontale de quatre heures semble moins solliciter le travail cardiaque, le CCR ne dépasse pas 40 % mais la comparaison des tracés montre bien la différence de sollicitation cardiaque entre un sujet très entraîné et un sujet à la pratique très occasionnelle. La progression en laminoir est la phase entraînant le coût cardiaque le plus élevé.

Il ne fait aucun doute que l'entraînement permet de réduire la charge cardiaque, ceci est confirmé par les enregistrements d'initiés. La moitié des sujets ont un CCR supérieur à 50 ainsi qu'un CCR 99 supérieur à 60 et dépassant 100 pour trois sujets, avec un temps moyen de dépassement de la FCM de 34 % du temps de la sortie. Et ce même chez des sujets se disant sportifs, le facteur stress devant entrer en compte. Toutes les phases de remontée sur corde présentent des CCR supérieurs à 60 % ; dans ces phases, la maîtrise de la technique est un facteur important pour limiter le coût cardiaque.

L'analyse de sorties dans une cavité de moins de 100 m de profondeur, de sujets ayant une pratique régulière fait ressortir des CCR ne dépassant pas 50 % pour la quasi totalité des pratiquants mais avec des CCR 99 très élevés et des temps de dépassement de 80 % de la FCM pouvant atteindre les 30 % de la sortie. Technicité et entraînement régulier font la différence entre les sujets.

Lors de sorties plus engagées — dénivelé plus important, durée de sortie plus longue —, des sujets pratiquants de même niveau présentent des CCR et CCR99 plus élevés de 20 %, le temps passé au-dessus de 80 % de la FCM augmentant dans les mêmes proportions. Les facteurs intervenant semblent être les difficultés techniques (étroitures, *ramping*, succession de petits puits) et la durée de la sortie. Les sujets jeunes, entraînés et ayant une bonne technicité présentent également des CCR autour de 50 % (vraisemblablement lié à la remontée de grands puits) avec des CCR 99 inférieur à 80 % liés à une bonne technicité. Rappelons également que ces dernières sorties étaient réalisées dans des cavités équipées, ce qui a sûrement minoré le coût cardiaque global.

Dans les sorties d'envergure, qui concernent des spéléos entraînés et chevronnés, cette étude renforce quelques points qui semblent logiques et connus : nécessité d'une progression lente, d'un entraînement régulier, d'une optimisation des temps à coût énergétique plus faibles (topographie, pauses repas, bivouac, sommeil), de s'hydrater et de s'alimenter souvent en qualité et en quantité ; mais révèle également quelques surprises comme le coût énergétique important et sous-estimé de la descente, et l'influence d'un bon état général pour encaisser des incidents physiologiques toujours possibles.

Il semble important, dans tous les cas, et notamment lorsque l'on avance en âge, de « travailler » en dessous du seuil physiologique de 80 % de la FCMT, seuil personnel idéalement défini après 50 ans par un test d'effort en milieu spécialisé (médecine ou cardiologie du sport).

Lors des plongées « fond de trou », il est capital de préserver le plongeur sur les phases les plus exposées à la descente, et lors du début de la remontée sur corde.

Sorties canyon, 30 % des sujets ont un CCR supérieur à 50 % et tous ont un CCR 99 supérieur à 60 %. La comparaison entre les deux groupes spéléo et canyon montre une sollicitation cardiaque légèrement plus faible pour les sorties canyon. L'analyse par phases de progression, montre que ce sont, chez les pratiquants réguliers et les initiés, les accès au départ de canyon (correspondant à une randonnée sur un sentier pentu) ainsi que les sorties qui peuvent être également accidentées, et les marches en rivière sur blocs qui entraînent les coûts cardiaques les plus élevés. Le facteur stress est également à prendre en compte chez les initiés ; ainsi lors d'une sortie de nuit, on a pu comparer les tracés de trois sujets jeunes pour le même canyon parcouru la veille de jour. Leur CCR a augmenté de plus de 50 % et leur CCR 99 de 22 %.

PRÉVENTION

Avant d'aborder les recommandations proprement dites, établissons les grandes lignes de la prévention.

Elles se situent à deux niveaux, l'individu et l'activité :

- Pour l'individu, il faut tenir compte des divers facteurs de santé comme l'âge, les pathologies, l'état de santé et de forme physique au moment de l'activité, l'hygiène de vie, les facteurs de risques cardiovasculaires, le niveau technique et l'entraînement.

Il faut savoir que dans les phases d'endurance avec intensités soutenues, on observe une déshydratation avec hyperviscosité sanguine, d'où l'importance de l'hydratation au cours de sorties de longue durée. L'entraînement joue un rôle important sur la tolérance à l'exercice dynamique et les variations tensionnelles, que ce soit chez les sujets normotendus ou hypertendus ; pression artérielle systolique et pression artérielle moyenne baissent et ce quelque soit l'âge du sujet.

Comme le disait le D^r Thierry Costes en introduction, « *La spéléologie ne protège pas des maladies cardiaques* ». Certes le risque absolu de mort subite, quelque soit l'intensité de l'exercice physique est très bas : une mort subite pour 1.51 million d'épisodes d'exercice¹¹. Les différentes études de la littérature chez les sportifs ayant présenté un infarctus du myocarde lors d'une activité sportive montrent que près d'un quart ont des coronaires angiographiquement normales (23 %), près de la moitié (44 %) avec une maladie uniquement mono tronculaire, et un tiers (32 %) avec une maladie multi tronculaire. **Chez un sujet, porteur de facteurs de risques (HTA, cholestérol...) ignorés**, les activités physiques à hautes intensités (comme on peut les rencontrer dans nos pratiques) peuvent générer des ruptures de plaque athéromateuses coronariennes et apparition d'un Syndrome Coronarien Aigu pouvant aboutir à l'infarctus du myocarde, ou déclencher un trouble du rythme¹².

Une composante vasospastique à l'effort est également possible, notamment en cas d'imprégnation tabagique ou de basse température. Les sportifs, surtout les plus jeunes et en sport amateur, n'échappent pas aux facteurs de risque, notamment au tabagisme, dont les risques sont souvent méconnus ou négligés. Bien des sportifs pensent à tort que le sport permet d'« éliminer » les méfaits de celui-ci. L'information doit être réalisée notamment lors

11- ALBERT C. M. , MITTLEMAN M. A., CHAE C. U., LEE I. M., HENNEKENS C. H., MANSON J. E., "Triggering of sudden death from cardiac causes by vigorous exertion", *N. Engl. J. Med.*; 343 (19):1355-61, 2000

12- ROBERTS W. O., MARON B. J., "Evidence for decreasing occurrence of sudden cardiac death associated with the marathon", *J. Am. Coll. Cardiol.*; 46:1373-4, 2005

de la délivrance de certificats de non contre indication, surtout en présence de facteurs de risques.

Plusieurs facteurs favorisent la survenue d'un Syndrome Coronarien Aigu à l'effort (première cause de mort subite après l'âge de 35 ans) :

- la volonté de performance ;
- l'engagement sans échauffement initial ;
- les ruptures d'entraînement régulier ;
- des facteurs climatiques (froid, chaleur, hygrométrie élevée...);
- des comportements favorisant des facteurs vasomoteurs (cigarette, douche froide...).

Conseils pratiques à respecter :

- Respecter une période d'échauffement et de récupération (marches d'approche progressives, récupération post-effort), ménager ses efforts, faire des pauses, s'entraîner régulièrement dans l'année y compris hors cavité (falaise, salle) ;
- Supprimer tabac et alcool ou toute autre conduite addictive, en particulier deux heures avant l'effort, pendant l'effort et deux heures après l'effort ;
- Protections adéquates lors de conditions climatiques extrêmes (froid, vent, chaleur, humidité) ;
- S'hydrater très régulièrement (toutes les 30 min) et s'alimenter le mieux possible avant, pendant et après l'effort ;
- Éviter douches très froides ou très chaudes trop tôt après l'effort ;
- Consulter au moindre symptôme suspect (douleur thoracique, palpitations, malaise) ;
- Arrêt temporaire du sport en cas de fièvre et de syndrome viral récent (attendre une semaine pour la reprise) ;
- Éviter les « compléments alimentaires », pouvant contenir d'autres substances dangereuses (dopage caché) et la prise médicamenteuse non contrôlée (anti inflammatoires notamment) ;
- 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 ».

En complément, les **Dix règles d'or**¹³ éditées par nos confrères cardiologues du sport méritent d'être connues de tout pratiquant du milieu souterrain

- Pour l'activité, il faut adapter le niveau de la cavité ou du canyon aux capacités de l'individu et adapter son équipement technique et sa tenue vestimentaire. Dans le cas d'un groupe, la solidarité et la bienveillance seront de mise pour chacun, en s'alignant sur les personnes les plus fragiles. Et comme toujours dans les activités de pleine nature, savoir renoncer à temps ou limiter ses ambitions.

Connaitre ses limites et pratiquer en fonction de ses capacités techniques. La maîtrise de la technicité, notamment des remontées de puits et passage de fractionnement est un facteur d'économie du coût cardiaque. Dans une étude de 1994, des auteurs ont conseillé aux spéléologues de ne pas dépasser la cadence de 20 brassées par minute, ce qui correspond au seuil de 4 mMol/mn de lactate, le seuil SV2, afin de rester en endurance et de ne pas risquer l'épuisement¹⁴.

À notre connaissance c'est le premier travail concret de ce type pour nos activités. Dans l'ensemble, que ce soit en spéléologie ou en canyon, on peut chiffrer le coût cardiaque à un niveau élevé pour les phases en endurance avec des phases dynamiques pouvant être très intenses. Spéléologie et canyonisme sont cependant des sports d'endurance développant les capacités d'adaptation

13- http://www.clubcardiosport.com/reglesd'or/affiche/CCS%20affiche_regles_d_or_HD.pdf

14- DE YZAGUIRE I., GUTIERREZ J. A., « Épreuve fonctionnelle de laboratoire pour l'évaluation des spéléologues », *Cinésiologie*, XXIII, 164, 1994

cardiaque à l'effort, avec tous les effets bénéfiques reconnus pour d'autres sports tels le cyclisme et la course à pied. Avec un énorme avantage, celui de solliciter tous les groupes musculaires.

Comme pour le cyclisme, il faut savoir adapter sa pratique à son niveau de forme et d'entraînement, le coût cardiaque n'est pas le même en balade cyclotouriste et en cas d'ascension du Mont Ventoux¹⁵ !

Savoir se préparer c'est pratiquer un entraînement régulier sur structure artificielle, falaise. On peut se faire plaisir quel que soit le niveau de pratique, c'est ce que permettent spéléologie et canyonisme, gratter au fond d'une grotte ou « faire » un moins 300. 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.

Ce qu'a permis l'étude c'est la confirmation de ces phases intenses, que chaque pratiquant connaît bien et qui peuvent avec l'âge être le déclenchement d'accidents cardiaques ou autres chez des sujets porteurs de facteurs de risques ignorés. C'est toute la valeur du certificat médical, moment privilégié d'accompagnement du pratiquant sur ses capacités.

LE CERTIFICAT MÉDICAL

Suite à l'obligation annuelle du certificat médical, que n'a-t-on pas entendu de la part de certains spéléos ! : « *Que chacun se connaissait mieux qu'un médecin (y compris le leur parfois), que chacun savait dans quel état il était au moment de faire une sortie, etc. En bref, que l'individu avait une parfaite clairvoyance de sa prise de risque !* »

L'étude de la *CoMed* démontre en grande partie l'inverse de cette position de principe. Les pratiquants s'étant soumis à ces enregistrements cardiaques ont souvent été surpris des résultats. Ils ne s'attendaient pas en général à de telles augmentations de fréquence cardiaque, même s'ils pouvaient parfois l'imaginer en raison de leur âge, de leur manque d'entraînement ou de leur méforme physique. Il est donc assez peu réaliste de se fier uniquement au ressenti du moment, l'accident cardiaque étant souvent un « coup de tonnerre dans un ciel bleu »...

Durant l'échange médecin/patient, ce qui se joue en matière d'examen de prévention n'a rien d'anecdotique. Il s'agit bien de la vie du pratiquant qu'il s'agit de préserver ainsi que la vie de coéquipiers engagés en cas de secours pour un accident cardiaque que l'on aurait pu prévenir.

On ne peut qu'insister sur la mise en perspective des trois composantes fondamentales de cet échange :

- l'activité : que ce soit la spéléologie, le canyonisme ou la plongée souterraine, la sollicitation physique et mentale de l'individu est forte. Milieu très particulier, inhabituel, souvent stressant, effort soutenu et fractionné, endurant et résistant.
- le pratiquant : ses données de santé globales, en particulier la recherche de ses facteurs de risque cardiovasculaire, mais ce ne sont pas les seuls éléments à considérer, son niveau technique, l'intensité de sa pratique, sa motivation (qu'il faut parfois freiner...). C'est tout l'individu qu'il faut appréhender dans cet acte qui engage fortement malgré son apparente banalité administrative.
- l'angoisse du médecin : on pourrait l'oublier, mais le médecin n'est pas une intelligence artificielle ! C'est un être de chair et de sang qui a ses propres représentations. Et avouons que la spéléologie n'a pas bonne réputation dans le public ! On peut donc comprendre ses difficultés ou sa prudence parfois très excessive avant d'apposer sa signature sur un tel certificat.

Le certificat médical de non contre-indication au sport (CMNCI) est toujours une recherche de compromis entre l'analyse du risque et la prise de risque, que ce soit du côté du pratiquant ou du médecin. On conçoit facilement que ce ne soit pas toujours simple. Heureusement les examens complémentaires d'exploration cardiaque peuvent aider à la prise de décision :

15- Plusieurs morts par an par arrêt cardiaque et le certificat médical n'est obligatoire que tous les trois ans.

électrocardiogramme, échocardiographie, épreuve d'effort, Holter tensionnel ou rythmique, recherche d'apnées du sommeil, et bien d'autres.

Le médecin généraliste ou le cardiologue n'étant pas forcément spécialiste des activités sportives de pleine nature, le recours à un médecin du sport pourra débloquer certaines situations. Rappelons que la *CoMed*, commission fédérale, peut être contactée par le pratiquant ou son médecin pour discuter de cas précis. Les membres du Comité Technique mais aussi les médecins référents et les médecins fédéraux régionaux (souvent les mêmes), sont à même de renseigner pratiquants, structures fédérales et médecins.

Le site internet de la commission affiche également les travaux médicaux réalisés, tous téléchargeables, qui peuvent aider à la prise de décision.

Le modèle de certificat médical élaboré par la *CoMed* répond au mieux aux impératifs médicaux, juridiques et réglementaires en jeu dans cette procédure. Il comprend trois parties :

- une description des contraintes de l'activité et des pathologies pouvant interférer avec elle ;
- le certificat proprement dit à faire signer par le médecin, avec les activités nommément autorisées ;
- une attestation d'antécédents déclarés par le pratiquant, destiné au dossier médical tenu par le médecin.

Nous ne pouvons que conseiller à tous de l'utiliser.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERT C. M., MITTLEMAN M. A., CHAE C. U., LEE I. M., HENNEKENS C. H., MANSON J. E. "Triggering of sudden death from cardiac causes by vigorous exertion", *N. Engl. J. Med.* 2000; 343 (19):1355-61
- BANISTER E. W., CALVERT T. W., SAVAGE M. V., BACH T., "A systems model of training for athletic performance". *Aust. J. Sports Med.* 7(3): 57-61, 1975
- BLANCHARD J.-M., « Contribution à l'étude de l'épuisement du spéléologue en milieu souterrain », Thèse de juin 1982
- BOUDET G., CHAMOIX A., « Validation en chambre calorimétrique de la mesure de la charge physique de travail par la fréquence cardiaque », *Arch. Mal. Prof. Env.* , p.580, 2005
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjbtObI9b3eAhWKy4UKHSwsB6QQFjAAegQICRAB&url=http%3A%2F%2Fwww.em-consulte.com%2Fen%2Farticle%2F73633&usg=AOvVaw0K_juasIYQPuCDSANs6zUj
- BUCH J.-P., VALENTIN G., VIDAL A. D^{rs}, « Mortalité cardio-vasculaire en spéléologie », *Spelunca* n°107, p 5-9, 2007
- BUCH J.-P., OSTERMANN J.-M., VALENTIN G., VIDAL A. D^{rs}, « Mortalité cardio-vasculaire en spéléologie », *Cardio&sport* n°6, p.23-26
- DELMAS P. D^r; « L'aptitude à l'effort en spéléologie », *Spelunca* n°19, p. 33, 1985
- DE YZAGUIRRE I., GUTIERREZ J. A., « Épreuve fonctionnelle de laboratoire pour l'évaluation des spéléologues », *Cinésiologie* 1994, XXIII, 164
- FABRE M., Mémoire de DIUMUM 2011, Bibliographie sur le travail cardiaque en spéléologie
- GERS (Groupe Exercice Réadaptation Sports) de la Société Française de Cardiologie, « Avis d'experts, Coronaropathies et activités sportives », août 2011,
<https://www.google.com/search?q=avis+d%27experts+coronaropathies&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b>
- GUILLEMAN J.-L., « Étude comparative de trois méthodes de remontée sur corde en spéléologie », Groupe d'études techniques de l'E.F.S, Mémoire Instructeur, *Spelunca* n°90, 2003
- LEMOINE J.-L., VANHEULE S., *Cardiofréquence-métrie et travail*, ASMIS, 2015
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=14&ved=2ahUKEwjP74T31K3eAhUORBoKHSfIB4wQFjANegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fgemsto.free.fr%2FRepreseaccCV25sept15%2FCardiofreqmetrie.-25sept15.SVanheule.pdf&usg=AOvVaw1epSmBOnKCgIqM_-leMsFs
- MACDOUGALL J. D., WENGER H. A., GREEN H. J., "Physiological Testing of the High Performance Athlete". 2nd Edition. Champaign, IL: *Human Kinetics*, pp. 403-422, 1991

- MARBACH G., TOURTE B., « Techniques de la spéléologie alpine », Expé
- MEUNIER Ph., « Abaque de modélisation et de classification des profils cardiaques des postes de travail selon les coûts cardiaques relatifs moyen et crête », *Cahiers de Médecine Interprofessionnelle (CAMIP)*, 1997 ,3, p 287-293, 4, pp. 409-416, 2000
- MITCHELL J. H., MARON B. J., EPSTEIN S. E., 16th Bethesda Conference: *Cardiovascular abnormalities in the athlete: recommendations regarding eligibility for competition.*, J Am Coll Cardiol. 6 (6):1186-232, 1985
- REY B. D^r, « Les cordistes », Mémoire présenté en vue de l'obtention du DES en médecine du travail, 2003-2004, <http://docs.bossonsfute.fr/Documents/memoirecordistesrey.pdf>
- WILMORE J. H., COSTILL D. L., LARRY KENNEDY W., « Physiologie du sport et de l'exercice », 4^e édition, Ed. De Boeck
- ROBERTS W. O., MARON B. J., "Evidence for decreasing occurrence of sudden cardiac death associated with the marathon. ", *J. Am. Coll. Cardiol.*, 46:1373-4, 2005