DES TESTS SPÉLÉOLOGIQUES FILMÉS CHEZ PETZL : PREMIERS RÉSULTATS

Par Gaël Monvoisin, PB Laussac

1. Rappel du projet

Comme vous avez pu le lire depuis 3 ans dans les Info-EFS n° 57, 59 et 61, le projet de vidéo didacticiel de l'EFS commence à être une vieille histoire, elle dure déjà depuis 4 ans. Nous avions détaillé la nouvelle avancée de ce projet dans le dernier Info-EFS. L'idée est d'utiliser la vidéo comme support pédagogique pour discuter ou expliquer des situations enseignées et rencontrées régulièrement en formation. Pour mener à bien ce projet, Petzl nous a prêté du matériel pour réaliser les différents tests. Ce partenariat s'est renforcé cette année avec la mise à disposition du centre V.axess à Crolles et de personnels de Petzl pour notre projet. Ainsi, la première campagne commune de tests et de tournages s'est déroulée du 19 au 23 mai 2014 dans le centre V.axess. Elle a réuni 8 spéléologues dont plusieurs de la Direction Nationale de l'EFS, deux vidéastes et deux personnes référentes des tests chez Petzl. Des scénarii de 8 situations ont été testés. Vous trouverez donc à suivre plusieurs articles sur les résultats de quelques uns des tests réalisés.

2. Choix des tests

Lors de cette première campagne, en concertation avec les techniciens de Petzl et de V.axess, nous avons choisi de traiter différentes configurations de progression d'un spéléologue sur corde : en statique (progression classique) et en dynamique (glissade, chute). Tous les tests ont été réalisés directement avec des spéléologues de façon à se rapprocher des conditions réelles rencontrées (pas d'utilisation de masse inerte du type gueuse ou mannequin). A chaque fois, des mesures ont été faites de façon à quantifier et analyser les forces et contraintes mises en action.

Les situations testées se regroupent en 3 types de progression sur 8 ateliers :
- Chute sur main courante en progression horizontale,
- Progression verticale à la montée :
    - remontée lente/rapide, fluide/saccadée
    - en cas de chute à l'arrivée lorsque le spéléo est longé à l'amarrage
    - chute sur bloqueur ventrale sur plan incliné
- Progression verticale à la descente :
    - descente lente/rapide, fluide/saccadée
    - en cas de chute sur le descendeur avant le délongeage.

Pour chaque test, 3 personnes, de gabarits différents, ont reproduit au moins 3 fois chaque situation. Si les données résultantes étaient cohérentes, le test était validé. Pour toutes les situations de chutes et pour les protéger lors de chaque test, les testeurs ont toujours travaillé dans des conditions de sécurité optimales et validées par Petzl : harnais confortables pour les chocs importants, double sécurité en cas de possibilité d'ouverture du doigt des mousquetons de longes, retrait des prises des murs d'escalade en cas de risque de frottement, matelas de type crash pad au sol, casque en permanence sur la tête. Le ressenti des testeurs était un paramètre pris en compte dans les résultats.

3. Quelques définitions

Nous n'avons pas l'intention de vous présenter un long cours de physique quantique. Cependant, pour fixer les idées sur les termes qui seront employés tout au long des articles sur ces tests, il est important d'avoir un langage précis pour éviter toute confusion. Nous allons essayer de faire simple avec des choses complexes. Exercice de style…

3.1. Mesure d'une force

Une force se mesure avec un dynamomètre et est exprimée en Newton (N). En première approximation, on dit qu'un décanewton (daN) est équivalent à un kilogramme (kg), à ne pas confondre avec un kilonewton (kN) : 1kN = 1000 N = 100 daN.

3.2. Masse et poids

La masse (m) d'un spéléologue est la quantité de matière qui le compose (en kilogrammes), elle est invariable au cours d'un test. Le poids (P) est une grandeur pour laquelle intervient un paramètre dépendant de la pesanteur (g = 9.81 N sur la Terre), c'est une force. Il existe une formule reliant ces deux paramètres : $P = m * g$

3.3. Vitesse, accélération et décélération

La vitesse (v) d'un déplacement (en mètres par seconde) est la mesure d'une distance (d) (en mètres) parcourue pendant un temps (t) donné (en secondes) : v = d/t
L'accélération (en mètres par seconde par seconde, ou en mètres par secondes au carré) est la mesure de la modification d'une vitesse (en m/s) pendant un temps donné (en s). L'accélération (a) est une augmentation de la vitesse. La décélération (d) est une diminution de la vitesse. Cette grandeur est assimilée à la gravitation et est exprimée en g : 1 g = 9, 81 m/s².
Une masse à l'arrêt est soumise à l'attraction terrestre, même au repos. Il faut lui donner une énergie pour la mettre en mouvement, c'est l'énergie potentielle (en Joules) : Ep = m * g * h où h est la hauteur à laquelle se situe la masse.
Pour provoquer le déplacement d'une masse (en kg) à une vitesse donnée (en m/s), il faut une énergie dite cinétique (en Joules), une énergie de mouvement : Ec = ½ * m * v².
Lorsqu'un corps chute, il perd de l'énergie potentielle au profit d'une augmentation de l'énergie cinétique.
Plus la hauteur de chute est grande, plus la vitesse est importante, plus la décélération sera violente à l'arrivée, sauf si nous utilisons un objet déformable comme une corde, par exemple, pour ralentir la chute. L'accélération est mesurée dans les 3 dimensions et peut avoir un paramètre cinématique lorsqu'il y a un mouvement de rotation qui intervient, comme lors d'un pendule.

3.4. Efforts, facteur de chute et force choc

Effort et force :

Le terme effort est un synonyme de force, l'effort engendré par une traction sur une corde est la force appliquée en un point de la corde dans une direction verticale et dans le sens du haut vers le bas (poids du spéléologue en déplacement classique ou lors d'une chute).

Le facteur chute ou facteur de chute est le rapport entre la hauteur de chute (H) et la longueur (L) de la corde qui intercepte la chute (sans prise en compte de l'élasticité) ; et il ne peut donner qu'une « indication de la sévérité » d'une chute potentielle. Il n'y a pas d'unité d'énergie ou de force associée à cette formule.
Facteur de chute (f)= H / L.
Une chute dite de facteur 1 signifie que la hauteur de chute est égale à la longueur de corde disponible pour chuter. C'est la valeur maximale recommandée sur des cordes semi-statiques de 9 mm et plus, utilisées en spéléologie.

Force-choc :

La force-choc ou force de choc est l'impact que va encaisser le spéléologue lors de l'arrêt de sa chute par la corde ou sa longe. C'est l'énergie totale absorbée répartie sur le spéléologue, sa longe, son baudrier, la corde, les nœuds et les amarrages. Cette absorption de l'énergie va limiter l'impact de la chute sur le corps du spéléologue. La force-choc, dont on parle en cas de chute, est liée à la masse du spéléologue, au diamètre de la corde, à l'élasticité de la corde (ce qu'on appelle le module d'élasticité ou module de Young) et au facteur de chute.

Cette valeur est également employée dans les notices d'utilisation des cordes par les fabricants, mais leurs tests sont faits avec des masses rigides et les valeurs ne se rapportent pas aux mêmes paramètres.

Exemple de calcul d'une force-choc maximale pour une chute de facteur 1 sur de la 9mm Béal Spélénium pour une masse rigide de 81kg.
Définition théorique de la force-choc maximale :
(Formule 1) : Fchoc max = m * g * (1+√((1+2 * K * f)/ (m * g))
Avec K = module de Young = module d'élasticité = 21100 N (données constructeur pour la Spélénium 9 mm), f le facteur de chute et g = accélération de la pesanteur = 9, 81 m/s²

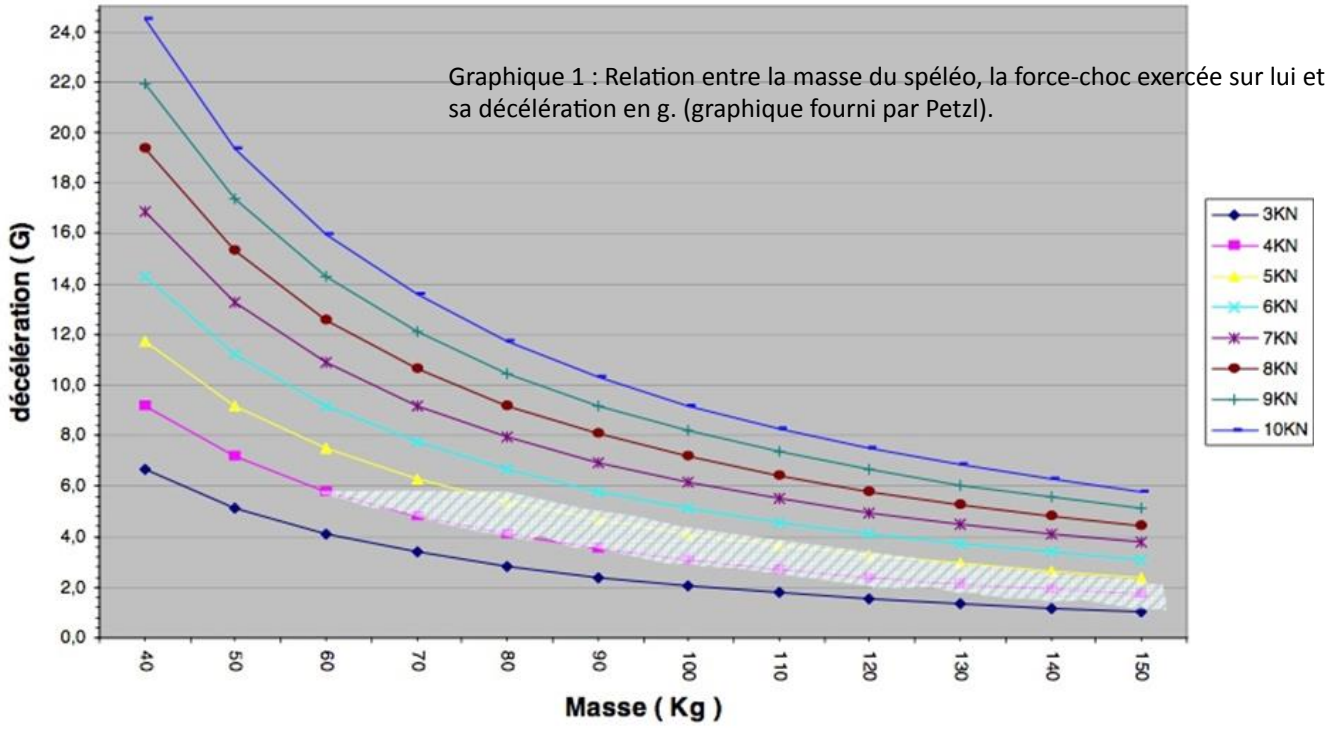
Soit : Fchoc max = 81 * 9,81 * (1+√((1+2 * 21100 * 1) / (81 * 9 ,81)) = 685,5 daN=6585,5N

La force-choc maximale encaissée par la masse rigide lors de cette chute en facteur 1 serait théoriquement de 685.5 daN. En fait, elle est moindre d'un tiers environ, comme le montrent les résultats des tests de chute sur longe (350 daN en moyenne pour le testeur de 81 kg), car elle n'intègre pas l'amortissement par le baudrier et le corps du spéléologue. On remarque que la hauteur de la chute n'intervient pas dans la détermination de la force-choc max.

La force-choc constructeur :

Il s'agit d'une donnée totalement indépendante que fournissent les constructeurs de cordes sur les capacités d'absorption de chocs de leurs cordes. Cette force-choc correspond plutôt à la capacité de la corde à absorber un choc. Ainsi, plus la force-choc qu'annoncera le constructeur sera basse, meilleures seront ses capacités physiques.
Par exemple, Béal annonce pour la corde «Verdon», une force-choc de 530 daN. Cela ne signifie pas que la corde va se rompre à 531 daN, mais que lors d'une chute d'un grimpeur, les qualités physiques de la corde ne vont pas faire monter la force-choc (celle mesurée au dynamomètre) de manière trop importante et donc assurer une absorption maximale du choc.

Pour notre activité, une force-Choc basse pour la confection de nos longes est un gage de qualité. D'autant plus qu'avec le temps, les longes tendent à se «rigidifier», donc le choix



Graphique 1 : Relation entre la masse du spéléo, la force-choc exercée sur lui et sa décélération en g. (graphique fourni par Petzl).

d'une corde avec une Force-choc basse est cohérent avec notre pratique. Ce qui n'empêche pas de changer ses longes régulièrement.

3.4. Le seuil d'occurrence lésionnel

Le seuil d'occurrence lésionnel est une donnée qui vient des pilotes de chasse et des parachutistes. C'est le nombre de g (ou le nombre de fois une force équivalente à l'attraction terrestre) que le spéléologue va subir lors de l'arrêt de sa chute pendant une décélération brutale.
La limite imposée par les normes européennes, pour une personne moyenne, est de 6 g soit 600 daN, soit environ six fois son poids. Au-delà, le corps commence à subir des lésions (musculaires d'abord, puis osseuses).
A titre d'exemple, lorsque je suis debout en statique, je suis à 1 g, c'est-à-dire mon poids (c'est l'attraction terrestre). Lorsque je monte sur un tabouret et que je saute au sol, je peux mesurer avec un accéléromètre environ 2 g.
Reprenons l'exemple ci-dessus et tentons de déterminer le nombre de g que reçoit le spéléologue d'une masse de 81 kg pour une force-choc max de 6585,5 N.
La force de choc max (Fchoc max) subie par l'utilisateur varie en fonction de son poids :

(Formule 2) : Fchoc max =m*g*d et d=Fchoc max/m*g (voir formule ci-dessous)

d étant la décélération exprimée en g , soit le nombre de g que l'individu va subir correspondant à « n » fois l'accélération de la pesanteur à la surface de la terre. Pour rappel 1g = 9,81 m/ s².

Nous obtenons le calcul suivant avec l'aide de la formule 2 :

d = Fchoc max/m*g = 6585,5 / (81*9,81) = 6585,5 / 794,61 = 8,3 g

Dans cet exemple, la masse rigide de 81 kg subit une décélération de d=8,3 g, soit au-dessus du seuil d'occurrence lésionnel déterminé à 6 g. Il y a donc potentiellement risque de blessures au niveau des lombaires, des cervicales et sur d'autres parties du corps. Comme abordée précédemment, cette valeur reste théorique et ne tient pas compte de l'amortissement lié au corps du spéléologue. Ainsi, les tests réalisés ont permis d'observer qu'un spéléo de masse de 81kg ne réagit pas du tout de la même manière qu'une masse rigide identique et diminue le nombre de g encaissés, de l'ordre de 4g, comme le montre le graphique 1 ci-dessous.

Remarque : Le nombre de g engendrés par la décélération est inversement proportionnel à la masse du spéléologue.
Exemple avec une masse rigide de 60 kg :
Ainsi, une masse rigide de 60 kg subira d'après la formule 1, une force-choc max de 5572,5 N.
Connaissant la force-choc max, nous pouvons calculer à l'aide de la formule 2 la décélération théorique de la masse rigide de 60 kg : d = Fchoc max/m*g= 5572,3 / (60*9,81) = 5572,3 / 588,6 = 9,5 g.

Ces calculs sont vérifiés dans le graphique 1 : pour une force-choc max équivalente, une masse plus légère engendrera une décélération supérieure.

Voilà, j'espère que vous n'êtes pas encore malades. On arrête avec les formules maintenant.

Tableau 1. Testeurs et matériels utilisés par chacun.

Code	Nom	Masse (kg)	Matériel (Baudrier et longes)
1	PB Laussac	81	Petzl Super Avanti. Longes Beal Verdon 9 mm usées
2	José Mulot	65	MTDE Amazonia longes Beal Top Gun II 10.5 usées
3	Anthony Brigand	74	MTDE Amazonia longes Beal Verdon 9 mm usées

Photo 1 : Dynamomètre (photo site Rock Exotica Enforcer).
Ce dynamomètre est positionné sur l'atelier comme sur la figure 1.

4. Matériel et méthodes

Pour l'établissement des protocoles de tests, nous avons eu plusieurs réunions avec V.axess. Alain Maurice et Chris Blakeley de Petzl ont été présents pour nous conseiller et nous accompagner dans la réalisation des tests. Les tests ont été faits du 19 au 23 mai 2014 dans la salle d'expérimentation de V.axess, à Crolles. Les ateliers ont été mis en place et validés par Alain Maurice, Chris Blakeley et Gérard Cazes (conseiller technique national et responsable du groupe d'études techniques de la FFS).

Les 3 premiers jours de la semaine ont été consacrés à la réalisation des tests et à la validation des résultats. 3 testeurs, de masses et de gabarits différents, sont venus participer aux tests (José Mulot, Pierre-Bernard Laussac et Anthony Brigant). Chaque testeur a répété 3 fois au moins les essais sur chaque atelier. Chaque testeur avait son propre matériel et ses propres longes, en bon état.
Les 2 derniers jours de la semaine, Gaël Monvoisin (coordinateur du projet), Julien Bozzato (cadreur et monteur des films) et Olivier Perret (cadreur et cinéaste) sont venus pour filmer les tests ou des séquences reproduisant les tests (sans les capteurs quand ils étaient utilisés sur d'autres ateliers) et réaliser des interviews des participants. Ils avaient avec eux deux GoPro Hero3+, deux appareils photos Canon 5DMarkll, à très haute définition, ainsi qu'un micro HF et un micro de poing pour les prises de son avec un enregistreur zoom H4. Au total, ce sont 4 fois 5 heures d'images et 2 fois 5 heures de sons qu'il faut dépouiller, trier et arranger pour en faire des vidéos exploitables, un jeu d'enfant...

Vincent Biot (président de l'EFS) a pu se libérer une journée à cette occasion pour voir comment se passaient les tests. Tristan Godet et Barnabé Fourgous se sont déplacés le dernier jour pour faire les acteurs sur les séquences finales des films et illustrer les tests.

Stéphane Lozac'hmeur et Olivier Moret de la Fondation Petzl étaient également sur place. La Fondation Petzl prend en charge financièrement la partie montage des films, partie la plus longue en terme de temps et de frais pour ce projet.
Le matériel utilisé pour la partie technique des tests est détaillé ci-dessous.

Les cordes utilisées sur tous les ateliers étaient des cordes mises à disposition par l'EFS, corde Béal Spélénium, diamètre 9mm, non neuves de même année de fabrication.

Les informations techniques sur ces cordes peuvent être trouvées dans les notices techniques sur le site du fabricant : http://www.beal-planet.com/2014/francais/cordes.html

Les efforts engendrés par les progressions et les chutes des testeurs étaient enregistrés sur des dynamomètres Rock Exotica Enforcer, sans fils et commandés par Bluetooth via des Iphones : http://rockexotica.com/enforcer/index.html.

5. Enregistrements des capteurs et lecture des données des dynamomètres

Les dynamomètres fonctionnent en deux modes, mode lent ou rapide selon le type de test. Les tests mettant en jeu des chutes, séquences courtes, ont été mesurés en mode rapide ; la totalité des évènements est enregistré et les courbes visualisées en direct sur les appareils.
Les tests de progression sur corde, séquences longues, ont été enregistrés en mode lent, les graphiques sont disponibles sans valeur chiffrée et seule la valeur maximum est enregistrée.

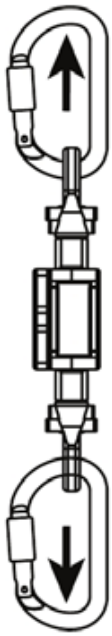


Figure 1 : Positionnement du dynamomètre sur l'atelier. Le mousqueton supérieur est fixé sur l'amarrage ou la corde, le second, en dessous, sur la corde ou la longe selon les situations. (Figure site Rock Exotica Enforcer).

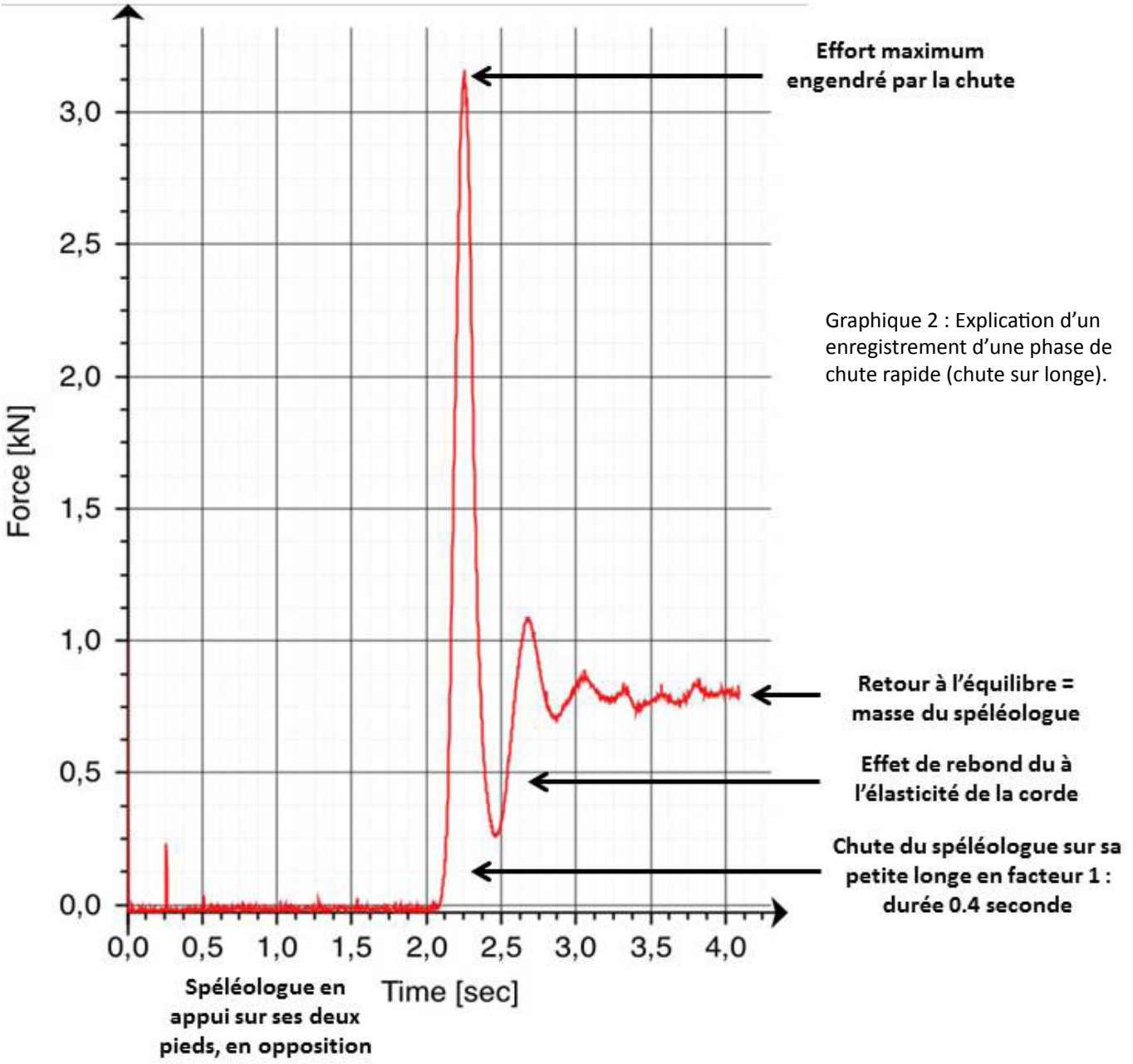
Deux dynamomètres étaient mis à notre disposition par Petzl. Toutes les données ont été transmises par Bluetooth sur des Iphones puis transférées par mail. Ces données ont été traitées par Excel pour les exploiter et en tirer des conclusions.

Cette semaine de tests a généré 50 fichiers de valeurs de plusieurs milliers de lignes et 30 images à dépouiller pour exploiter ces données et en tirer des conclusions.

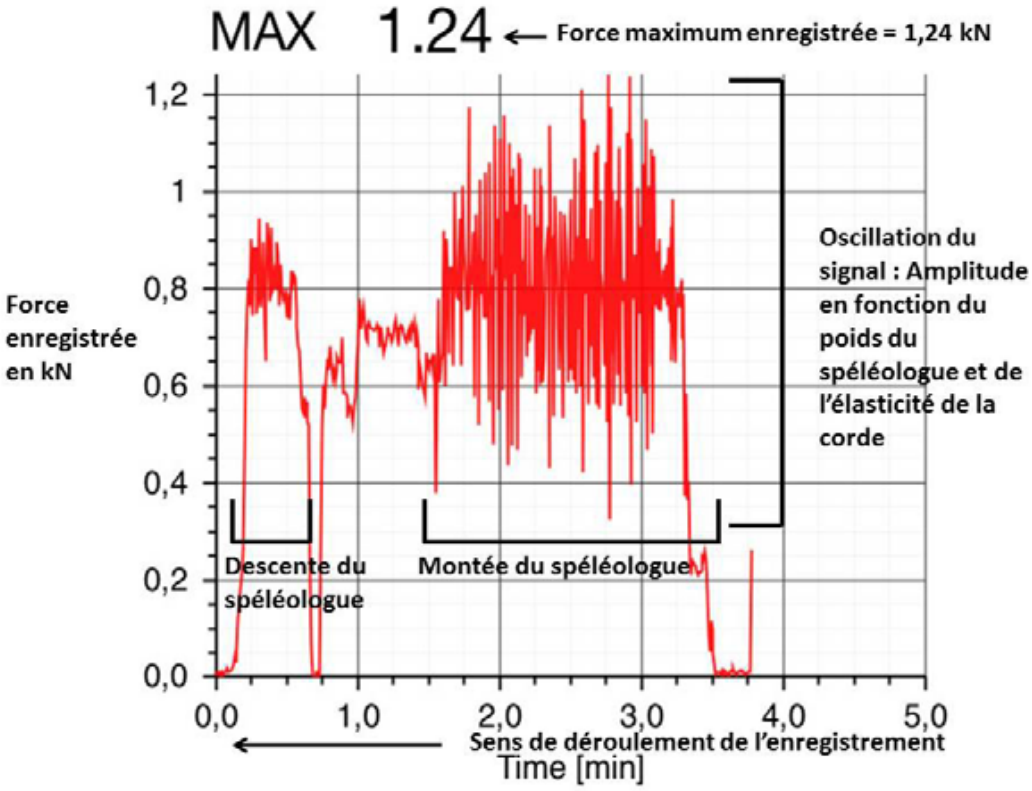
5.1. Enregistrement d'un évènement court (chute)

Le dynamomètre enregistre 500 mesures par seconde. Cela permet d'analyser un évènement très court dans le temps (de l'ordre de quelques secondes) en visualisant les pics de force, même très rapides. Le graphique 1 permet de comprendre et d'interpréter la courbe ainsi restituée.

Graphique 2 : Explication d'un enregistrement d'une phase de chute rapide (chute sur longe).
Le graphique se lit de gauche à droite sur l'axe des abscisses, temporel (en secondes). L'axe des ordonnées correspond à la force donnée en kN (100 daN ou 100 kg). Sur une chute, quatre phases sont enregistrées:
- Une phase « muette » où le spéléologue est en appui sur



Graphique 2 : Explication d'un enregistrement d'une phase de chute rapide (chute sur longe).



Graphique 3 : Explication d'un enregistrement d'une phase de progression lente (montée/descente sur corde)

ses deux pieds (de 0 à 2 secondes) et ne « pèse » pas sur le dynamomètre (y compris le temps de chute libre).
- Une phase de choc lorsque le spéléologue est freiné et qu'il arrive au maximum de l'élasticité de la chaine dont il fait partie, de 2.1 à 2.5 secondes.
- Une phase de rebond liée à l'élasticité du système entre 2.5 et 2.7 secondes.
- Une phase d'amortissement et de retour à l'équilibre (qui correspond à la force engendrée par le poids seul du spéléologue au repos), de 2.7 à 4 secondes.

5.2. Enregistrement d'un évènement long (progression normale)

Le dynamomètre enregistre deux mesures par seconde. Ce mode d'enregistrement pour les événements qui durent plusieurs minutes ne permet pas d'enregistrer des valeurs chiffrées précises. La restitution se traduit par un graphique avec une valeur maximale. L'axe des abscisses est toujours le temps mais en minutes et l'enregistrement se lit de droite à gauche (ne me demandez pas pourquoi !). La valeur indiquée au sommet du graphique et notée MAX est la force maximale enregistrée par le dynamomètre.

Sur une phase de montée/descente d'un spéléologue, nous pouvons découper l'enregistrement en
4 phases :
- Le spéléologue est au sol (entre 3.75 et 3.5 min) puis commence à ravaler le mou de la corde (de 3.5 à 3.25 min), il atteint une force de 0,8 kN correspondant globalement à son poids (81 kg). Il prend son envol.
- Le spéléologue s'agite pour monter et enchaîne les mouvements de poussée sur ses pieds et de montée de sa poignée (de 3.25 à 1.5 min). Les oscillations observées correspondent au yoyo de l'ascension, dû à l'élasticité de la corde, bien connue des spéléologues : il est même possible de compter en combien de brassées le spéléologue avale ses 20 mètres de hauteur (environ 50). Le phénomène de yoyo diminue d'ailleurs au fur et à mesure que le spéléologue se rapproche du sommet, il y a moins d'élasticité dans la corde.
- Le spéléologue arrive en haut de la corde et prend appui sur ses pieds, il fait sa conversion et ne pèse plus que son propre poids, légèrement diminué par l'appui de ses pieds. Il a même un poids nul lorsqu'il prend appui sur ses pieds pour se décrocher et entamer sa descente (de 1.5 à 0.75 min).
- Enfin, il entame sa descente. Les oscillations sont beaucoup plus faibles compte-tenu de la fluidité des mouvements et du coulissement de la corde dans le descendeur. La valeur n'est que légèrement supérieure à son poids. La valeur devient nulle lorsque le spéléologue arrive au sol et ne pèse plus sur la corde (de 0.75 à 0 min).

Vous retrouverez ces graphiques tout au long des tests détaillés plus loin et vous avez maintenant toutes les informations nécessaires pour les comprendre.

Remarque : Dans tous les tests réalisés et pour toutes les conclusions de ces tests, nous n'avons jamais pris en compte la résistance des amarrages. C'est un paramètre difficilement quantifiable et soumis à tellement de facteurs que nous nous en sommes volontairement affranchis lors de nos mesures de force-choc. Ce paramètre est pourtant primordial dans notre pratique et à prendre en compte en situation réelle.

6. Point sur la vidéo/ conclusion

Des films issus de ces tests sont en cours de montage. Si certaines vidéos devront être complétées par d'autres tests lors d'une prochaine campagne, l'objectif est de terminer les premiers montages pour la fin de l'année 2014, si possible avant les Journées d'Études de la FFS. Mais, j'ai appris à être prudent en terme de calendrier avec la vidéo, il reste tant à faire : finir de regarder tous les rushs, les trier, les mettre dans l'ordre, construire le scénario, rédiger un texte pour une voix off et valider le contenu des textes et des images par l'EFS et le GET mais aussi par les responsables techniques de Petzl et V.axess. Enfin, reprendre tout le film pour vérifier que tout colle parfaitement. Il ne restera plus qu'à faire la mise en ligne mais c'est une rigolade à côté de tout ce qui précède…

Tous les participants à ce projet ont été cités dans la partie «matériels et méthodes», qu'ils/elles soient tou(te)s remercié(e)s pour leur participation et leur accompagnement tout au long de cette aventure qui nous agite le ciboulot. Nous espérons que tout cela fera avancer la spéléologie. N'hésitez pas à nous contacter si vous avez des critiques ou des idées à nous proposer, pourvu qu'elles soient constructives. Il reste tant à faire.

Merci aussi aux nombreux relecteurs : Gérard Cazes, Vincent Biot, José Mulot, Alain Maurice, Chris Blakeley, Tristan Godet, Judicaël Arnaud, Alexandre Zappelli et Anthony Brigand.
Nous remercions également la société Petzl pour la mise à disposition de ses techniciens et de son centre V.axess ainsi que la fondation Petzl qui soutien ce projet.

7. Bibliographie

De nombreux articles et documents ont servi à appuyer les tests et leurs interprétations, certains sont listés ci-dessous mais nous n'avons sans doute pas toutes les sources, surtout sur ceux qui ont été réalisés à l'étranger.

- *Manuel technique de spéléologie.*G. Cazes, E. Cazot, N. Clément. Editeur : Fédération Française de Spéléologie - Ecole Française de Spéléologie, 2011 : 256 pages, ré-édité en 2013) ;
- *Techniques de Spéléologie Alpine (TSA)*, G. Marbach, B. Tourte, 3° édition, 2002, Spéléo Project : 384 pages) ;
- Fiches GET : http://ffspeleo.fr/groupe-d-etude-technique-29.html :
    - Les amarrages plafond, *Spelunca* 112, 2008 accessible en ligne :http://ffspeleo.fr/image/uploader/uploadify/article/pdf/63-fiche-ffs-amarrages-plafond.pdf ;
    - Les sangles, *Spelunca* 109, 2008 accessibles en ligne : http://ffspeleo.fr/image/uploader/uploadify/article/pdf/63-ffs-fiche-les-sangles.pdf;
    - Les longes, *Spelunca* 107, 2007 accessible en ligne : http://ffspeleo.fr/image/uploader/uploadify/article/pdf/63-ffs-fiche-les-longes.pdf ;
    - La dyneema, *Spelunca* 97, 2005 accessible en ligne :http://ffspeleo.fr/image/uploader/uploadify/article/pdf/63-ffs-fiche-dyneema.pdf.
- *La cordelette dyneema et son utilisation en spéléologie*, J. Arnaud, 2005, 28 pages, les cahiers de l'EFS N° 13 ;
- *Info EFS* : http://efs.ffspeleo.fr/documentation/infos-efs ;
- « Du nouveau dans les sacs de nœuds », G. Cazes, N. Clément, PB Laussac, *Spelunca* n°110, 2008.
- Articles de *Health and Safety Executive* :
- Industrial rope access - Investigation into items of personal protective equipment. Prepared by Lyon Equipment Limited for the Health and Safety Executive CONTRACT RESEARCH REPORT 364/2001
- Harness suspension: review and evaluation of existing information. Prepared by Paul Seddon for the Health and Safety Executive CONTRACT RESEARCH REPORT 451/2002.
- A review of criteria concerning design, selection,installation, use, maintenance and training aspects of temporarily-installed horizontal lifelines. Prepared by Safety Squared for the Health and Safety Executive 2004. RESEARCH REPORT 266
- Evidence based evaluation of the scale of disproportionate decisions on risk assessment and management Prepared by Greenstreet Berman Limited for the Health and Safety Executive 2008
- Karabiner Safety In The Arboriculture Industry. HSL/2003/18. Project Leader: J Statham. Science Group: Engineering Control Group. Crown copyright 2004
- Use of PPE against falls from a height with user weights over 100kg, Plasa rigging conference, 12-13 septembre 2011.
- Survivable Impact Forces on Human Body Constrained by Full Body Harness. HSL/2003/09, prepared by Harry Crawford for the Health and Safety Executive

EFFORTS ENGENDRÉS PAR LA PROGRESSION VERTICALE D'UN SPÉLÉOLOGUE

Par Gaël Monvoisin, PB Laussac

1. Contexte

Les cordes sont utilisées par les spéléologues depuis les années 60 et leur servent à sécuriser les passages dangereux, mais surtout à progresser dans les zones verticales des cavités. Le matériel et les techniques d'équipement évoluent en permanence : qualité, résistance, élasticité des cordes et sécurisation de leur installation. La notion d'amarrage irréprochable est toujours utilisée, mais quelles sont les forces subies lorsqu'un spéléologue progresse dessus ? Le Spéléo-Secours Français avait déjà réalisé des tests sur les efforts appliqués sur les cordes lors de secours mais nous cherchons maintenant à mesurer les valeurs lors d'une progression classique, sur la corde elle-même.

2. Protocole

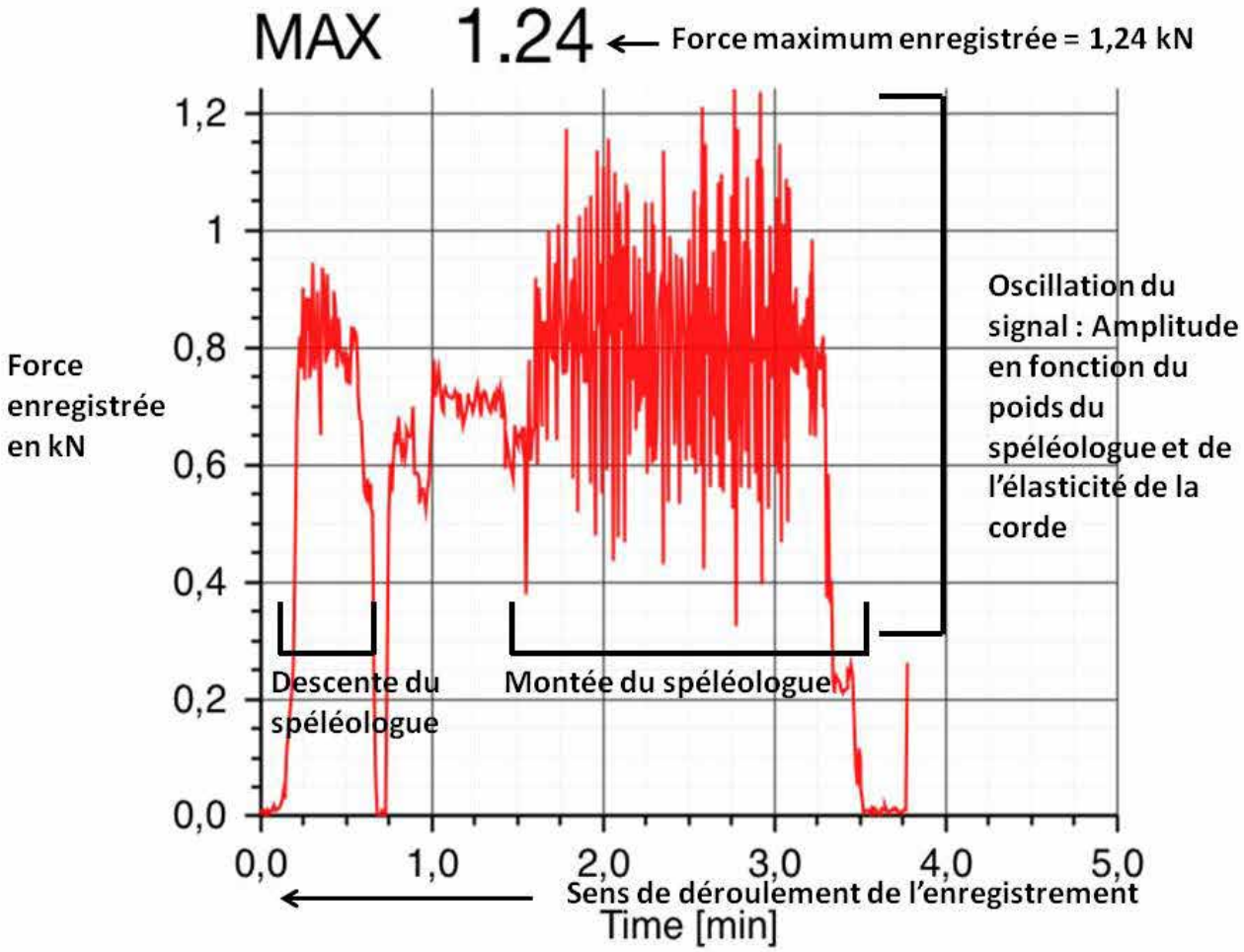
L'objectif des tests est de mesurer la charge appliquée à l'amarrage lors de la progression de spéléologues en phase de montée ou de descente sur une longueur de corde de 20 m. Le choix de la longueur de la corde (20 m) est intéressant pour voir ce qu'il se passe près du sol lorsque l'effet de l'élasticité est plus grande, au milieu de la corde et proche de l'amarrage où les efforts sur l'amarrage sont supposés maximum.

Nous avons testé, sur des cycles de montée-descente d'un spéléologue, différentes façons de progresser, en ne faisant varier qu'un paramètre à la fois :
- trois personnes de gabarits différents ;
- montée lente et fluide ou montée rapide et saccadée ;
- descente fluide ou descente saccadée avec à-coups ;
- progression sur une corde de diamètre 9 mm ou de 8 mm.

Pour ces tests, l'enregistrement en continu des 20 m de remontée suivis de la descente nous a contraints à utiliser le mode de lecture lent des dynamomètres (voir explications dans l'introduction). Lorsque la montée enregistre une force supérieure au maximum de la descente, la valeur maximale de la descente est surveillée à l'œil pendant l'enregistrement et notée sur le carnet de suivi. Les données étant reproductibles, les valeurs ne variant que de quelques daN pour chaque personne, nous n'avons reproduit ces tests que 2 fois par testeur pour chaque type de corde (8 et 9 mm).

Photo 1 : Atelier du test d'une hauteur de 20 m. (Photo G. Cazes)

Nous avons détaillé dans l'introduction le mode de lecture des graphiques enregistrés en mode lent. Pour rappel, l'enregistrement d'un signal de montée-descente d'un spéléologue dure environ 5 minutes et se fait en continu (la lecture se fait de la droite vers la gauche).



Graphique 1 : Explication d'un graphique d'enregistrement d'une phase longue montée/descente

3. Résultats

Les tests ont été réalisés de la manière suivante :
Tableau 1. Nombre de passages en montée/descente sur de la 8 et de la 9.

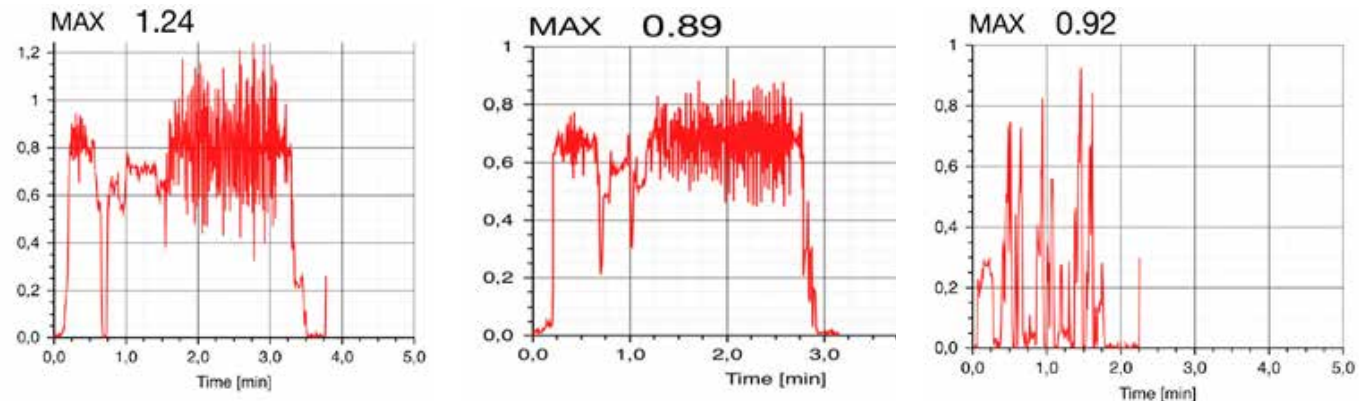
Testeur	Corde de 9mm		Corde de 8mm	
	Montée/descente Fluide	Montée/descente saccadée-brutale	Montée/descente Fluide	Montée/descente saccadée-brutale
Testeur 1 (81kg)	2 passages (Graphique 2)	2 passages (Graphique 3)	2 passages (Graphique 4)	2 passages (Graphique 5)
Testeur 2 (65kg)	2 passages	2 passages	2 passages	2 passages
Testeur 1 (72kg)	2 passages	2 passages		

Le testeur 3 n'était pas disponible le jour des tests sur la corde de 8 mm, il n'y a pas eu d'essais avec lui.

Tableau 2. Différentes configurations de montée et descente sur la corde de 20 m.

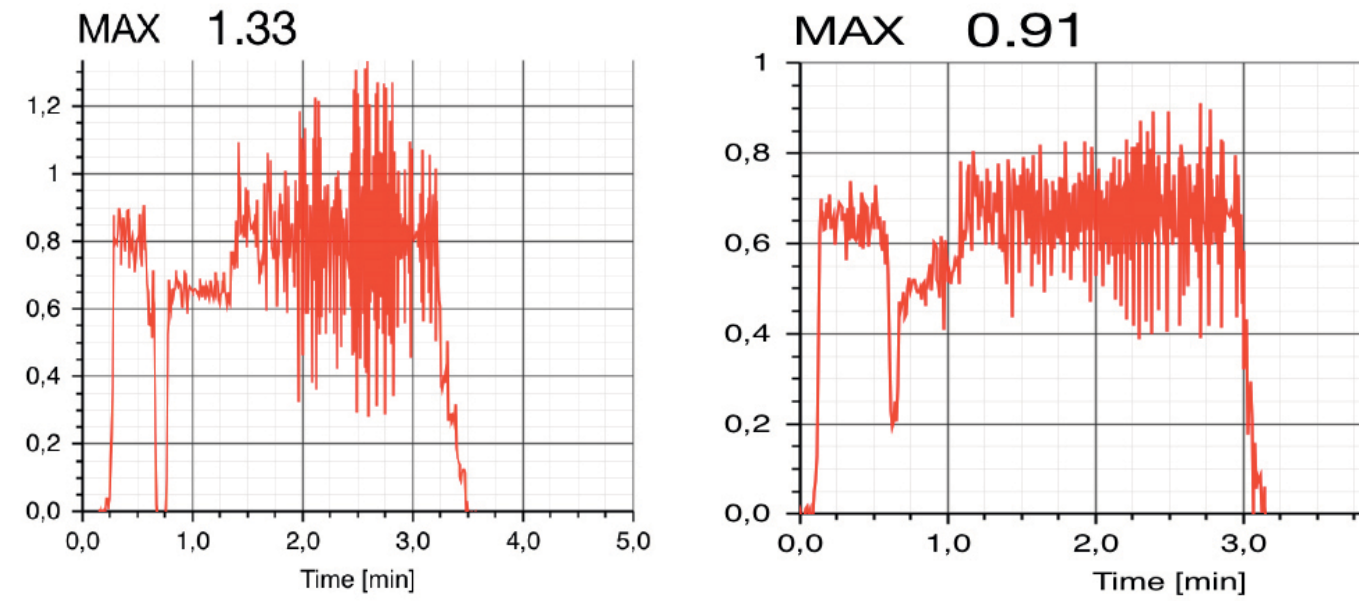
Testeur	Résultat Montée (daN)	Moyenne Montée (daN)	Résultat Descente (daN)	Moyenne Descente (daN)
Montée / Descente «fluide» : Corde de 9 mm				
1 (81 kg)	124	129	95	96
	133		96	
2 (65kg)	89	90	78	78
	90		78	
3 (74 kg)	135	122	92	92
	108		92	
Montée / Descente «brutale» : Corde de 9 mm				
1 (81 kg)	178	187	249	262
	195		275	
2 (65kg)	126	131	220	223
	135		225	
3 (74 kg)	149	158	238	245
	167		252	
Montée / Descente «fluide» : Corde de 8 mm				
1 (81 kg)	133	138	91	93
	142		94	
2 (65kg)	93	92	85	80
	91		74	
Montée / Descente « brutale » : Corde de 8 mm				
1 (81 kg)	180	185	255	254
	189		252	
2 (65kg)	126	131	201	213
	136		225	

Une montée fluide est une montée où la progression se fait de manière lente et sans à-coups. Une montée brutale représente une montée sur corde d'un spéléologue débutant ou d'un spéléologue fatigué, de retour d'une longue exploration, qui se rassoit avec force dans son baudrier à chaque brassée. Les à-coups ont été volontairement exagérés pour simuler les efforts qu'engendrerait un tel comportement.
Pour une descente fluide, le spéléologue progresse de manière continue et régulière, alors que pour la descente brutale, il prend de l'élan et bloque la corde au bout de quelques mètres, pour simuler la progression sur une corde usée et mouillée où la descente se fait par à-coups. De la même manière, le spéléologue a exagéré les efforts pour enregistrer une charge maximum pour son poids.



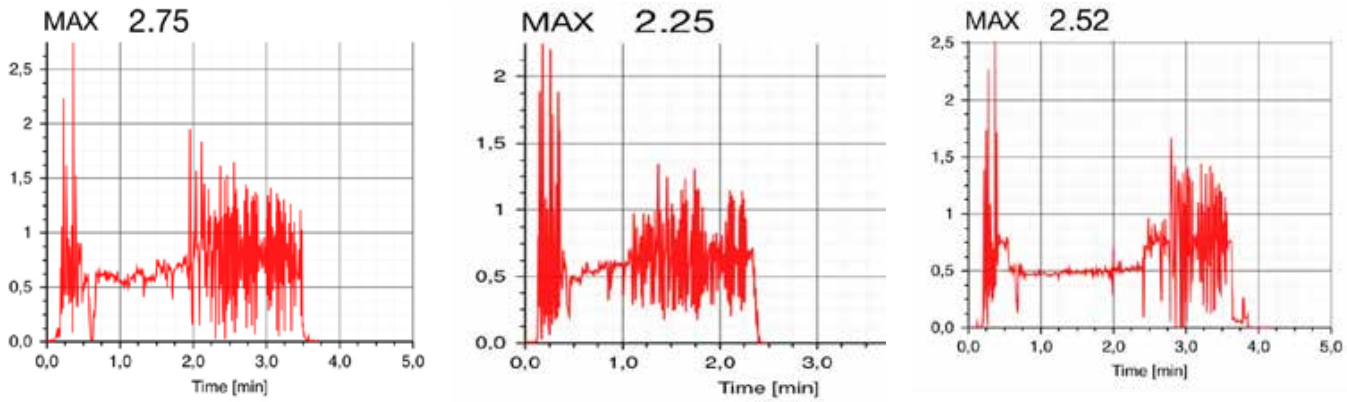
Graphique 2 : Montée/descente fluide sur corde de 9mm - testeurs 1, 2 et 3.

Les testeurs montent et descendent de manière fluide sur une corde de diamètre 9 mm et les capteurs enregistrent des charges maximales de 124 daN, 89 daN et 135 daN respectivement pour les testeurs 1, 2 et 3. L'effort maximum est enregistré à la montée et sur le premier tiers de la montée. L'effort a tendance à diminuer au cours de la montée. L'amplitude maximale engendrée par l'élasticité de la corde est respectivement de 100 daN pour le testeur 1, 40 daN pour le testeur 2 et 100 daN pour le testeur 3.
Lors de la descente, les charges maximales enregistrées sont respectivement de 95 daN, 78 daN et 92 daN pour les testeurs 1, 2 et 3. Elles semblent plus importantes vers le bas de la descente.



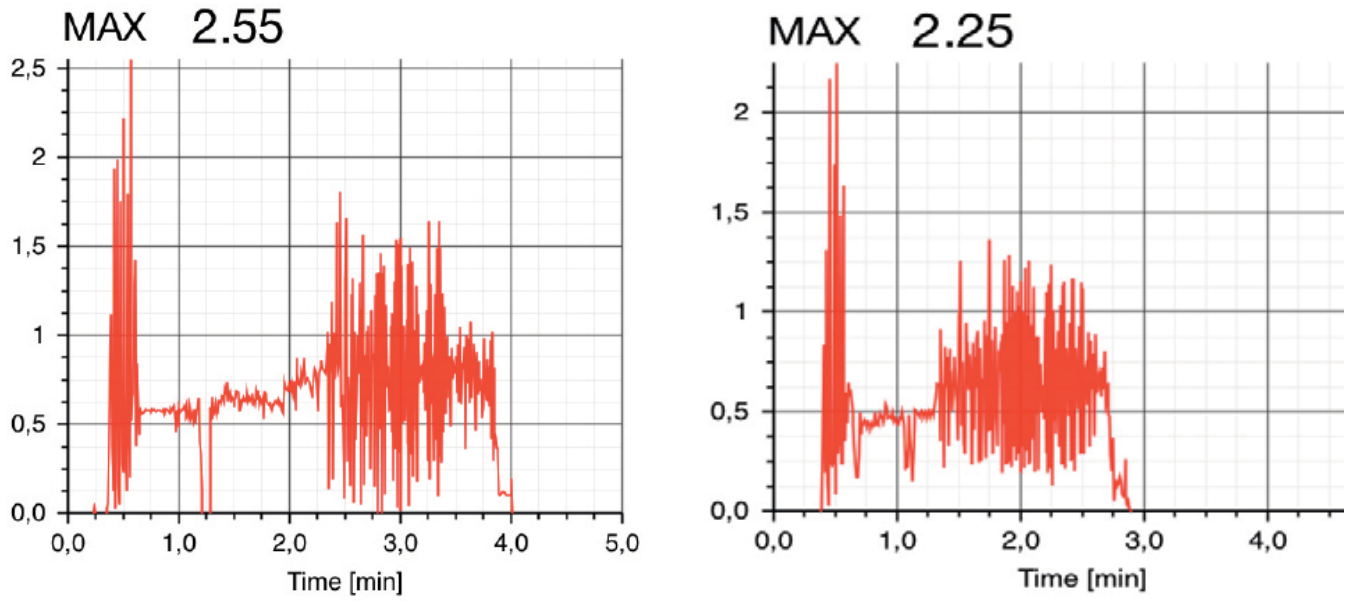
Graphique 3 : Montée/descente fluide sur corde de 8mm , testeurs 1 et 2.

Le même test reproduit sur une corde de diamètre 8 mm, donne une charge maximale de 133 daN pour le testeur 1 avec un effort maximum entre le premier tiers de la montée et le milieu de la corde et de 91 daN pour le testeur 2, plutôt vers le premier tiers de la montée. L'amplitude maximale enregistrée est de 120 daN pour le testeur 1 et de 50 daN pour le testeur 2.
Lors de la descente, les charges maximales sont respectivement de 91 daN et 74 daN pour les testeurs 1 et 2.



Graphique 4 : Montée/descente brutale/saccadée sur corde de 9 mm - testeurs 1, 2 et 3.

La montée brutale modifie un peu l'allure des courbes, les efforts maximum enregistrés le sont plutôt vers la fin de la montée, en s'approchant de l'amarrage, avec des pics respectifs de 195, daN, 135 daN et 167 daN pour les testeurs 1, 2 et 3 (soit environ deux fois leur masse).
L'amplitude augmente également avec des valeurs de 200 daN, 100 daN et 170 daN. Les valeurs maximales enregistrées le sont à la descente, avec des valeurs de 275 daN, 225 daN et 252 daN.



Graphique 5 : Montée/descente brutale/saccadée sur corde de 8mm, testeurs 1 et 2.

Sur de la corde de diamètre 8 mm, les charges maximales appliquées sur l'amarrage pour les testeurs 1 et 2 sont respectivement de 180 daN et 136 daN à la montée, avec une amplitude de 180 daN et 100 daN. Les efforts semblent maximum tout au long de la montée pour le testeur 1 et plutôt vers le milieu de la montée pour le testeur 2.
La descente enregistre ici encore des valeurs maximales. Elles sont de 255 daN pour le testeur 1 et de 225 daN pour le testeur 2.

4. Interprétations

4.1. Progression fluide.

4.1.1-Résultats montée/descente fluide sur corde de 9 mm :

Effort maximum à la montée = 133 daN. Valeur moyenne = 80daN . Effort maximum à la descente = 96 daN. Amplitude maximale à la montée de 30 à 133 daN soit 100 daN pour 81 kg

4.1.2-Résultats montée/descente fluide sur corde de 8 mm :

Effort maximum à la montée = 142 daN. Valeur moyenne = 80 daN. Effort maximum à la montée = 94 daN. Amplitude maximale à la montée de 20 à 142 daN soit 120 daN pour 81 kg

Les graphiques 2 et 3 montrent que les tests de montée/descente fluide sur corde de 9 mm ou de 8 mm sont comparables. L'effort maximum correspond à la phase d'appui en fin de rebond en raison de l'effet de l'élasticité sur la corde. Il est d'environ deux fois la masse du spéléologue.

Sur une montée fluide, l'amplitude maximale a plutôt lieu au début de la montée, en bas de la corde. Ce résultat est un peu différent de ce à quoi nous nous attendions. En effet, les efforts sont maximum là où l'effet de l'élasticité est la plus importante, soit au bas de la corde. L'élasticité de la corde joue un rôle et la charge enregistrée est donc légèrement supérieure pour de la corde de diamètre 8 mm. Le nombre de signaux est d'environ 50, correspondant sans doute au nombre de brassées pour monter en haut de la corde (voir graphique 6). Le signal s'atténue en arrivant proche de l'amarrage, l'effet de l'élasticité diminue. La valeur moyenne de la charge est constante et équivalente à la masse du spéléologue.

Comme pour la montée, les efforts sur de la 8 ou de la 9 à la descente sont également comparables. Les résultats à la descente ont une valeur environ égale à la masse du spéléologue et avec une très faible amplitude, 20 daN.

EFFORTS ENGENDRÉS PAR LA CHUTE D'UN SPÉLÉOLOGUE SUR SA PETITE LONGE

Par Gaël Monvoisin, PB Laussac

1-Contexte

Des tests sur les longes ont été réalisés en 2006 par le GET (http://efs.ffspeleo.fr/groupe-detude-technique-get/42-longes/download).

Lors de ces précédents tests, le but était de mesurer les efforts enregistrés sur les longes en fonction de leur type (longes cousues, semi-cousues ou cordes avec des nœuds), de leur diamètre (de 8 à 11mm) ou longueur (30 à 60 cm), de la hauteur de chute (facteur 1 ou 2) et des nœuds les reliant aux mousquetons (demi-pêcheur, huit, queue de vache).

Tous ces précédents tests ont été réalisés avec des mannequins. L'EFS voulait, 7 ans après, reconduire et reproduire des tests de choc avec de vrais spéléologues (et non des gueuses), pour voir ce qu'il se passe avec un homme dans son harnais et non avec une masse rigide.

2-Protocole de test

Ce test correspond à la situation rencontrée lorsqu'un spéléologue remonte un puits, arrive à un amarrage, se longe sur l'amarrage, retire ses bloqueurs de la corde, se met en opposition au-dessus du puits et chute ou glisse alors qu'il est à la hauteur de l'amarrage (facteur 1 sur la longe). Un dynamomètre enregistre la charge appliquée sur le connecteur par la chute du spéléologue sur sa petite longe.

L'amarrage est en Y, le connecteur utilisé est un mousqueton delta pour s'affranchir de la mauvaise position éventuelle du mousqueton et le Y est confectionné avec deux sangles en dyneema pour s'affranchir du facteur d'absorption du choc par la corde et les nœuds. Le nœud au niveau de l'amarrage est un nœud de chaise double. Les longes des 3 testeurs avaient toutes moins de 6 mois et étaient en bon état.

Le testeur se longe au niveau de l'amarrage avec sa longe courte, le Croll au niveau du dynamomètre pour se placer en situation de facteur 1, en opposition sur le dièdre (photo 1) et se laisse tomber dans le vide. Chaque testeur répète les essais 3 fois.

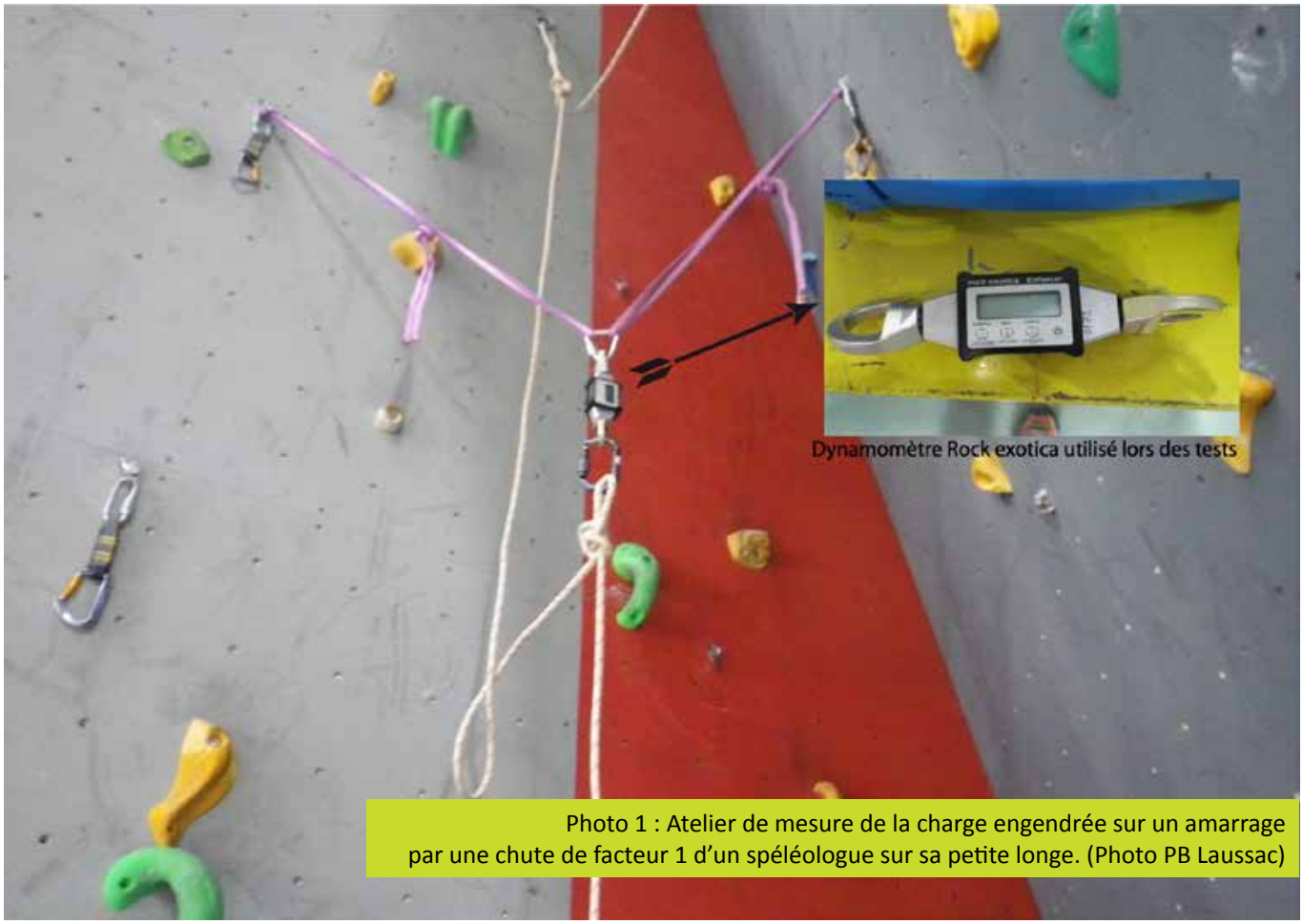


Photo 1 : Atelier de mesure de la charge engendrée sur un amarrage par une chute de facteur 1 d'un spéléologue sur sa petite longe. (Photo PB Laussac)

Graphique 1 : Enregistrement d'une chute d'un testeur, la lecture se fait de la gauche vers la droite, 1 kN = 100 daN.

3-Résultats

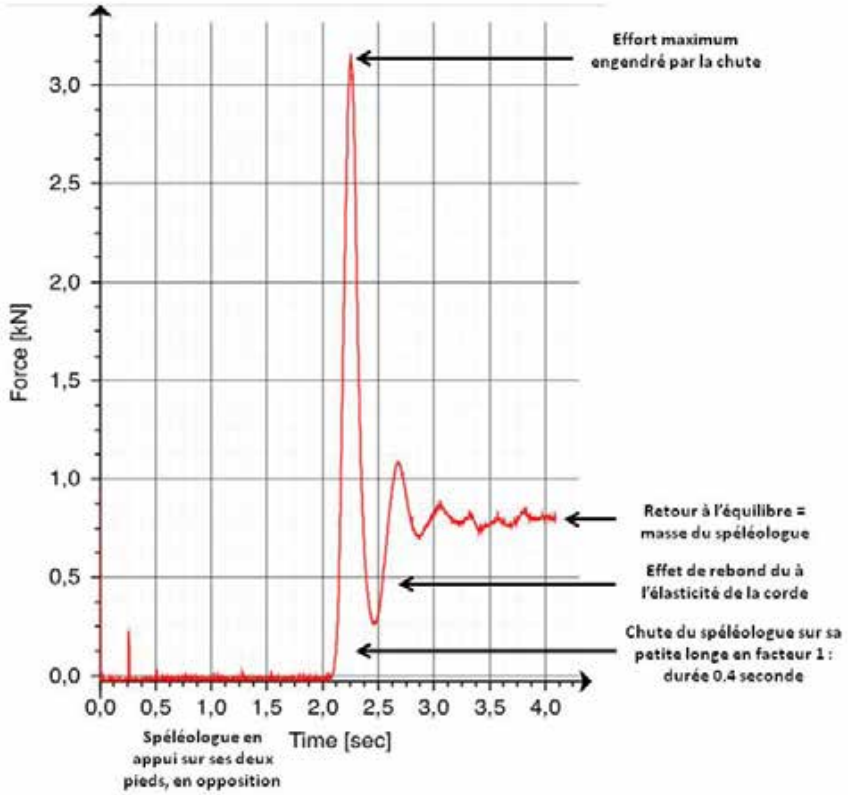
Les résultats de ce test sont présentés ci-dessous.

Le graphique 1 présenté ici montre 3 phases dans l'enregistrement :

- Une phase de décélération après la chute où la force maximale enregistrée correspond au choc sur l'amarrage ;

- Une phase de rebond dû à l'élasticité de la corde où le spéléologue est « plus léger » que sa masse propre ;

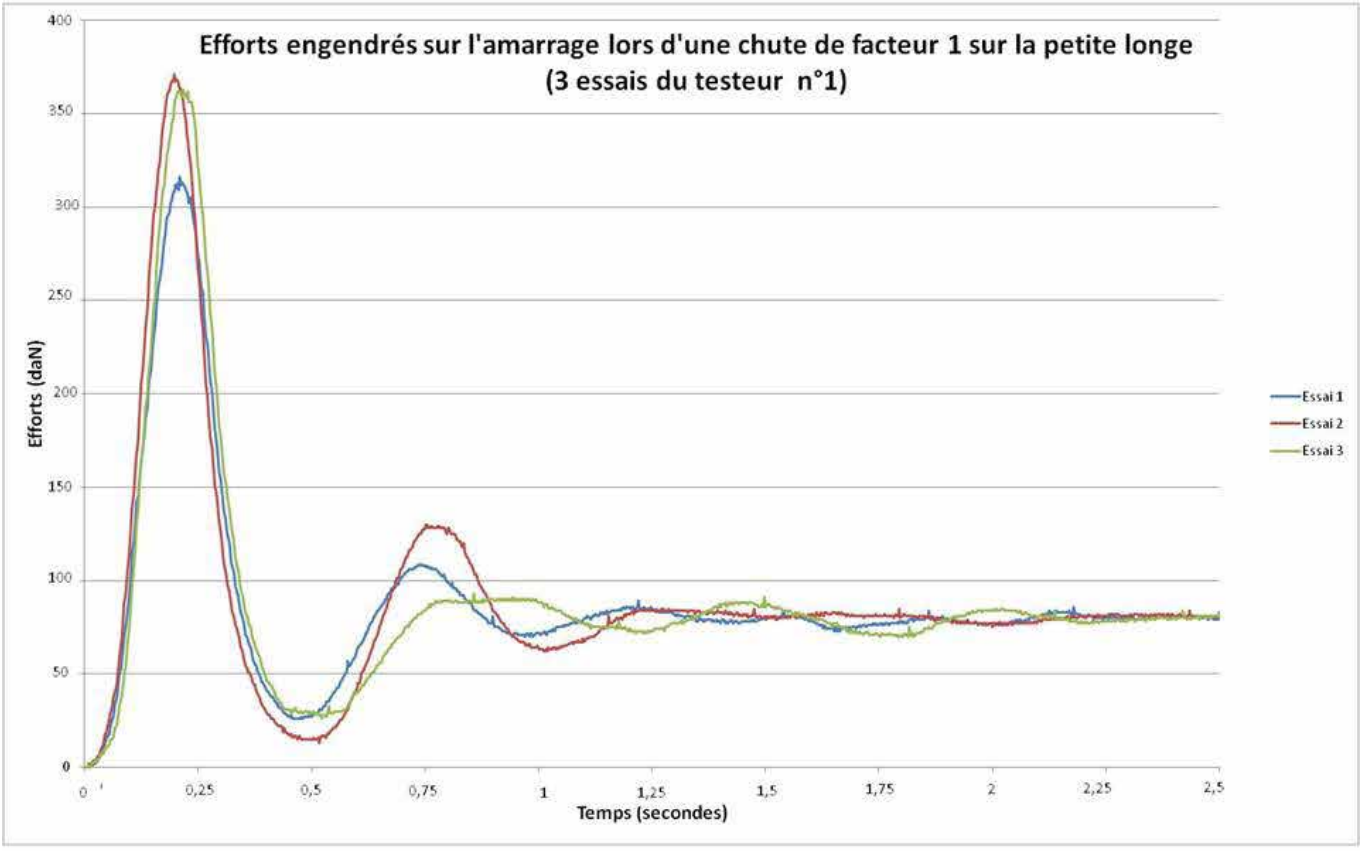
- Une phase de retour à l'équilibre où la valeur enregistrée correspond à la masse du spéléologue.



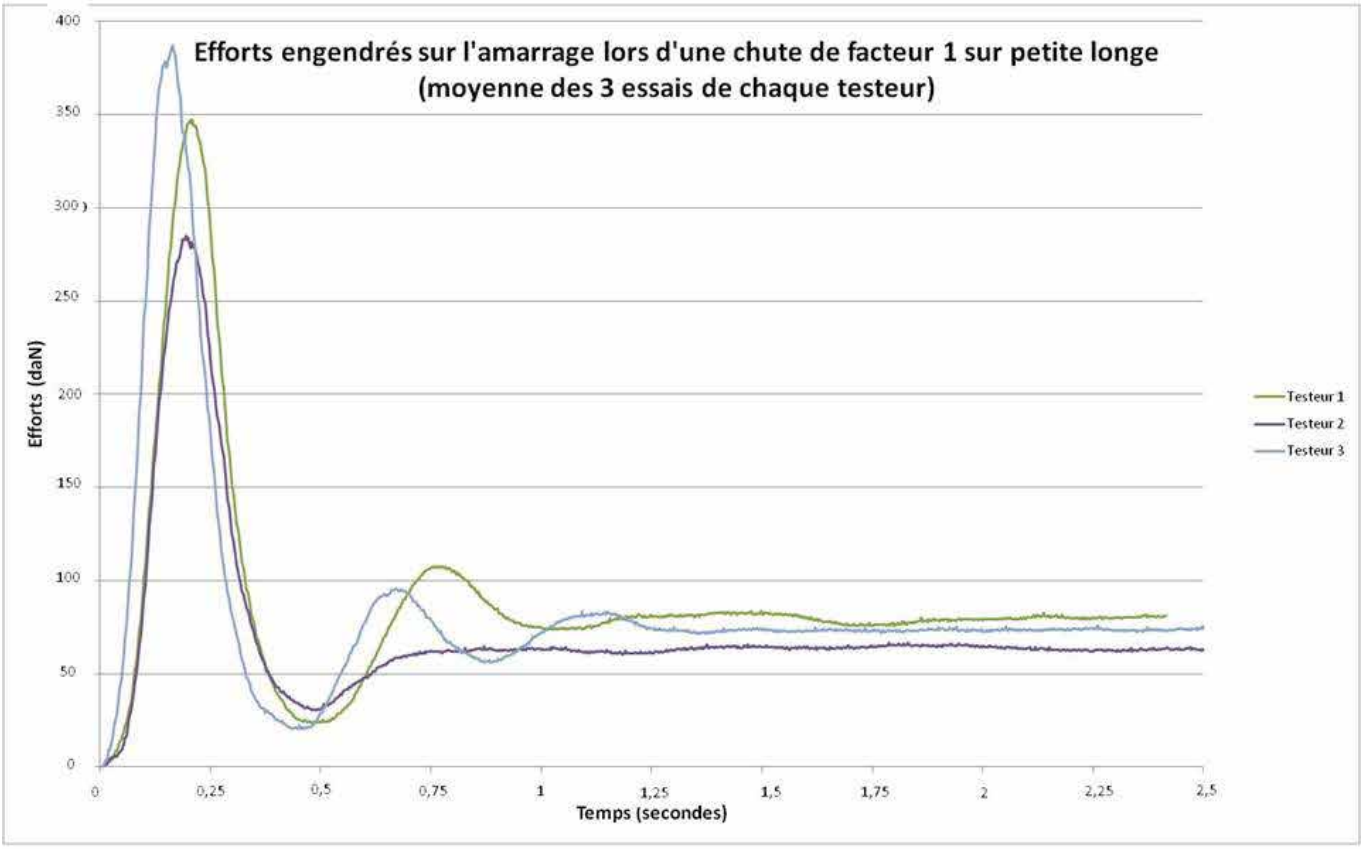
Testeur	Essai	Résultats en daN	Hauteur de chute
1 (masse 81 kg)	1	320	Longe courte Chute en facteur 1
	2	360	
	3	370	
2 (masse 65 kg)	1	260	
	2	300	
	3	310	
3 (masse 74 kg)	1	350	
	2	380	
	3	390	

Tableau 1 : Valeurs maximales enregistrées lors des chutes des 3 testeurs sur leurs longes.

On peut noter l'augmentation des forces sur les 3 tests pour chaque testeur. (Sur le testeur 1, les résultats du tableau ne correspondent pas au graphique ci-dessous ; interversion essai 2 et 3)



Graphique 2 : Enregistrement des données rapides de la chute pour les 3 essais du premier testeur



Graphique 3 : Enregistrement des données rapides de la chute moyennées pour les 3 essais de chaque testeur

On voit ici que la masse du testeur n'est pas le seul paramètre intervenant dans la force du choc même s'il semble prépondérant (testeur 1 = 81 kg, testeur 2 = 65 kg et testeur 3 = 74 kg).

4-Analyse

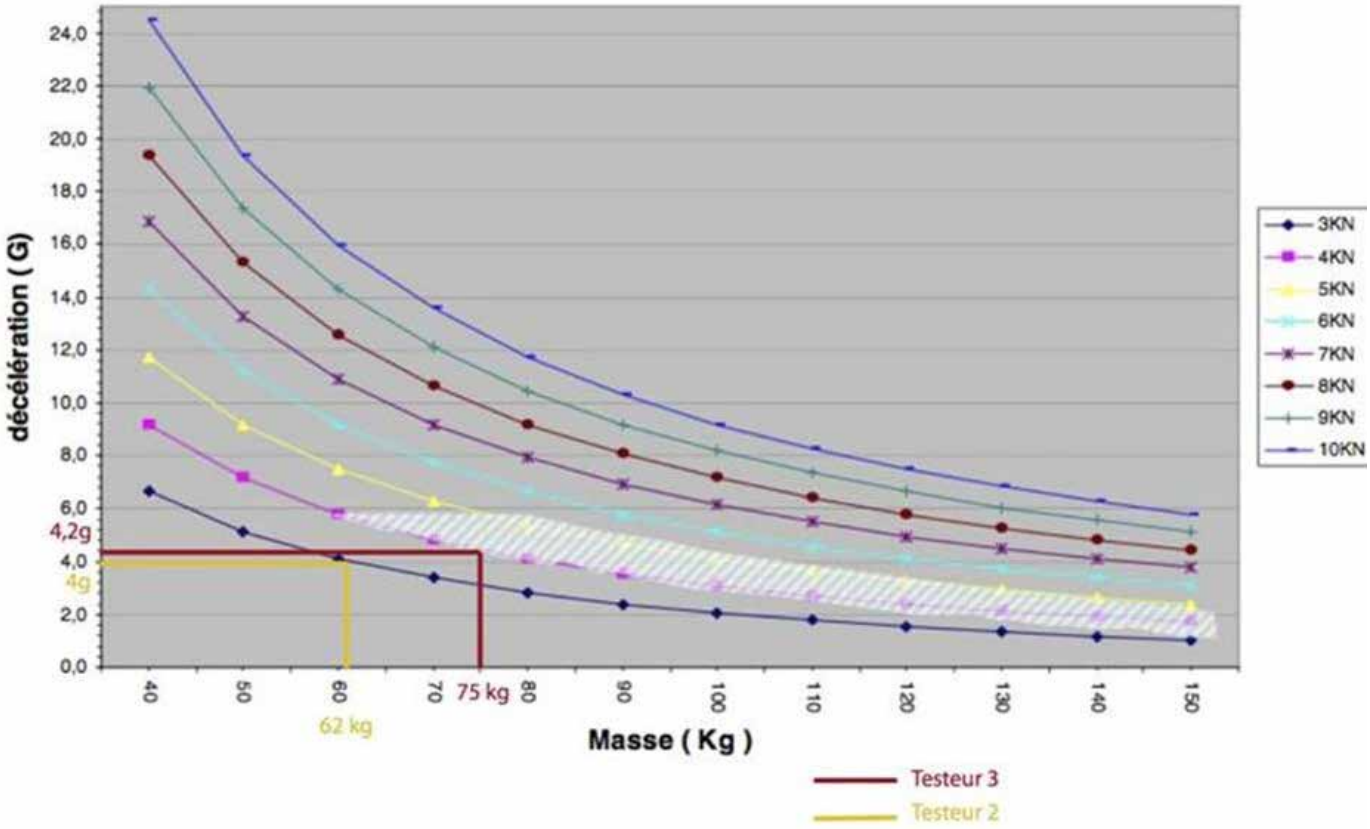
L'augmentation des valeurs enregistrées au cours des 3 essais de chaque testeur peut être due en partie au serrage des nœuds (de l'amarrage et des longes). En se serrant, les nœuds sont moins efficaces pour l'absorption des efforts ce qui a pour effet d'augmenter la « force-choc ». Cette augmentation peut aussi être due à un biais par la prise de confiance des testeurs qui n'ont plus peur de se laisser tomber.

Le passage du pic d'effort se fait en moins de 0,4 secondes et atteint une force de 4 à 5 fois la masse du spéléologue (maximum 370 daN pour le testeur 1 (81 kg), 310 daN pour le testeur 2 (65 kg) et 390 daN pour le testeur 3 (74 kg)). La masse n'est peut-être pas le seul facteur intervenant mais il semble prépondérant.
L'effet rebond dure 0.5 secondes, probablement dû aux caractéristiques de la longe. Le spéléologue rebondit avant de revenir à une position d'équilibre (qui correspond à son poids) en une seconde environ, durant cette phase la masse du spéléologue augmente par 20 à 30 kg, avant de revenir à l'équilibre - soit environ un tiers de sa masse.

A la question « qu'avez-vous ressenti ?», les testeurs disent n'avoir strictement rien ressenti au niveau du dos ou des lombaires. La longe, le nœud de la longe, la déflexion et le mouvement du corps dans le harnais encaissent la majeure partie du choc. Le serrage des nœuds intervient également dans la limitation du choc.

D'un point de vue purement physique, une chute de facteur 1 sur une petite longe semble tout à fait acceptable. La décélération théorique est en deçà du seuil d'occurrence lésionnel de 600 daN (ou 6 g pour une masse de 100 kg) puisque nous avons des valeurs qui varient entre 4 g pour le testeur 2 et 4,2 g pour le testeur 3 (qui sont respectivement le plus léger et le plus lourd) (Cf. graphique 4) (et testeur 1 ?). Ces valeurs seront testées lors d'une prochaine séquence de tests avec des accéléromètres pour le confirmer (préciser peut-être l'apport de l'accéléromètre par rapport au dynamomètre étant donné que l'on ne mesure pas la même chose)

Les tests ont été réalisés avec des longes en bon état. Nous essayerons de tester les valeurs avec de vieilles longes (supérieures à 1 an et/ou forte utilisation) pour en comparer les comportements.



Graphique 4 : Relation entre la masse du spéléo, la force-choc exercée sur lui et sa décélération en g. (graphique fourni par Petzl)

5-Conclusion

Nous pouvons donc dire, en conclusion, qu'une chute de facteur 1, sur une longe en bon état, en plein vide ne met pas en danger la sécurité du spéléologue.

Avec un maximum de force-choc à 390 daN, nous sommes encore largement sous les seuils de résistance des matériels. Ces tests ont permis de rajouter de la plus-value par rapport à la campagne de 2006. En effet, faire des tests avec de vraies personnes montrent que les forces-choc sont bien en dessous des valeurs données par la gueuse. Par exemple, le testeur 1 de masse de 81 kg atteint une force-choc moyenne de 350 daN, alors que pour une gueuse de même masse (80kg), la Force-choc moyenne obtenue lors des tests de 2007 (cf. *Spelunca* n°107) atteint 576 daN.

On observe une baisse de la force-choc de plus de 40% avec des vrais testeurs humain. Ce n'est pas rien… Le corps est « mou » et absorbe une partie du choc. Attention, toutefois, à l'environnement dans un tel cas, le spéléologue risque surtout de se faire mal contre la paroi.

En cas de chocs répétés, il est important de changer ses longes rapidement. L'usure et le vieillissement des cordes en diminuent leur résistance et leur élasticité.

Nous rappelons qu'il est recommandé de changer ses longes au moins une fois par an, en fonction de leur utilisation et d'en surveiller l'état après chaque sortie.

Par Gaël Monvoisin, PB Laussac

EFFORTS ENGENDRÉS PAR LA CHUTE D'UN SPÉLÉOLOGUE SUR SON CROLL LORS D'UNE ESCALADE FACILE SUR PAN INCLINÉ

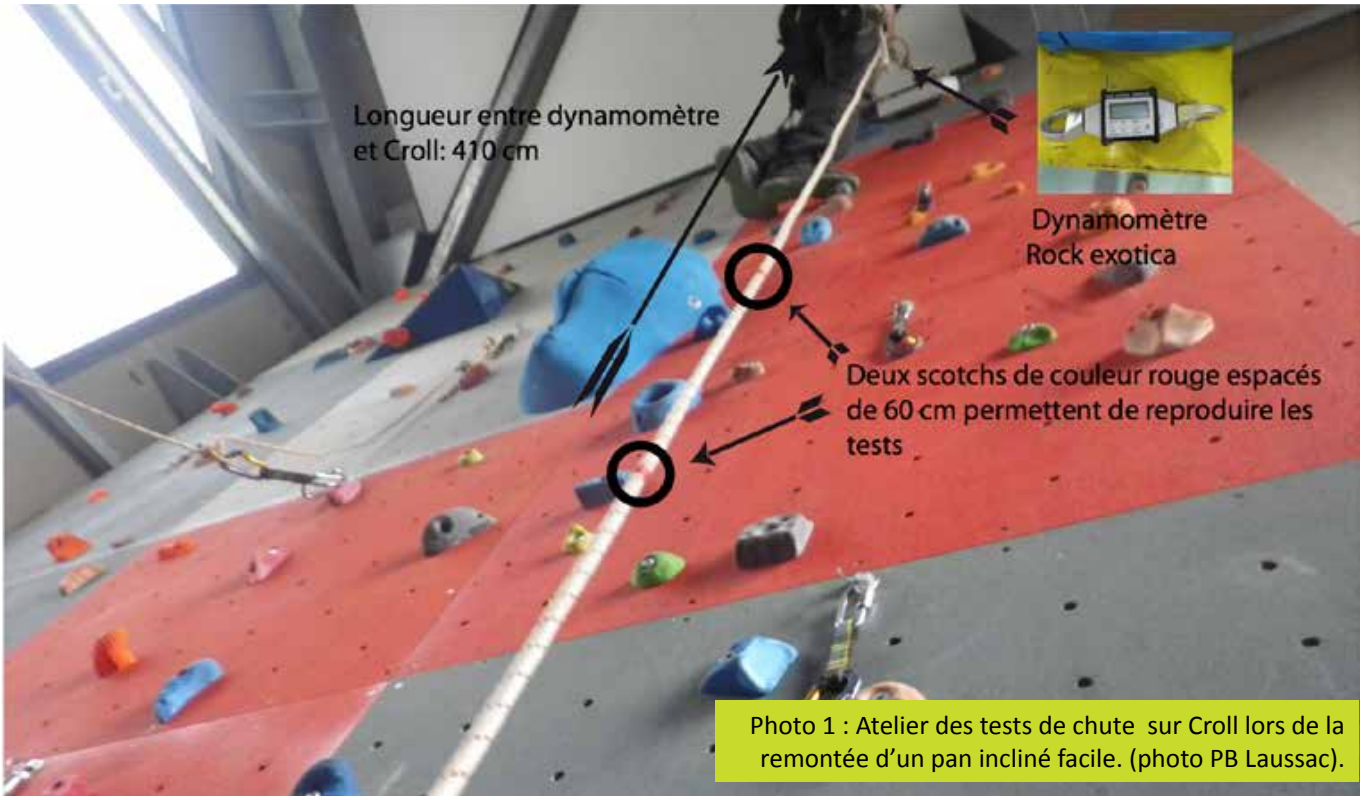


Photo 1 : Atelier des tests de chute sur Croll lors de la remontée d'un pan incliné facile. (photo PB Laussac).

1-Contexte

La question est souvent posée de savoir si le bloqueur de poitrine appelé croll (produit Petzl) par facilité, modèle utilisé par tous les testeurs, est un élément de sécurité et si l'on peut se retrouver en tension uniquement sur son croll. Nous nous sommes donc posés la question de savoir comment se comporterait un croll lors d'une chute uniquement sur celui-ci.

2-Protocole de tests

Un spéléologue entame une remontée le long d'un pan incliné. L'escalade est facile et il ne met que son croll sur la corde pour s'assurer. En montant, la corde ne coulisse pas dans le croll et du mou s'installe. Le spéléologue glisse ou chute à ce moment-là. Nous mesurons la charge appliquée à l'amarrage lors de la chute du spéléo retenu par son croll (60 cm de mou en amont du croll, à 4,10 m de l'amarrage).

Pour ce test, compte-tenu du choc potentiellement à risque pour le spéléologue, les essais ont été effectués avec un harnais de travaux sur cordes (Petzl Falcon Ascent), pour le confort et la sécurité des testeurs. Les prises d'escalade ont été retirées de la zone de chute, afin de réduire le risque de blessures sur le pan incliné et des tapis de sécurité ont été mis en place sous les testeurs.

Données métriques :

Longueur de la corde entre le Croll (scotch rouge le plus bas) et le nœud d'amarrage : 410 cm
Longueur entre les deux scotchs = hauteur de chute = 60 cm. Soit un facteur de chute de 0,14.

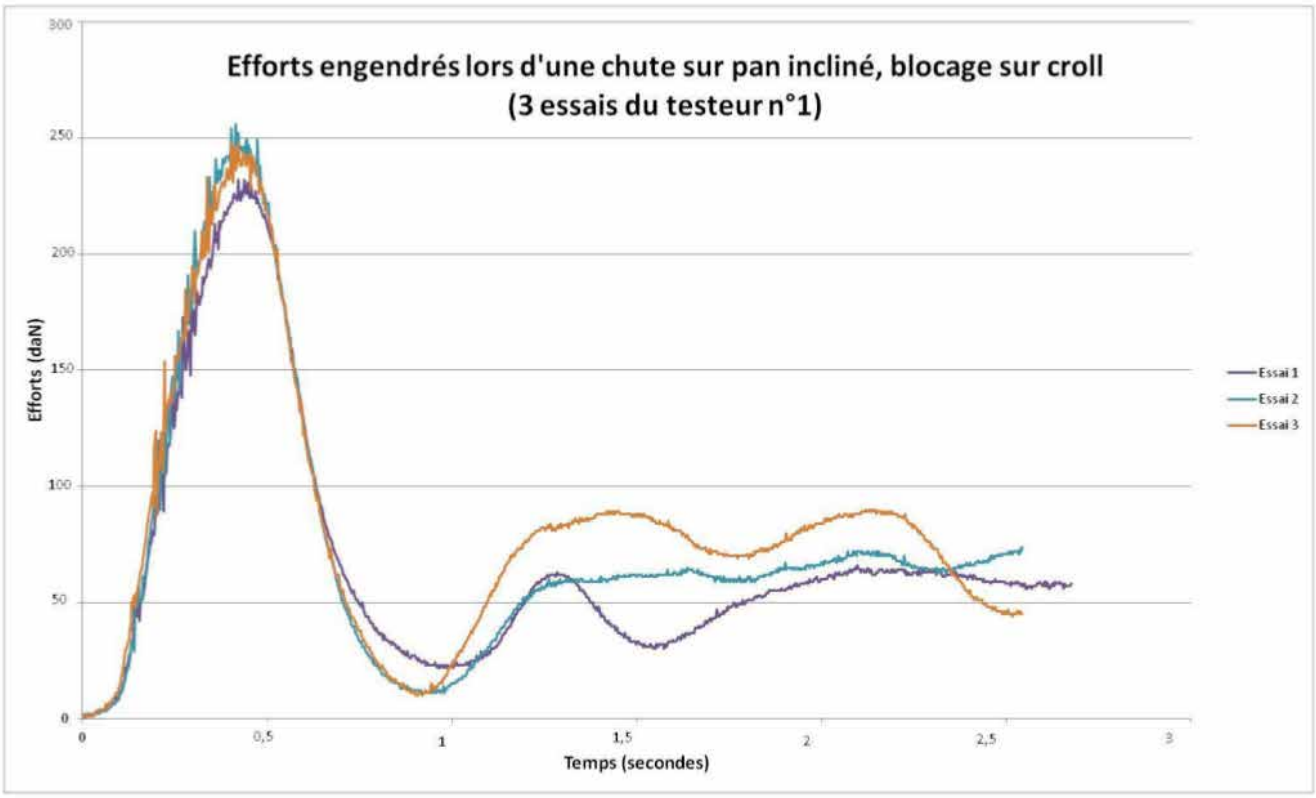
Photo 2 : Juste avant la chute du spéléo. La longueur de corde entre les deux scotchs est de 60 cm. (photo PB Laussac).

3-Résultats

Testeur	Essai	Résultats (en daN)	Hauteur de chute
1 (81 kg)	1	230	Remontée d'un ressaut en escalade auto assurance sur le croll qui coulisse mal, boucle de 0,6 m, chute à 4,10 m de l'amarrage.
	2	250	
	3	250	
2 (65 kg)	1	180	
	2	215	
	3	205	
3 (74 kg)	1	210	
	2	230	
	3	245	

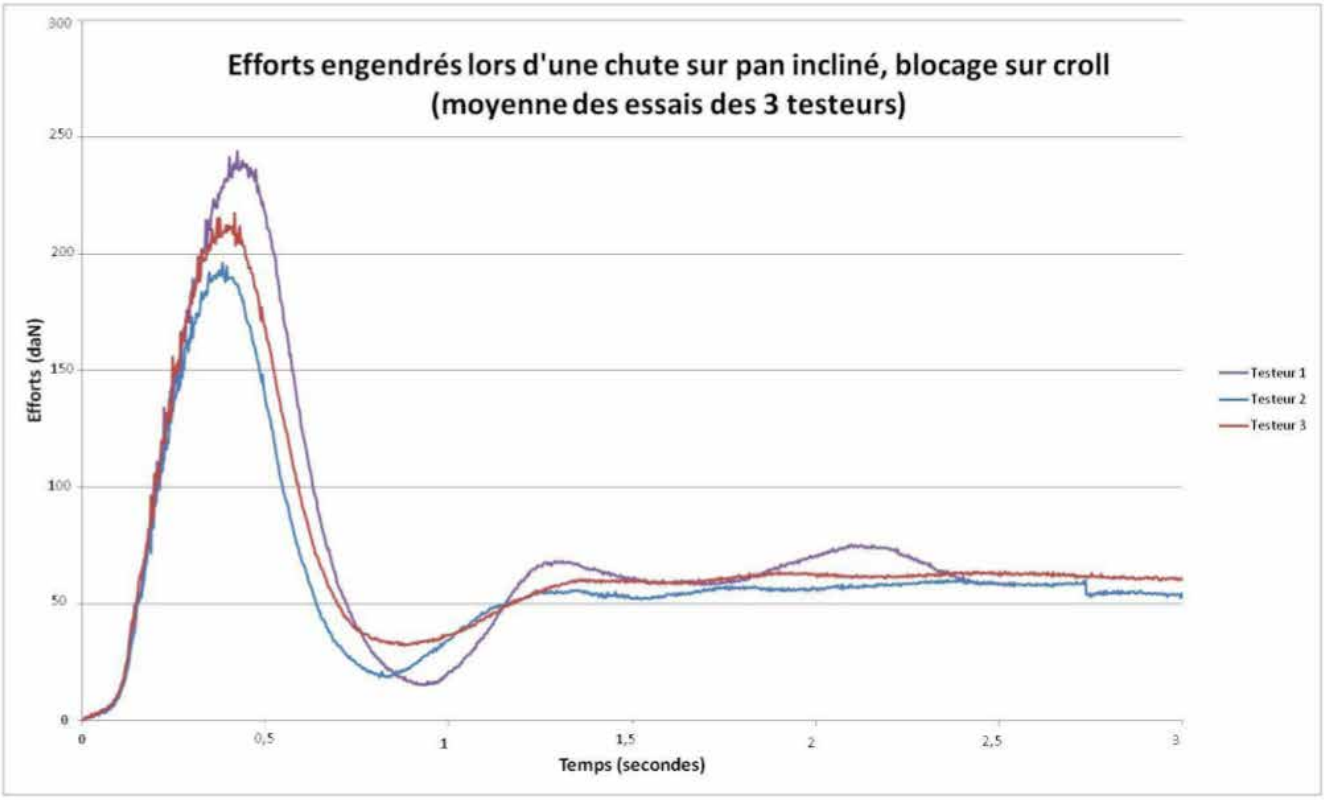
Tableau 1 : Résumé des tests de chute sur plan incliné.

Les efforts engendrés ici sont faibles, comparés à tous les autres tests, 250 daN au maximum, un peu plus de 3 fois la masse du spéléologue. En effet, il y a 4,10 mètres au dessus du spéléologue qui ne fait une chute que de 60 centimètres, soit un facteur de chute très faible de 0,14. Quoiqu'impressionnante, la chute n'est pas si dure. Lors du tournage des vidéos, l'un des testeurs s'est jeté 6 fois d'affilée sur son croll, sans ressentir aucune douleur.



Les trois essais sont similaires et reproductibles.
L'amortissement est très rapide.

Graphique 1 : 3 essais des chutes du testeur 1.



Les 3 essais des 3 testeurs sont ici moyennés et bien qu'ayant la même forme et étant superposables, il est clair que le facteur masse est prépondérant.

Graphique 2 : Moyenne des 3 essais de chaque testeur.

4-Analyse

Les 3 courbes du testeur 1 (graphique 1) présentent des valeurs très basses, malgré la masse du testeur (81 kg), le facteur de chute n'est pas important (0,14) et l'effort engendré par la chute du spéléologue sur son croll est faible, environ 3 fois la masse du testeur. Nous restons bien loin des valeurs de rupture des cordes données par le constructeur et du seuil d'occurrence lésionnel acceptable.

Lorsque l'on regarde le graphique 2 des valeurs moyennées pour chaque testeur (244 daN pour le testeur 1, 196 daN pour le testeur 2 et 217 daN pour le testeur 3), il apparaît que la masse est le facteur le plus important.
La corde a subit tous les essais avec les mêmes repères et les mêmes points de choc et c'est seulement à la neuvième chute que nous avons commencé à abîmer la gaine de la corde.

5-Conclusion

Si le fait qu'une chute ne porte pas, d'après nos tests, à de graves conséquences en cas de non suivi du croll (dans la limite du mou du test), il n'en reste pas moins que la vigilance doit rester de rigueur lorsque l'on monte sur un pan incliné assuré uniquement avec son croll. La chute n'est *a priori* pas dangereuse d'après ces tests, mais il convient de ne pas oublier le facteur environnement, ici non plus, qui peut blesser le spéléologue lors de sa chute (les genoux ou le visage peuvent cogner contre le rocher en cas de glissade). Bien entendu, ces essais ont été réalisés à partir de près de 4 m du point de l'amarrage. Il est possible qu'une chute puisse avoir lieu plus près de l'amarrage, avec des résultats différents. Il reste impératif de s'assurer que la corde coulisse correctement dans le croll pendant toute la remontée du spéléologue.

Le bon suivi peut se faire par la tenue de corde par un collègue, ou par la confection d'une poupée de corde afin de mettre du poids. Evidemment, ces précautions sont aussi valables lors de l'utilisation du bloqueur de poing comme moyen unique d'assurance (des tests à ce sujet sont à venir).

Le fait que la gaine de la corde soit endommagée après le 9ème essai est *a priori* anecdotique, puisque l'on ne chute pas deux fois au même endroit avec du mou dans la corde. Toutefois, une vigilance sera apportée aux cordes installées en fixe assurant un pas difficile sous terre. Pensez à vérifier l'état de la corde lors de votre passage et à la changer le cas échéant.

Par Gaël Monvoisin, PB Laussac

EFFORTS ENGENDRÉS PAR LA PROGRESSION ET/OU LA CHUTE D'UN SPÉLÉOLOGUE SUR UNE MAIN COURANTE OU UNE VIRE

1-Contexte

Cette série de tests a pour but de quantifier les forces mises en jeu lorsqu'un spéléologue se déplace horizontalement sur une main-courante ou une vire. Quel est l'effort enregistré par la corde lorsqu'il se meut, pieds au sol sur une main courante ou plein vide sur une vire ? Et surtout que se passe-t-il lorsque le spéléologue chute au bout de la vire plein vide : quelles forces engendre cette chute sur la corde, sur les amarrages, sur la longe du spéléologue et sur le corps du spéléologue lui-même ?

2-Protocole de test

Un spéléologue se déplace longé sur une main courante, en prenant appui sur ses pieds, puis sur une vire plein vide, tracté avec les mains sur la corde. Il traverse la partie aérienne, atteint l'extrémité de la main courante et, au moment où il se hisse pour se délonger, chute ou glisse et tombe, retenu par sa longe. C'est le cas probable d'un passage sur vire plein vide qui demande de forcer sur les bras pour se rétablir, si le sol est glissant à l'arrivée, si la margelle est étroite ou si la roche cède sous les pieds du spéléologue...

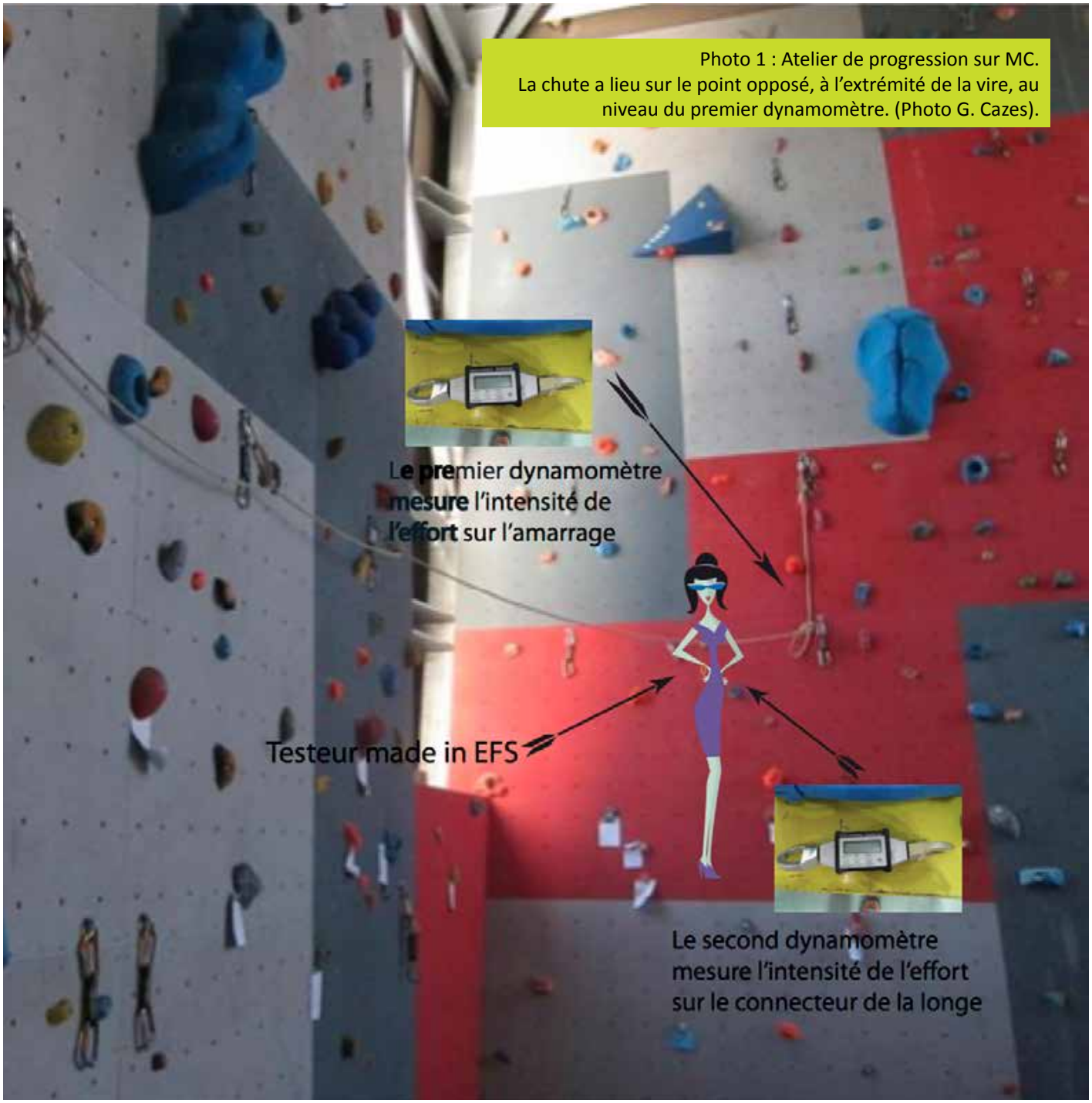


Photo 1 : Atelier de progression sur MC. La chute a lieu sur le point opposé, à l'extrémité de la vire, au niveau du premier dynamomètre. (Photo G. Cazes).

Nous avons d'abord mesuré la charge appliquée par la progression du spéléologue, en appui sur ses pieds, sur la main courante (graphique 1), puis les efforts engendrés par la chute du spéléologue sur sa longe (tableau 2) et les charges appliquées sur l'amarrage à proximité de l'extrémité de la main courante (tableau 2). Nous avons doublé l'instrumentation parce que la charge appliquée lors de la chute n'a pas seulement une composante verticale mais également une composante horizontale. Afin de recueillir toute l'information, nous avons donc installé un dynamomètre sur l'amarrage à l'extrémité de la corde et un autre sur la longe du spéléologue.

Pour des mesures de sécurité, un maillon rapide était installé à la place du mousqueton de longe. Quand il n'était pas possible de retirer les mousquetons des longes des testeurs pour cause de nœud de demi-pêcheur trop serré, le testeur a installé ses deux longes avec les mousquetons tête-bêche. Cette précaution a été prise pour éviter le phénomène d'ouverture potentielle du mousqueton lors de la chute et protéger le testeur.

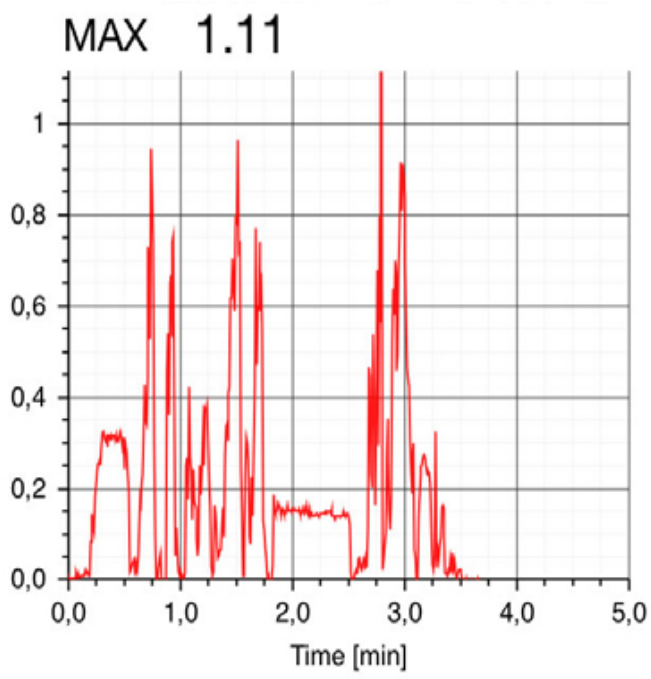
3-Résultats

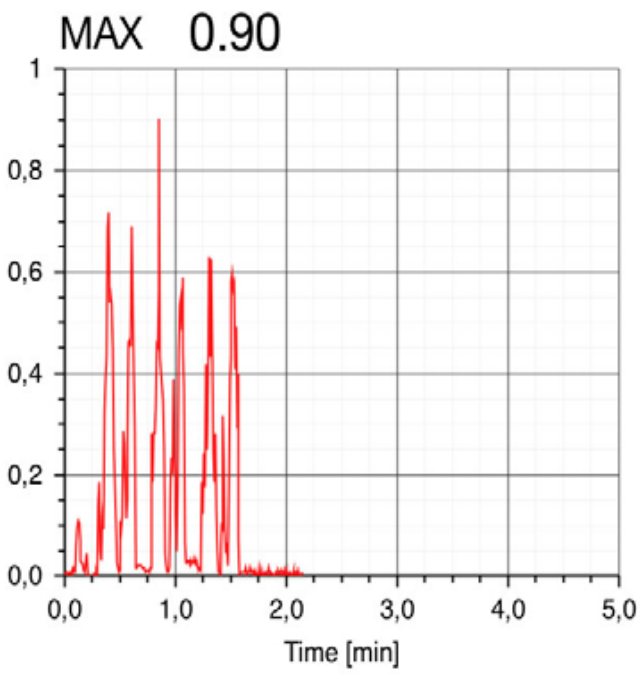
3-1 Progression d'un spéléologue sur vire plein vide

Le spéléologue progresse sur un tronçon de main courante plein vide vers l'amarrage équipé d'un capteur.

Testeurs	Résultats daN	Noeud utilisé	Amarrages
1	111	Chaise double	Mousquetons sur plaquettes
	90		
	90		
2	62		
	90		
	72		
3	92		
	82		
	75		

Tableau 1 : Valeurs enregistrées lors de la progression d'un spéléologue sur vire plein vide





L'effort lors de la progression est logiquement très faible, à peine plus important que la masse du spéléologue. Le poids du testeur est légèrement supérieur lors de la progression plein vide du fait des à-coups qu'il peut donner lors de sa progression longée.

Graphique 1 : Enregistrements de la progression de chaque spéléologue (respectivement testeurs 1, 2 et 3) plein vide sur la vire

3.2. Chute d'un spéléologue sur vire

Testeur	Masse (kg)	Noeud Longes	Noeud amarrages	Harnais / Longes	Distance horizontale amarrage (cm)	Hauteur de chute estimée (cm)	Longueur de la longe (cm)	Facteur de chute	Résultats charge Amarrage (A) daN	Résultats charge Longe (B) daN
1	81	demi-pêcheur / huit	noeuds de chaise double	Super avanti / longes Béal	264	60	34	0,2	240	320
									250	320
									300	400
									355	470
2	65			MTDE Amazonia					170	170
									210	220
									250	270
3	74			MTDE Amazonia					240	310
									260	350
									270	390

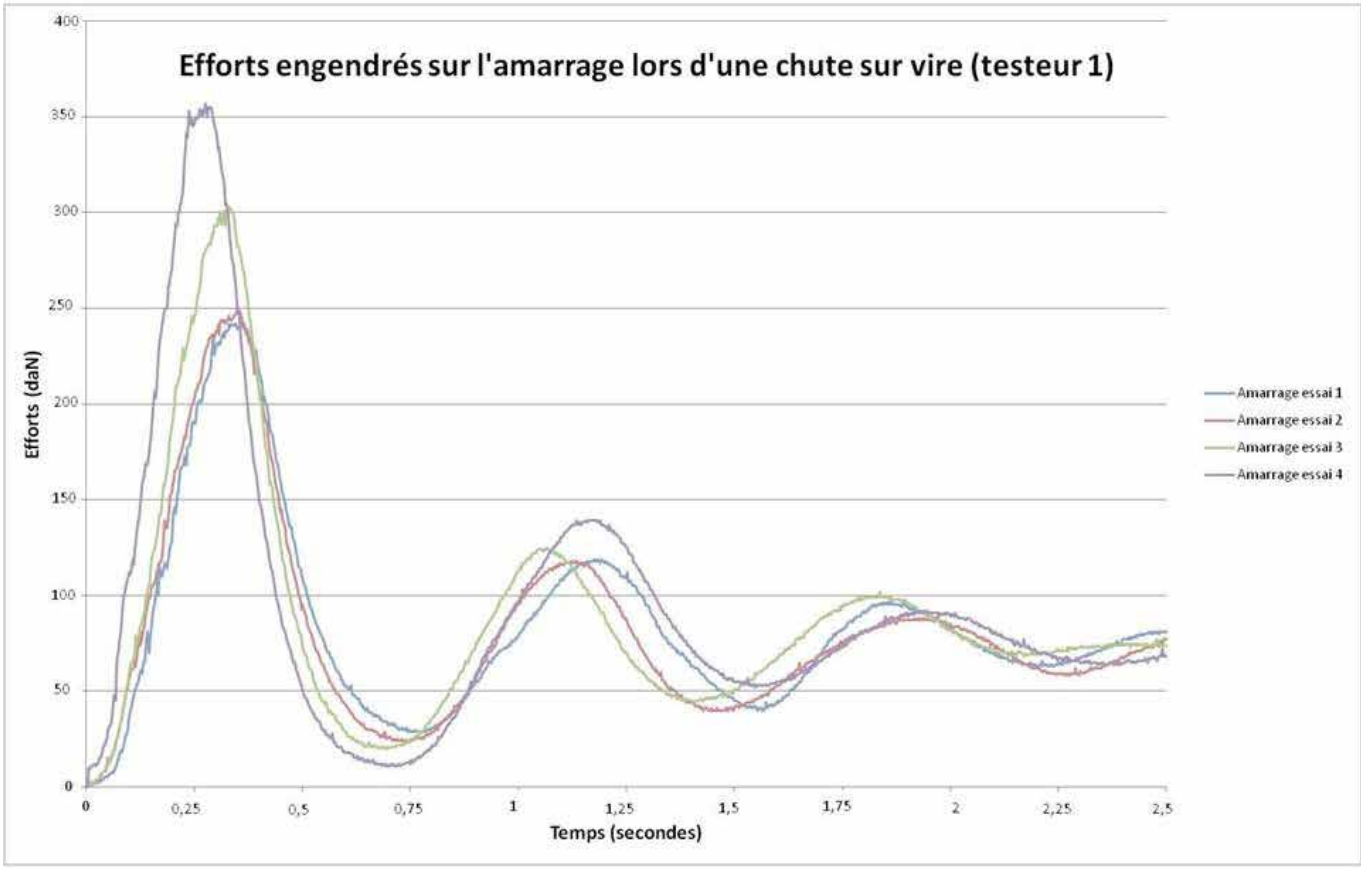
Tableau 2. Enregistrement des chutes. Deux groupes de fichiers : (A) pour l'effort sur l'amarrage et (B) pour l'effort sur les longes.

Lorsque les testeurs sont en attente de la chute, accrochés sur les prises de la paroi, la traction est nulle, il n'y a pas de forces appliquées sur les dynamomètres.

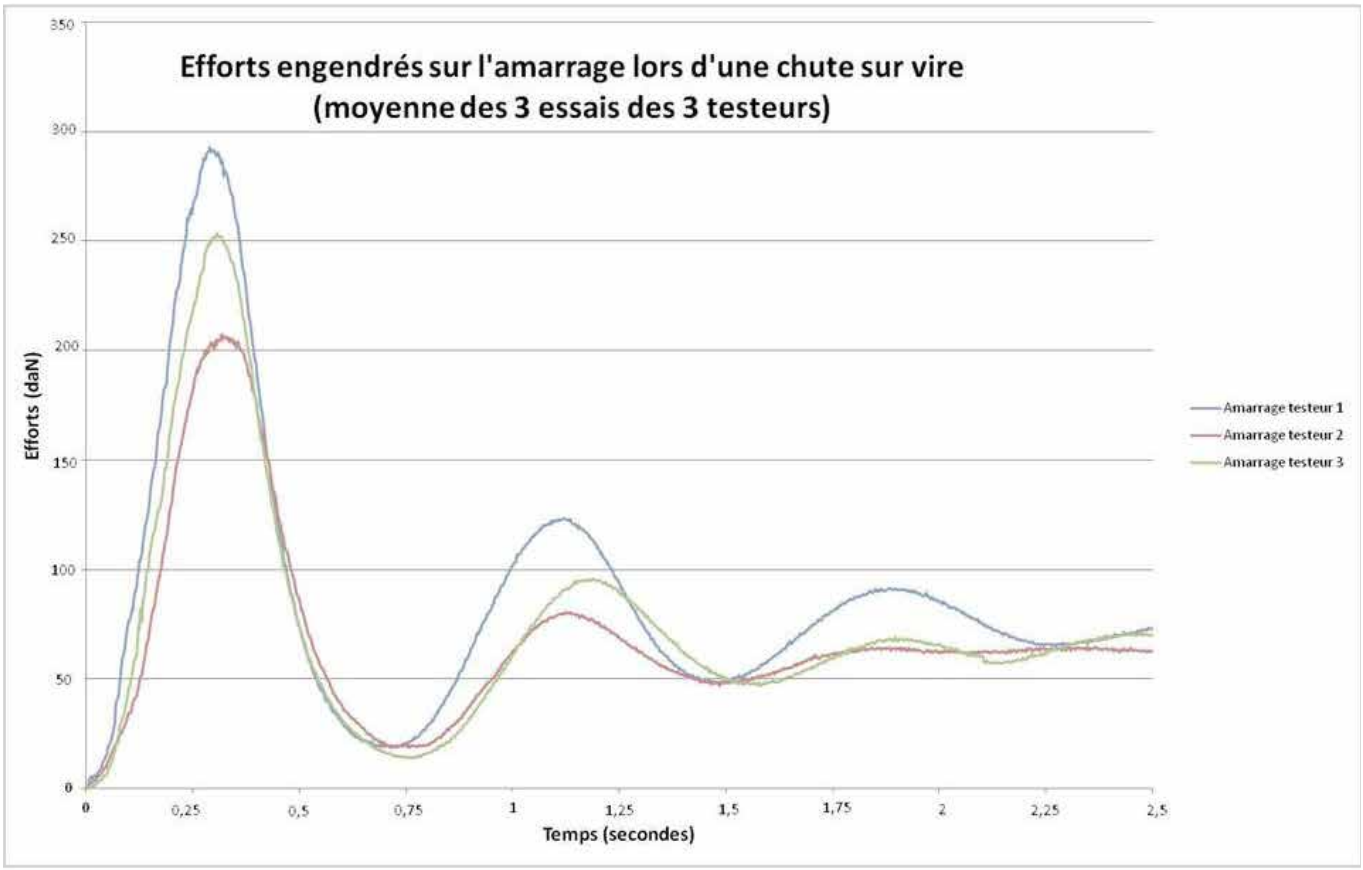
Lorsque le testeur est en position, que Chris Blakeley a les deux iPhone prêts et qu'il donne le départ, le testeur se laisse tomber sur sa longe. Le choc est enregistré simultanément sur les deux dynamomètres.

3.2.1. Composante horizontale : sur un des amarrages.

Nous avons traité les données enregistrées sur la composante horizontale de la chute, l'effort sur un des amarrages, et le testeur 1 (le plus lourd, 81 kg) a répété 4 fois l'exercice (graphique 2). La valeur du choc augmente au fur et à mesure des essais. L'effort engendré est variable et augmente, parfois, de manière importante. Nous retrouvons cette tendance pour tous les testeurs. Elle est probablement due au serrage des nœuds à chaque chute et surtout à la prise de confiance des testeurs qui se laissent tomber avec de plus en plus d'assurance. La valeur moyenne maximale des essais pour chaque testeur correspond environ à une force équivalente à 3 fois la masse du spéléologue (testeur 1, valeur max = 293 daN ; testeur 2, valeur max = 207 daN et testeur 3, valeur max = 253 daN), comme nous pouvons le voir sur le graphique 3. Cette force est montée au maximum pour tous les essais à 350 daN, soit plus de 4 fois la masse du testeur 1 (graphique 2).



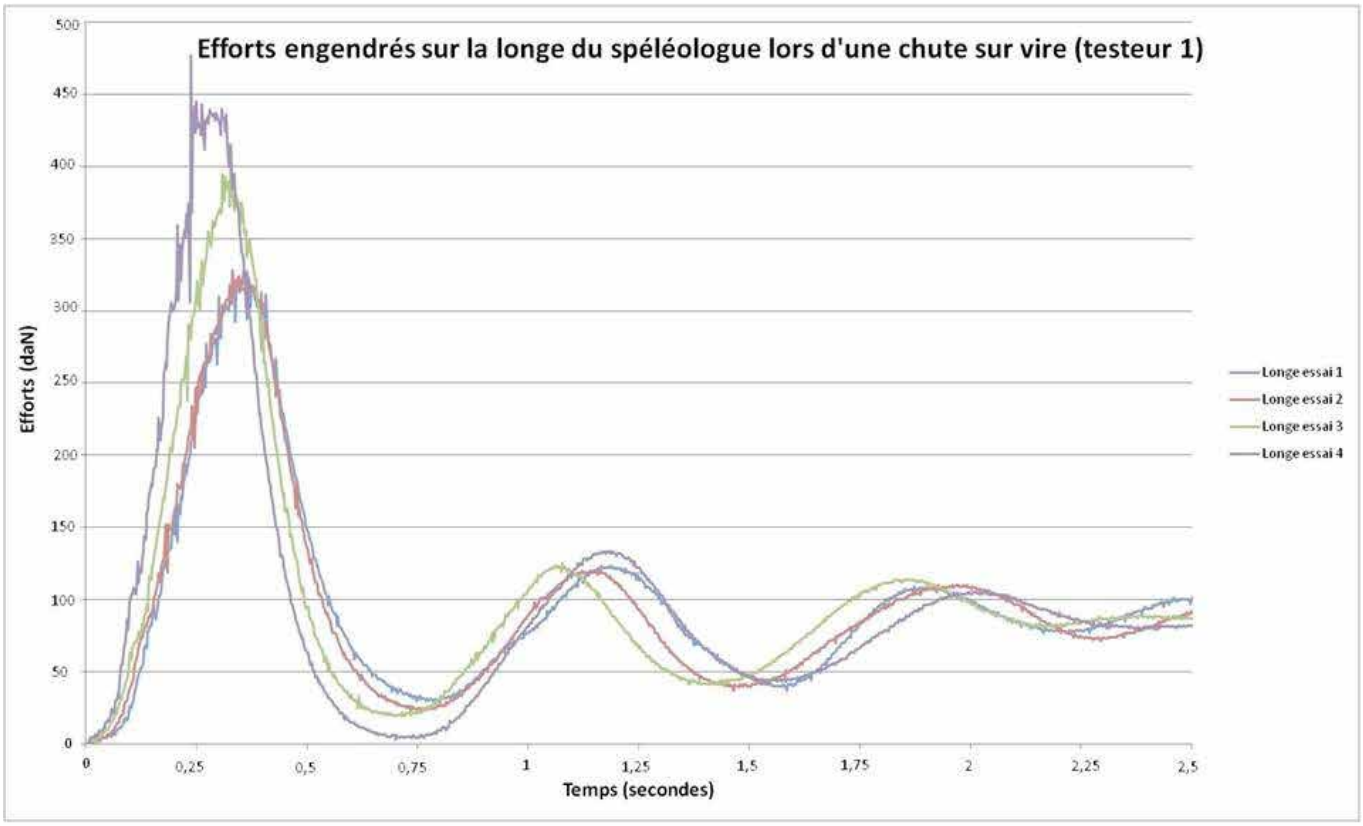
Graphique 2 : Résultats du testeur 1 sur 4 essais.



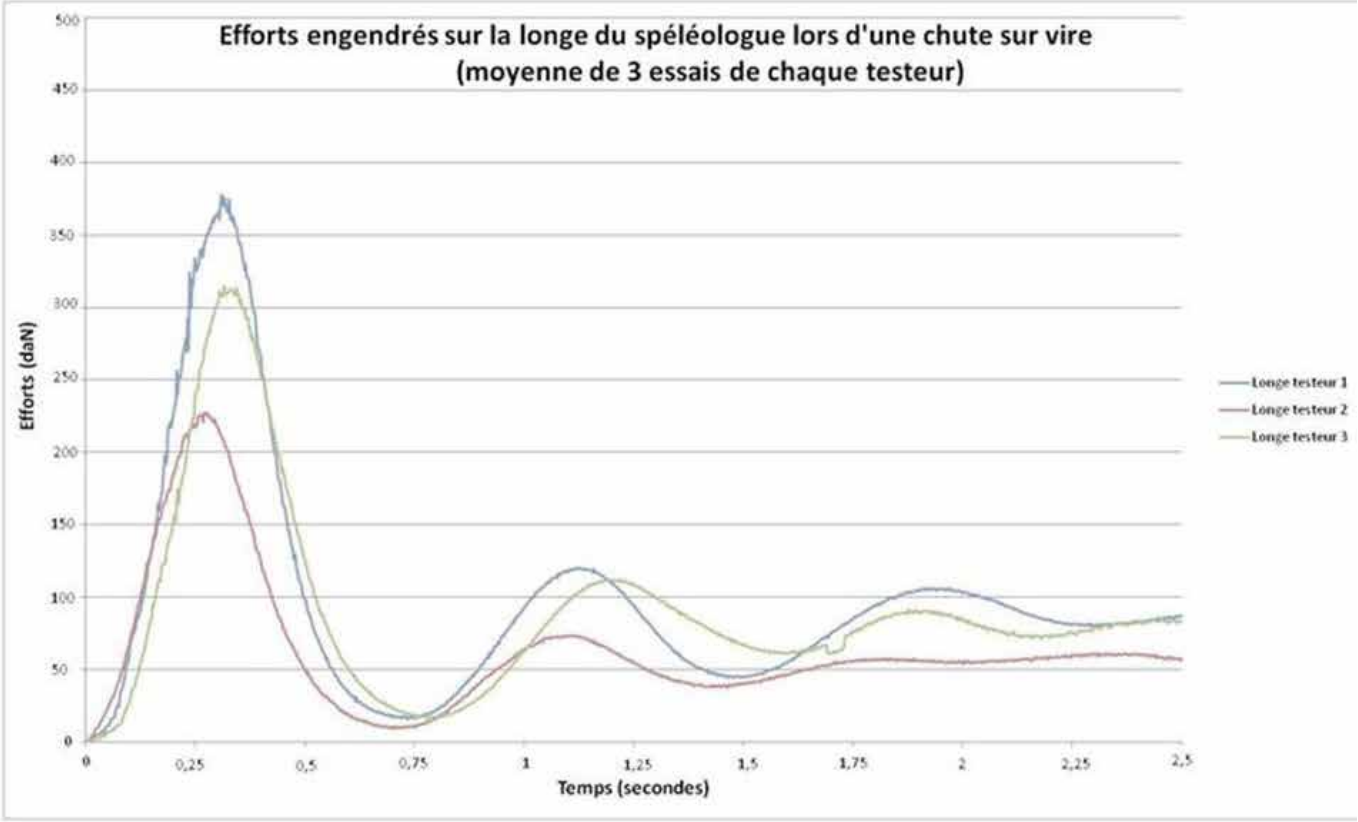
Graphique 3 : Moyennes des 3 essais de chaque testeur

3.2.2. Composante verticale : sur la longe

Nous avons, en parallèle aux mesures précédentes de la composante horizontale de la chute, enregistré les paramètres de la composante verticale de la chute en plaçant un dynamomètre sur le mousqueton de longe du testeur. Les résultats, pour le même testeur, des efforts engendrés par sa chute sur sa longe sont plus importants que ceux de la composante horizontale. Mais n'oublions pas que nous avons mesuré seulement une partie des composantes horizontales (d'un côté de la vire). Nous observons également l'augmentation de la force-choc au fur et à mesure de la répétition des tests. La structure est similaire à celle de la composante horizontale quoique légèrement plus bruitée. La force- choc semble plus importante sur cette composante.



Graphique 4 : Résultats du testeur 1 sur les 4 essais

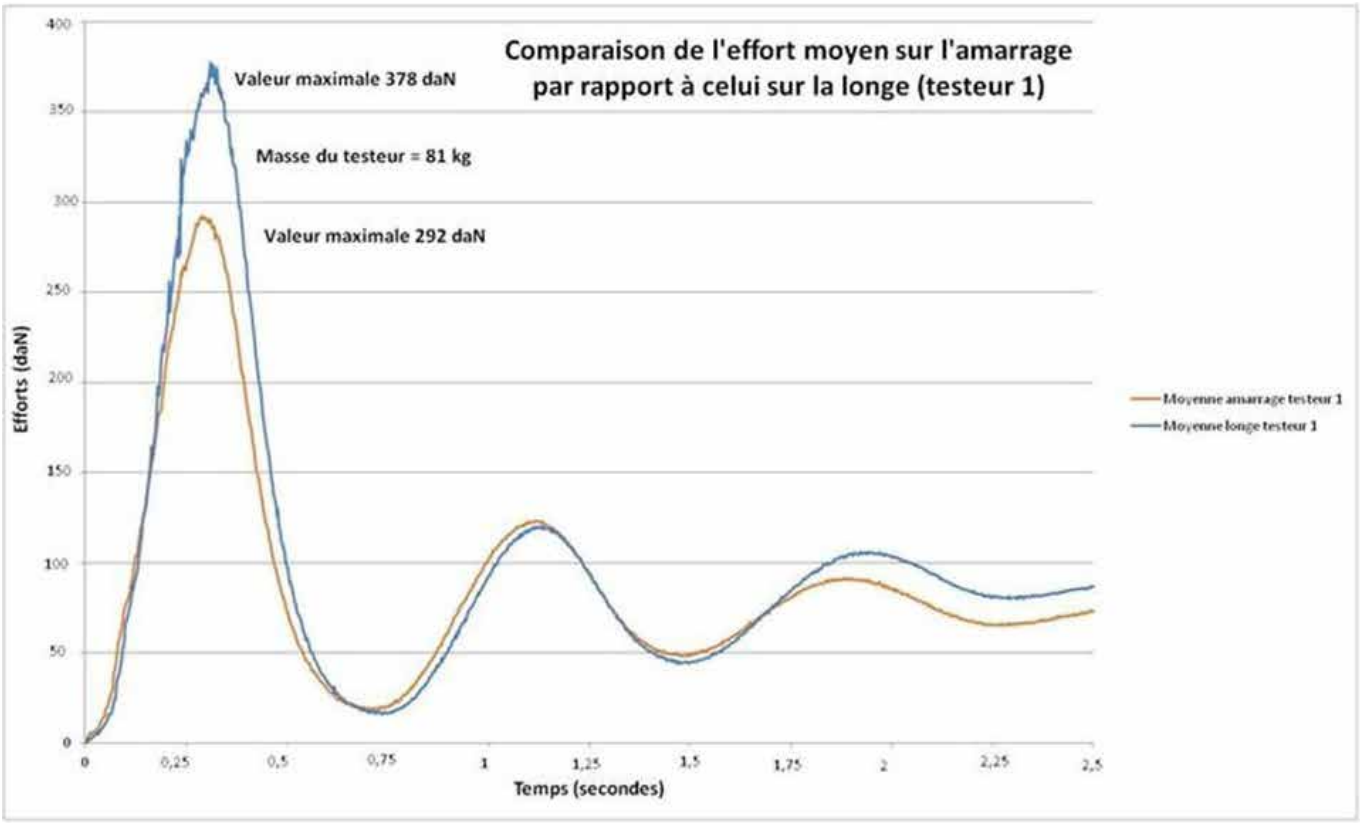


Graphique 5 : Moyenne des 3 essais de chaque testeur.

La part de la masse est nettement visible dans la chute sur la longe et son impact joue sur la force engendrée sur la longe pendant la chute. L'effort est plus important que dans la composante horizontale. La valeur moyenne maximale des essais pour chaque testeur correspond environ à une force équivalente à 4 fois la masse du spéléologue, voire plus (testeur 1, valeur max = 378 daN ; testeur 2, valeur max = 227 daN et testeur 3, valeur max = 315 daN), comme nous pouvons le voir sur le graphique 5. Cette force est montée au maximum pour tous les essais à 477 daN, soit près de 6 fois la masse du testeur 1 (graphique 4). Cependant, le testeur lui-même avoue avoir un peu exagéré et s'être jeté dans le vide un peu fort. C'est donc un maximum qui ne se rencontrera *a priori* pas dans la réalité, mais permet de voir jusqu'où cela peut aller.
Nous retrouvons toujours la structure de rebond et d'atténuation suite au choc, quelle que soit la composante observée. Le temps est légèrement supérieur aux autres chutes, plus de 0,5 secondes. La chute est en partie amortie par la flèche de la vire et les efforts sont répartis sur les deux points d'amarrage, de part et d'autre du tronçon plein vide. Le temps pour trouver l'équilibre augmente du fait des composantes plus flexibles du système composé de la corde, des nœuds et du corps humain.

3.2.3. Comparaisons des deux composantes

La comparaison des deux composantes montre que la composante verticale est toujours plus importante. Il y a une différence notable entre les deux composantes qui correspond à peu de chose près à la masse du spéléologue.



Graphique 6 : Comparaison entre l'effort moyen (sur les 4 essais) engendré par la chute du testeur 1 sur l'amarrage (composante horizontale) et sur la longe (composante verticale).

3-Conclusion

Les tests réalisés sont satisfaisants en matière de sécurité. L'intensité des forces obtenues sur les testeurs sont tout à fait acceptables (cf. graphique 5). A la question « qu'avez-vous ressenti ?», les testeurs n'ont strictement rien ressenti au niveau du dos ou des lombaires.

D'un point de vue purement physique, une chute de facteur 0,20 sur une main courante montre une décélération en deçà du seuil d'occurrence lésionnel de 6g pour une masse rigide de 100kg ; Le testeur 1 (M=81 kg) atteint des valeurs de décéleration de 2,8g.

Les tests réalisés se retrouvent facilement dans la pratique lors de passage de vires ou de mains courantes un peu sportives. Le spéléologue se tracte sur ses bras, glisse et chute. Les efforts engendrés, notamment sur l'amarrage, montrent que l'équipement doit être particulièrement soigné afin d'augmenter la marge de sécurité. D'autre part, le spéléologue doit toujours progresser en minimisant le facteur de chute. Ces paramètres ne doivent pas faire oublier que sur les vires un peu aériennes, c'est souvent le mouvement pendulaire du passage des spéléos sur la corde qui dévisse les plaquettes. Pour éviter cela, il est important de bien vérifier que les plaquettes soient correctement vissées ou, quand l'équipeur a le choix, de préférer des AN ou des AF pour équiper des vires aériennes. Encore une fois, l'effet de la masse du spéléologue est prépondérant. Les plus lourds engendrent des forces supérieures. L'augmentation de la charge au fur et à mesure des chutes (quelle que soit son origine), est une situation qui a peu de chance de se rencontrer réellement, on ne tombe pas plusieurs fois au même endroit en général, sauf sur un pas particulièrement difficile avec un équipement en fixe mais il faut revoir l'équipement à ce moment-là : c'est qu'il n'est pas optimal. N'oublions pas que le confort est un gage de sécurité en spéléologie.

Enfin, dans ce cas aussi, le choc engendré par la chute sur la corde ou la longe est une chose, mais il ne faut pas oublier le facteur environnement qui peut rendre la chute douloureuse si le spéléologue tape sur une paroi ou le sol.

Efforts engendrés par la chute d'un spéléologue au moment d'entamer sa descente

Gaël Monvoisin, moniteur EFS et Pierre-Bernard Laussac, instructeur EFS

Contexte

Un spéléologue se prépare à descendre un puits, il est longé sur la main courante et installe son descendeur sur la corde. Au moment où il se délonge, il glisse ou chute et se retrouve retenu par son descendeur. Nous avons cherché à mesurer les efforts engendrés sur la corde lors d'une chute d'un spéléologue sur son descendeur simple Petzl au moment de la descente. Cependant, ces tests ont un second objectif qui est de vérifier le comportement du matériel lorsqu'un spéléologue chute sur une clef. Ces tests complètent ceux déjà effectués sur les chutes sur longes ou sur bloqueurs. Ils ont été réalisés lors de la campagne de tests de mai 2014 dans les locaux V-axess de la société Petzl.

Protocole

Pour mesurer les efforts engendrés par la chute d'un spéléologue sur son descendeur au moment de la descente, il était nécessaire de nous affranchir de l'effet potentiel de la tenue de la corde par le spéléologue et du biais résultant de l'amortissement par le glissement de la corde dans le descendeur. Nous avons donc choisi de mesurer la chute avec une clef complète réalisée sur le descendeur. Bien que l'EFS n'enseigne pas l'utilisation de clef sur les descendeurs pour passer un fractionnement ou démarrer une descente, dans une configuration normale, cette situation peut toutefois être rencontrée pour des raisons diverses alors que le spéléologue a besoin de ses deux mains. De plus, il s'agissait d'un paramètre nécessaire du test. Enfin, pour que le test soit reproductible, des repères ont été installés sur les cordes (rubans adhésifs rouges) afin que les longueurs de cordes et de chutes soient les mêmes pour chaque passage et chaque testeur. Les tests ont été réalisés sur des cordes semi-statiques de type Béal Spélénium, diamètre 9mm, ayant déjà été utilisées. Les spéléologues ont fait les tests sur ces cordes avec leurs propres descendeurs simples Petzl. Les données du constructeur pour ces modèles de descendeurs sont données ici :
http://www.petzl.com/fr/Sport/Assureurs--descendeurs/SIMPLE?l=FR#.VmGd078WlCI.

<u>Deux situations différentes ont été testées :</u>

- Le spéléologue n'a pas ravalé le mou (25 cm de mou) avant de se délonger et de se mettre en tension sur le descendeur. Il chute verticalement sur l'amarrage.

  <u>Données métriques des tests de chutes verticales :</u>

  Longueur entre le nœud et le scotch = 61 cm et hauteur de chute estimée = 50 cm, soit un facteur de chute de 0,82.

  Pour information, la longueur de corde dans le descendeur plus la clef = 98 cm et la longueur de corde utilisée pour le nœud de chaise = 100 cm.

- Le spéléologue n'a pas pu ravaler le mou parce qu'il a installé la corde dans son descendeur en étant décalé de la tête du puits (décalage d'un mètre). Il chute et le mou, avec le décalage d'axe, provoque un mouvement de chute pendulaire.

  <u>Données métriques des tests de chutes pendulaires :</u>

  Longueur entre le nœud et le scotch = 81 cm et hauteur de chute estimée = 60 cm, soit un facteur de chute de 0,74.

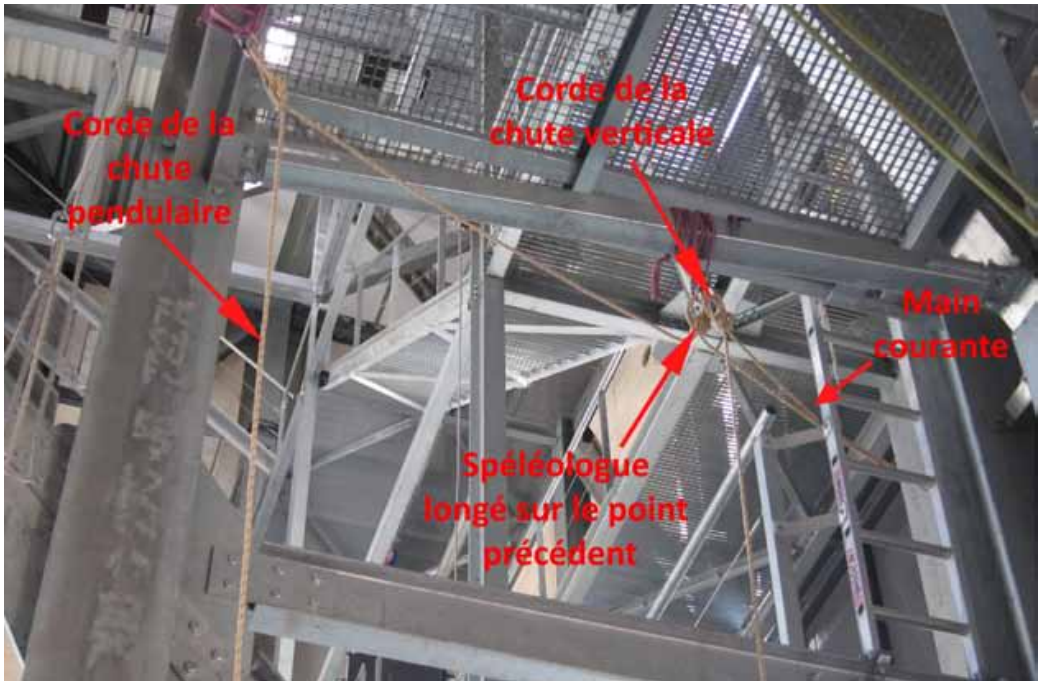


Photo 1. Atelier de chute à la descente. Main courante en haut à droite. Situation de chute verticale : sur la corde de droite (le spéléologue est longé sur la tête de puits de droite avant de chuter) ; situation de chute avec pendule : sur la corde de gauche (le spéléologue est longé sur la même tête de puits que pour le premier test et installe la corde verticale de gauche dans son descendeur). Le dynamomètre est placé au niveau de l'amarrage, entre le nœud et le mousqueton.

Résultats

Le mode d'enregistrement des efforts par les dynamomètres (Rock Exotica Enforcer) est le mode dit rapide (500 mesures par seconde), le même que pour les chutes sur longes ou sur bloqueurs (voir explications dans Info-EFS N°61, introduction des tests).

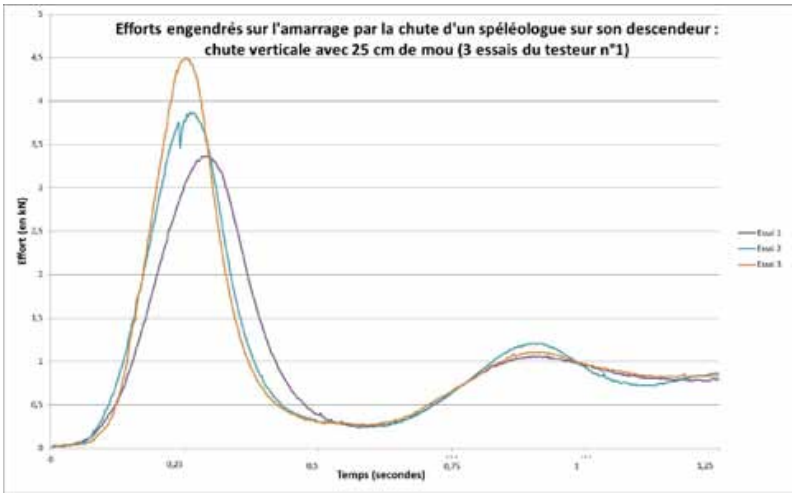
Situation de chute verticale

Le spéléologue est longé sur la main courante, il installe son descendeur, fait une clef complète, sans ravaler le mou de corde au dessus du descendeur, se délonge et chute/glisse. La composante de la chute est uniquement verticale.

Testeur	Essai	Résultats daN	Moyenne (daN)	Hauteur de chute
Testeur 1 - 81 kg	1	340	390	Boucle de 25 cm de mou au-dessus du descendeur
	2	380		
	3	450		
Testeur 2 - 65 kg	1	230	302	
	2	360		
	3	315		
Testeur 3 - 74 kg	1	440	435	
	2	410		
	3	455		

Tableau 1. Valeurs maximales enregistrées lors des chutes des 3 testeurs sur leurs descendeurs.

Le premier essai du testeur 2 donne une valeur nettement plus faible que les deux autres, il se peut que la clef ait été mal serrée et que l'amortissement lors de la chute ait été plus important que pour les essais suivants.

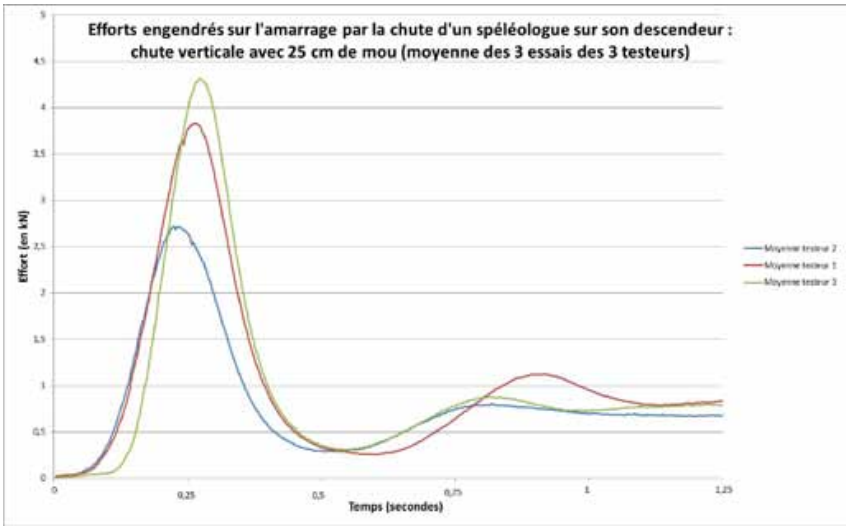


Graphique 1. Enregistrement des données rapides des 3 essais du testeur 1 (81 kg) sur une chute verticale.

Comme dans le cas des autres tests de chutes, le passage du pic d'effort se fait en moins de 0,5 seconde. Nous retrouvons également l'effet de rebond et l'amortissement du mouvement jusqu'à la situation d'équilibre rapidement atteinte qui correspond à la masse du spéléologue.

Nous pouvons noter une tendance à l'augmentation de l'effort au fur et à mesure des essais (graphique 1), mais nous avons déjà émis des réserves quant à sa signification. En effet, le serrage des nœuds de l'amarrage est un premier facteur qui peut influer, quoique cet effet puisse être en partie atténué par le glissement de la corde dans la clef du descendeur, mais également la prise de confiance du testeur qui a tendance à « exagérer » sa chute au fur et à mesure des essais.

L'effort enregistré lors de la chute semble dépendre de la masse du spéléologue, mais pas uniquement, puisque l'effort maximum n'est pas engendré par la chute du spéléologue le plus lourd, le testeur 3 pèse 74 kg contre 81 kg pour le testeur 1 (graphique 2).



Graphique 2. Moyenne des 3 essais des 3 testeurs pour les chutes à composante verticale sur descendeur.

Les efforts engendrés par une telle chute sont conséquents. Les chutes sur longes avec un facteur de chute de 1 donnaient des résultats entre 300 et 400 daN (voir Info-EFS N° 61, chutes sur longes). Ici pour une chute de facteur 0,82, les forces chocs atteignent les 450 daN, donc supérieures pour un facteur plus faible. Le rebond, quant à lui, n'est pas très important, autour de 100 daN, dépendant de la masse du spéléologue.

Photo 2 : José se prépare à chuter sur son descendeur. Nous pouvons observer le mou dans son descendeur. Il est contre-assuré par sa grande longe sur une corde secondaire. (photo P.-B.L.)

Situation de chute pendulaire

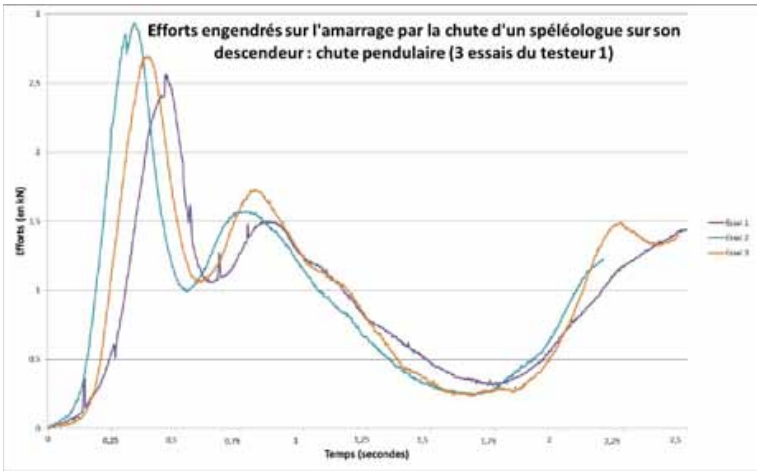
Le spéléologue est longé sur la main courante, la tête de puits est décalée d'un mètre par rapport à la main courante. Le spéléologue attrape la corde sous la tête de puits et installe son descendeur sans ravaler le mou de corde au-dessus du descendeur, fait une clef complète avant de se délonger, se délonge et chute/glisse. La chute se fait de façon pendulaire sur l'amarrage.

Testeur	Essai	Résultats daN	Moyenne (daN)	Hauteur de chute
Testeur 1 - 81 kg	1	250	268	Tête de puits décalée d'un mètre par rapport à la main courante
	2	290		
	3	265		
Testeur 2 - 65 kg	1	160	145	
	2	130		
	3	145		
Testeur 3 - 74 kg	1	240	233	
	2	218		
	3	240		

Tableau 2. Résumés des valeurs enregistrées lors de la chute d'un spéléologue en début de descente avec pendule.

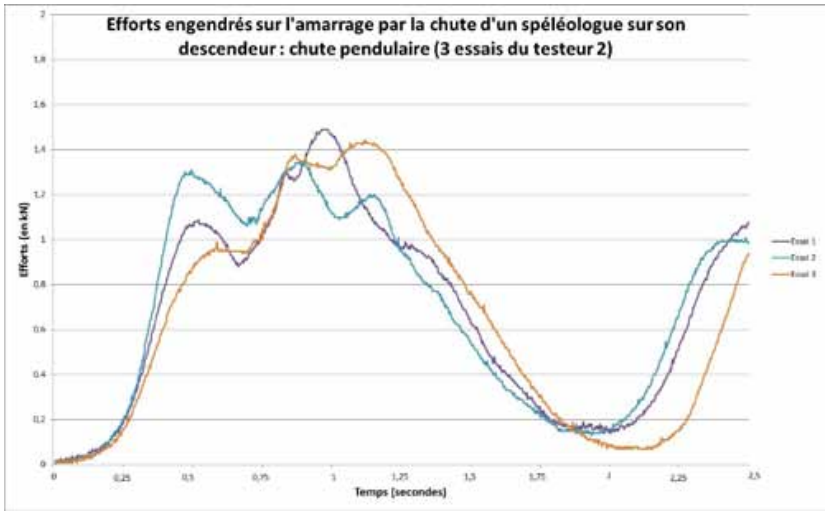
Nous observons que les efforts engendrés lors de la chute pendulaire sont nettement plus faibles que lors d'une chute verticale (graphique 3) ; de l'ordre de ceux que nous avons mesurés lors des chutes sur bloqueur ventral. La valeur maximale est de moins de 290 daN, avec des moyennes de l'ordre de 250 daN.

Il y a, par contre, de multiples rebonds et leur amplitude est bien plus importante que pour une chute verticale, de l'ordre de 150 daN, soit environ 2 fois la masse du spéléologue. Le temps mis pour revenir à une situation d'équilibre est plus longue compte-tenu du caractère chaotique de la chute (graphique 4). Lorsque l'on examine les moyennes des valeurs par individu, le facteur prépondérant est clairement la masse (graphique 5).



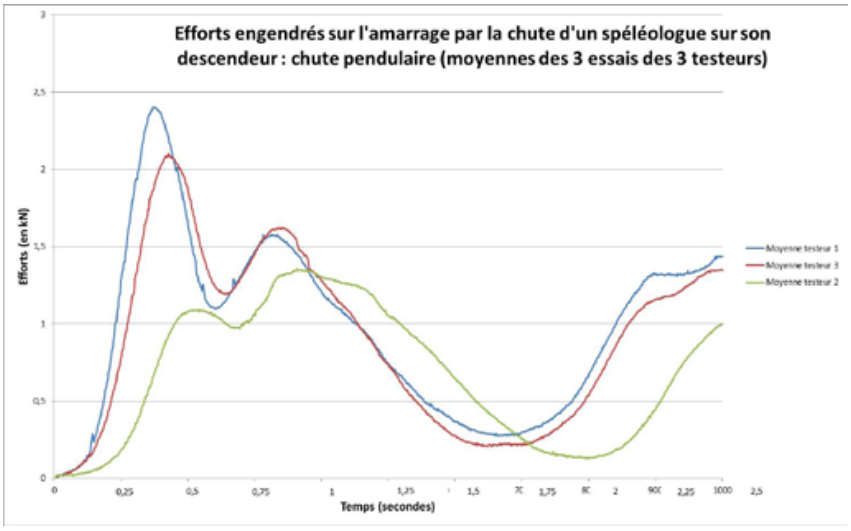
Graphique 3. Enregistrement des données rapides des 3 essais du testeur 1 (81 kg) sur chute pendulaire.

Sur les essais du testeur 2 (graphique 4) nous pouvons observer un comportement bien différent de la chute, le pic d'impact est décalé et moins marqué. Le spéléologue est balloté dans le vide dans tous les sens. Les images des films tournés lors de ces tests sont impressionnantes, le corps du spéléologue ne contrôle rien de la trajectoire de la chute.



Graphique 4. Enregistrement des données rapides des 3 essais du testeur 2 (65 kg) sur chute pendulaire.

Lorsque nous comparons les comportements des 3 chutes des différents testeurs, il semble que la masse du spéléologue soit bien le facteur prépondérant.



Graphique 5. Moyenne des 3 essais des 3 testeurs pour les chutes pendulaires sur descendeur.

Interprétation

Lors des essais de chutes verticales, des efforts très importants ont été enregistrés, plus importants que lors des chutes sur les longes, mais avec des effets sur le spéléologue moins ressentis. Les chutes sur descendeur semblent moins traumatisantes pour le spéléologue du fait de l'amortissement léger créé par le serrage de la corde de la clef et dans le descendeur. En effet il faut plus de temps pour s'arrêter compte-tenu des divers amortissements et donc la décélération est moins importante. Néanmoins, l'importance de la force choc pour un facteur de chute inférieur montre bien la différence d'absorption d'un choc entre une corde semi-statique (corde de progression de spéléologie) et une corde dynamique (corde de longe). Même sur une très petite longueur (de l'ordre du mètre), l'élasticité de la corde dynamique (avec les deux nœuds) absorbe nettement mieux le choc que la corde semi-statique légèrement usagée, malgré l'effet d'amortissement du serrage de la clef et du glissement de la corde dans le descendeur.

Par contre, les efforts engendrés lors des chutes pendulaires sont bien moins importants. En effet, l'absorption d'une partie des efforts de la chute pendulaire se fait par les nœuds, la clef du descendeur et le matériel, comme dans le cas d'une chute verticale, mais aussi par toutes les composantes de la force de chute autres que verticales, notamment horizontales ou multidirectionnelles. Ce sont ces autres composantes de la chute qui diminuent la force enregistrée sur le dynamomètre. Le mouvement du corps humain dans les différents axes dissipe une grande quantité d'énergie.

Conclusion

Dans tous les cas de tests de chutes sur descendeur à la descente, les efforts engendrés restent largement inférieurs à la résistance des cordes. Attention toutefois à la qualité de l'amarrage ou de la roche. Les valeurs enregistrées ne mettent pas le spéléologue en danger. D'autre part, aucune déformation n'a été notée sur le descendeur ou le reste du matériel.

Par contre, lorsqu'on observe les images des chutes pendulaires, il apparait que le facteur dangereux de la chute est la chute elle-même. En effet, le spéléologue ne contrôlant rien de sa chute, il est probable qu'il aille se cogner contre les parois et risque de se blesser ou d'endommager la corde si celle-ci se met à frotter lors du pendule.

Enfin, il serait intéressant de refaire ces tests avec des descendeurs stop pour comparer les résultats.

Chutes sur main courante

Spéléologue retenu par son bloqueur de poing, longe non contre-assurée sur la corde

Gaël Monvoisin, moniteur EFS et Pierre-Bernard Laussac, instructeur EFS

Contexte

Pour ces tests, il s'agissait d'observer le comportement d'un bloqueur de poing, lors d'une chute sur main courante, dans le cas où le mousqueton de la longe n'est pas relié à la corde. Bien que l'EFS enseigne que la longe doit impérativement être reliée à la corde lors d'une progression sur main courante avec bloqueur de poing, qu'elle soit plein vide ou non, cette pratique n'est pas toujours acquise notamment par les débutants. La question de ce test était « que se passe-t-il si le spéléologue glisse ou tombe dans cette configuration ? ».

Protocole

Pour cette série de tests, nous n'avons pas effectué de mesures d'efforts avec les dynamomètres, mais uniquement des observations et des images. Nous avons tendu une corde entre deux points éloignés de 5 m. Le spéléologue est dans la configuration la plus défavorable. Son bloqueur de poing est légèrement incliné vers le bas dans le sens de la flèche de la corde, gâchette vers le haut, en bout de longe et le spéléologue se laisse tomber dans le vide alors qu'il a la corde de la vire quasiment au niveau de son croll. La chute est assimilée à une chute de facteur 1 (photo 1).

Photo 1. David juste avant sa chute, la longe (jaune) n'est pas reliée à la corde.

David est contre-assuré par une autre longe (noire) sur la corde. Photo J.B.

Nous avons répété ce test avec différents modèles de bloqueurs de poing de chez Petzl : poignée classique, basic ancien modèle, basic 2 (nouveau modèle). Le testeur est contre-assuré par une seconde corde avec un spirit, un gros tapis est au sol pour l'amortir. Tous les essais ont été filmés avec le matériel des vidéastes plus une caméra fantôme (haute vitesse) du bureau d'études de Petzl permettant d'enregistrer un grand nombre d'images et d'obtenir des ralentis de bonne qualité.

Résultats

Le testeur 4 fait un premier essai avec un basic ancien modèle, ayant déjà servi, aux dents légèrement usées. Il se laisse tomber dans le vide et … se retrouve pendu sur la longe de sécurité. Il n'est plus sur la corde de progression. Le basic a cédé. La gâchette est décalée du fond de la gorge du basic, la partie arrondie du retour enfermant la gâchette est tordue et le rivet de la gâchette est tordu (voir photos 3 et 4).

Photo 2. David chute et le bloqueur de poing (basic ancien modèle) s'éjecte de la corde. Seule la longe de sécurité retient le spéléologue. Photo J.B.

Photos 3 et 4. Le basic ancien modèle est déformé par l'ouverture et l'éjection de la corde. Photo J.B.

Le testeur 4 réitère sa chute sur un basic ancien modèle, mais neuf. Il ne se passe rien. Il est retenu par le basic et celui-ci est fonctionnel. Il fait deux sauts successifs sur ce basic sans conséquences.

Le testeur 2 fait un essai avec une poignée en bon état mais d'un ancien modèle. Le spéléologue reste pendu sur la corde, la poignée ne s'ouvre pas, mais elle est tordue au niveau de la partie large sur laquelle vient se longer le spéléologue. Sa chute a provoqué un important bras de levier mais elle est toujours fonctionnelle.

Il teste ensuite un basic 2, nouvelle génération, tout neuf, n'ayant jamais servi. Après la chute, celui-ci ne s'ouvre pas, mais il est légèrement tordu, la gâchette est coincée et ne s'ouvre plus. Il coulisse dans les deux sens. Il faut défaire le nœud de la corde et la faire coulisser dans le basic jusqu'à l'extrémité pour le sortir.

Le même test est refait avec un autre basic du même type et le résultat est identique.

Conclusions

Même si les résultats des tests divergent en fonction des matériels utilisés, certains essais ont tout de même mis en défaut le bloqueur de poing comme élément de sécurité, avec dans un cas, le bloqueur qui s'échappe totalement de la corde. Il aurait été intéressant de multiplier les essais pour en tirer des statistiques, mais ces tests étant destructifs, le coût en matériel aurait été conséquent et puis le but était de voir si cette situation représentait un danger et cela ne fait pas de doute.

L'EFS rappelle bien que tout spéléologue qui se déplace sur une main courante en ne longeant pas le mousqueton de sa grande longe sur la corde se met en danger ! **L'unique** élément de sécurité lorsqu'on se déplace sur une main courante est la longe ; le bloqueur facilite la progression mais ne saurait être un élément de sécurité à part entière. Il est donc primordial de toujours insister lourdement sur cette notion de sécurité lorsque l'on est témoin d'une erreur de ce type en spéléologie. Que le spéléologue fautif soit débutant ou confirmé.

Efforts engendrés par la rupture d'un amarrage entre deux spéléologues en cours de descente

Gaël Monvoisin, moniteur EFS et Pierre-Bernard Laussac, instructeur EFS

Contexte

Un spéléologue (B) descend un puits et passe un fractionnement. Un second spéléologue (A) le suit et entame sa descente. Un seul amarrage les sépare et ce point vient à lâcher. Nous avons voulu, par ce test, mesurer les efforts engendrés lors d'une telle rupture d'amarrage, mais surtout observer le comportement du descendeur du spéléologue A au-dessus de l'amarrage. Ceci afin de tenter de répondre aux bruits qui courent sur le comportement du descendeur. Nous entendons couramment dire que si l'amarrage sous le spéléologue A en cours de descente lâche avec une personne B sur le tronçon de corde inférieure, le descendeur va se tordre, se plier ou exploser. Mais quand est-il réellement ? Est-ce que le spéléologue A va se retrouver en danger ?

Protocole

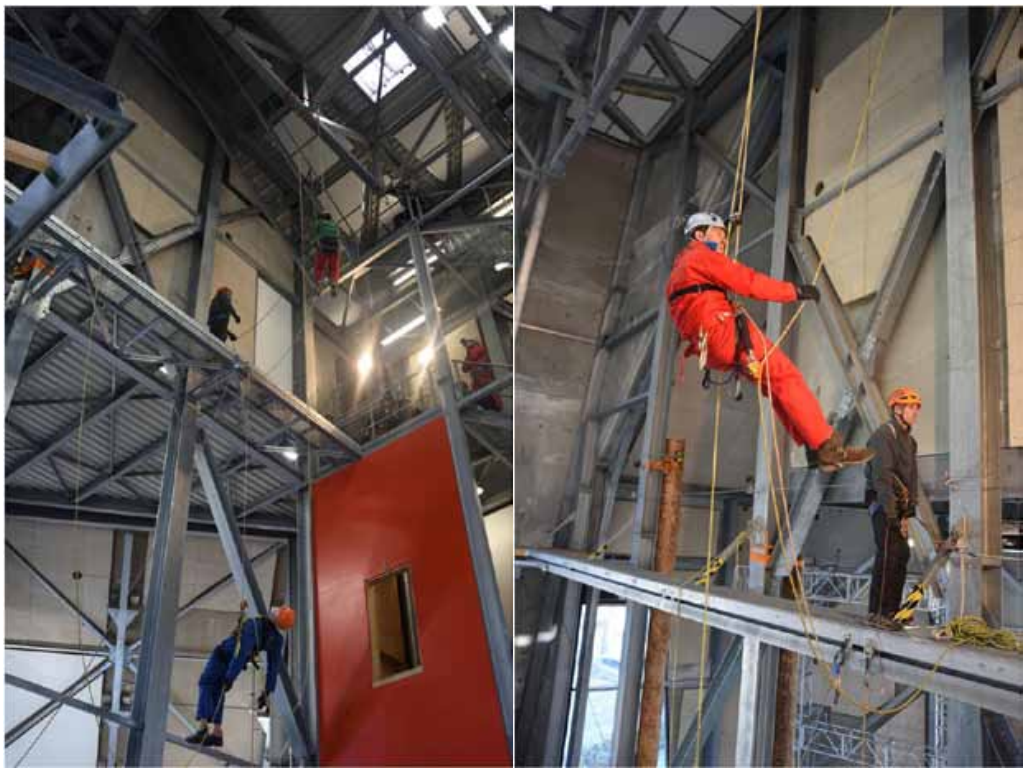
Un puits de 15 m est équipé avec l'installation d'un fractionnement à -5 m. Le spéléologue A entame la descente du puits et s'arrête à 4 m du sommet. A 1 m sous lui il y a un fractionnement avec une boucle de mou de 1,80 m. Sous le fractionnement, situé à 10 m du sol, se trouve un mannequin B de 80 kg, installé sur la corde et retenu par un Grigri©, à 4 m sous l'amarrage. Le spéléologue A se met en place en situation de descente. Il est contre-assuré par un Shunt© sur une corde annexe. Une dernière vérification est apportée avant la chute pour que le spéléologue A ne soit pas emmêlé dans les boucles de corde et ne risque pas de se blesser. Lorsque tout est clair, l'amarrage entre les deux spéléologues est libéré et le mannequin B chute sous le spéléologue A.

Nous avons testé différentes situations sur le descendeur :

- sans mousqueton de freinage ;
- avec mousqueton de freinage :
    - en S avec freinage vertaco ;
    - en O avec freinage vertaco ;
    - avec un mousqueton de frein annexe ;
    - avec un mousqueton freino.

Pour ces tests de rupture d'amarrage, en plus des 2 caméras gopro et des 2 caméras numériques qui ont filmé l'ensemble des tests, nous avons utilisé la caméra fantôme haute vitesse du bureau d'étude de Petzl. Cette caméra permet de filmer à très haute vitesse et donc de pouvoir regarder des mouvements très rapides, au ralenti, avec une très haute qualité d'image.

Une attention toute particulière a été apportée au descendeur du testeur A pour vérifier une éventuelle déformation au niveau des flasques et/ou du mousqueton d'accroche.



Photos 1 et 2. Installation de l'atelier sous les caméras. Tristan et José en attente de la rupture d'amarrage. Photos G.C.

Résultats

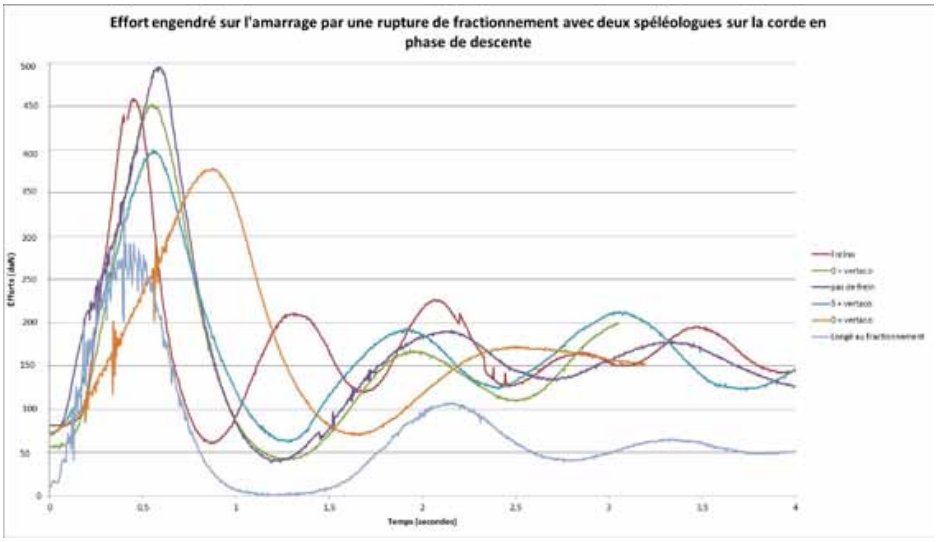
Rupture de fractionnement			
Mesure de la charge appliquée au sommet de la corde après rupture du fractionnement entre les deux spéléologues			
Testeur	**Type de freinage**	**Valeurs maximales (daN)**	**Observation du descendeur après la chute**
Testeur 2 (71 kg)	Vertaco	440	un peu tordu en charge mais reprend sa position sans charge
Testeur 1 (56 kg)	Mousqueton de frein annexe, symétrique (omni) et placé devant le descendeur	450	un peu tordu en charge mais reprend sa position sans charge
Testeur 5 (82 kg)	Mousqueton freino	500	flasque mobile très légèrement pliée
Testeur 4 (73 kg)	Vertaco	mesure non enregistrée	RAS
Testeur 1 (56 kg)	0 + vertaco	450	RAS
Testeur 6 (?)	Pas de mousqueton de frein	500	corde coincée entre les flasques, du côté du mousqueton, libérée sans la charge
Testeur 2 (71 kg)	S + vertaco avec clef par devant	mesure non enregistrée	corde tonchée après 7 chutes du mannequin
Testeur 2 (71 kg)	0 + vertaco avec demi clef + clef	370	corde légèrement écrasée au croisement de la corde qui vient d'en haut et de la clef
Testeur 7 (94 kg)	Longé sur le fractionnement	350	RAS

Tableau 1. Résultats des enregistrements et observations des ruptures d'amarrages.

Pour tous les résultats (tableau 1) , les valeurs sont du même ordre de grandeur, entre 370 daN et 500 daN, quel que que soit le type de freinage et la façon dont la corde est passée dans le descendeur.

Le spéléologue descend sur la portion de corde supérieure

Le descendeur du spéléologue A du dessus, comme nous avons pu le constater sur les images vidéos, se tord légèrement, se plie un peu ; mais il s'agit a priori d'une élasticité du métal puisqu'il revient à sa forme initiale une fois que la charge du mannequin B est retirée. Sur chaque vidéo, la crispation de la main du spéléologue sur la corde du descendeur est notable. Il semble y avoir, bien que les spéléologues A s'attendent à la chute, un réflexe de sécurisation chez les testeurs, ce qui est plutôt rassurant sur nos réflexes de survie. Quoi qu'il en soit, la chute du spéléologue A du dessus est stoppée nette par le blocage de la corde avec le poids du spéléologue B du dessous, même s'il n'y a pas de clef d'arrêt.



Graphique 1. Efforts engendrés par une rupture d'amarrage avec deux spéléologues en phase de descente sur la corde. Différents type de freinage pour le spéléologue A au-dessus de l'amarrage.

Le spéléologue attend à l'amarrage intermédiaire que la corde se libère

Il est à noter que lorsque le spéléologue A est longé sur l'amarrage intermédiaire, en attente de libération de la corde par le spéléologue B du dessous, et que cet amarrage cède, la charge totale appliquée à l'amarrage au-dessus du spéléologue A est inférieure à celle appliquée lorsque ce même spéléologue se trouve en situation de descente au-dessus de l'amarrage qui cède. L'effort engendré monte à peine à 350 daN alors que le testeur avoisine le quintal. Cette situation est peut être due au fait que le spéléologue A est longé, donc, sur une portion de corde dynamique qui absorbe mieux une partie du choc que la corde semi-statique enroulée sur le descendeur. D'autre part, la hauteur de corde au-dessus du spéléologue A est légèrement supérieure, de près de 2,80 m, ce qui diminue le facteur de chute et augmente la longueur de corde qui peut absorber le choc.

Photo 3. Max un peu crispé avant le largage de l'amarrage sur lequel il est longé. Photo J.B.

Conclusions

Bien que le temps de mise en œuvre de ce test soit très long (spéléologue du haut à libérer après la chute, mannequin à remettre en place, etc.) et n'ait pas permis de dupliquer au moins 3 fois chaque configuration, il apparaît tout de même qu'une rupture d'amarrage entre deux spéléologues en train de descendre ne provoque pas, à première vue, d'éclatement du descendeur, ni de pliure violente du descendeur du spéléologue A au-dessus de l'amarrage (qu'il soit en train de descendre ou arrêté sur clef). Le seul problème semble être que le spéléologue A reste coincé sur la corde et ne peut ouvrir son descendeur tant que le spéléologue B du bas n'a pas libéré la charge sur la corde.

Cependant, le choc reste fort puisqu'il peut atteindre une charge allant jusqu'à 500 daN pour deux personnes. Mais même pour cette valeur, les deux spéléologues restent en sécurité sur la corde. Attention tout de même à la qualité des ancrages et de la roche.

Le danger potentiel, suite aux résultats de ces tests, est que le spéléologue du bas ait un mauvais réflexe et lâche la corde… L'environnement n'est pas à négliger non plus vu le choc provoqué par la rupture de l'amarrage et le peu de possibilité de contrôler la course et les mouvements latéraux des deux spéléologues, surtout pour le spéléologue du bas.

Répartition des efforts en fonction des angles d'un double amarrage en Y

Gaël Monvoisin, moniteur EFS, Pierre-Bernard Laussac, instructeur EFS et Jean-Luc Front, moniteur EFS

Contexte

Il est courant d'entendre des spéléologues, discutant de techniques d'équipement, dire que « l'angle maximum d'ouverture d'un amarrage double en Y est de 120°, parce qu'au-delà de cette valeur c'est dangereux ! »

En découlent des souris avec des oreilles de lapin de 2 m de long, un nœud au niveau de la margelle du puits et un passage de nœud à 3 mètres du sol parce que la corde est trop courte pour arriver en bas…

D'autres disent qu'on peut mettre le nœud à plat et qu'on peut avoir un angle de 180°, sans risque et que c'est plus confortable.

Alors Y à 120° ou Y à plat ? Qu'en est-il réellement ? L'EFS a réalisé des mesures pour tenter de répondre à cette question.

Données théoriques

Dans le domaine professionnel de la manutention et du levage, des règles d'utilisation existent pour l'emploi d'élingues dans le port de charges. Une charge soulevée par deux élingues permet de répartir les forces et de contrôler les effets de bascule. Ces règles sont basées sur les principes de calcul mécanique en physique statique. La physique statique prend pour hypothèse que les matériaux sont rigides, homogènes et indéformables.

Le schéma ci-dessous (fig.1) illustre le levage d'une charge de 1 tonne suspendue par 2 brins. Pour les différents angles, l'effort dans chaque brin est noté en Newton (1 daN = 10 N = 1kg environ). On peut remarquer que lorsque l'angle augmente, la force appliquée sur chaque brin augmente, jusqu'à devenir supérieure à celle de la charge elle-même.

Angle entre les 2 brins	Force appliquée sur un brin
45°	541 daN
90°	707 daN
120°	1000 daN
150°	1931 daN
180°	infinie !!

Tableau 1. Lecture du schéma de quelques angles (pour une charge de 1 000 kg):

Ainsi, l'angle de 120° est un cas particulier. La charge est de 1 000 kg et la force appliquée sur chaque brin est de 1 000 daN. Au-delà, la force sur chaque brin est supérieure à la charge totale. De ces valeurs découle une notion discutée parfois en spéléologie qui limite à 120° l'angle entre les deux points d'accroche d'un amarrage double. Voilà l'historique du fameux angle de 120°…

Pour reprendre un peu de physique de base, sur un triangle de force, V est la composante verticale de l'effort, H est la composante horizontale et C la résultante, l'effort combiné dans le brin. En vecteurs (forces orientées), nous avons C = V + H.

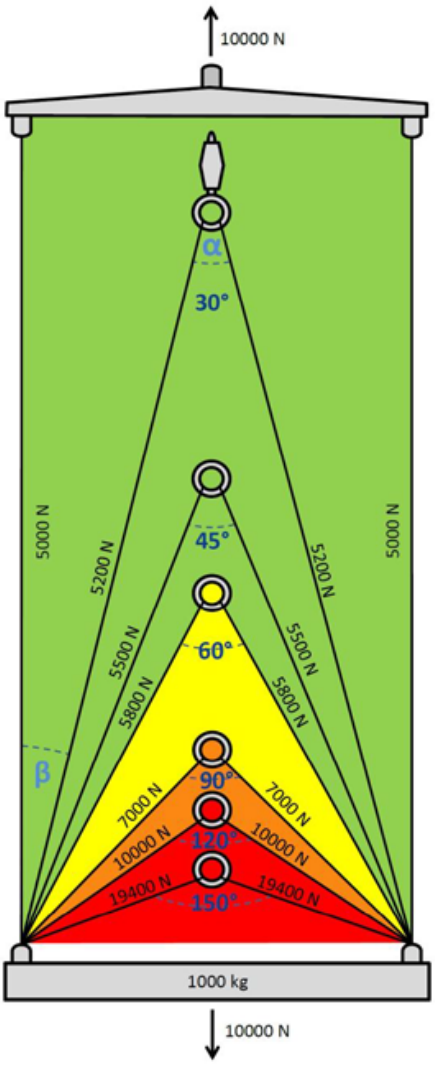


Figure 1. Force théorique appliqué à chaque brin lorsque l'angle α augmente (D'après l'Institut de Prévention de la Construction, fiche Toolbox, Eq-003 V01).

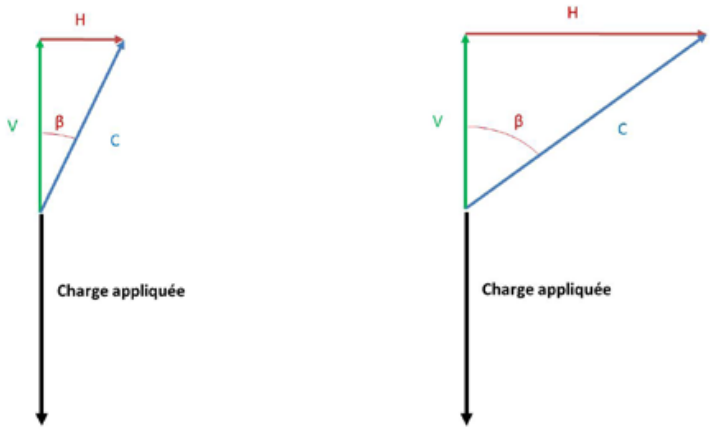


Figure 2. Triangles des forces avec angle faible ou un angle important.

Dans le cas d'un amarrage en Y, sur deux points de même hauteur, supportant une charge centrée, nous obtenons :

- V est l'effort vertical. Il est constant et repris également des deux côtés. Donc chaque brin du Y reprend la moitié de l'effort de la charge appliquée. V est la force de cisaillement ;
- H est l'effort horizontal. Il varie en fonction de l'angle β du Y (voir figure 1). Comme le montre le triangle des forces, plus cet angle augmente, plus H est grand. H est la force d'arrachement ;
- C est l'effort combiné. C'est l'effort dans le brin. C est la résultante des vecteurs V + H, donc plus l'angle est grand, plus H augmente et plus C est grand.

La formule mathématique qui contrôle cette règle est : où F est la force correspondante à la résistance utile du brin (composante C du triangle des forces), P est le poids de la charge et K est un coefficient proportionnel à l'angle d'écartement α tel que : avec α l'angle entre les deux brins de l'élingue et α/2 = β. Pour un angle α de 60°, la force sur chaque brin est de 577 kg. Pour un angle de 120°, chaque brin supporte 1000 kg (soit l'équivalent de la charge totale). Pour un angle de 180°, le cosinus d'un angle de 90° tend vers 0 et donc la force à chaque brin tend vers l'infini (figure 3). Nous en profitons pour remercier ici Pythagore pour son aide précieuse dans ces explications.

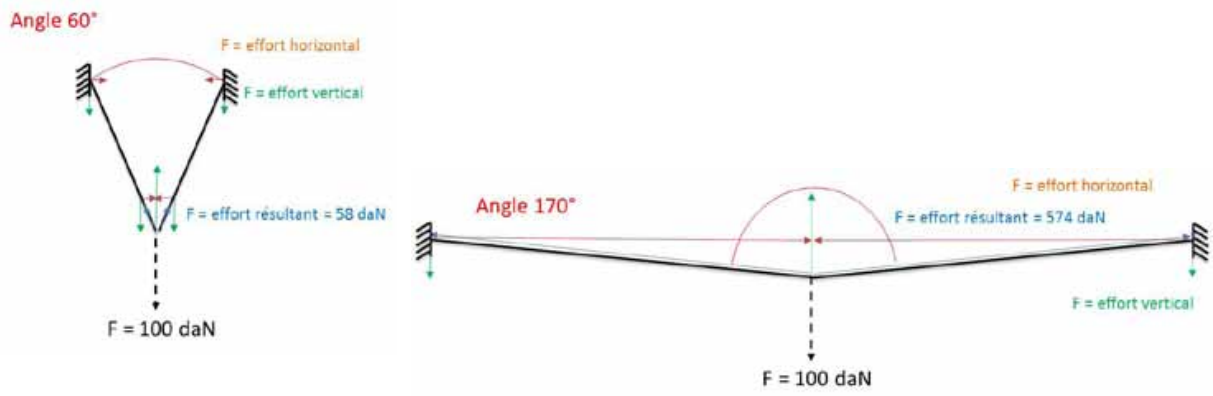


Figure 3. Décomposition des vecteurs des forces appliqués aux points d'attache et au niveau de la charge.

Ces notions sont valables dans le cas d'élingues mais qu'en est-il des cordes utilisées en spéléologie ?

Protocole

Nous avons mesuré les forces sur les amarrages, dans différentes configurations. Cette campagne de tests a été réalisée par l'EFS, au centre V-Axess, dans le cadre du partenariat entre Petzl et l'EFS, au mois de janvier 2015.

Le double amarrage en Y est installé avec un capteur dynamométrique au niveau de chaque oreille du nœud, sur l'ancrage (fig. 4). La force appliquée sur la corde est mesurée à vide pour chaque angle, puis avec une charge (poids du testeur). Les valeurs sont mesurées en statique pour chaque testeur et mises en rapport avec sa masse. Les essais sont répétés en faisant varier l'angle du Y, puis en décalant la position du nœud vers l'un des deux capteurs.

Numéro du test	Angle α
Test 1	45°
Test 2	60°
Test 3	80°
Test 4	120°
Test 5	180°

Tableau 2. Numéro du test et angle du Y souhaité entre les deux brins.

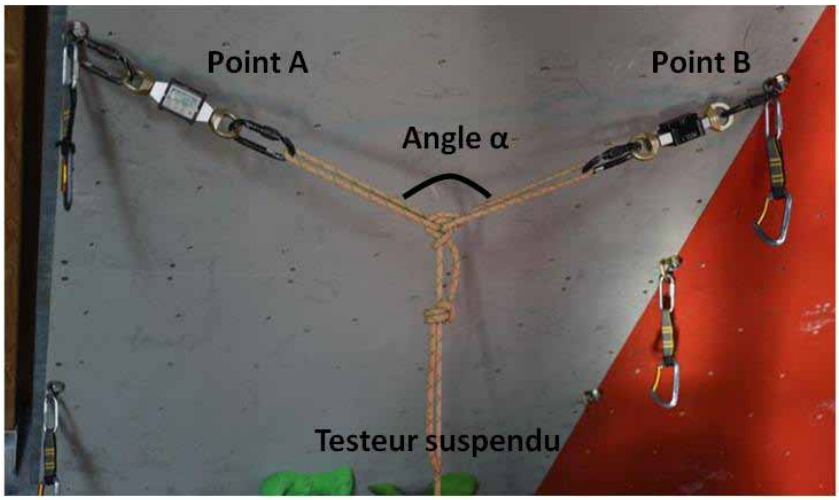


Figure 4. Installation du Y avec un capteur dynamométrique sur chaque oreille du nœud de chaise double. Les mesures sont prises en statique, à vide puis avec un testeur pendu sur la corde. Photo PBL.

Figure 5. L'équipe des testeurs presque au complet. Anthony en charge sur la corde et de gauche à droite : David, Vanessa, Chris, José, Laura, P-B. et Tristan.

Mesures

Test 1 : Angle α = 45°

N° testeur (masse en kg)	Force appliquée au point A (daN)	Force appliquée au point B (daN)	Force totale théorique (daN)
Testeur 1 (56 kg)	30	30	30
Testeur 2 (71 kg)	39	39	38
Testeur 3 (62 kg)	33	33	33
Testeur 4 (73 kg)	39	39	39
Testeur 5 (82 kg)	44	46	44

Tableau 3. Résultats de l'essai à 45°.

Figure 6. Angle 45° à vide et sous charge.

L'angle formé à vide et sous charge est quasiment le même à quelques centimètres près. La force appliquée sur chaque brin est d'environ 53 à 55 % de la charge totale.

Test 2 : Angle α = 60°

N° testeur (masse en kg)	Force appliquée au point A (daN)	Force appliquée au point B (daN)	Force totale théorique (daN)
Testeur 1 (56 kg)	32	32	32
Testeur 2 (71 kg)	42	42	41
Testeur 3 (62 kg)	36	36	36
Testeur 4 (73 kg)	42	42	42
Testeur 5 (82 kg)	48	48	47

Tableau 4. Résultats de l'essai à 60°.

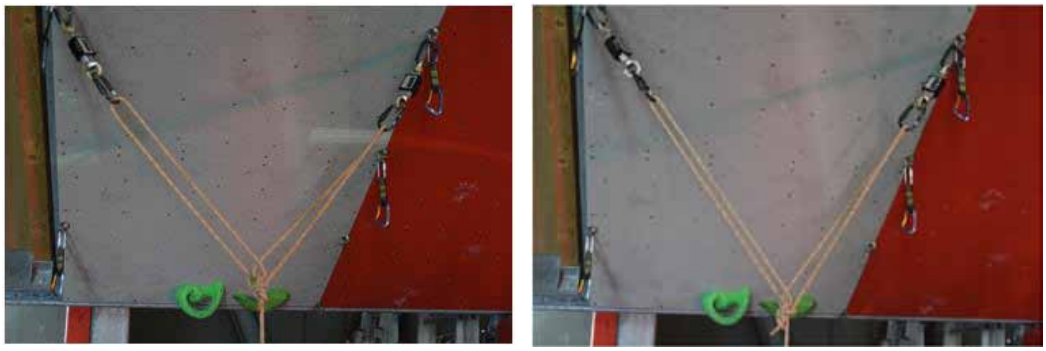


Figure 7. Angle 60° à vide et sous charge.

L'angle formé sous charge n'est pas significativement différent de celui à vide. La force appliquée sur chaque brin est équivalente à environ 57 à 60 % de la charge totale.

Test 3 : Angle α = 80°

N° testeur (masse en kg)	Force appliquée au point A (daN)	Force appliquée au point B (daN)	Force totale théorique (daN)
Testeur 1 (56 kg)	36	36	37
Testeur 2 (71 kg)	42	42	47
Testeur 3 (62 kg)	36	36	41
Testeur 4 (73 kg)	42	42	48
Testeur 5 (82 kg)	48	48	54

Tableau 5. Résultats de l'essai à 80°.

Figure 8. Angle 80° à vide et sous charge.

La force mesurée sur chaque point d'ancrage est légèrement inférieure à la charge théorique. Elle est équivalente à environ 58 à 65 % de la charge totale. L'angle sous charge commence à se fermer.

Test 4 : Angle α = 120°

N° testeur (masse en kg)	Force appliquée au point A (daN)	Force appliquée au point B (daN)	Force totale théorique (daN)
Testeur 1 (56 kg)	55	54	56
Testeur 2 (71 kg)	71	71	71
Testeur 3 (62 kg)	58	58	62
Testeur 4 (73 kg)	68	68	73
Testeur 5 (82 kg)	76	76	82

Tableau 6. Résultats de l'essai à 120°.

Figure 9. Angle 120° à vide et sous charge.

La force appliquée sur chaque point est égale à la masse du testeur. L'angle sous charge est plus fermé. Après la mise sous tension, le nœud descend de 20 cm environ.

Test 5 : Angle plat ou angle α = 180°

N° testeur (masse en kg)	Force appliquée au point A (daN)	Force appliquée au point B (daN)	Force totale théorique (daN)
Testeur 1 (56 kg)	75	71	3207
Testeur 2 (71 kg)	92	89	4066
Testeur 3 (62 kg)	79	76	3551
Testeur 4 (73 kg)	93	88	4181
Testeur 5 (82 kg)	103	99	4696

Tableau 7. Résultats de l'essai à 180°.

Ici le calcul pour un angle proche de 180° (prenons α = 179°) donne . La valeur théorique est immense par rapport à la valeur mesurée.

Figure 10. Angle 180° à vide et sous charge.

La force appliquée sur chaque brin est supérieure à la masse du testeur d'environ 30 %. L'angle installé à plat à vide devient proche de 135° sous charge.

Test 6 : Décalage du nœud vers le point B

Nous avons ensuite décalé le nœud en le décentrant et en mesurant les forces en fonction de sa position, pour voir comment sa position influait sur les valeurs. L'angle de départ est de 80°. Le testeur 3 était sur la corde.

Position du nœud	**charge point A (daN)**	**charge point B (daN)**	**Masse testeur (kg)**
Symétrique	40	40	62
Disymétrique, 2/3 - 1/3	32	50	
Disymétrique totalement décalé	14	56	

Tableau 8. Résultats des essais en déplaçant le nœud.

Figure 11. Nœud décalé de plus en plus vers le point B.

Résultats

Quelque soit l'angle, lorsque le Y est au milieu du double amarrage, les charges appliquées de chaque côté sont équivalentes.

Test N°	Angle à vide	Effort Maxi daN dans un brin	Effort Théorique daN
1	45°	45 (55% de la charge totale)	44
2	60°	48 (58% de la charge totale)	47
3	80°	48 (58% de la charge totale)	54
4	120°	76 (93% de la charge totale)	82
5	180°	100 (122% de la charge totale)	4696 (1)

(1) :Calcul réalisé avec un angle de 179° (180° = effort théorique infini)

Tableau 9. Synthèse des mesures pour le testeur de 82kg.

Pour des angles de 45° à 120° le calcul théorique est en phase avec les mesures. A partir de 80° la force sur chaque oreille augmente de 15 à 20% de plus que la moitié de la charge totale. Pour un angle de 120°, la force sur chaque oreille est équivalente au poids du spéléologue. Au-delà d'un angle de 120°, la force appliquée sur chaque point d'ancrage devient supérieure à la charge totale. Après la mise sous tension, le nœud descend et l'angle se ferme un peu mais pas assez pour que la charge soit significativement diminuée.

Avec un angle de 180° (lorsque le double amarrage est à vide), la force mesurée (une fois sous tension) dépasse d'un tiers le poids du spéléologue sur chaque brin, soit près de 2 fois et demi la charge totale. Nous retrouvons un angle sous charge proche de 135°. Le calcul théorique par contre est 44 fois supérieur aux mesures.

Analyse

Du fait de l'élasticité de la corde, le nœud réalisé à 180° devient, sous charge, proche de 135° (voir figure 10). C'est une différence très importante et qui justifie pour bonne partie toutes ces mesures.

Avec l'élasticité des cordes de spéléologie et les nœuds réalisés, le double amarrage ne reste pas rigide. Le nœud se tend, le poids du spéléologue sur la corde ferme l'angle qui ne reste pas à plat. Alors que l'angle augmente, la différence entre les cordes et les élingues rigides s'accentue. C'est la différence entre un système statique et un système dynamique.

Si nous considérons que la référence est la corde (car nous ne sommes pas en mesure de quantifier la résistance de nos amarrages dans le calcaire) alors les tests réalisés, quelque soit l'angle, sont satisfaisants. En effet, dans les tests réalisés la valeur maximum (avec un testeur de 82 kg) a été de 103 kg. La marge de sécurité est large, ce qu'avaient déjà montré les tests du SSF de 1994 et 1996.

Certes, plus l'angle est plat et plus l'amarrage travaille à l'arrachement, plutôt qu'en cisaillement vertical, comme le montrent les calculs théoriques de répartition des vecteurs des figures 2 et 3, mais au vu des valeurs, cela est tout à fait satisfaisant.

En décalant le nœud du centre vers le point B, la charge se déplace également vers le point B. L'angle est proche de 80° lorsque le nœud est au centre. La charge appliquée à chaque oreille du nœud est supérieure à la moitié du poids du spéléologue, comme nous l'avons déjà mesuré précédemment. De ce fait, la charge totale est légèrement supérieure au poids du spéléologue mais les valeurs ne sont pas significatives. Pour simplifier, dans le cas d'un amarrage asymétrique, les forces mesurées sur chaque point ne sont pas identiques. Le point le plus à la verticale de la charge « porte » plus la charge que le second. Cela est en phase avec la théorie.

Lorsque le nœud est totalement décalé au point B, la valeur se rapproche de celle d'un amarrage simple et de la masse du spéléologue. Le point A ne reçoit presque plus de charge. Moins d'un quart du poids du spéléologue.

Conclusions

En conclusion, quelque soit l'angle et la position du nœud du double amarrage en Y :

- La marge de sécurité est large ;
- Placer le nœud le plus haut possible, en tendant le double amarrage est souvent un gain en confort, il ne faut pas s'en priver, le confort est aussi un gage de sécurité.
- Pour un angle de 80° et le nœud centré, la force sur chaque amarrage est la moitié du poids du spéléo

- Pour un angle de 120° et le nœud centré, la force sur chaque amarrage est le poids du spéléo
- Pour un angle de 180° et le nœud centré, la force sur chaque amarrage est une fois et demie le poids du spéléo.

  Remarque : En charge, l'angle du nœud va se positionner à un angle qui approche sensiblement un écart de 135°
- Lorsque la roche est de qualité médiocre, il est préférable de réduire l'angle en allongeant les oreilles pour moins solliciter les amarrages.

Évidemment, toutes les autres règles sur l'équipement restent bien entendu à appliquer.

Prospectives de travail

Les tests d'angles ont été réalisés avec des cordes de 9 mm. Il serait intéressant de réaliser ces tests avec des cordes de diamètres inférieurs pour estimer l'effet de l'élasticité. Il serait également très intéressant de reproduire ces tests avec des répartiteurs en dyneema ou en sangle. En effet, ces deux matériaux sont plus statiques et il est possible d'obtenir des mesures sensiblement différentes, qui se rapprocheront peut être de ce que nous pouvons rencontrer dans les cas des élingues.

Bibliographie commune aux 4 articles

- Manuel technique de l'EFS, 2ème edition, 2013, 256 p.
- Accessoires de levage. Mémento de l'élingueur. INRS. 2014. 76p. site internet : www.inrs.fr
- Pour ne pas passer à deux doigts, Rémy Limagne, Spelunca n°118, pages 44-45, 2010
- La rupture de fractionnement en cours de descente, Spelunca n°66, pages 41-42, G.E.T. ,1997
- Le nœud en Y, Info-EFS n°32, pages 44 à 47, G.E.T. ,1997
- Le double amarrage en question. Rémy Limagne, Spelunca N°62, juin 1996, 5 p.
- Manuel technique de l'Ecole Française de Spéléologie. Initiateur. Mai 1996. 78 p.
- Essais mécaniques en spéléo-secours. Campagnes d'essai 1994 et 1996 du Spéléo Secours Français sur Tyrolienne. Tests réalisés chez Petzl.
- Institut de prévention de la construction, fiche Toolbox, Eq-003 V01.
- Utilisation d'élingues textiles : Fiche de prévention Eq 003-V01 Navb-Cnac de l'institut de la prévention de la construction, 6p. site internet : **cnac**.constructiv.be