RETOURS D'EXPÉRIENCE

COMMISSION DES RELATIONS ET DES EXPÉDITIONS INTERNATIONALES

Par : **Denis Langlois, Philippe Auriol, Pierre Boudinet, Samuel Gerente, Florence Guillot, Rémi Limagne, Sarah Monnin, Félix Nilius, Véronique Olivier, Pierre Rimbert et Christophe Rognon.**

Mise en page by Véro.

Cordes de Ø 6 mm :

Tests de RÉSISTANCE

Ces tests ont été réalisés du vendredi 28 février au dimanche 2 mars 2025 lors d'un week-end RetEx de la CREI par un groupe motivé de membres de cette commission afin d'avancer sur la compréhension de la résistance des cordes fines grâce à des tests en traction lente, chocs ou autres.

Ils font suite à ceux qui ont eu lieu en juillet 2024 pendant le stage initiateur & perfectionnement de Montrond-le-Château 2024 par le groupe de spéléologues en formation « techniques légères » qui avaient donné lieu à une première publication.
Des expérimentations complémentaires réalisées en fin d'année 2024 ont soulevé de nouvelles interrogations, qui ont conduit à mener des réflexions et à réalisé cette nouvelle campagne d'essais.

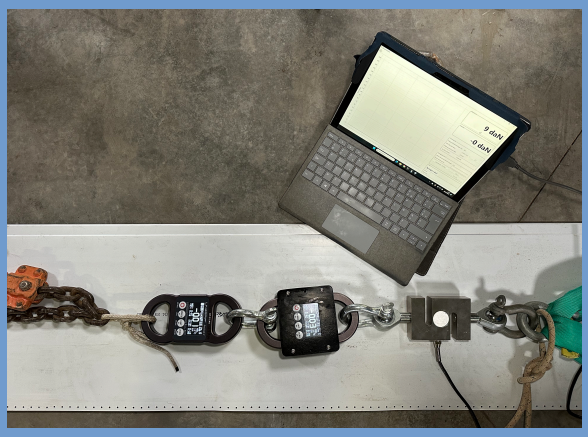
PROBLÉMATIQUES ET OBJECTIFS

Au préalable, les méthodes et les principes suivants sont utilisés :
• Tester des situations qui arrivent dans la réalité de la pratique.
• Tester des matériels utilisés par les spéléos ou qui le seront.
• Tester au plus proche de la réalité de la pratique.
• Tester en respectant les préconisations d'emploi des notices des fabricants.
• Conserver toutes les données brutes des tests (photos, valeurs et graphiques, etc.).
• Partager les données natives des tests entre tous les participants.
• Publier avec les données comme preuves, tenir compte de l'état de la question, citer la bibliographie.
•Conclure chaque test par une ou deux phrases présentant les résultats intéressants et les éventuelles suites à donner à l'expérimentation.

Nos objectifs dans le cadre de cette session de tests étaient axés sur :
• L'existence d'une différence de résistance entre corde sèche et mouillée.
• L'existence d'une différence de résistance entre corde sale et propre.
• La tenue du bloqueur de poing et la comparaison avec les autres cordes.
• Acquérir des données à propos des versions v3 et v4 de la corde Slick-Line (Berger) et sur la Caving Line (Petzl).
• Des tests de résistance à l'abrasion entre des cordes fines hyperstatiques et des cordes semi-statiques.
• Comprendre la résistance et la réponse des cordes fines hyperstatiques lors de chocs/chutes tels qu'il peut advenir en progression spéléo.

MOYENS MATÉRIELS

Christophe Rognon – président du Comité départemental de spéléologie du Doubs et président de la Commission des relations et des expéditions internationales de la Fédération française de spéléologie – a mis à disposition ses locaux professionnels, dont un bâtiment qui comporte une structure métallique imposante soutenant un pont roulant de 5 tonnes.
Pour l'ensemble des tests, les amarrages sont très statiques : poutre métallique de grosse section, plaquette soudée sur poutre, crochet du pont roulant, élingue, etc. Ces conditions sont bien évidemment très défavorisantes comparées à celles de notre pratique, mais l'hyperstaticité induit que des tests avec des personnes pourraient les exposer à des blessures. Il faut donc comprendre les résultats obtenus, comme ceux de situations pires que celles de nos usages.
Nous avons à notre disposition 3 dynamomètres :
Deux linescale-3i (Linegrip) dont l'un prêté par l'Union Spéléologique de l'Agglomération Nancéienne (USAN) ; une cellule de charge en S couplée au boîtier d'acquisition QLB9 (QlSensor).
Ces trois dynamomètres sont contrôlés avant les tests, afin de les étalonner à 0 en l'absence de charge, puis de vérifier l'homogénéité des valeurs obtenues après l'application d'une force de 10 kN.



Les trois dynamomètres sont étalonnés à 0 en absence de charge.

Puis après application d'une force de traction de 10 kN (1000 daN).

Tableau récapitulatif des cordes de faible diamètre utilisé lors des tests

Désignation	Fabricant	Prix/mètre	Résistance (Donnée fabricant)	Résistance au nœud de 8 (Donnée fabricant)	Composition Gaine	Âme
Slick-Line Std ou v1	Berger / CE4Y	2,90 €	20 kN	11 kN	Vectran 1/3 Polyester 2/3	UHMPE*
Slick-Line v2	Berger / CE4Y	Non communiqué	-	-	Vectran 1/3 UHMPE 1/3 Polyester 1/3	UHMPE
Slick-Line v3	Berger / CE4Y	3,00 €	-	-	Aramide 1/2 UHMPE 1/2	UHMPE
Slick-Line v4	Berger / CE4Y	Non communiqué	-	-	Vectran 1/2 UHMPE 1/2	UHMPE
Caving Line	Petzl	2,00 €	14 kN	8 kN	Polyamide 1/2 Polyester 1/2	UHMPE
Pure Dynemaa	Béal	4,50 €	11,7 kN	-	UHMPE	UHMPE

** UHMPE : polyéthylène de masse molaire très élevée avec une excellente tenue à l'abrasion*

1 kN = 100 daN

Les différentes versions de « Slick-Line » émanent d'une « collaboration » avec le fabriquant dans le but d'améliorer les performances (résistance à la rupture, résistance à l'abrasion de la gaine, ...) par rapport à la version standard ou v1 qui est la version actuellement commercialisée. L'objectif final est de proposer la corde la plus aboutie tout en préservant un prix de vente raisonnable.

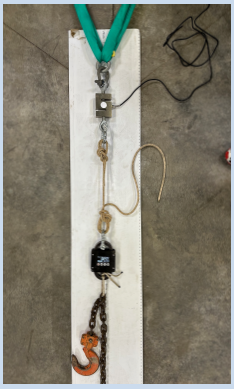
TEST DE TRACTION LENTE

Protocole
Ces tests sont effectués en appliquant une traction lente grâce à un palan à levier. L'échantillon de corde à tester est connecté d'un côté au palan via un dynamomètre et de l'autre côté, à un point fixe via un second dynamomètre.
L'intérêt des deux dynamomètres est de doubler la mesure et de vérifier que les valeurs obtenues sur les deux appareils sont concordantes.

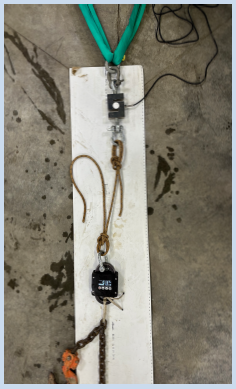
Préparation des tests de traction lente avec mise en place du protocole standardisé.

C1 — Objectif : différence entre corde sèche et corde mouillée

Type de corde	Béal Antipode ø 8 mm 2013
État de la corde	Usagé, bon état visuel
Premier nœud	Chaise double
Second nœud	Chaise double
Rupture totale	Corde sèche test C1a1 : 736 daN Corde sèche test C1a2 : 803 daN Corde mouillée test C1b1 : 662 daN Corde mouillée test C1b2 : 654 daN



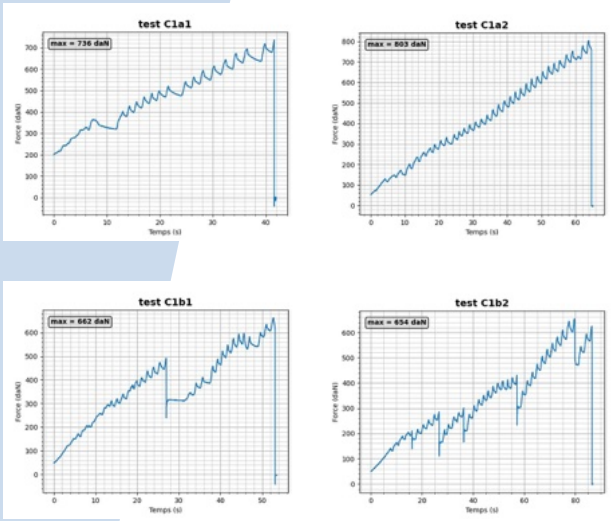
Corde sèche



Corde mouillée

La corde Béal Antipode ø 8 mm mouillée est moins résistante à la traction lente que son équivalent sec (-14 %).

Dynamométrie



L'INFO EN +

La rupture de la gaine et de l'âme a lieu en simultanée à la sortie du nœud de chaise double, c'est-à-dire entre la base du nœud et le brin de traction.

Les échantillons de corde « mouillée » ont trempé 15 minutes dans l'eau avant le test.
Moyenne des résistances à la traction lente :
- sur des cordes sèches : 769 daN,
- sur des cordes mouillées : 658 daN.

On observe les ruptures de corde.

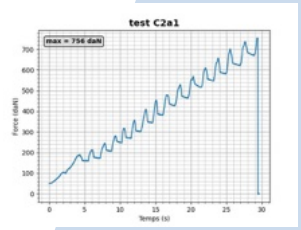
Denis Langlois enregistre les tests définis de manière collaborative avec l'équipe de la CREI impliquée dans le projet.

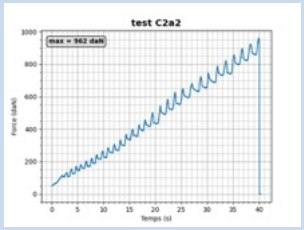
C2

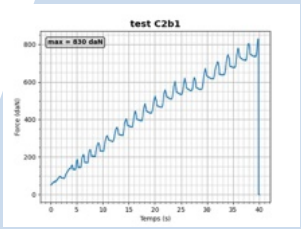
Objectif : Différence entre corde sèche et corde mouillée

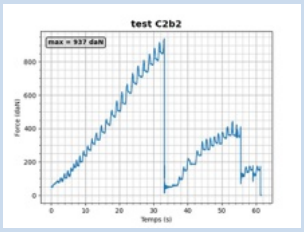
Type de corde	Slick-Line Std ø 6 mm de 07/2024
État de la corde	< 10 sorties, très bon état visuel
Premier nœud	Chaise double
Second nœud	Chaise double
Rupture totale	Corde sèche test C2a1 : 756 daN Corde sèche test C2a2 : 962 daN Corde mouillée test C2b1 : 830 daN Corde mouillée test C2b2 : 937 daN Corde mouillée test C2b3 : 910 daN

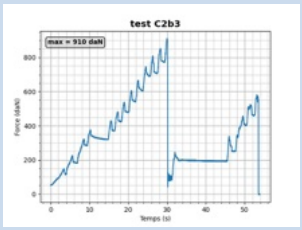
Dynamométrie

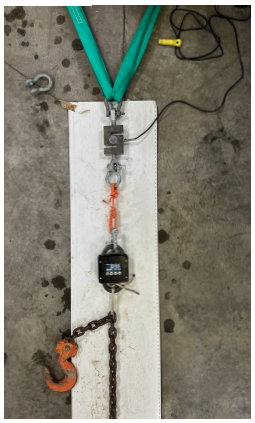




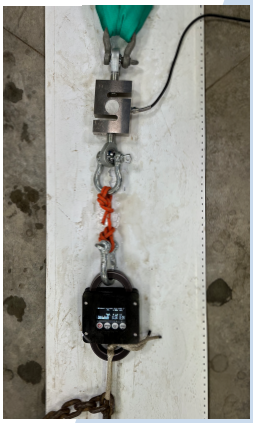








Corde sèche



Corde mouillée

La corde Slick-Line Std ø 6 mm mouillée ou sèche présente une résistance à la traction lente presque équivalente.

L'INFO EN +

La rupture de la gaine et de l'âme a lieu en simultanée à la sortie du nœud de chaise double, c'est-à-dire entre la base du nœud et le brin de traction.

Les échantillons de corde « mouillée » ont trempé 15 minutes dans l'eau préalablement au test ; sauf dans le cas du test C2b3 pour lequel l'échantillon a trempé pendant 24 heures.
L'échantillon utilisé pour le test C2a1 correspond à l'extrémité de la corde qui a été utilisée directement au cours de sa vie dans des amarrages naturels.
Moyenne des résistances à la traction lente :

- sur des cordes sèches : 859 daN,
- sur des cordes mouillées : 892 daN.

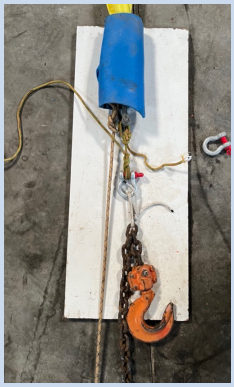
Felix Nilius s'est aussi occupé particulièrement des tests d'abrasion.

Pierre Rimbert et Sarah Monnin aux tests de traction lente.

B5B6B7

Objectif : résistance à la traction lente

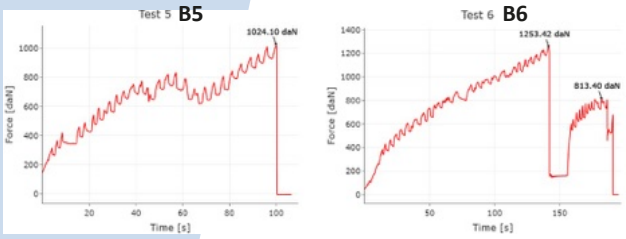
Type de corde	Slick-Line V2 ø 6 mm
État de la corde	mouillée, 3 sorties pour les tests B5 et B6 et neuve pour le B7
Premier nœud	Chaise double
Second nœud	Chaise double
Rupture totale	Test B5 : 1024 daN Test B6 : 1253 daN Test B7 : 1244 daN



Corde mouillée

La corde Slick-Line v2 ø 6 mm mouillée, neuve ou presque, présente une résistance à la traction lente de plus de 1000 daN (moyenne 1174 daN) avec des nœuds de chaise double. Ces valeurs dépassent largement celles des tractions appliquées lors de la progression en spéléo.

Dynamométrie



L'INFO EN +

Lors du test B5, on observe un léger glissement autour des 750 daN qui est causé par le serrage d'une oreille du nœud de chaise double autour de la manille.
Lors du test B6, la rupture de la gaine a lieu à 1253 daN, la tension redescend vers 150 daN, puis rupture de l'âme à 813 daN.
Dans le cas du test B7, on observe un glissement vers 1100 daN qui fait redescendre la tension autour de 400 daN (serrage d'une oreille du nœud sur la manille), puis rupture de la gaine à la sortie du nœud à 1244 daN, la tension descend alors vers 140 daN, enfin rupture de l'âme à 686 daN.

Christophe Rognon surveille toutes les opérations.

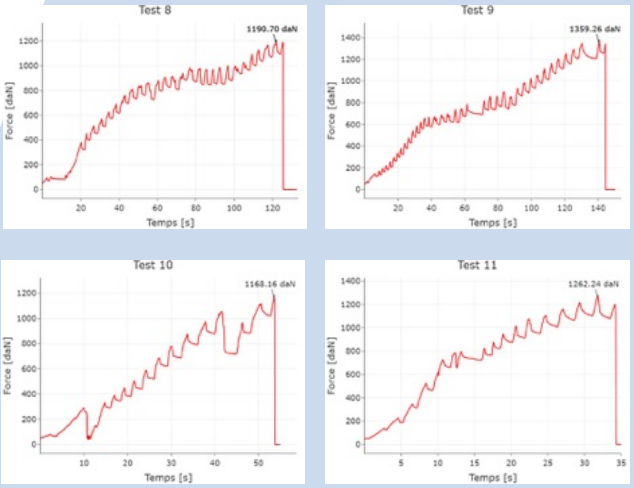
Pierre Boudinet est aux tests de chute, réponse indicielle.

B8B9B10B11 Objectif : résistance à la traction lente

Type de corde	Slick-Line V3 ø 6 mm
État de la corde	3 sorties, mouillée
Premier nœud	Chaise double
Second nœud	Chaise double pour B8 et B9, chaise simple yosémité pour B10 et B11
Rupture totale	Test B8 : 1190 daN Test B9 : 1359 daN Test B10 : 1168 daN Test B11 : 1262 daN

Corde mouillée

Dynamométrie



La corde Slick-Line v3 ø 6 mm mouillée présente une résistance à la traction lente de plus de 1190 daN (moyenne 1275 daN) avec des nœuds de chaise double et de plus de 1168 daN avec des nœuds de chaise simple.
La corde Slick-Line v3 offre une résistance supérieure à la Slick-Line v2 (de l'ordre de +10 %).

L'INFO EN +

Les ruptures ont lieu en sortie du nœud sur le brin de traction pour les nœuds de chaise double (B8 et B9) et dans le nœud de chaise simple pour les tests B10 et B11.
Dans le cas du test B8, on observe un glissement similaire au test B5 autour de 870 daN. Dans le cas du test B9, ce glissement se produit autour des 700 daN.

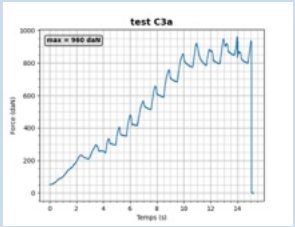
C3

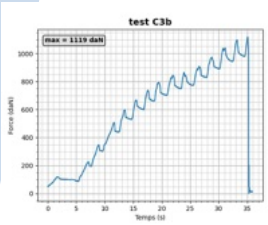
Objectif : résistance à la traction corde sale et usagée

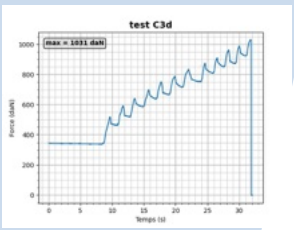
Type de corde	Slick-Line V3 ø 6 mm
État de la corde	250 utilisations (montées et descentes), sans lavage, corde sèche
Premier nœud	Chaise double
Second nœud	Chaise double
Rupture totale	Test C3a : 960 daN Test C3b : 1119 daN Test C3c : 978 daN Test C3d : 1031 daN Test C3e : 1026 daN

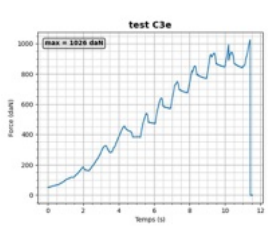
Corde sèche

Dynamométrie









La corde Slick-Line v3 ø 6 mm sale et ayant subi 250 cycles de montée/descente conserve une résistance à la traction de ≈1020 daN, mais affiche une perte d'environ 20 % par rapport à une corde neuve.

L'INFO EN +

La rupture a lieu systématiquement à la base du nœud.
Les tests C3a et C3c concernent des échantillons prélevés aux deux extrémités de la corde.
Les autres tests utilisés sont des échantillons prélevés au milieu de la corde.

Christophe Rognon a prêté son hangar et un pont pour faciliter la mise en place des différents tests.

C5

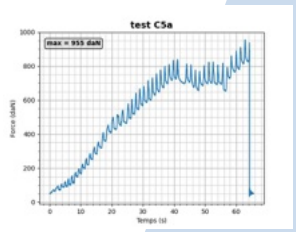
Objectif : résistance à la traction

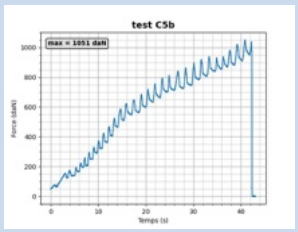
Type de corde	Slick-Line V4 ø 6 mm
État de la corde	Neuve, peu utilisée
Premier nœud	Chaise double pour C5a à C5c, chaise simple yosémité pour C5d à C5f
Second nœud	Chaise double pour C5a à C5c, chaise simple yosémité pour C5d à C5f
Rupture totale	Test C5a : 955 daN Test C5b : 1051 daN Test C5c : 1014 daN Test C5d : 1009 daN Test C5e : 866 daN Test C5f : 837 daN

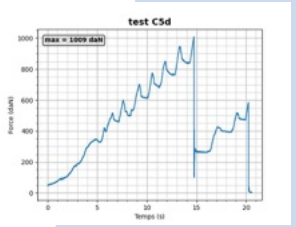
C5a1

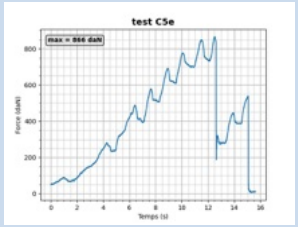
C5a2

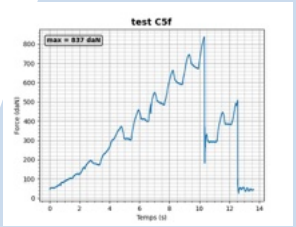
C5d











La corde Slick-Line v4 ø 6 mm Semble moins résistante à la traction lente que la version v3 (-20%) ou v2 (-14%).

L'INFO EN +

La rupture a lieu systématiquement à la base du nœud.
La moyenne de la force atteinte au moment de la rupture est de ≈1007 daN avec des nœuds de chaise double à chaque extrémité et de ≈904 daN avec deux nœuds de chaise simple.
Les nœuds de chaise simple conduisent à une perte de l'ordre de 10 % de la résistance par rapport à des nœuds de chaise double.

Séquence nostalgie pour Rémy Limagne avec ses vieux amarrages et cordes, prêts pour le rebut.

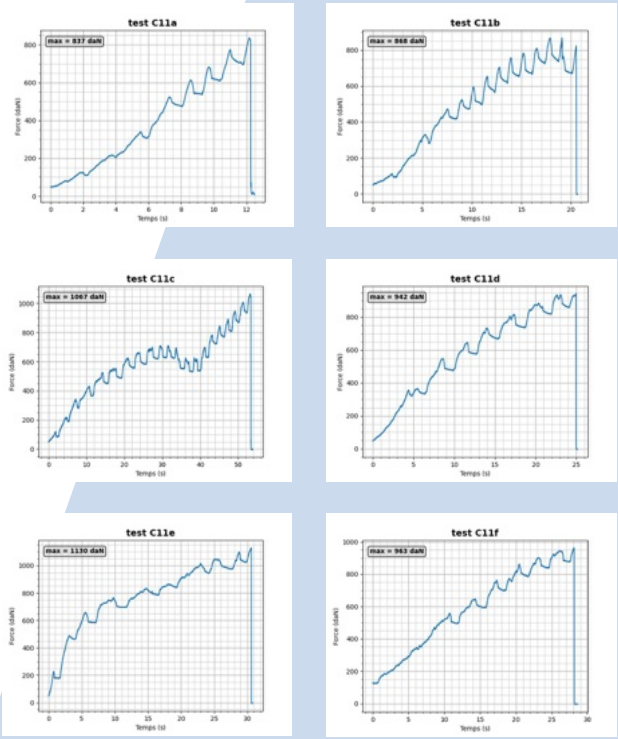
C11

Objectif : résistance à la traction

Type de corde	Slick-Line V4 ø 6 mm
État de la corde	Corde utilisée 10 sorties
Premier nœud	Chaise double
Second nœud	Chaise double
Rupture totale	Test C11a : 837 daN Test C11b : 868 daN Test C11c : 1067 daN Test C11d : 942 daN Test C11e : 1130 daN Test C11f : 963 daN

Corde sèche

Dynamométrie



La corde Slick-Line v4 utilisée présente une valeur maximale de rupture moindre que la corde neuve (881 vs 1010 daN lors des tests C5 soit -13 %, 881 daN est la moyenne des 3 tests C11a, C11b et C11d pour lesquels la corde n'a pas été pré-étirée).

Pour les deux cordes testées, ce test semble mettre en évidence que lorsqu'elles sont pré-étirées, elles résistent avant de rompre à des forces plus grandes que celles qu'on mesure avec les mêmes cordes non pré-étirées (1053 vs 881 daN soit +20 %). Ce phénomène a été vérifié sur une corde Béal Spelenium ø 9 mm réformée de plus de 10 ans en suivant le même protocole lors des tests C11g et C11h. Ces derniers indiquent une rupture en traction lente à 1091 daN et 1143 daN.Elles sont plus résistantes que sans pré étirement (996 daN et 979 daN - cf. tests C8c et C8d), soit +14 % de résistance.

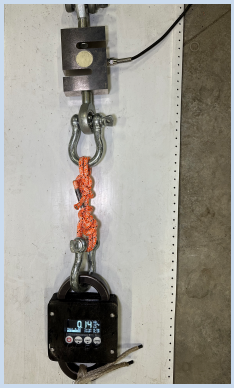
L'INFO EN +

La rupture a lieu systématiquement à la sortie du nœud sur le brin de traction.
La corde utilisée pour le test C11c est un échantillon qui a servi préalablement lors des tests C7 et C10. Par conséquent, des tests supplémentaires (C11e et C11f) sont réalisés selon le protocole suivant :
•Phase de pré-étirage : mise sous tension à 600 daN de l'échantillon pendant 10 secondes.
•Phase de repos : tension relâchée pendant 5 minutes.
Ce cycle est réalisé deux fois, avant le test de rupture proprement dit.

C8 Objectif : résistance à la traction, comparaison de différentes cordes

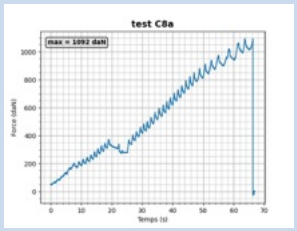
Type et État de la corde	Test C8a et C8b : Courant ø 10 mm, 2017, apparence correcte, peu utilisée Test C8c et C8d : Béal Spelenium ø 9 mm, réformée, > 10 ans, très bon état Test C8e et C8f : Béal Spelenium ø 8,5 mm unicore, 07/2023, très bon état Test C8g et C8h : Petzl Segment ø 8 mm neuve Test C8i et C8j : Petzl Caving Line ø 7 mm neuve
Premier nœud	Chaise double
Second nœud	Chaise double
Rupture totale	Test C8a (Courant ø 10 mm) : 1092 daN Test C8b (Courant ø 10 mm) : 1185 daN Test C8c (Béal ø 9 mm) : 996 daN Test C8d (Béal ø 9 mm) : 979 daN Test C8e (Béal ø 8,5 mm) : 1044 daN Test C8f (Béal ø 8,5 mm): 977 daN Test C8g (Petzl ø 8 mm) : 1240 daN Test C8h (Petzl ø 8 mm) : 1251 daN Test C8i (Petzl ø 7 mm) : 883 daN Test C8j (Petzl ø 7 mm) : 936 daN

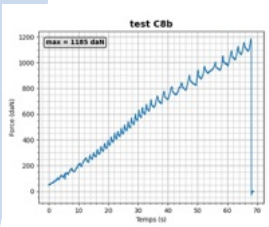
Corde C8a

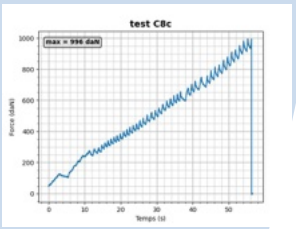


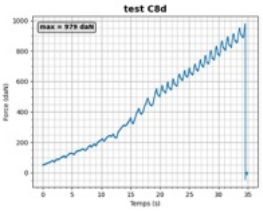
Corde C8i

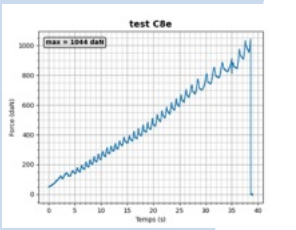
Dynamométrie

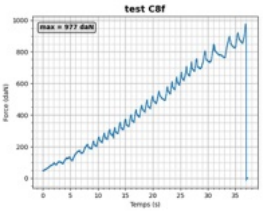


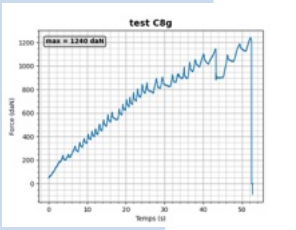


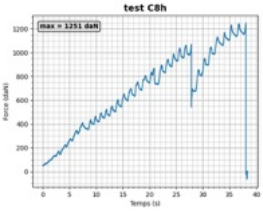


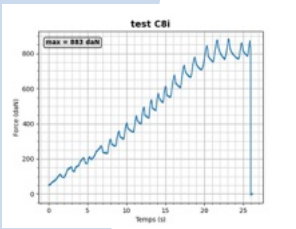


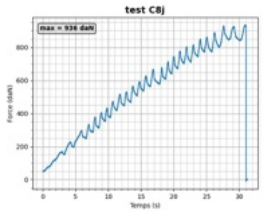












En traction lente, la corde Slick-Line v3 (pour rappel, avec environ 1275 daN si neuve et environ 1020 daN si très usagée – 250 A/R) présente des résultats supérieurs ou équivalents aux cordes de plus gros diamètres utilisées habituellement en spéléologie.

L'INFO EN +

La rupture a lieu systématiquement à la sortie du nœud sur le brin de traction.

TEST DE TRACTION LENTE SUR BLOQUEUR

Protocole
Ces tests sont effectués en appliquant une traction lente grâce à un palan à levier. L'échantillon de corde à tester est connecté d'un côté à un point fixe via un dynamomètre et de l'autre côté la corde est installée dans un bloqueur BASIC de Petzl (modèle actuel) relié via un second dynamomètre au palan à levier.
Le test est effectué jusqu'à appliquer une traction de 450 daN. Pour rappel, la charge nominale standard du BASIC est de 140 kg.

C4 C6 C9

Objectif : traction lente sur BASIC

Type et État de la corde	Test C4a : Slick-Line v3 ø 6 mm, 250 utilisations (montée/descente) Test C4b : Courant ø 8 mm, 2009, usagée + 2,5 ans au soleil Test C6 : Slick-Line v4 ø 6 mm neuve Test C9 : Caving Line ø 7 mm neuve
Nœud	Chaise simple
Rupture totale	NA

Corde C4a

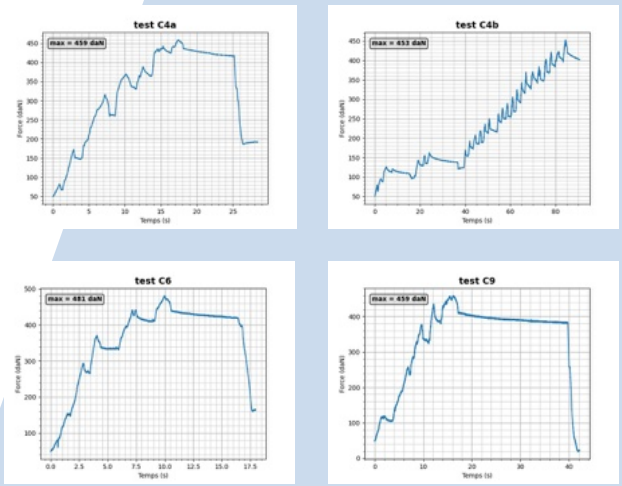
Corde C4b

Corde C6

Corde C9

RAS : une traction lente jusqu'à 450 daN ne pose aucun problème (corde et bloqueur intacts). Après la traction, les dents de la came du bloqueur marquent temporairement la gaine.

Dynamométrie



L'INFO EN +

Arrêt traction à 460 daN.
Le test C6 utilise une corde Slick-Line neuve, ce qui est le pire cas puisque la gaine et l'âme d'une corde neuve ne sont pas encore bien solidarisées.

Installation de la prise de vue vidéo pour les tests de chute. Au sol les morceaux de cordes testées que Florence Guillot va évacuer.

TEST DE TRACTION LENTE SUR DOUBLE AMARRAGE « À LA NINI »

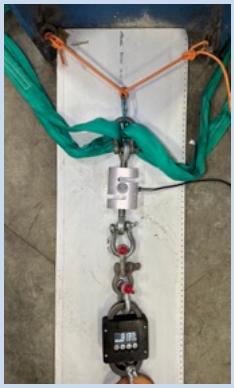
Protocole
Un double amarrage est confectionné avec une corde Slick-Line v4 neuve autour de deux plaquettes soudées à une poutre métallique. Le système est installé le plus « tendu » possible.

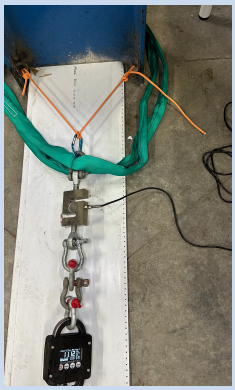
La corde repasse dans le nœud de huit double d'extrémité autour de l'une des plaquettes, puis un cabestan emprisonne un mousqueton (Camp Nano 22) au barycentre des deux points. La corde est alors verrouillée autour de la seconde plaquette via un nœud de chaise yosémité.
La corde est neuve.
Un palan à levier est connecté via deux dynamomètres en série au mousqueton d'amarrage.

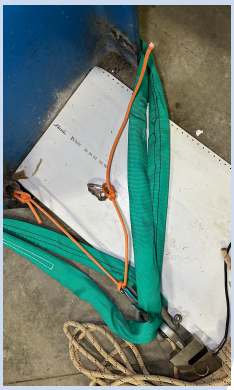
C7 — Objectif : traction lente sur double amarrage « à la Nini »

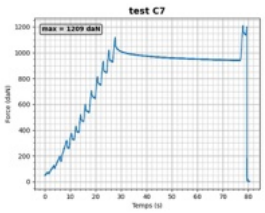
Type et état de la corde	Slick Line v4 ø 6 mm, neuve

Dynamométrie









Test C7

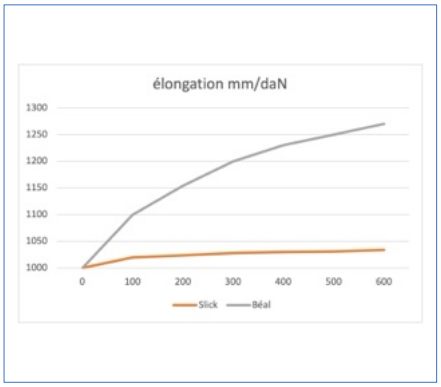
Le test est interrompu par la rupture de la soudure entre la plaquette et la poutre à 1209 daN. La corde ne présente aucun signe d'endommagement.

Les test de chute sont toujours impressionnants et comme cela va très vite, tout le monde est prêt à filmer. Un cordon de sécurité a été créé pendant l'ensemble de ces tests.

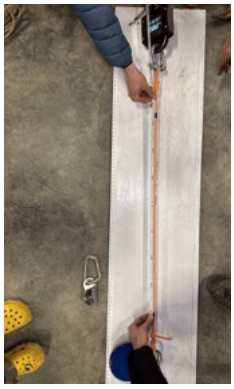
TEST DE MESURE D'ÉLONGATION

Protocole
L'échantillon est placé entre les deux dynamomètres. Un palan à levier exerce des forces croissantes par palier de 100 daN. Un double marquage sur la corde permet de mesurer l'élongation de la corde pour chaque niveau de force appliquée. Les tests sont effectués avec des nœuds de chaise double, mais ces nœuds ne rentrent pas en compte dans ce test, puisque la mesure est réalisée entre les marques matérialisées sur la corde.

C10 — Objectif : mesure d'élongation



Type et État de la corde	Test 10a : Slick-Line v4 ø 6 mm neuve, 70 cm Test C10b : Béal Spelenium ø 9 mm, réformée, 100 cm		
Premier nœud	Chaise double		
Second nœud	Chaise double		
Résultats	Force appliquée	Slick Line Longueur en mm	Béal Longueur en mm
	0 daN	1000 (700*10/7)	1000
	100 daN	1020 (714*10/7)	1100
	200 daN	1024 (717*10/7)	1154
	300 daN	1028 (720*10/7)	1200
	400 daN	1030 (721*10/7)	1230
	500 daN	1031 (722*10/7)	1250
	600 daN	1034 (724*10/7)	1270


Test C10a

Test C10b

La différence d'élasticité est flagrante et attendue. Il faut également noter que l'allongement résiduel de la Béal en fin de test est de 112 mm !

Denis Langlois prépare les tests de chute.

TEST DE RÉSISTANCE À L'ABRASION

Protocole
Ce test est difficile à mettre en œuvre (reproductibilité, réalisme de la situation, etc.). Néanmoins, nous avons effectué deux essais qui apportent de l'information. Une réflexion est menée pour monter un protocole plus réaliste et efficient pour des prochains tests.

Le test C12 a utilisé une cornière métallique aiguisée à la meule comme un couteau et placée à une hauteur de 3,75 m du sol pour une longueur de corde totale de 5,64 m (lame placée à 2/3 de la hauteur). L'angle de la corde sur la lame par rapport à la verticale est de 7°.

C12

Objectif : résistance à l'abrasion

Le spéléologue réussit à effectuer une seule montée jusqu'à la lame sur de la Béal Spelenium ø 8,5 mm et deux montées sur de la Slick-Line v4 ø 6 mm.

Test C12

C19

Objectif : résistance à l'abrasion en cavité

Désignation	État
Slick-Line Std ou v1	une dizaine de sorties
Slick-Line v3	neuve
Slick-Line v4	neuve
Caving Line	neuve
Segment ø 8 mm	neuve
Spelenium ø 8,5 mm	2023-une vingtaine de sorties
Béal Aqualine ø 9,5 mm	usagée

L'INFO EN +

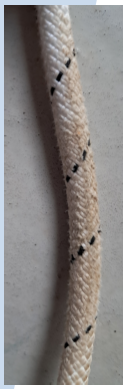
Le test C19 est réalisé en cavité. Les cordes frottent sur la lèvre d'un puits de 5 m. L'information à retenir de ce test, c'est que la Caving Line est la seule corde impactée par ce test : la gaine est endommagée (le textile orange qui la compose est sévèrement attaqué). Néanmoins, le test n'est pas concluant par manque de hauteur dans la cavité choisie (autres cordes légèrement usées mais pas vraiment endommagées). Il s'avère nécessaire de trouver une cavité proposant une montée d'une vingtaine de mètres en frottement sévère et qui permette un contre-assurage en toute sécurité.

Slick Line v1

Slick Line v3

Slick Line v4

Caving line



Segment

Spelenium

Béal Aqualine

TEST DE RUPTURE D'UN POINT INTERMÉDIAIRE D'UNE MAIN-COURANTE

Protocole
La corde à tester est connectée à 3 amarrages hyperstatiques. Les nœuds d'extrémité sont des nœuds de chaise simple réalisés directement sur l'anneau d'un dynamomètre. Le nœud du point intermédiaire est un nœud de cabestan sur un mousqueton connecté à l'amarrage par un dispositif de largage sous charge. Les longueurs de corde entre le point intermédiaire et les extrémités sont respectivement de 0,9 m et de 1,33 m. La main-courante est tendue et subhorizontale.
La gueuse de 80 kg est connectée au mousqueton du point intermédiaire via un troisième dynamomètre. L'usage de la gueuse évite de soumettre une personne à des chutes qui pourraient la blesser. Bien conscients que l'usage d'une gueuse est loin de la réalité spéléologique, nous avons décidé de faire appel à cette masse statique et inerte qui s'affranchit des capacités d'amorti du corps du spéléo, du baudrier et des longes en corde dynamique pour se placer dans le pire cas.

C13 C14 C15

Objectif : rupture de point intermédiaire de main courante

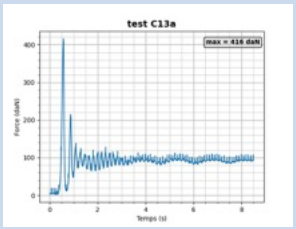
Test C13

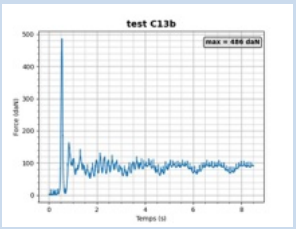
Type et État de la corde	Test C13 : Slick-Line v1 ø 6 mm, 07/2024, 12 sorties			
Résultats	Test	Dyn 90 cm	Dyn gueuse	Dyn 133 cm
	C13a	416 daN	400 daN	422 daN
	C13b	486 daN	526 daN	562 daN
	C13c	334 daN	350 daN	350 daN

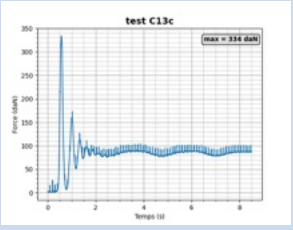
L'INFO EN +

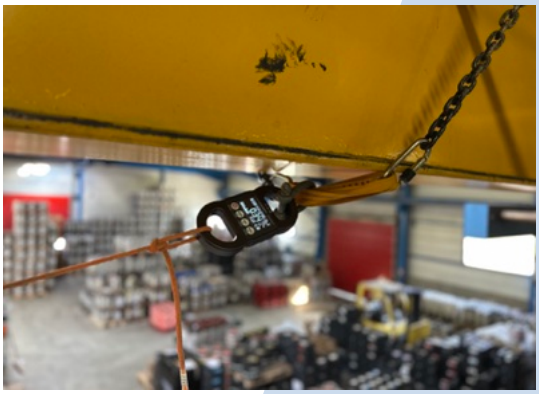
La même corde est utilisée pour les 3 essais. Les nœuds ne sont pas refaits entre les différents tests. La corde reste intacte après les 3 essais.
Le test C13c est réalisé en interposant une vieille longe Béal Ice Line de ø 8,1 mm entre la gueuse et le dynamomètre.

Dynamométrie







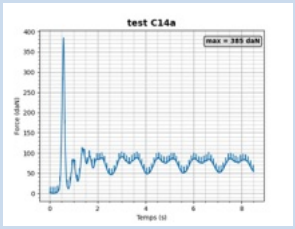

Test C13

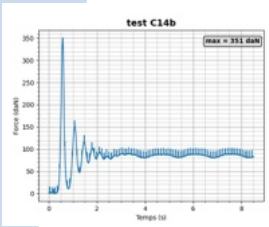
Type et État de la corde	Test C14 : Petzl Caving Line ø 7 mm, neuve		

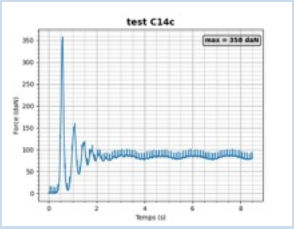
Résultats	Test	Dyn 90 cm	Dyn gueuse	Dyn 133 cm
	C14a	385 daN	400 daN	224 daN
	C14b	351 daN	347 daN	299 daN
	C14c	358 daN	366 daN	308 daN

Test C14

Dynamométrie







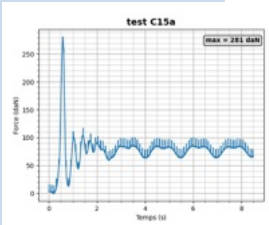
L'INFO EN +

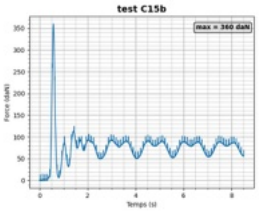
La même corde est utilisée pour les 3 essais. Les nœuds ne sont pas refaits entre les différents tests sauf le nœud du côté « Dyn 133 cm » lors du test C14b, car lors du test C14a cette partie de main-courante n'était pas suffisamment tendue. La corde reste intacte après les 3 essais.

Type et État de la corde	Test C15 : Beal Spelenium ø 8,5 mm, 2023, bon état		

Résultats	Test	Dyn 90 cm	Dyn gueuse	Dyn 133 cm
	C15a	281 daN	294 daN	223 daN
	C15b	360 daN	375 daN	262 daN

Dynamométrie





L'INFO EN +

La même corde a été utilisée pour les 3 essais. Les nœuds ne sont pas refaits entre les différents tests. La corde reste intacte après les essais.

La force encaissée par la gueuse lors de la rupture d'un point intermédiaire de main-courante s'élève à 400 daN sur de la Slick-Line v1 ou de la Caving Line soit 100 daN de plus que sur de la Béal Spelenium ø 8,5 mm.
Le serrage des nœuds induit par la répétition des essais a également tendance à accroître au fur et à mesure les valeurs des forces maximales d'interception au niveau de la gueuse.
La longe amortit considérablement la force maximale d'interception et le corps et le harnais de la personne doivent participer également à la réduction de cette force maximale d'interception.

TEST DE CHUTE LORS DE L'ÉQUIPEMENT D'UNE MAIN-COURANTE

Protocole
La corde à tester est connectée à 2 amarrages hyperstatiques. Le nœud d'extrémité est un nœud de chaise simple réalisé directement sur l'anneau du dynamomètre. Le nœud du point intermédiaire est un nœud de cabestan autour d'un mousqueton connecté à l'amarrage par un dispositif de largage sous charge. La longueur de corde entre les deux points est de 130 cm. La main-courante est tendue et subhorizontale.
La gueuse de 80 kg est connectée au mousqueton du point intermédiaire via un second dynamomètre. L'usage de la gueuse évite de soumettre une personne à des chutes qui pourraient la blesser. Bien conscients que l'usage d'une gueuse est loin de la réalité spéléologique, nous avons décidé de faire appel à cette masse statique et inerte qui s'affranchit des capacités d'amorti du corps du spéléo, du baudrier et des longes en corde dynamique pour se placer dans le pire cas.

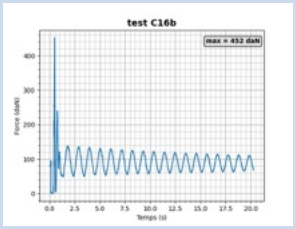
C16 — Objectif : test de chute

Rupture du point intermédiaire d'une main-courante lors de son équipement :
le spéléo effectue alors un pseudo pendule – corde plus ou moins tendue et subhorizontale – depuis la hauteur de l'amarrage sur lequel il tombe, sur la longueur de corde entre le point précédent et le point intermédiaire, soit 130 cm dans notre test.

Type et État de la corde	Test C16a et C16 b : Béal Spelenium ø 8,5 mm, 2023, bon état

	Test	Dyn 130 cm	Dyn gueuse
Résultats	C16a	399 daN	391 daN
	C16b	468 daN	452 daN

Dynamométrie



Test C16, la gueuze effectue un pendule

L'INFO EN +

La même corde est utilisée pour les 2 essais et il s'agit de la corde qui a participé aux 3 essais du test C15. Les nœuds ne sont pas refaits entre les différents tests. La corde est intacte après les essais.

Test C16, la gueuze pèse 75 kg

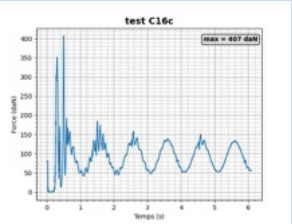
Type et État de la corde	Test C16c et C16 d : Slike-Line v1 ø 6 mm, 07/2024, 12 sorties

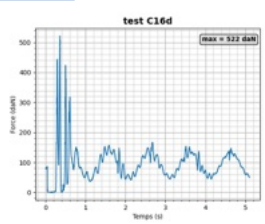
	Test	Dyn 130 cm	Dyn gueuse
Résultats	C16c	417 daN	407 daN
	C16d	526 daN	522 daN

L'INFO EN +

La même corde est utilisée pour les 2 essais et il s'agit de la corde qui a participé aux 3 essais du test C13. Les nœuds sont refaits au début du test, mais pas refaits entre les deux tests C16c et C16d. La corde est intacte après les essais.

Dynamométrie





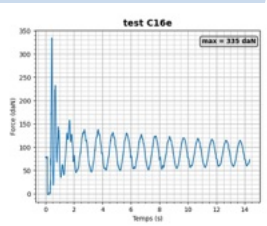
Type et État de la corde	Test C16e et C16f: Petzl Caving Line ø 7 mm, neuve

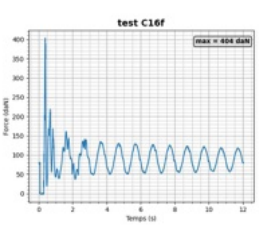
	Test	Dyn 130 cm	Dyn gueuse
Résultats	C16e	352 daN	335 daN
	C16f	413 daN	404 daN

L'INFO EN +

La même corde est utilisée pour les 2 essais et il s'agit de la corde qui a participé aux 3 essais du test C14. Les nœuds sont refaits au début du test, mais pas refaits entre les deux tests C16e et C16f. La corde est intacte après les essais.

Dynamométrie





Samuel Gérente (au centre) a prêté deux dynamomètres pour effectuer les mesures.

Si on compare les valeurs lorsque les nœuds sont serrés, on obtient :
- **395 daN pour la Béal Spelenium ø 8,5 mm**
- **524 daN pour la Slick-Line v1 ø 6 mm**
- **409 daN pour la Petzl Caving Line ø 7 mm**

La corde fine hyperstatique engendre un choc supérieur de 100 daN dans cette configuration (pendule de facteur 1 sur une corde de longueur 130 cm) par rapport aux cordes semi-statiques.
Il faudrait réitérer ce test avec une longe en corde dynamique, mais si on se réfère aux résultats précédents, il faut tenir compte d'un amorti de plus de 100 daN du fait de la longe

TEST DE CHUTE
RÉPONSE INDICIELLE

Protocole
La corde à tester est connectée à un amarrage hyperstatique via un nœud de chaise simple directement sur l'anneau du dynamomètre. L'autre bout de la corde est connecté via un nœud de chaise double à une manille reliée d'un côté à un dispositif de largage sous charge et de l'autre à l'ensemble dynamomètre-gueuse de 75 kg.

L'usage de la gueuse évite de soumettre une personne à des chutes qui pourraient la blesser. Bien conscients que l'usage d'une gueuse est loin de la réalité spéléologique, nous avons décidé de faire appel à cette masse statique et inerte qui s'affranchit des capacités d'amorti du corps du spéléo, du baudrier et des longes en corde dynamique pour se placer dans le pire cas.
L'ensemble des tests est filmé à 240 images/seconde, une mire et des repères sont fixés sur la paroi juste derrière le dispositif afin de pouvoir analyser le déplacement vertical du point d'attache de la gueuse en fonction du temps.

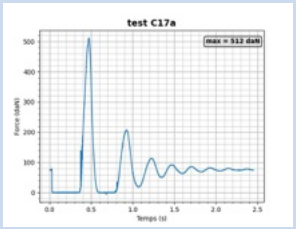
C17 — Objectif : réponse indicielle

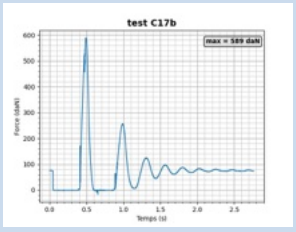
Type et État de la corde	Béal Spelenium ø 9 mm, réformée

	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Dyn. point	Dyn. gueuse	Dyn. moyenne	Allongement
Résultats	C17a	0,675	250 cm	510 daN	512 daN	511 daN	+ 25 cm
	C17b	0,64	264 cm	597 daN	589 daN	593 daN	+ 16 cm

Test C17a

Dynamométrie





Test C17c

L'INFO EN +

Après la première chute, la corde s'allonge de 25 cm. Après retrait de la charge, la corde conserve un allongement de 14 cm.

Type et État de la corde	Caving Line ø 7 mm, neuve

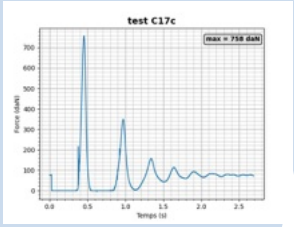
Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Dyn. point	Dyn. gueuse	Dyn. moyenne	Allongement
	C17c	0,675	250 cm	769 daN	758 daN	763 daN	+ 24 cm
	C17d	0,65	260 cm	916daN	904 daN	910 daN	+ 15 cm

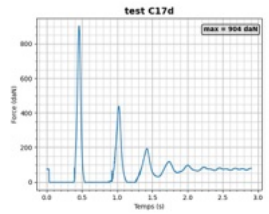
Dynamométrie

L'INFO EN +

Après la première chute, la corde s'allonge de 24 cm. Après retrait de la charge, la corde conserve un allongement de 10 cm.

Consulter l'article de Pierre Boudinet page 24.





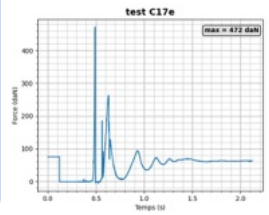
Type et État de la corde	Slick Line v1 ø 6 mm, 07/2024, tonchée, issue des test C13 et C16

Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Dyn. point	Dyn. gueuse	Dyn. moyenne	Allongement
	C17e	0,675	250 cm	-	472 daN	472 daN	NA

L'INFO EN +

Dynamométrie

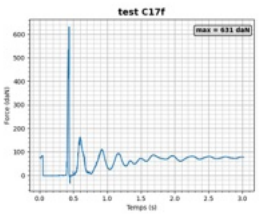
Rupture de la corde à 472 daN. Dans les cas de rupture de corde, le dynamomètre – reliée à la gueuse – enregistre après l'extremum local de la fonction, l'amortissement induit par la corde de sécurité.



Type et État de la corde	Slick Line v4 ø 6 mm, 07/2024, peu utilisée

Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Dyn. point	Dyn. gueuse	Dyn. moyenne	Allongement
	C17f	0,675	250 cm	624 daN	631 daN	627 daN	NA

Dynamométrie



L'INFO EN +

Rupture de la corde à 627 daN.

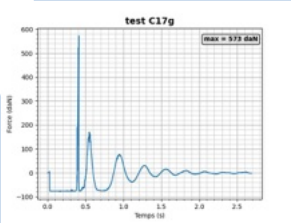
Type et État de la corde	Slick Line v4 ø 6 mm, 07/2024, peu utilisée

Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Dyn. point	Dyn. gueuse	Dyn. moyenne	Allongement
	C17g	0,675	250 cm	624 daN	631 daN	627 daN	NA

L'INFO EN +

Test identique au précédent (C17f) hormis le fait que le nœud de chaise simple de l'amarrage fixe est remplacé par un nœud de chaise double. Le delta entre les valeurs obtenues via les deux dynamomètres peut s'expliquer par une différence entre les fréquences d'échantillonnage des deux appareils.
Rupture de la corde à 691 daN.

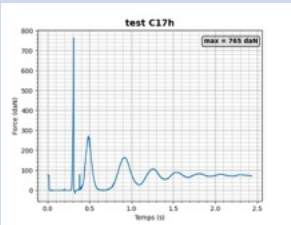
Dynamométrie



Type et État de la corde	Slick Line v4 ø 6 mm, 07/2024, peu utilisée

Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Dyn. point	Dyn. gueuse	Dyn. moyenne	Allongement
	C17h	0,3	250 cm	752 daN	762 daN	758 daN	NA

Dynamométrie



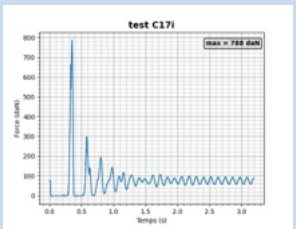
L'INFO EN +

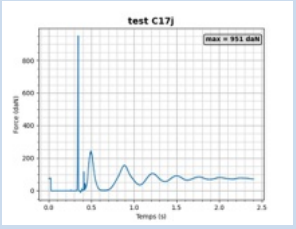
La chute de 75 cm de la gueuse entraîne la rupture de la corde à 758 daN.

Type et État de la corde	Slick Line v3 ø 6 mm, utilisée

Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Dyn. point	Dyn. gueuse	Dyn. moyenne	Allongement
	C17i	0,3	250 cm	800 daN	788 daN	794 daN	+ 20 cm
	C17j	0,28	270 cm	989 daN	-	989 daN	NA

Dynamométrie





L'INFO EN +

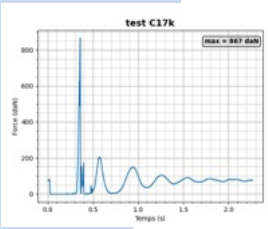
Après la première chute, la corde s'allonge de 20 cm. Les nœuds sont très serrés pour le second test. Lors de ce dernier, la corde rompt lorsque la force appliquée atteint 989 daN.

Type et État de la corde	Slick Line v3 ø 6 mm, 250 utilisations (montées + descentes)

Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Dyn. point	Dyn. gueuse	Dyn. moyenne	Allongement
	C17k	0,36	250 cm	875 daN	867 daN	871 daN	NA

Test C17k

Dynamométrie



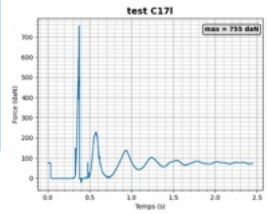
L'INFO EN +

La chute de 90 cm de la gueuse entraîne la rupture de la corde à 871 daN.

Type et État de la corde	Slick Line v3 ø 6 mm, 250 utilisations (montées + descentes)

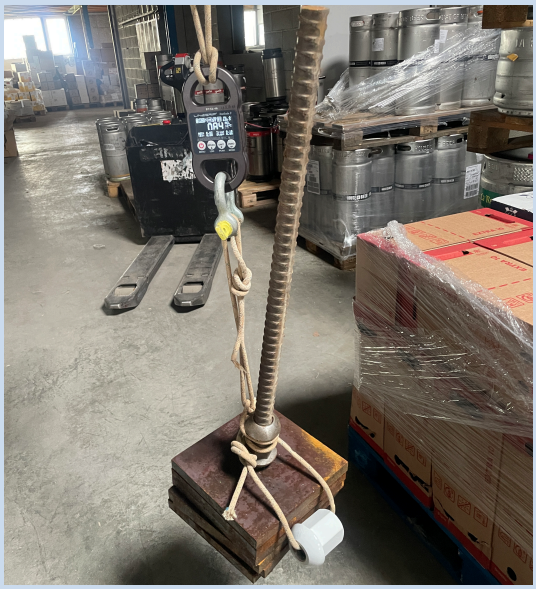
Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Dyn. point	Dyn. gueuse	Dyn. moyenne	Allongement
	C17l	0,32	250 cm	780daN	755 daN	767 daN	NA

Dynamométrie



L'INFO EN +

La chute de 80 cm de la gueuse entraîne la rupture de la corde à 767 daN. Cet essai n'est pas filmé, néanmoins un court temps de latence est perçu juste avant la rupture de la corde.



Pour obtenir une gueuze de 75 kg, plusieurs configurations ont été testées.

Pour les cordes hyperstatiques, c'est la hauteur de chute et non le facteur de chute qui est le paramètre à prendre en compte.

Se reporter à la page 24.

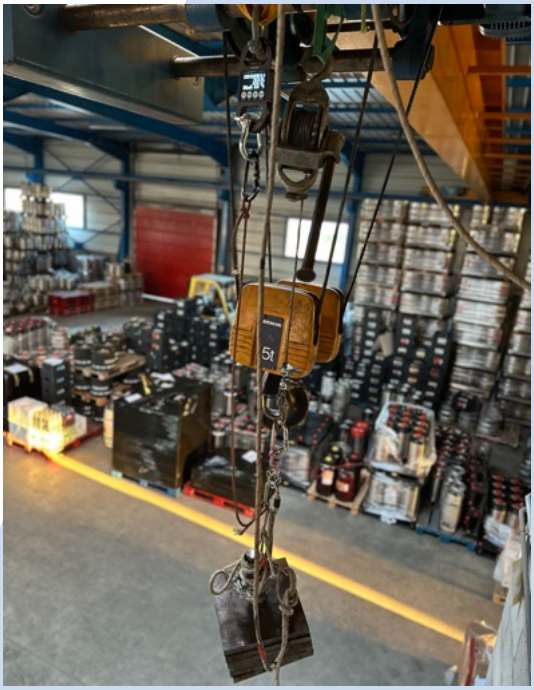
C18

Objectif : réponse indicielle, variabilité de la hauteur de chute

Type et état de la corde	Slick Line v3 ø 6 mm, usagée				
Préparation	Nœud de chaise à chaque extrémité. Chaque corde est pré-étirée à 200 daN				
Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Hauteur de chute	Force maximale d'interception
	C18a1	0,22	50,5 cm	11 cm	288 daN
	C18a2	0,44	50,5 cm	22 cm	1022 daN

L'INFO EN +

Pas de rupture.



Test C18a

Type et état de la corde	Slick Line v3 ø 6 mm, usagée				
Préparation	Nœud de chaise à chaque extrémité. Chaque corde est pré-étirée à 200 daN				
Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Hauteur de chute	Force maximale d'interception
	C18b1	0,20	100 cm	20 cm	454 daN
	C18b2	0,40	100 cm	40 cm	482 daN

L'INFO EN +

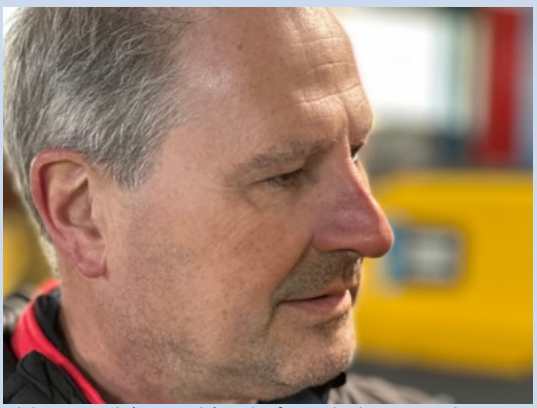
Pas de rupture.

Le pont roulant a permis d'effectuer les différents montages.

Type et état de la corde	Slick Line v3 ø 6 mm, usagée				
Préparation	Nœud de chaise à chaque extrémité. Chaque corde est pré-étirée à 200 daN				
Résultats	Test	Facteur de chute	Longueur de corde	Hauteur de chute	Force maximale d'interception
	C18c1	0,20	200,8 cm	40 cm	592 daN
	C18c2	0,40	200,8 cm	80 cm	NA
	C18c3	0,40	203 cm	80 cm	NA

L'INFO EN +

Test C18c2 : rupture de la corde à 240 daN.
Test C18c3 effectué avec un nouvel échantillon de la même corde, rupture de la corde à 448 daN.



Philippe Auriol s'est penché sur les forces de choc maximales admissibles pour un humain.

ALLER PLUS LOIN

Cordes de ø 5 et 6 mm, la résistance en question (2024)
https://crei.ffspeleo.fr/Telechargement/rex_fiche_tests_cordes_5_6_mm.pdf

Les techniques de spéléologie légères (1999)
https://efs.ffspeleo.fr/images/les_cahiers_de_l_efs_n_09_les_techniques_sp_l_ologiques_l_g_res.pdf

À propos de la cordelette Dyneema (2006)
https://speleo-club-souillac.e-monsite.com/medias/files/dyneema-cordelette-v1.2.pdf

Sec. Humide. Humide. Polyamide et eau
https://analyzing-testing.netzsch.com/fr/application-literature/sec-humide-humide-polyamide-et-eau

Vectran
https://en.wikipedia.org/wiki/Vectran

UHPME - Polyéthylène de masse molaire très élevée
https://fr.wikipedia.org/wiki/Poly%C3%A9thyl%C3%A8ne_de_masse_molaire_tr%C3%A8s_%C3%A9lev%C3%A9e

Polyester
https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyester

Des infos du GET
Gaël Monvoisin, Pierre-Bernard Lausac, " Deux campagnes de tests du Groupe d'études techniques sur des cordelettes hyperstatiques de diamètre 6 mm (2025) ", Spelunca, 5e série, n°176, déc. 2024, p. 6-12.

C19 Objectif : tenue des cordes spéléos au choc, il est nécessaire d'avoir de nouveaux paramètres

Pierre Boudinet

Introduction

Des tests de différents agrès catégorisés par la réglementation comme « corde » ou « cordelette » et que nous désignons dans la suite sous le vocable commun de « corde » ont été effectués en équipe à Montrond-le-Château l'été 2024 et en fin d'hiver 2025.

Nous présentons ici l'analyse d'une partie de ces tests : le comportement d'une corde et de la force qu'elle exerce sur ses attaches lors d'un lâcher de gueuse avec un certain facteur de chute. Rappelons que ce dernier est défini comme le rapport entre la hauteur de chute -avant que la corde ne commence à se mettre sous tension- et la longueur de la corde.

Dans la formation classique du spéléologue ou du grimpeur, on assimile la corde à un ressort dont la raideur est accessible -notamment via l'allongement relatif entre une charge de 50 et de 150 kg- et l'on enseigne les résultats de ce modèle très simple pour affirmer passer que « plus le facteur de chute est élevé plus c'est dangereux ». D'une part à facteur de chute constant la force choc — force maximale exercée par la corde sur ses attaches — augmente lorsque l'allongement relatif diminue. D'autre-part, à allongement relatif fixé, la force-choc diminue si le facteur de chute diminue.

Toutefois notre analyse suggère que l'allongement relatif, accessible en principe via les données fournies par le fabricant, n'est pas le seul paramètre à prendre en compte pour évaluer la force choc. Deux autres paramètres au moins sont nécessaires : un reliant la force à la vitesse de d'étirement de la corde, et un quantifiant la façon dont la raideur de la corde augmente quand elle est étirée. Ces deux paramètres peuvent faire la différence entre deux cordes ayant la même raideur mais dont l'une serait employable sans souci en spéléologie alors que l'autre serait d'emploi dangereux.

Méthodologie

Lors du lâcher d'une gueuse de 75 kg, la force a été mesurée avec un dynamomètre enregistreur et simultanément le mouvement de la gueuse a été filmé, avec des repères permettant de corriger les effets de parallaxe (**Figure 1)**.

Dans l'état actuel de l'avancement de ces travaux, nous avons comparé l'enregistrement expérimental de la force au cours du temps avec des simulations numériques. En partant du modèle le plus simple, nous avons complexifié les choses jusqu'à obtenir une bonne restitution des pics de force et des intervalles entre pics de force : nous n'avons pu obtenir une bonne adéquation qu'en introduisant en plus de la raideur de la corde assimilée à un ressort les deux autres paramètres précités.

Modélisation et exploitation des données (1)

Nous avons dans un premier temps retenu le modèle à constantes localisées immédiatement plus complexe que le modèle trop simple « absorption d'énergie proportionnelle à la longueur » ou « ressort » avec à l'esprit toujours le principe du rasoir d'Ockham. **La Figure 2** précise les notations employées dans la suite.

La corde est modélisée par le système ressort – frottement de **la Figure 3** et l'équation correspondante *[1]. Nous laissons au lecteur le plaisir de deviner pourquoi le modèle de la Figure 4 est défectueux.*

Figure 1 : implémentation des tests.

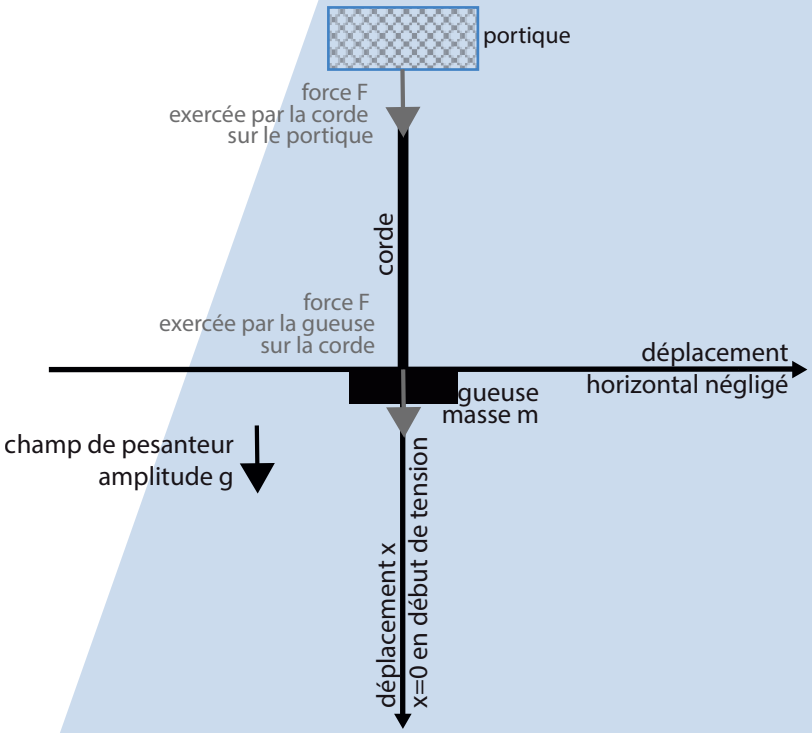


Figure 2 : notation employée.

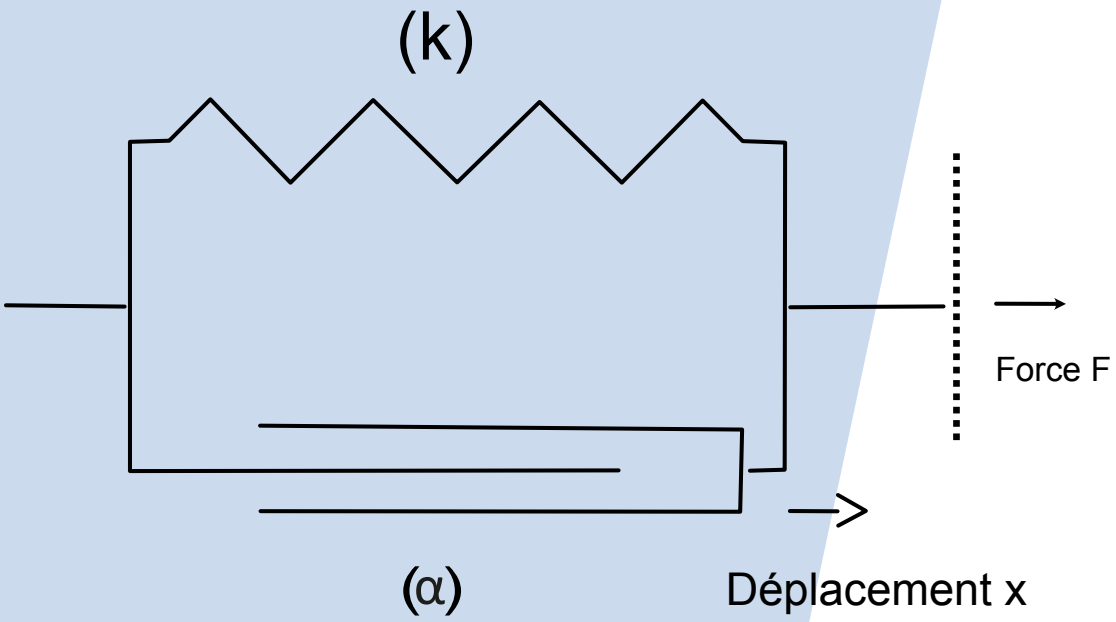


Figure 3 : modèle minimal de corde.

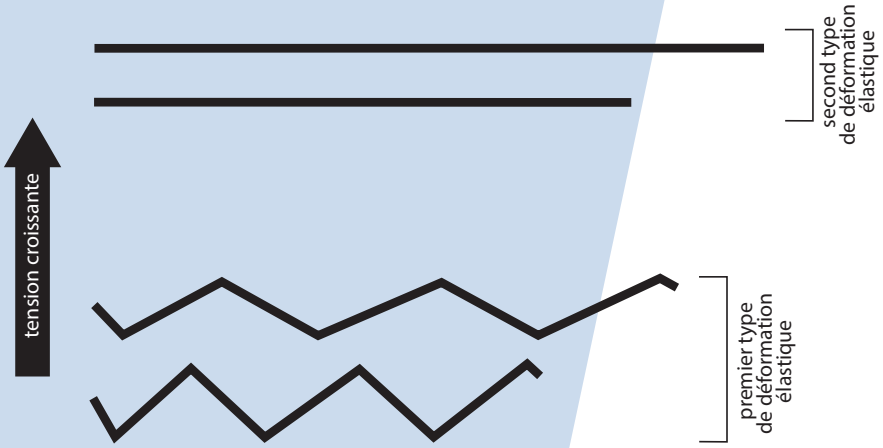


Figure 4 : modèle alternatif défectueux (raison à deviner par le.a lecteur.rice)

Dans le modèle de la **Figure 3**, la relation entre force et déplacement est la suivante :

$$F = \begin{cases} kx + \alpha \dfrac{dx}{dt} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

Il faut intégrer le fait que la corde mise en tension à partir d'un déplacement nul (x>0) exerce une force alors qu'une corde détendue n'exerce aucune force.
L'axe des x correspond à la verticale descendante, dans un champ de pesanteur d'intensité g et nous examinons le mouvement d'une gueuse, assimilée à un point matériel de masse m et de vitesse initiale v_0 juste avant que la corde ne se mette en tension.

L'application du principe fondamental de la dynamique à la gueuse de masse m conduit immédiatement à :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = mg - F$$

Cette équation peut être résolue de façon analytique morceaux par morceaux ou bien numériquement. L'avantage de la résolution analytique est de pouvoir extraire des mesures approximativement, mais assez facilement et directement les paramètres tels que α et *k*. Pour comparer un modèle à l'ensemble des données expérimentales correspondantes, la résolution numérique est plus adaptée.

Résolution numérique :

L'équation précédente [2] peut être réécrite sous la forme d'un système du premier ordre (« flot ») :

$$\frac{dx}{dt} = v$$
$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{F(x,v)}{m}$$

Symboliquement, en introduisant un vecteur d'état $\vec{y} = \binom{x}{v}$ ceci peut se noter :

$$\frac{d\vec{y}}{dt} = \vec{f}(\vec{y})$$

Il est alors facile de procéder à une résolution numérique à l'aide de la méthode de Runge-Kutta poussée à l'ordre 2, en procédant ainsi avec un pas de temps dt :

$$\vec{y}(t+dt) \approx \vec{y}(t) + \vec{f}(\vec{y}(t) + \frac{dt}{2}\vec{f}(\vec{y}(t)))$$

Résolution analytique :

L'étude des mesures aussi bien que des résultats de premières simulations numériques destinées à vérifier les programmes écrits révèle le comportement suivant :

• Une première phase de rebond (la corde se tend puis se détend)

• Une première phase de vol libre (la corde est détendue, la gueuse monte puis redescend sous l'effet de la pesanteur)

• Une seconde phase de rebond

• Une seconde phase de vol libre

• Etc. jusqu'à la disparition de la phase de vol libre. On est alors passé d'un comportement « hautes énergies » à un comportement « basses « énergies » avec une phase finale de petites oscillations amorties autour de la position d'équilibre[1].

Lors des phases de rebond comme lors de la phase finale, on a :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + \alpha\frac{dx}{dt} + kx = mg$$

Pour mettre sous forme canonique l'équation différentielle (6), il faut introduire les quantités classiques suivantes :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$\beta = \frac{\alpha}{2m}$$
$$x_0 = \frac{mg}{k}$$
$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$

Avec $x(0) = 0 \text{et } v(0) = \frac{dx}{dt}(0) = v_0$
l'équation différentielle (6) a pour solution :

$$x = x_0 + e^{-\beta t}(-x_0\cos\omega t + (\frac{v_0}{\omega} - \frac{\beta}{\omega}x_0)\sin\omega t)$$

Pour déterminer les constantes du modèle il est possible de procéder ainsi :

• Examiner les petites oscillations amorties de la dernière phase et en extraire ω et β .
• Examiner la première phase et en extraire à nouveau et .
• Vérifier si les deux jeux de valeurs sont les mêmes ou non.
• Vérifier si la simulation numérique la plus en accord avec la force mesurée correspond à l'un de ces jeux de valeurs.

Nous présentons les résultats de ces démarches avec trois échantillons différents de cordes

Test C17d

Il s'agit d'une corde Caving Line neuve, de longueur 2.5 m avec un facteur de chute 0.675. Un test nommé dans notre nomenclature C17c a permis, dans les mêmes conditions, de serrer les nœuds – c'est une façon de simuler au moins grossièrement de nombreux passages sur l'agrès avant un incident.

• Pour les petites oscillations, la période mesurée est de 0.445 s environ.
• Cela correspond à ω = 14.113 rad.s^{-1}.

• On lit $e^{-\beta\frac{2\pi}{\omega}} = 0.341 \text{soit } \beta = 2.415 s^{-1}$.

• On en déduit ω = 14.318 rad.s^{-1}.

• Avec *m* = 75 kg cela donne *k* = 15376 N.m^{-1}

La durée de la première phase est malaisée à déterminer, mais on peut faire quelques approximations :

• Si l'on néglige x_0 cela donne une durée de π/ω. Avec 0.196 s lues, on obtient ω ≈ 16.02 rad.s^{-1}.

• Toujours dans cette approximation, le coefficient de restitution du rebond sur la corde est $e^{-\beta\frac{2\pi}{\omega}}$.
On lit 0.432 s de durée de la première chute libre, soit une hauteur de chute 59.3 cm, à comparer avec la hauteur

[1] D'un point de vue pédagogique, pour qui enseigne ou a enseigné et la physique et la spéléologie, cette situation est surprenante : on part d'un poncif éculé -qui n'a pas étudié l'oscillateur harmonique amorti lors de ses études scientifiques supérieures ?- pour aboutir à quelque-chose de plutôt nouveau.

initiale de chute de 1.69 m (facteur 0.675 avec une corde de 2.5 m) : le facteur de restitution est d'environ 0.351. On en déduit ß ≈ 3.7 s^{-1}

• On en déduit ω_0 ≈ 16.44 rad.s^{-1}, k ≈ 20300 N.m^{-1}.s, α ≈ 16.44 rad.s^{-1}
Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les valeurs obtenues aux basses énergies même si différentes.

• Différents essais de simulation numérique montrent qu'aucun jeu de valeur de *k* et α dans ces ordres de grandeur ne reproduit de façon véritablement satisfaisante l'évolution de la force mesurée au cours du temps, aux hautes énergies l'amplitude de la force maximale est trop éloignée de la réalité.

Test C17b

Il s'agit d'une corde Béal Spélénium réformée de plus de 10 ans, de longueur 2.5 m avec un facteur de chute 0.675. Le test C17a a permis, dans les mêmes conditions, de serrer les nœuds.

• Pour les petites oscillations la période mesurée est de 0.364 s environ.

• Cela correspond à ω = 17.220 rad.s^{-1}.

• On lit soit $e^{-\beta\frac{2\pi}{\omega}}$ soit β = 2.052 s^{-1}.

• On en déduit ω_0 = 17.342 rad.s^{-1}.

• Avec *m* = 75 kg cela donne *k* = 22555 N.m^{-1} et α = 307.80 N.m^{-1}.s

Pour la première phase, on peut refaire les mêmes approximations que C17d :

• Si l'on néglige x_0 cela donne une durée π/ω. Avec 0.256 s lues, on obtient ω ≈ 24.47 rad.s^{-1}.

• Toujours dans cette approximation, le coefficient de restitution du rebond sur la corde est $e^{-\beta\frac{2\pi}{\omega}}$

On lit 0.568 s de durée de la première chute libre, soit une hauteur de chute 39.6 cm, à comparer avec la hauteur initiale de chute de 1.69 m (facteur 0.675 avec une corde de 2.5 m) : le facteur de restitution est d'environ 0.351. On en déduit β ≈ 4.1 s^{-1}.

• On en déduit ω_0 ≈ 24.81 rad.s^{-1}, *k* ≈ 46169 N.m^{-1}, α ≈ 615 N.m^{-1}.s.
Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les valeurs obtenues aux basses énergies même si différentes.

• La simulation numérique permet d'affiner et de proposer un jeu de valeurs reproduisant au mieux la réalité : *k* = 18500 N.m-1 et α = 600 N.m-1.s.

Test C17i

Il s'agit d'une corde Slick V3 usagée, de longueur 2.5 m avec un facteur de chute 0.3 seulement et sans serrage préalable des nœuds.

• Le comportement aux basses énergies est impossible à exploiter. Cela peut s'expliquer par des oscillations résiduelles correspondant à d'autres degrés de liberté que celui étudié (rotation ou déplacement horizontal – **Figure 2**).

• Aux hautes énergies :

- La durée de la première phase est malaisée à déterminer mais on peut faire les mêmes approximations que plus haut :

- Si l'on néglige x_0, cela donne une durée π/ω . Avec 0.144 s lues, on obtient ω ≈ 43.62 rad.s^{-1}

- Toujours dans cette approximation, le coefficient de restitution du rebond sur la corde est $e^{-\beta\frac{2\pi}{\omega}}$

On lit 0.350 s de durée de la première chute libre, soit une hauteur de chute 15,0 cm, à comparer avec la hauteur initiale de chute de 0,75 m (facteur 0.3 avec une corde de 2.5 m) : le facteur de restitution est d'environ 0.2 . On en déduit β ≈ 11.17 s^{-1}

- On en déduit ω_0 ≈ 45.02 rad.s^{-1}, *k* ≈ 152000 N.m^{-1}, α ≈ 1676 N.m^{-1}.s.

• La simulation numérique permet de déterminer les paramètres les moins irréalistes : *k* = 70000 N.m^{-1} et α = 1700 N.m^{-1}.s, néanmoins de petites différences (amplitude de la force maximale aux hautes énergies) subsistent.

Modélisation et exploitation des données (2)

La loi de force doit être modifiée, car le modèle de force dépendant linéairement de l'élongation présenté plus haut ne rend pas bien compte des mesures relevées durant les pics d'élongation.

Pour toute quantité suffisamment régulière et fonction de l'élongation *x*, une force par exemple, on pourrait noter :

$$F = \sum_{n=0}^{n=\infty} a_n x^{\bar{n}}$$

Avec a_0 = 0 sauf à mal choisir l'origine. Pour un ressort symétrique on aurait en outre a_{2n} = 0 (parité).

La corde ne constitue pas un ressort symétrique et l'on pourrait avoir $a_2 \neq 0$. Néanmoins la force doit être linéaire jusqu'à une limite élevée faute de ne pas rendre compte correctement des résultats mesurés à basse élongation. Par conséquent le modèle le plus simple que l'on peut retenir est le suivant :

$$F = \begin{cases} kx(1+(\frac{x}{x_0})^2) + \alpha\frac{dx}{dt} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

Il n'y a qu'un paramètre x_0 à rajouter. Il chiffre, pour l'exprimer simplement, la façon dont la corde devient de plus en plus raide au fur et à mesure qu'on l'étire.

Physiquement, cette augmentation de raideur peut se comprendre de la façon suivante (**Figure 5**) : quand on étend la corde, tout d'abord ses constituants s'alignent de plus en plus sans chacun s'étirer beaucoup, même si la corde dans son ensemble s'étire (penser aux spires jointives ou non d'un ressort). Ensuite, les constituants doivent commencer à s'étirer individuellement (penser à un ressort tellement étendu qu'il est devenu un fil).

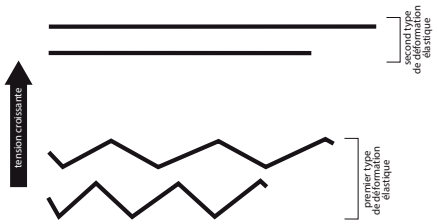


Figure 5 : deux possibilités de déformation élastique des fibres d'une corde.

Des simulations numériques ont permis de déterminer les meilleurs jeux de paramètres. La comparaison avec les mesures s'est effectuée « à l'œil » et non-pas, par exemple, avec une méthodologie de type « minimisation d'un écart quadratique moyen ».

La raison de ce choix est la suivante : avec un modèle qui reste simple et ne visant pas de reproduire pas la réalité de façon mimétique, les grands traits sont à ajuster avant les détails. Dans cette optique, le plus important est que les pics de force coïncident en amplitude et en position temporelle.

Cas du test C17d

Les meilleurs ajustements sont les suivants (**Figure 6**) :

k = 20000 N.m^{-1} ; α = 450 N.m^{-1}.s ; x_o = 0.375 m

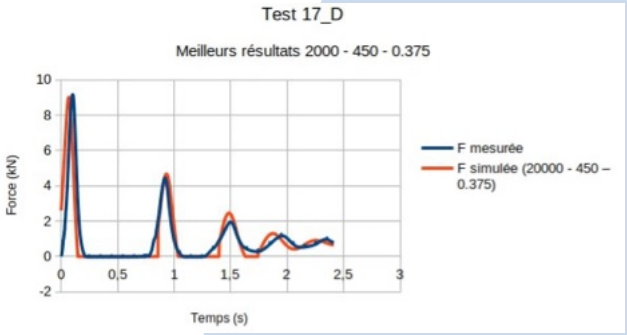


Figure 6 : meilleur ajustement dans le cas du test C17d.

Afin d'obtenir des résultats réalistes pour la corde légère « Caving Line », le paramètre doit impérativement être pris fini (**Figure 7**). Cependant, des variations autour de la valeur proposée ont moins d'influence que les variations des deux autres paramètres k et α (**Figure 8**).

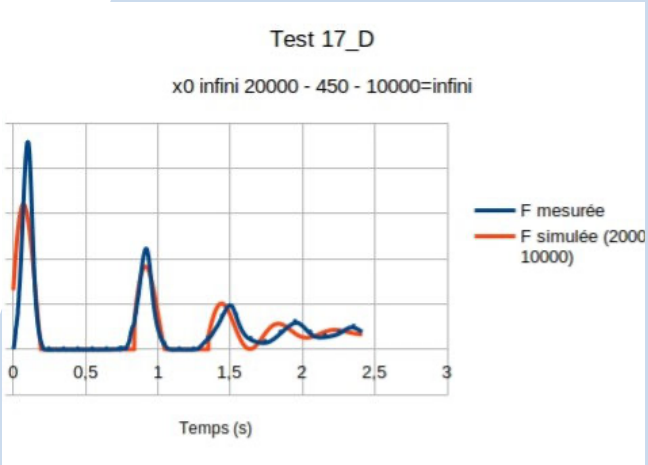


Figure 7 : deux possibilités de déformation élastique des fibres d'une corde.

Pierre Boudinet est ravi quand il s'agit de faire des nœuds, y compris dans le cerveau ;-)

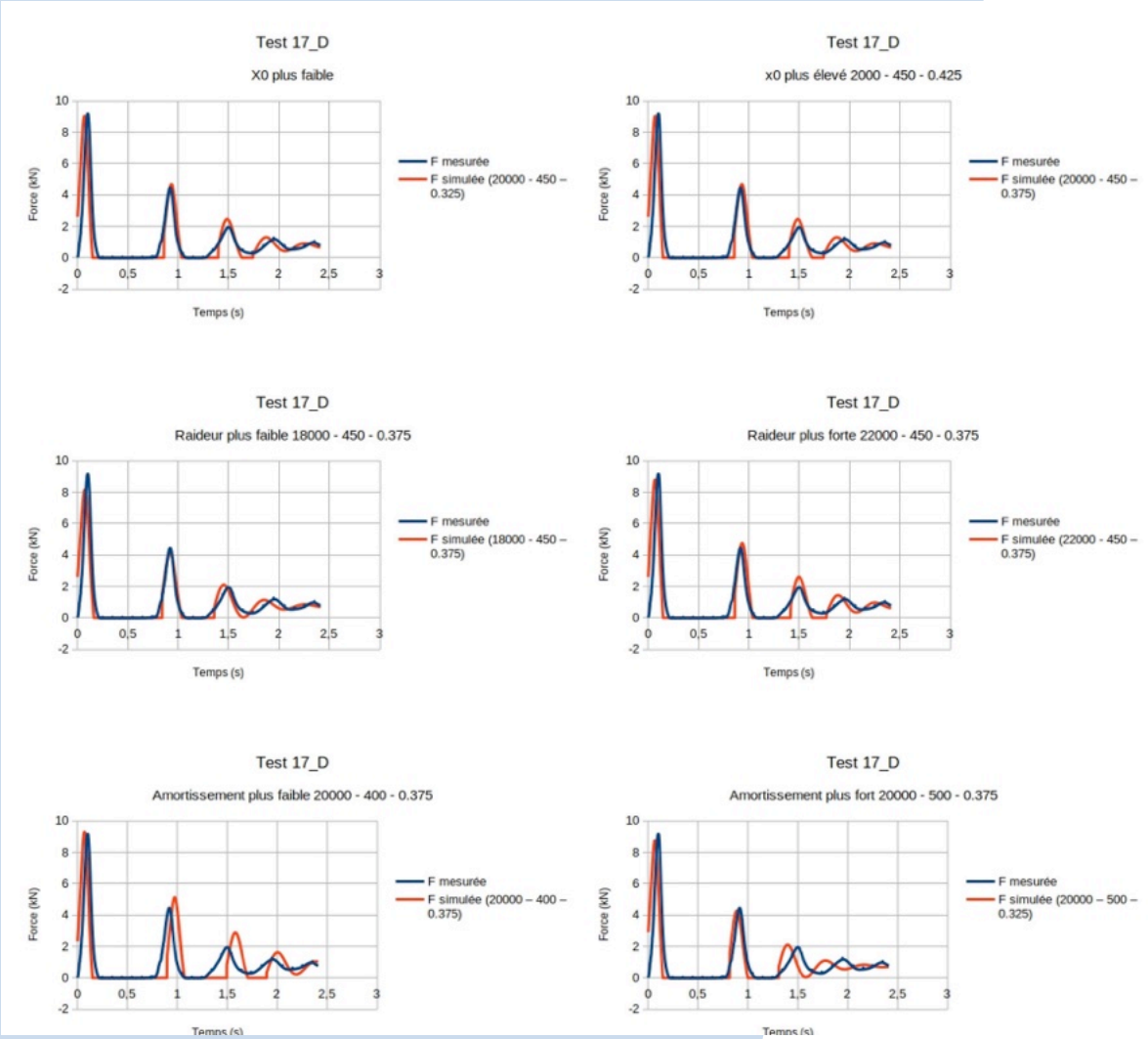


Figure 8 : effet de la variation des paramètres autour du meilleur jeu k = 20000 N.m-¹ ; α = 450 N.m-¹.s; x_o = 0.375 m - making of de l'ajustement.

Cas du test 17b

Les meilleurs ajustements sont les suivants (**Figure 9**) : *k* = 18500 N.m-¹ ; α = 600 N.m-¹.s ; $x_o = \infty$

Il n'y a pas besoin de prendre en compte de paramètre quantifiant la variation de la raideur pour obtenir un modèle réaliste (x_o tend vers ∞ pour cette « grosse » corde « classique »). Le modèle devient de moins en moins réaliste lorsque l'on écarte *k* et α des valeurs optimales (**Figure 10**).

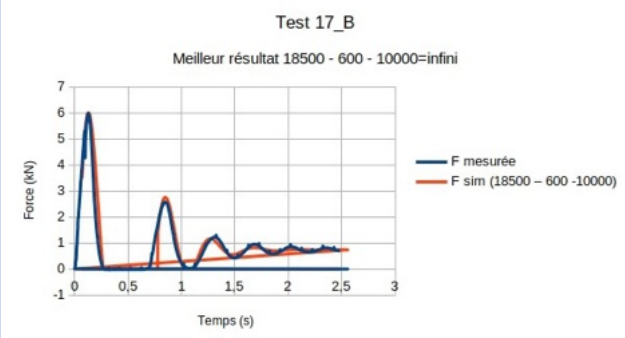


Figure 9 : meilleur ajustement pour le test 17b.

Cas du test C17i

Les meilleurs ajustements sont les suivants (Figure 11) : k = 70000 N.m-1 ; α = 1700 N.m-¹.s ; x_o = 0.2 m

Le comportement de cette corde légère complète l'éventail de comportement observé avec la corde « Spelenium » et la « Caving Line ». La faible valeur de x_o et la valeur élevée de rendent globalement la raideur de cette corde importante, évolutive et malaisée à ajuster (**Figure 11**).

Également, l'impossibilité d'exploiter le comportement aux basses énergies rend davantage précaires les meilleurs ajustements proposés (**Figure 12**).

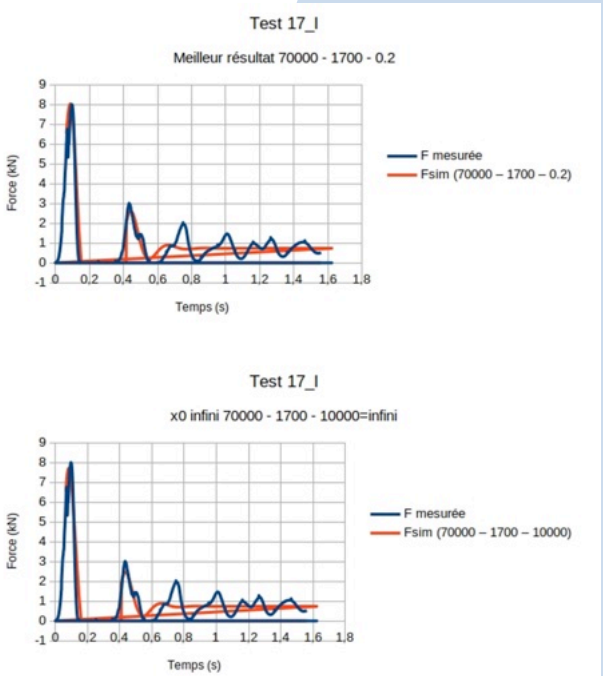


Figure 11 : meilleur ajustement pour les test 17i et comparaison avec $x_o = \infty$

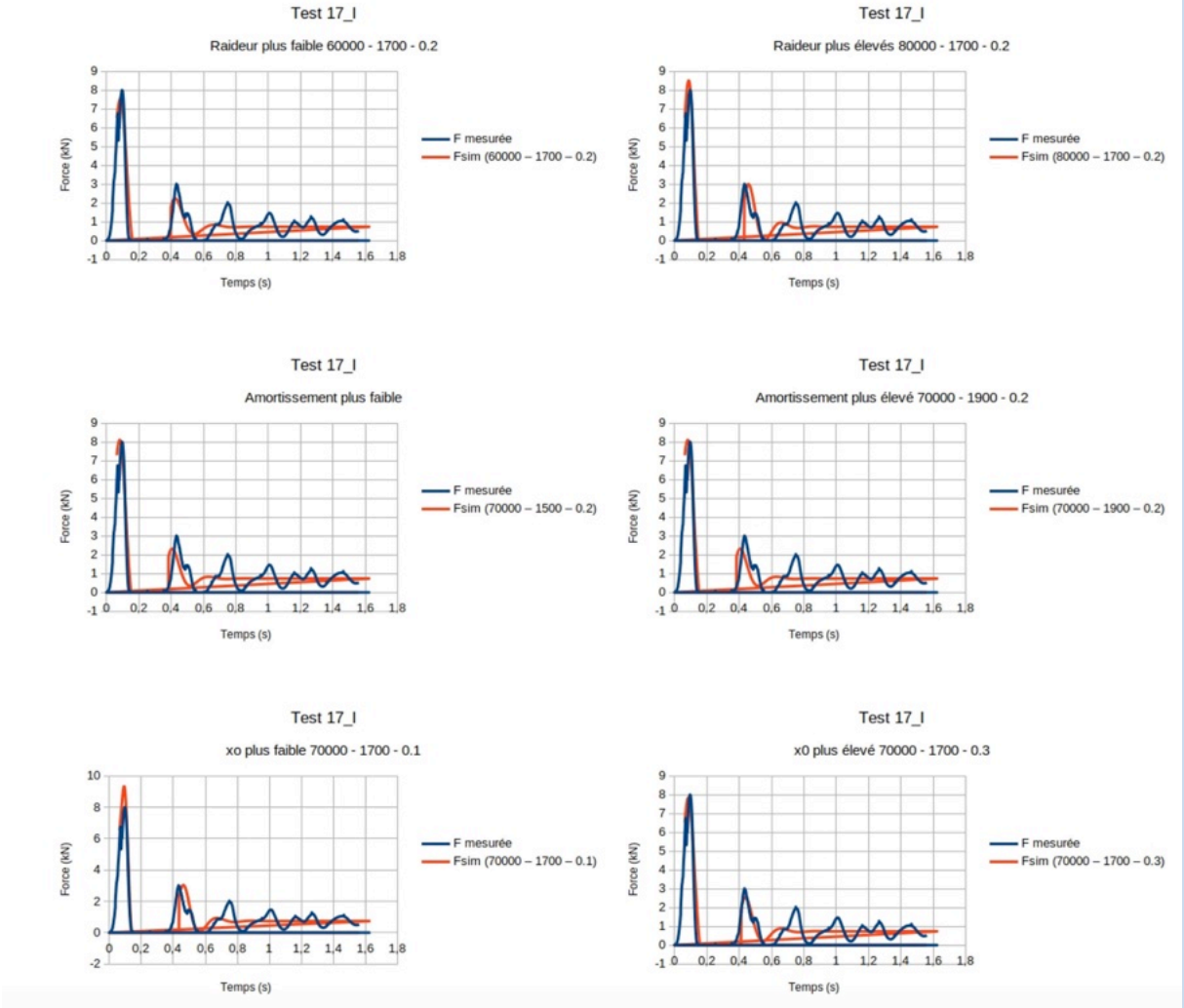


Figure 12 : précarité du meilleur ajustement k = 70000 N.m-¹ ; α = 1700 N.m-¹.s ; x_o = 0.2 m proposé - « making of » de l'ajustement.

Discussion et perspectives

Une modélisation plus poussée est prévue, notamment afin de comprendre et de reproduire la forme graduelle du début des pics de force, laquelle est observée mais pas reproduite par le modèle actuel.
La partie dissipative de la force provisoirement modélisée par $-\alpha\frac{dx}{dt}$ dépend certainement également du degré de tension de la corde, des fibres serrées les unes contre les autres exerçant potentiellement une force de frottement plus importante.

Des vidéos ont été prises durant les essais. Leur traitement pour accéder au déplacement demande des moyens que nous n'avons pas dans le cadre d'une action bénévole. C'est pourquoi nous avons privilégié les mesures de force. Néanmoins l'étude vidéo permettrait d'affiner la relation entre force, déplacement et vitesse de déplacement.
La comparaison de portraits de phase (*dx/dt* versus *x*) calculés et expérimentaux permettrait de préciser le degré de validité du modèle et d'investiguer plus en avant la loi de force.

Cependant, malgré les imperfections soulignées plus haut, notre modèle est suffisant pour montrer que l'allongement relatif sous charge (équivalent à *k*), seul paramètre fourni par les fabricants et abordé dans les normes, n'est pas absolument suffisant pour quantifier le comportement dynamique d'une corde.

Même avec un allongement relatif sous charge important (équivalent à « *k* assez faible » et « une corde absorbant bien l'énergie » dans une vision trop simpliste) : si x_0 est trop élevé la force maximale d'interception risque d'être trop élevée en cas de choc important. Cela peut conduire à des dommages corporels et/ou à la rupture de l'agrès.

La façon dont la force dépend de la vitesse d'allongement (paramètre α) a également son importance. Une valeur optimale de α permet de réduire la force maximale d'interception du premier et/ou du second pic de force.

Il serait donc souhaitable que les fabricants de corde mesurent ou apprennent à mesurer α et x_0 et si possible puisse contrôler ces valeurs lors de la fabrication de l'agrès. En fournissant ces paramètres au client, il pourra agir en connaissance de cause. On peut penser que x_0 chiffre la qualité de la corde, une haute qualité correspondant à une valeur élevée.

Côté utilisateur, en plus des processus physico-chimiques d'absorption ou adsorption d'eau sur des polymères, on peut penser qu'une corde sèche ou humide à cœur n'a pas le même coefficient de dissipation et par conséquent pas la même force maximale d'interception. De même, dans le cas d'une corde usagée et pénétrée par des particules d'argile.

Les trois paramètres *k*, α, x_0 introduits plus haut peuvent paraître abscons, leurs valeurs numériques particulières à un échantillon de corde : les essais ont été effectués sur des tronçons de corde de longueur L = 2.5 m tandis que les fabricants peuvent tresser et délivrer une longueur quelconque de corde.

Aussi il semble utile d'expliquer comment *k*, α, x_0 dépendent de la longueur de la corde et sont reliables à d'autres paramètres. Cela est évident si l'on considère deux cordes semblables mises en série (raboutée l'une après l'autre) :

• Pour une même force F, avec deux cordes en série le déplacement d'une corde est moitié du déplacement total : 1/*k* est proportionnel à la longueur et de même pour 1/α.

k = K/L ; α = A/L

• Les constantes K et A indépendantes de la longueur de la corde ayant été introduites, on peut considérer le déplacement relatif de la corde (quantité sans dimension).

δ = *x*/L.

• On peut ensuite reécrire ainsi la loi de force :

$$F = \frac{A}{L}\left(L\frac{d\delta}{dt}\right) + \frac{K}{L}(L\delta)\left(1 + \left(\frac{(L\delta)}{x_0}\right)^2\right)$$

• Il apparaît que x_0 peut se réécrire X_0L pour faire apparaître une troisième constante caractéristique indépendante de la longueur de la corde.

• L'unité de longueur a bien disparu de ce jeu de constantes caractéristiques : [K] =N ; [A] = N.s ; [X_0] = rien.
• « L'allongement relatif entre 50 et 150 daN », dans une vision « basses énergie », est en unités S.I. 10^3/K. On peut récapituler cela pour les trois échantillons de corde :

Echantillon	10^3/K	Allongement relatif	A(N.s)	X_0 (sans unité)
C17d	0.020	2.0 %	1125	0.15
C17b	0.022	2.2 %	1500	∞
C17i	0.0057	~ 0.6 %	4250	0.08

Conclusion :

La présente étude espère contribuer au développement de la spéléologie de pointe en introduisant de nouveaux paramètres nécessaires à quantifier le comportement des cordes lors d'un choc, notamment dans le cas de faible diamètre, quand on arrive aux limites de l'actuellement possible. L'allongement relatif entre 50 et 150 kg est un paramètre nécessaire mais pas suffisant.

:-) /!\Tout le travail a été effectué uniquement à l'aide d'intelligence naturelle. Aucun traitement à base de bêtise artificielle n'a été appliqué ni avant ni après récolte des données. <3

C20 Objectif : force de choc maximale admissible en cas de chute

Dr Philippe Auriol

La spéléologie est une activité qui nécessite une maîtrise des risques associés à la hauteur. Les accidents de chute sont peu fréquents, notamment grâce aux méthodes d'assurance personnelle, mais peuvent être très sérieux. Le niveau d'impact subi lors d'une chute dépend de plusieurs facteurs, tels que le poids, la hauteur de la chute, la longueur de la corde, la capacité d'absorption combinée du harnais, de la longe et de la corde, ainsi que des amarrages. Cet article traite des limites acceptables pour le corps humain et les méthodes techniques pour rester en dessous de ces limites.

Définition et facteurs influençant la force de choc

La force de choc est la force maximale transmise au corps et à l'ancrage lors de l'arrêt d'une chute. Elle est mesurée en kilonewtons (kN). Pour les cordes semi-statiques, elle dépend fortement du facteur de chute :

Facteur de chute = hauteur de chute / longueur de corde disponible

Plus ce rapport est élevé, plus la force de choc est importante. En spéléologie, on observe généralement des chutes de facteur 0,3 à 1. Le facteur 2 (chute de 2 m avec 1 m de corde) est rare, il est fréquent en alpinisme.

Limites : combien de kN le corps humain peut-il supporter ?

Selon la norme EN 958/2017, la force de choc transmise au corps ne doit pas dépasser 6 kN, seuil à partir duquel des lésions graves peuvent survenir.

Plusieurs études indiquent :

•Fracture de hanche chez femmes >65 ans : 2,5 kN [2]
•Fracture de la hanche chez les jeunes hommes : 2,8–4,0 kN [3]
•Lésions mortelles possibles : >12 kN [1]
•L'activation musculaire partiellement protège le bassin [4]

Rôle de la longe , du harnais et de la corde

Chaque élément absorbe une partie de l'énergie :

•Amarrage (?)
•Nœud dans l'amarrage (?)
•Longe dynamique : absorbe ~1,5 kN [5]
•Corde semi-statique : absorbe ~1 kN [5]
•Corde statique : absorbe <0,5 kN
•Harnais bien ajusté : répartit partiellement la force, gain estimé ~15 % [4]
Exemple : chute avec facteur 1 d'un spéléologue de 80 kg = 6,2 kN sans absorption. Avec une longe dynamique, une corde semi-statique et un harnais, la force est de 5,4 kN.

Effet de la masse du spéléologue

Les tests normalisés (EN 958) utilisent différents poids pour les essais :

•40 kg : limite de choc à 3,5 kN
•80 kg : 6 kN
•120 kg : risque de dépassement >6 kN

L'augmentation du poids entraîne une augmentation proportionnelle du choc. Il est recommandé aux personnes pesant plus de 100 kg d'utiliser des longes offrant un bon déploiement.

Exemple de configuration et recommandations

Spéléologue de 80 kg, chute de 2 m, corde disponible = 2 m
→ Facteur de chute = 1

Sans absorption : Force théorique : 6,2–6,5 kN

Avec absorption :

• Longe dynamique : –1,5 kN
•Corde semi-statique : –1 kN
•Harnais : –0,8 kN (15 %)

→ Force finale ≈ 5,4 kN

Recommandations :

•Utiliser des longes dynamiques certifiées UIAA [6]
•Éviter les facteurs de chute (points d'ancrage rapprochés ou doublés)
• Vérifier l'état des longes, cordes et amarrages
•Ajuster l'équipement en fonction du poids du pratiquant

Conclusion

La force de choc maximale admissible en spéléologie doit impérativement rester inférieure à 6 kN pour éviter les lésions graves. Ce seuil est rapidement atteint si les dispositifs d'absorption sont inadaptés ou si la chute présente un facteur élevé. En combinant longe dynamique, corde semi-statique et harnais ergonomique, on peut significativement réduire le risque. La compréhension de ces mécanismes physiques est essentielle pour évoluer en sécurité sous terre.

Références

[1]EN 958/2017 – Norme européenne pour longes de via ferrata.
[2]Lim KT et al., Osteoporosis International, 2020 ; fracture hanche femme >65 ans à 2,5 kN.
[3]Choi WJ et al., J Biomech, 2024 ; hanche homme jeune 2,8 à 4,0 kN.
[4]Kim SS et al., J Mech Behav Biomed Mater, 2023 ; rôle des muscles et du harnais.
[5]CREI – Tests sur cordes spéléo 6–9 mm ; document « spelelo-force-choc-chute.txt ».
[6]UIAA 109 – Exigences techniques pour longes dynamiques.

L'ÉQUIPE DE TESTEURS

***De gauche à droite** : Rémy Limagne, Pierre Boudinet, Florence Guillot, Felix Nilius, Christophe Rognon, Denis Langlois, Philippe Auriol, Samuel Gerente, Pierre Imbert, Sarah Monnin, Véronique Olivier.*

RETOURS D'EXPÉRIENCE

COMMISSION DES RELATIONS ET DES EXPÉDITIONS INTERNATIONALES

Les retours d'expériences de la CREI :
https://crei.ffspeleo.fr/Infos/rex.php

L'essentiel de la topo :
https://crei.ffspeleo.fr/Telechargement/CREI_essentiel_topo.pdf