

# Petite étude mécanique du descendeur Petzl ordinaire

Baudouin Lismonde, juin 2005

Le descendeur est un dispositif mécanique qui permet, grâce au frottement, de glisser le long d'une corde en limitant la vitesse de descente. La conception du descendeur ordinaire Petzl est ancienne (spéléo club de Paris dans les années 1930, Bruno Dressler pour le *design* dans les années 1960). L'appareil commercialisé par les établissements Petzl est constitué de deux poulies fixes autour desquelles la corde glisse en dessinant un S. Le contact entre le métal et le nylon de la corde engendre un frottement. La traction plus ou moins forte sur le brin du bas permet au spéléo de régulariser la vitesse de descente. Le principe de fonctionnement est que la force en A est plus petite que celle en D du fait des frottements. Un flasque pivotant permet d'empêcher la sortie de la corde.

L'étude que nous présentons est venue des questions que l'on peut se poser au sujet de l'accident de Gérard Ayad au Pot 2 le 18 juin 2005. Quel est le rôle du coefficient de frottement de la corde sur la position de fonctionnement du descendeur ? Ce sont ces deux paramètres : force de traction du spéléo sur la corde et angle d'inclinaison du descendeur que nous allons étudier pour différentes valeurs du coefficient de frottement.

Nous commençons l'étude par quelques réflexions sur le frottement dans un descendeur, puis nous étudions ensuite un descendeur fonctionnant à vitesse constante. On sait que les différentes forces travaillent transformant en chaleur l'énergie potentielle de gravité du spéléo. Nous supposons le coefficient de frottement donné (et variable). Il est bien évident qu'au cours d'une descente normale, la vitesse du spéléo évolue par à coup, et donc que les forces fluctuent dans le temps. Nous n'envisagerons pas ce phénomène.

## 1- Le frottement corde sur métal

Le frottement de deux corps solides (poulie et corde ici) fait qu'une force normale (perpendiculaire à la surface de contact) de l'un sur l'autre s'accompagne toujours d'une force tangentielle qui s'oppose au mouvement de glissement (loi dite de Coulomb). Le coefficient de frottement  $f$  est le rapport entre la force tangentielle et la force normale. Le coefficient de frottement dépend un peu de la vitesse. À vitesse de glissement nulle, il est un peu plus grand qu'avec une vitesse non nulle. Classiquement, on rencontre des coefficients de l'ordre de 0,1 à 0,4. La graisse, la glace, l'argile aussi, diminuent le coefficient de frottement.

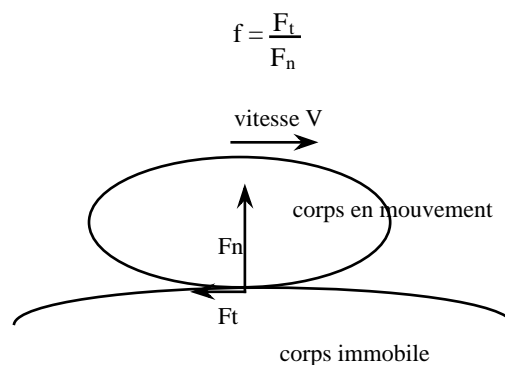


Fig. 1- Le glissement engendre du frottement, le corps immobile sur lequel glisse le corps en mouvement réagit par deux forces : l'une normale  $F_n$  et l'autre tangentielle  $F_t$ .

Mais pour un descendeur spéléo du genre Dressler, la surface de frottement n'est pas plane. La gorge de la poulie est en effet courbe, et cette courbure évolue dans le temps à cause de l'usure et en fonction du diamètre de la corde utilisée habituellement.

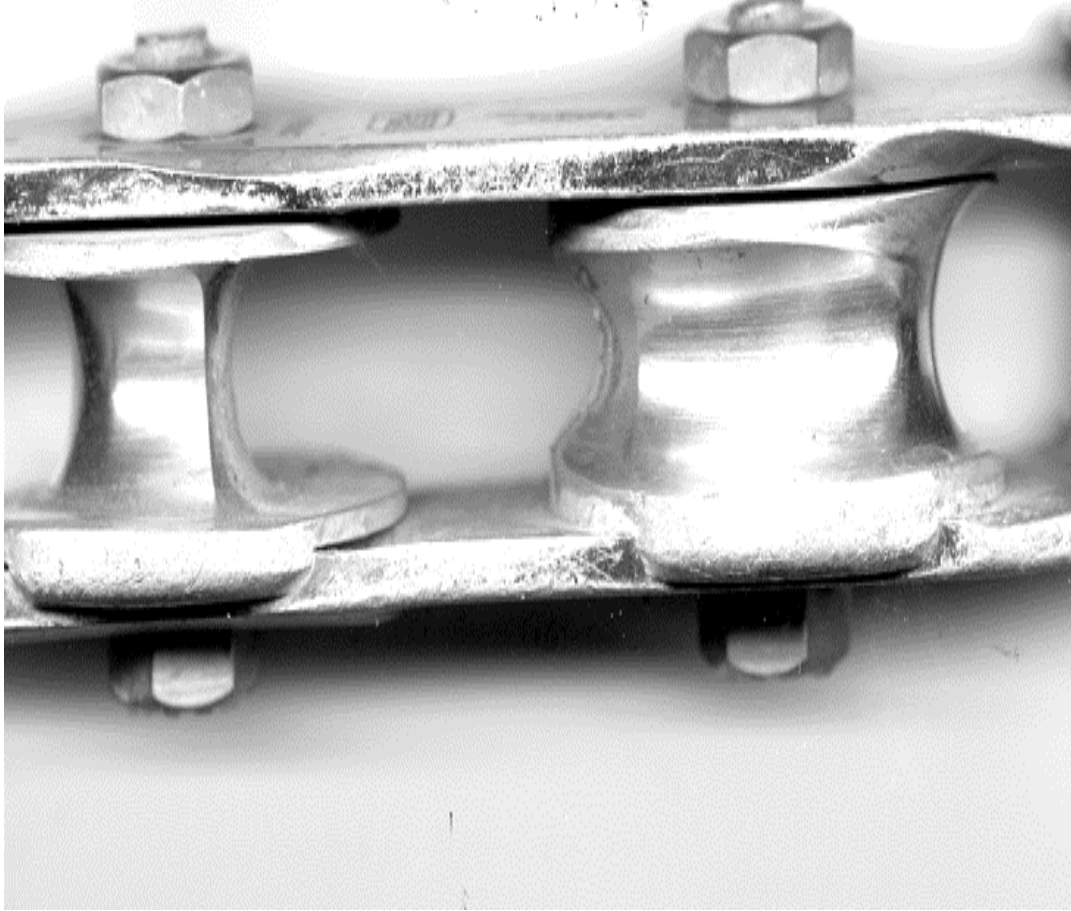


Fig. 2- Un descendeur Petzl usé a des poulies fortement modifiées

Le frottement de la corde sur la gorge d'une poulie fixe de descendeur peut se décomposer en deux facteurs. D'une part, un frottement minimum avec un coefficient de frottement  $f_1$ , qui correspondrait à une gorge plate, d'autre part, un deuxième frottement,  $f_2$ , dû au pincement de la corde du fait de la courbure transversale de la gorge. C'est la somme de ces deux facteurs que nous nommons coefficient de frottement ( $f = f_1 + f_2$ ). Il s'agit d'un frottement équivalent. Le frottement  $f_2$  est en fait défini par la relation ci-dessus. En effet, les seuls coefficients accessibles par les mesures sont les coefficients  $f_1$  et  $f$ .

Quand une corde est de faible diamètre (8 mm) le coefficient de frottement se réduit à  $f_1$ , ce qui justifie la constatation que les cordes fines glissent plus que les autres. Plus le diamètre de la corde augmente et plus le coefficient  $f_2$  augmente (à poulie constante), ce qui amène un blocage complet du descendeur pour les gros diamètres de cordes. C'est pour cette raison que les poulies d'un descendeur sont prévues pour un diamètre ou pour une gamme de diamètre donnée.

Le mousqueton de freinage Raumer utilise exclusivement le coefficient  $f_2$  car la largeur de passage de la corde varie automatiquement avec le diamètre de la corde

Il n'est pas facile de calculer  $f_2$  en fonction de  $f_1$  quand la poulie est arrondie car la corde se déforme d'une manière complexe en fonction de son âge, de sa marque et de son diamètre. Et par ailleurs, la poulie se modifie en fonction de la corde utilisée habituellement.

### **Cas simple du mousqueton Raumer**

En revanche il est plus facile d'estimer  $f$  (donc  $f_2$ ) dans le cas d'un mousqueton de freinage Raumer. Examinons cette question.

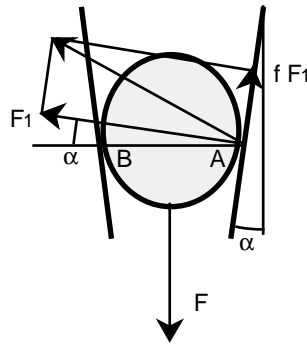


Fig 3- Le freinage dans le mousqueton Raumer

La force  $F$  centripète (cf. dessin ci-dessus) exercée par la corde sur le mousqueton provient du fait que la corde est courbée au passage du mousqueton. La tension de la corde se traduit par une force vers le centre de courbure que nous baptisons  $F$ . Cette force  $F$  dépend de la tension de la corde et du rayon de courbure de la corde. Pour une force  $F$  donnée, le mousqueton exerce sur la corde deux forces normales du genre  $F_1$  de chaque côté (aux points de contact A et B). Mais le frottement ajoute deux forces tangentielles  $f_1 F_1$  dans le plan de la figure. Pour un angle  $2\alpha$  formé par les deux branches du mousqueton Raumer (le mousqueton est effilé), on a la relation (en projection sur la verticale) :

$$2 F_1 \sin\alpha + 2 f_1 F_1 \cos\alpha = -F \Rightarrow \frac{F_1}{F} = \frac{1}{2(\sin\alpha + f_1 \cos\alpha)}$$

On en conclut que la force  $F_1$  est proportionnelle à  $F$ , mais qu'elle est systématiquement plus grande d'un facteur qui dépend de l'angle du sifflet,  $\alpha$ , et du coefficient de frottement  $f_1$ . Dans le plan perpendiculaire à la figure, la force totale vectorielle ( $2 F_1$ ) engendre une force de freinage qui vaut à peu près  $2 f_1 F_1$ . On en déduit que le coefficient de freinage équivalent vaut dans ce cas simple (mousqueton Raumer) :

$$f = \frac{2 F_1}{F} = \frac{1}{\sin\alpha + f_1 \cos\alpha}$$

Si l'angle  $\alpha$  est petit, le coefficient  $f$  est alors égale à  $1/f_1$ , c'est-à-dire qu'il est plus grand que  $f_1$ , et même, plus grand que 1. Pour un angle  $\alpha = 5^\circ$ , et pour un coefficient  $f_1 = 0,2$ , on trouve la valeur  $f = 3,5$ . On constate donc la grande efficacité d'un tel freinage. Dans le descendeur à gorge courbe, l'efficacité est moins bonne, mais néanmoins sensible, comme peut le constater celui qui passe d'une corde de 10 mm à une corde de 8 mm.

### Glissement autour d'un axe

Montrons qu'une corde parfaitement souple déviée sur un solide d'un angle  $d\theta$  donné voit sa tension changer à cause du frottement  $f$ .

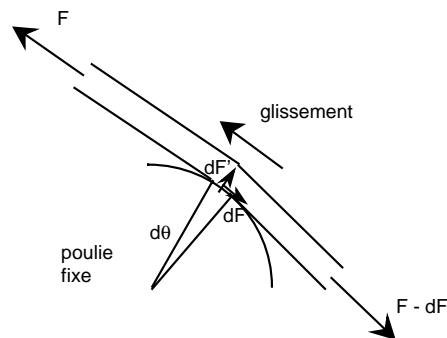


Fig. 4- Glissement sur une longueur faible

La corde a sa tension déviée de l'angle  $d\theta$ . On en déduit que la corde exerce une force faible sur la poulie obéissant à l'équation :

$$\vec{F} + \vec{F} + d\vec{F} + \vec{dF}' = 0$$

Ce qui donne en projection sur la normale :

$$dF' \approx F \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) + F \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \approx F \sin(d\theta) = F d\theta$$

La force de frottement qui en résulte est proportionnelle à  $dF'$  et au coefficient de frottement dynamique  $f$ .

$$dF = f dF' = -f F d\theta$$

Dans l'équilibre des forces sur la tangente, on en déduit que la différence des forces  $F$  et  $F - dF$  est égale à cette force tangentielle, ce qui justifie la notation utilisée.

La relation de base sur la tension d'une corde est donc :

$$\frac{dF}{F} = -f d\theta \Rightarrow F = F_0 \exp(-f\theta)$$

Ce n'est pas la longueur de frottement qui fait le freinage, mais la déviation angulaire de la corde. Le force de freinage augmente exponentiellement avec l'angle de déviation de la corde. On utilise empiriquement ce phénomène quand on oriente plus ou moins la corde sur le mousqueton de freinage.

## 2- Étude du cas sans mousqueton de sécurité

Nous supposons que la corde est simplement tenue (par le spéléo qui descend), sans être repassée dans un mousqueton. On suppose par ailleurs que le spéléo se contente de tirer la corde vers le bas. Cette configuration est déconseillée, mais elle nous servira de référence pour les autres méthodes.

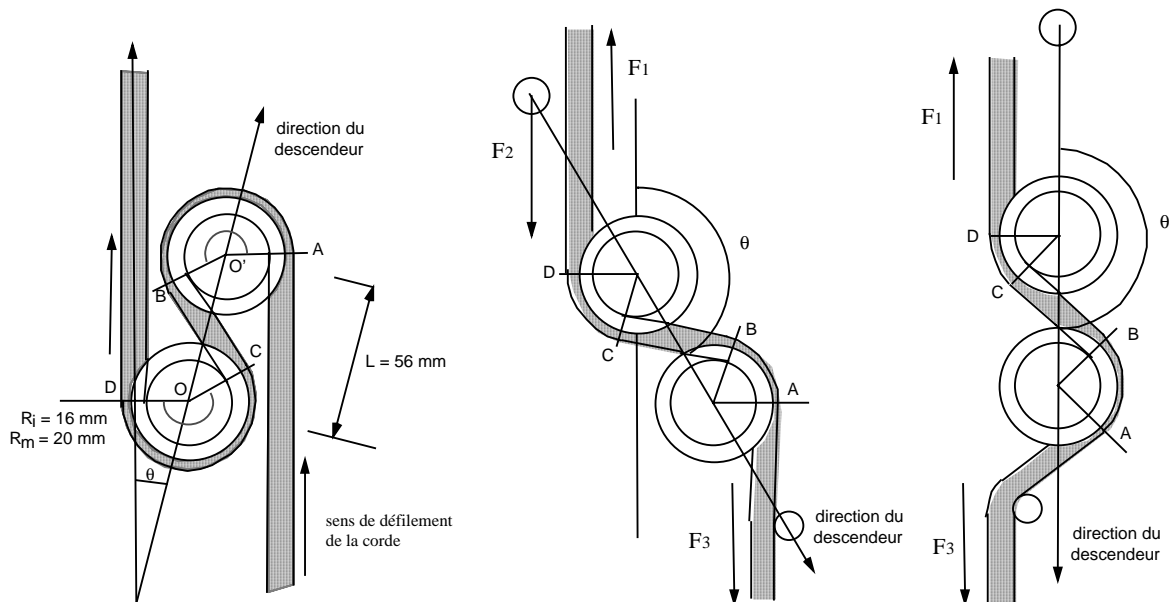


Fig. 5- Le descendeur avec la corde en place sans système de freinage supplémentaire  
 Au milieu, descendeur ayant basculé en avant. Examinez la longueur de frottement de la corde  
 À droite, le descendeur ayant complètement pivoté, le réa 3 entre en jeu

On comprend bien que le coefficient de frottement entre la corde et les poulies fixes en dural joue un rôle important dans le fonctionnement de l'appareil. Si pour une raison ou une autre (par exemple : corde boueuse

ou corde encore enduite de l'apprêt avec lequel elle est vendue), le coefficient de frottement vient à diminuer, l'appareil a son fonctionnement perturbé. Le spéléo sent que la corde glisse trop fort et il est obligé d'exercer une force plus grande sur le brin qui va en bas.

**Le freinage de la corde.** La force de freinage sur une surface croît exponentiellement avec l'angle de déviation de la corde, et croît linéairement avec la force  $F_3$  (ou  $F_1$ ).

On en déduit la relation (approchée, car les poulies peuvent être usées différemment) entre la force  $F_3$  et la force  $F_1$  :

$$F_3 = F_1 \exp(-f(\varphi_1 + \varphi_2))$$

Dans cette relation  $F_3$  est la force qui s'exerce sur le brin qui part vers le bas (force exercée par le spéléo).  $F_1$  est la force qui s'exerce sur le tronçon de corde qui part vers le haut.  $f$  est le coefficient de frottement, rapport entre la force tangentielle et la force normale.  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont les angles de déviation de la corde sur les poulies (réas) du descendeur. Ces angles dépendent de l'angle d'inclinaison  $\theta$  du descendeur. Nous supposons dans tout ce qui suit que le coefficient de frottement dépend peu de la température.

Il est facile de voir que le freinage est d'autant plus efficace que la somme des deux angles AO'B ( $\varphi_2$ ) et DOC ( $\varphi_1$ ) est plus grande.

Trouvons la relation entre  $\varphi_1 + \varphi_2$  et  $\theta$ , l'angle d'inclinaison du descendeur par rapport à la verticale. Les points C et D sont fixes sur le descendeur (et ne dépendent que de l'usure des poulies). L'angle DOC =  $\varphi_1$  se calcule à partir de la valeur maximale pour  $\theta = 0$ , il diminue ensuite suivant la loi :  $\varphi_1 = 220 - \theta$ . (en degrés).

De même, l'angle AO'B =  $\varphi_2$  diminue quand l'angle  $\theta$  augmente, mais il dépend aussi de l'angle de sortie de la corde. Appelons  $\alpha$ , cet angle par rapport à la verticale ( $\alpha$  est positif si la corde est rapprochée du descendeur et négatif si elle est éloignée)  $\varphi_2 = 220 - \theta + \alpha$ . Cette dernière formule cesse d'être valable quand la corde vient toucher le troisième réa placé en haut du descendeur. Cela arrivera pour un angle  $\theta = 135^\circ$  environ.

On en déduit l'expression approchée (les angles  $\theta$  et  $\alpha$  sont en degrés et  $\theta < 135^\circ$ ). On rappelle que  $\theta$  est l'angle d'inclinaison du descendeur par rapport à la verticale et que  $\alpha$  est l'angle d'inclinaison de la corde du bas par rapport à la verticale :

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 440 - 2\theta + \alpha \quad (\text{en degrés})$$

Sur les trois dessins de la figure 5, on voit nettement que l'inclinaison du descendeur s'accompagne d'une diminution de la longueur de frottement.

Des mesures statiques à l'IUT Génie Thermique de Grenoble (1999), à l'occasion de mesures thermiques, ont fourni des valeurs du coefficient de frottement moyen à froid, de l'ordre de 0,25.

**Les forces.** L'équilibre statique (le descendeur ne bouge pas ou se déplace à vitesse constante) impose à la somme des forces extérieures agissant sur le descendeur d'être nulle. Les forces sont définies comme sur la figure 1-b. La convention pour une corde est de la couper par la pensée et de remplacer la corde manquante par une force vers l'extérieur, égale par définition à la tension de la corde. Ainsi  $F_1$  est la force qu'exerce la partie supérieure de la corde sur la partie de la corde au voisinage du descendeur. On néglige le poids du descendeur. Il ne reste plus que le poids du spéléo ( $P_s$ ) et le poids de la corde ( $P_c$ ). Ce qui conduit à la relation (figure 1-b) :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{P}_s + \vec{P}_c = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

Dans cette relation,  $F_1$  et  $F_2$  proviennent de la tension de la corde alors que  $F_2$  est la force qu'exerce le mousqueton sur le descendeur (le descendeur exerce sur le mousqueton la force  $-F_2$ ).

Et comme il existe une relation entre  $F_1$  et  $F_3$  (cf. au-dessus) :

$$\vec{F}_2 = (\vec{P}_s + \vec{P}_c)(1 - F) \quad \text{avec } F = \exp\left(-\frac{\pi f}{180}(440 - 2\theta + \alpha)\right)$$

En réalité,  $F_2$  n'est pas verticale du fait de l'angle  $\alpha$ . Mais l'inclinaison de cette force est petite si l'angle  $\alpha$  reste peu important. Nous négligeons cette inclinaison en première approximation.

On remarque que la formule indique que la force exercée en bas serait égale à  $F_1$  (le mousqueton d'accrochage vers le spéléo est alors sans tension) si  $\theta = 220^\circ$ . Mais cela ne sera pas réalisé à cause du 3<sup>e</sup> réa qui touche alors la corde et oblige de modifier les relations.

**Les moments.** L'équilibre statique du descendeur impose qu'en un point la somme des moments des forces extérieures soit nulle. La force  $F_3$  est supposée exercée dans une direction faisant un angle  $\alpha$  avec la verticale. Si  $\alpha$  est positif, la corde se rapproche du descendeur. Pour calculer les moments, on se place au point E, point d'appui du mousqueton sur le descendeur :

Les distances intervenant dans le calcul des moments,  $c$  pour  $F_1$  et  $d$  pour  $F_3$  :

$$c = a \sin \theta - R_M \quad d = b \sin (\theta - \alpha) + R_M$$

La somme des moments en E est nulle (car le contact mousqueton-descendeur étant ponctuel ne peut pas transmettre de moment), ce qui se traduit par la relation :

$$c F_1 = d F_3 \Leftrightarrow (a \sin \theta - R_M) F_1 = [b \sin (\theta - \alpha) + R_M] F_3$$

$$a \sin \theta - R_M = [b \sin (\theta - \alpha) + R_M] F \quad \text{avec } F = \exp\left(-\frac{\pi f}{180}(440 - 2\theta + \alpha)\right)$$

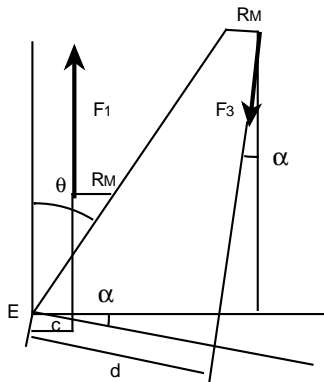


Fig. 6- Les deux forces de basculement

On en déduit la valeur de l'angle  $\theta$  par la relation :

$$\sin \theta = \frac{R_M(1 + F)}{a - b(\cos \alpha - \cotg \theta \sin \alpha) F}$$

Il reste  $\cotg \theta$  dans le membre de droite. L'équation est délicate à résoudre, et comme  $F$  dépend de  $\theta$ , nous utiliserons une méthode itérative de résolution pour trouver  $\theta$  en fonction de  $f$ . On fait cela sur un tableur. On choisit pour paramètres (relevés sur le descendeur Petzl) :  $a = 80$  mm ;  $b = 136$  mm ;  $R_M = 20$  mm.

$$\sin \theta = \frac{20(1 + F)}{80 - 136(\cos \alpha - \cotg \theta \sin \alpha) F} = 0,25 \frac{1 + F}{1 - 1,7(\cos \alpha - \cotg \theta \sin \alpha) F}$$

La force  $F_3$  se calcule, à partir de  $F_1$ , par la relation :

$$F_3 = F F_1 \quad \text{avec } F_1 = P_s + P_c$$

Une fois le calcul fait, on trace les valeurs de  $\theta$  en fonction de  $f$  (pour  $\alpha = 0$ ) :

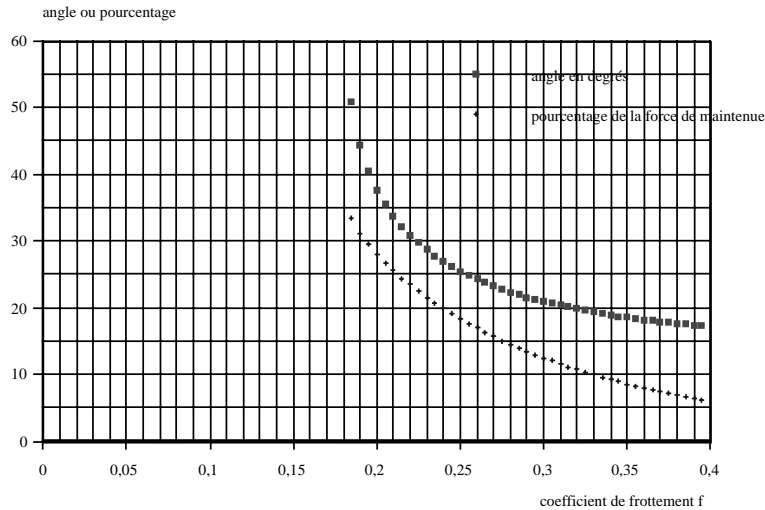


Fig. 7- Courbe du haut : inclinaison du descendeur en fonction de  $f$ , avec  $\alpha = 0$   
 Courbe du bas rapport de la force  $F_4/F_1$ . On voit que la force  $F_4$  augmente quand  $f$  diminue

Pour un coefficient de frottement moyen inférieur à 0,25, le descendeur se met à s'incliner, puis pour la valeur 0,18 le descendeur plonge vers le bas. Il n'y a plus d'équilibre possible quand le spéléo continue à tirer verticalement vers le bas. En effet, la force  $F_3$  fait basculer le descendeur et la force  $F_1$  ne peut pas empêcher ce basculement (à cause du bras de levier trop court). Mais une fois que le descendeur est dans la position de la figure 1-c, le couple de basculement s'arrête. On atteint une position d'équilibre qui n'est pas intéressante puisque le spéléo doit tirer vers le bas presque de tout son poids, (ce qui supprime l'intérêt du descendeur).

Si on fait varier l'angle  $\alpha$  (qu'on a pris égal à 0 pour le calcul), on trouve qu'une valeur positive de cet angle retarde le basculement du descendeur et améliore donc ses performances. Ce geste d'augmenter l'angle  $\alpha$  est celui que fait spontanément le spéléo.

**Conclusion :** quand le coefficient de frottement est trop petit, il n'y a pas de descente possible en tirant vers le bas la corde qui va vers le bas. On pourrait au contraire la remonter vers le haut en la passant sur le troisième réa, autour de l'épaule, ou autre. On voit que cette configuration sans freinage supplémentaire est dangereuse. C'est pour cette raison qu'elle est déconseillée.

### 3- Étude du cas avec méthode de freinage Vertaco

En pratique, la corde qui va vers le bas est passée autour d'un mousqueton. De ce fait, et en tirant la corde vers le haut, on peut régler la longueur de freinage à la demande (en augmentant l'angle de contact), ce qui permet d'exercer une force  $F_4$  vers le bas assez importante s'il le faut.

Dans la méthode Vertaco, la corde qui sort de la poulie (en principe en haut) est repassée dans le mousqueton qui tient le descendeur. Cette méthode a l'inconvénient d'obliger la corde à passer contre un des flasques du descendeur provoquant une certaine usure. Par ailleurs, le mousqueton qui tient le descendeur s'use aussi, obligeant le spéléo à le changer régulièrement (ou à le choisir en acier). Certains même disent que cette méthode revient à scier la branche sur laquelle on est assis ! Cette méthode a néanmoins l'avantage de ne pas nécessiter de mousqueton supplémentaire, et d'avoir une corde qui garde toujours la même position par rapport au descendeur.

Il y a trois angles principaux :  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ . Le premier caractérise l'inclinaison du descendeur, le second la direction de la corde qui entre dans le descendeur, le dernier la direction que le spéléo imprime à la corde qui vient du bas.

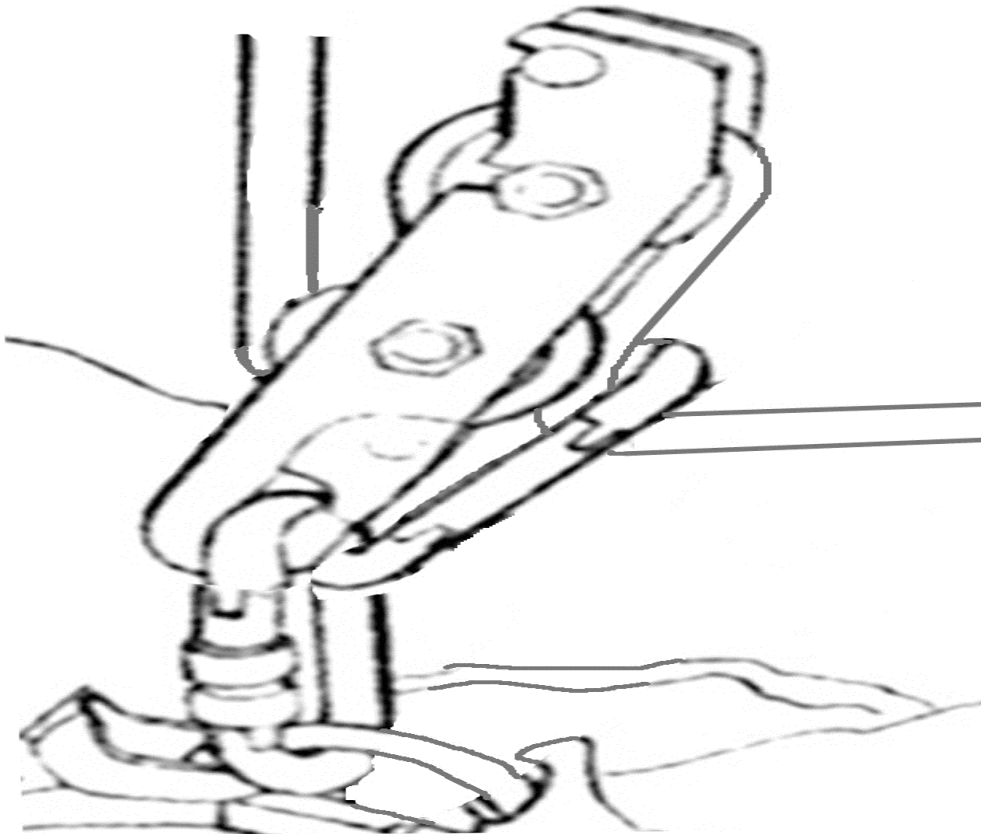
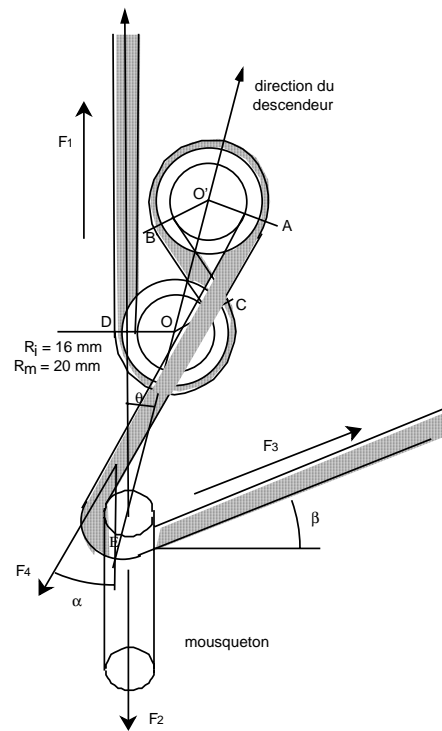


Fig. 8- Position du descendeur en mode de freinage Vertaco avec à droite la variante avec mousqueton sur celui du descendeur



**Les forces en présence en méthode Vertaco.** Si on considère le descendeur seul, il est soumis par la corde aux forces  $F_1$  et  $F_4$  et par le mousqueton à la force inconnue  $F'_2$ . La force  $F_1$  est bien sûr égale à l'opposé du poids du spéléo et de la corde.

L'équilibre du descendeur se traduit donc par l'équation des forces :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}'_2 + \vec{F}_4 = 0$$

Le mousqueton soumet la corde à une force vectorielle  $F''_2$  provenant de la déviation et du freinage supplémentaire de la corde sur le mousqueton. L'équilibre de la corde s'écrit :

$$-\vec{F}_4 + \vec{F}_3 + \vec{F}''_2 = 0$$

Le mousqueton est soumis vers le bas à la force  $F_2$  et vers le haut aux forces (vectorielles)  $-F'_2$  et  $-F''_2$  provenant respectivement du descendeur et de la corde :

$$\vec{F}_2 - \vec{F}'_2 - \vec{F}''_2 = 0$$

Le spéléo, quant à lui, est soumis à quatre forces dont la somme est nulle :

$$\vec{P}_s + \vec{P}_c - \vec{F}_3 - \vec{F}_2 = 0$$

Si on fait la somme membre à membre de toutes les équations, on retrouve 0 pour cette somme, c'est-à-dire l'équilibre global, ce à quoi on s'attendait.

**Position angulaire.** La position angulaire du descendeur dépend des moments. Écrivons que le moment au niveau du contact du mousqueton (point E) est nul. Si la force  $F_4$  est petite, on en déduit que le descendeur adopte à peu près la position de la figure 4 telle que la force  $F_1$  passe par E. Si la force  $F_4$  augmente par suite d'un coefficient de frottement insuffisant, le couple induit est dans le sens antihoraire. La force  $F_1$  doit donc se décaler vers la gauche, et l'angle  $\theta$  diminue un peu.

Calculons l'angle total correspondant au frottement de la corde sur le descendeur en fonction de l'angle  $\theta$ .

DOC =  $220 - \theta$  . (en degrés).

AO'B =  $305 - \theta$ , d'où l'expression de F :

$$F = \exp\left(-\frac{\pi f}{180}(525 - \theta)\right)$$

L'équilibre des moments en E s'écrit :

$$c F_1 = -d F_4 \Leftrightarrow (a \sin\theta - R_M) F_1 = -d F_4$$

$$\sin\theta = \frac{-d F + R_M}{a} = \frac{2 - F}{8}$$

Dans cette expression, d est à peu près égal au diamètre du fil du mousqueton de freinage, donc de l'ordre de 1 cm,  $R_M$  vaut à peu près 2 cm et  $a = 8$  cm. Ce sont ces valeurs que nous avons retenues pour le calcul.

L'intérêt de cette méthode Vertaco (figure 7) réside dans le fait que la force  $F_4$ , malgré son importance, n'engendre jamais un grand couple de basculement.

L'insuffisance du coefficient de frottement est dangereuse en terme de force  $F_3$  qui devient trop grande pour le spéléo, mais pas en terme de pivotement de descendeur. La solution pour diminuer la force  $F_3$  est de faire passer la corde sur l'épaule ou sur d'autres systèmes de freinage, sachant que la corde va brûler à la longue le tissu de la combinaison. Dans tous les cas, l'insuffisance du coefficient de frottement rend la descente fort pénible et dangereuse.

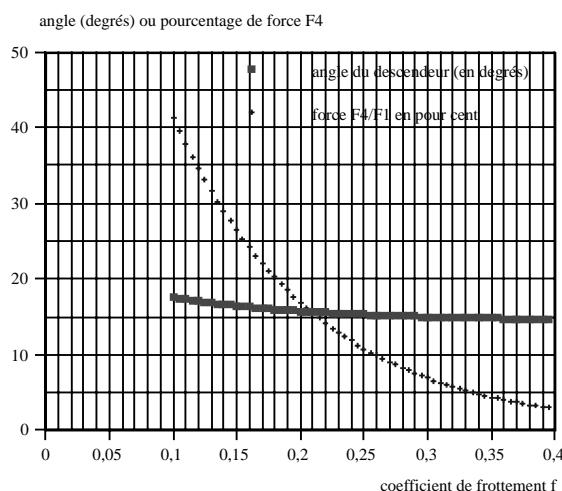


Fig. 9- Angle d'inclinaison du descendeur en fonction de f (méthode Vertaco) et force à exercer  $F_4/F_1$  exprimée en pourcent

La variante de la méthode Vertaco présentée sur la figure 4-b est assez peu différente de cette dernière. Sans faire de calcul, on peut penser que le freinage sera un peu inférieur à celui de la méthode Vertaco, mais avec l'avantage de ne pas user le mousqueton du descendeur. C'est la méthode maintenant préconisée par l'école française de spéléo. Le couple de basculement est limité, plus grand que dans la méthode Vertaco, mais plus petit que dans la méthode que nous allons analyser ci-dessous.

#### 4- Freinage avec mousqueton fixé sur le mousqueton de ceinture

Nous prenons comme disposition celle qui est préconisée dans le livre Marbach-Tourte (auquel nous empruntons le dessin de la figure ci-dessous à gauche). Cette méthode est aussi celle qui a été longtemps retenue par l'EFS et qui est donc quelquefois enseignée dans les clubs aux spéléos débutants.

Le descendeur est soumis à trois forces : la force  $F_1$  égale à l'opposé du poids du spéléo et de la corde ( $F_1 = -P_s - P_c$ ), la force  $F_4$  qui se déduit de la force  $F_3$  par la longueur de frottement et le rayon de courbure du mousqueton, et la force  $F_2$  qui se calcule en faisant l'équilibre des forces sur le spéléo.

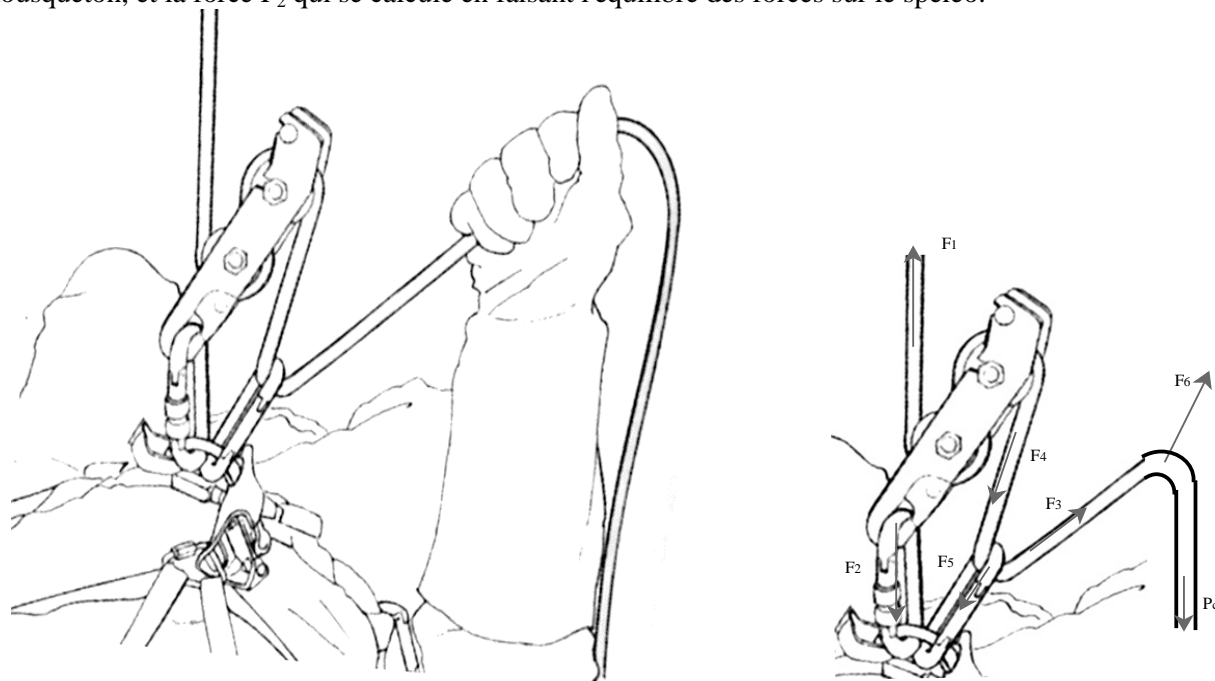


Fig. 10- Freinage de la corde par mousqueton séparé. Forces en présence

Le spéléo est soumis à son poids  $P_s$ , aux forces vectorielles  $-F_2 - F_5$  et à la force vectorielle :  $-F_6$ . On en déduit la relation :

$$\vec{P}_s - \vec{F}_2 - \vec{F}_5 - \vec{F}_6 = 0$$

Le triangle des forces sur le mousqueton de freinage fournit la relation :

$$-\vec{F}_4 + \vec{F}_5 + \vec{F}_3 = 0$$

Le triangle des forces sur la corde au niveau de la force  $F_6$  conduit à :

$$-\vec{F}_3 + \vec{F}_6 + \vec{P}_c = 0$$

L'équilibre des forces sur le descendeur s'écrit donc :

$$-\vec{P}_s - \vec{P}_c + \vec{F}_2 + \vec{F}_4 = 0$$

Comme on pouvait s'y attendre, la somme des quatre équations (membre à membre) est bien nulle. Elle traduit l'équilibre global de l'ensemble (spéléo + mousqueton + corde + descendeur).

**Inclinaison du descendeur.** Analysons maintenant l'angle que prend le descendeur en écrivant que le moment au point d'accrochage du mousqueton, le point E, est nul :

$$(a \sin \theta - R_m) F_1 = d F_4 \quad \text{avec} \quad d = b \sin (\theta - \alpha) + R_m$$

$$F_4 = F_1 \exp \left( -f \frac{L_1 + L_2}{R_i} \right) = F_1 F$$

D'où la relation :

$$a \sin \theta - R_m = (b \sin (\theta - \alpha) + R_m) F$$

On en déduit l'angle  $\theta$  :

$$\sin \theta = \frac{b F \sin (\theta - \alpha) + R_m (1 + F)}{a}$$

On prendra comme valeurs numériques :  $a = 80 \text{ mm}$  ;  $b = 134 \text{ mm}$  ;  $R_m = 20 \text{ mm}$ . Malheureusement l'angle  $\alpha$  dépend de l'angle  $\theta$  d'une façon complexe puisqu'il dépend des longueurs respectives des deux mousquetons. Au vu du dessin, on pourra adopter la relation approchée :  $\alpha = \theta - 20^\circ$ .

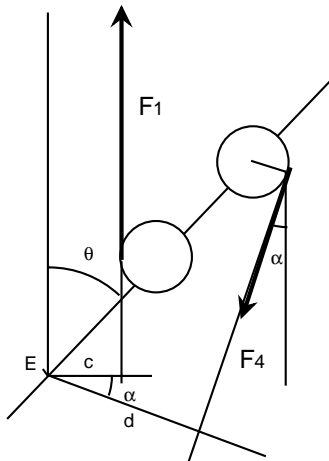


Fig. 11- Les moments des forces au point d'accrochage E

L'expression de F est la même que dans le premier calcul.

$$F = \exp \left( -\frac{\pi f}{180} (440 - 2 \theta + \alpha) \right) \approx \exp \left( -\frac{\pi f}{180} (420 - \theta) \right)$$

D'où :

$$\sin\theta = 0,825 F + 0,25$$

On résoud cette équation par une méthode itérative sur un tableur. On se donne  $\theta$  petit, ce qui donne  $F$ , puis on itère en remplaçant  $\theta$  par sa nouvelle valeur.

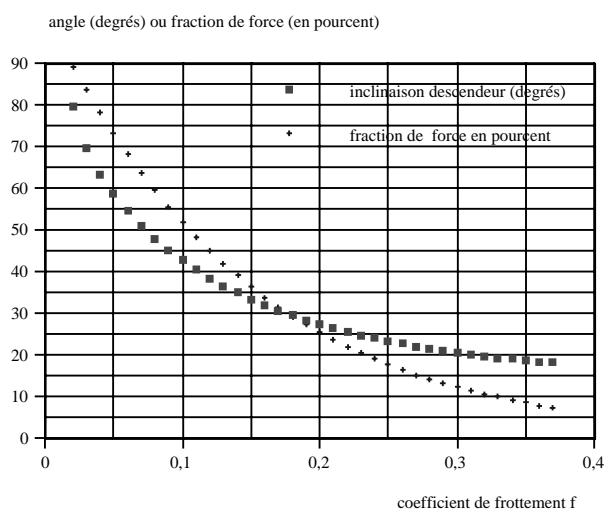


Fig. 12- Inclinaison du descendeur et fraction  $F_4/F_1$  en pourcent

On voit que la méthode de descente est bien meilleure que sans mousqueton de freinage, puisque le basculement du descendeur n'arrive que pour des valeurs faibles du coefficient de frottement (inférieure à 0,1). Mais l'inconvénient noté dans la méthode sans mousqueton demeure puisque la force  $F_4$  engendre quand même un couple de basculement.

**Forces de freinage.** Par ailleurs, si on compare la force demandée au spéléo pour le freinage, par exemple pour un coefficient de frottement de 0,2, on trouve qu'avec la méthode Vertaco, la force  $F_4$  vaut 17 % de la force totale alors qu'avec le mousqueton, la force  $F_4$  vaut 27 %, ce qui est beaucoup plus. Ce rapport se retrouvera sur la force  $F_3$  demandée au spéléo. L'expérience confirme ce résultat.

**Positionnement dangereux.** On peut imaginer que par malchance, ou en utilisant un mousqueton de descendeur plus grand que l'autre, la tête du descendeur vienne se loger dans le mousqueton de freinage. Cette situation est très délicate, car alors le mousqueton de freinage ne sert plus à rien et la force  $F_3$  que doit exercer le spéléo devient égale à celle  $F_4$  qui est importante. D'après les témoignages, cette situation s'est déjà présentée à certains spéléos (qui utilisent cette méthode de freinage souvent préconisée). Cette configuration ne doit sans doute se produire que lorsque la corde en-dessous est lourde, que le spéléo est longé sur un fractionnement, et qu'il est sur le point de repartir.

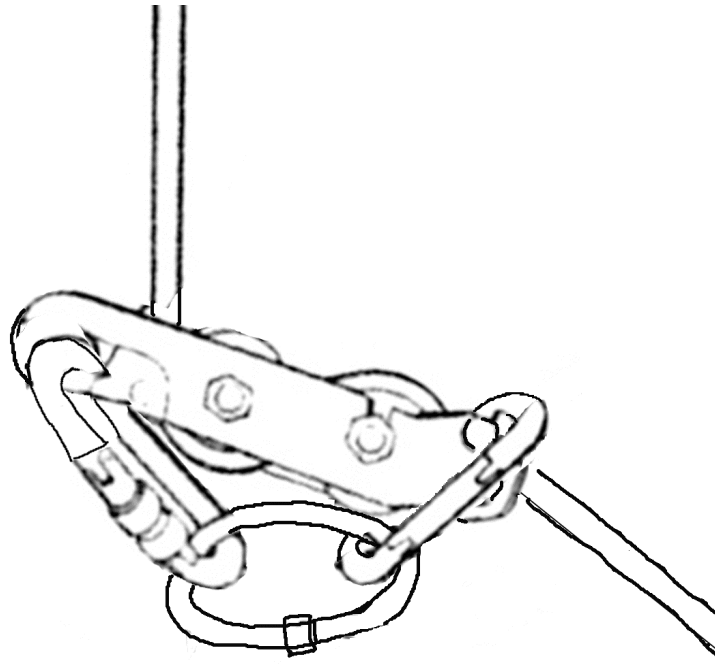


Fig. 13- Position critique du descendeur

Une telle position est critique, et il ne faut surtout pas commencer à descendre. Dans tous les cas, il faut se bloquer sur le descendeur, s'assurer à la poignée, se mettre sur la pédale, et remettre le descendeur dans la bonne position.

Il est possible que l'accident du Pot 2 soit dû à cette configuration.

## Conclusions

Les calculs que nous avons présentés au-dessus sont à considérer avec précaution puisqu'ils reposent sur l'hypothèse simplificatrice d'un coefficient de frottement moyen uniforme le long du contact corde poulie du descendeur. Ils ne prennent pas non plus en compte l'usure du descendeur. Nous n'avons pas calculé le coefficient de frottement moyen en fonction des caractéristiques du descendeur et de la corde, mais nous l'avons supposé connu (par exemple à l'aide d'une mesure). Néanmoins, ces calculs permettent de tirer quelques enseignements.

La descente sur un descendeur non auto-bloquant est dangereuse du fait du basculement du descendeur quand le coefficient de frottement baisse pour une raison ou pour une autre (argile, tronçon mal lavée). On doit repasser la corde dans un mousqueton. Les deux méthodes (Vertaco ou classique) présentent des avantages et des inconvénients. On remarque tout de même que la méthode classique n'élimine pas la possibilité de basculement, avec les inconvénients, voire le danger, associés. La méthode Vertaco (ou les méthodes dérivées) est la plus efficace en terme de frottement et devra être utilisée chaque fois que la corde est très glissante. La méthode préconisée actuellement par l'EFS, du mousqueton de freinage sur celui du descendeur reste très convenable.

Toutes les techniques utilisées sur corde par les spéléos sont telles qu'un évanouissement (suite à un choc par exemple) doit être sans conséquence : par exemple, passage en vire longé à la corde, franchissement d'un amarrage à la double longe, franchissement d'un fractionnement au cours d'une remontée. Mais la descente fait exception : la plupart des spéléos ne sont pas assurés en cas d'évanouissement. La solution est pourtant connue : on peut s'assurer tout au long de la descente avec un shunt, ou bien passer au descendeur auto-bloquant. Mais on connaît la réticence des spéléos pour ces méthodes, car ils trouvent qu'il est désagréable de monopoliser une main pour l'assurance, étant donné que l'autre est utilisée pour tenir la corde. Il ne reste plus de main pour s'écarter de la paroi et éviter les becquets qui peuvent se présenter.

La bonne méthode de descente, qui reste à inventer, est celle qui laissera une main libre et assurera la sécurité.

Mais quand on réfléchit aux différents cas pour lesquels la corde est très glissante, c'est principalement quand elle est neuve. Et on peut se demander pourquoi les fabricants de cordes ne les font pas tremper avant de les vendre. Car il est anormal de vendre un article de sécurité dans une configuration dangereuse. Les spéléos constituent un groupe de pression tout à fait capable de modifier cette dangereuse pratique des constructeurs de corde. Qu'attendent-ils ?

## **Bibliographie très sommaire**

articles dans Spelunca sur les techniques par les membres de l'EFS

sites internet sur le descendeur : [www.ecole-française-de-speleologie.com](http://www.ecole-française-de-speleologie.com)

Marbach G., Tourte B. -2000- Techniques de la spéléologie alpine. Expé éditeur, 325 p.