



École Française
de Spéléologie

Cahier de l'EFS n°18

November 2019

Jean-François BALACEY

Dominique ROS

LIGHTING IN SPELEOLOGY



Fédération Française
de Spéléologie



After a historical reminder, the objective of this study is to provide keys to help the speleologist choose his main lighting wisely LED, commercial or homemade. The keys are mainly based on the illumination actually measured but also on other practical criteria: reliability, weight, price, ergonomics. The speleologist will be able, in view of the measurements carried out and feedback, adapt his choice to his objectives, his means, and thus buy a lighting that is not too quickly outdated technically.



CARBUR N° 37 : « *Lumen versus l'humain...* »





TABLE OF CONTENTS

FIAT LUX !	4
HISTORY OF LIGHTING UNDERGROUND	5
STRUCTURES OF LED LAMPS	25
ASSESSMENT OF ILLUMINATION OF LED LIGHTS	30
METHOD FOR MEASURING THE ILLUMINATION OF LED LIGHTS FOR SPELEOLOGY	38
STUDIES OF SOME LIGHTS WITH TRADE LEDS	56
A HOME MADE SPELEO FRONTAL: WHY, HOW ?	70
LAMPS FOR DIVING	91
THE IMPORTANCE OF THE POWER AND RELIABILITY OF DIVING LAMPS	93
SCURION BOX FLOODED AT PEYRAOU DE CHADOUILLET	96
EXCERPTS	97
BIBLIOGRAPHY	108
THANKS	109
WARNING	110



FIAT LUX !

What's more important than light for the caver ? Without it, his sophisticated equipment is useless, the darkness imprison him. In this multi-hand publication, we retraced the history of underground lighting over the ages and provided some keys to better choose or manufacture his LED lighting. Because « fiat lux, et lux fuit » (that the light be, and the light was) answer manufacturers of commercial lamps and skilled handymen. A plethora of solutions exist to enlighten both the many manufacturers and the speleologists electronics. We have tried here to help the speleologist to choose wisely its main LED lighting trade, or manufacture it, mainly on the basis of the illuminance actually measured but also on other practical criteria, reliability, weight, price, ergonomics. He will thus be able, in the light of the measurements carried out and feedback from experience, to adapt his choices to his objectives, his resources and in the long term.



HISTORY OF LIGHTING UNDERGROUND

JEAN-FRANÇOIS BALACEY ET DOMINIQUE ROS

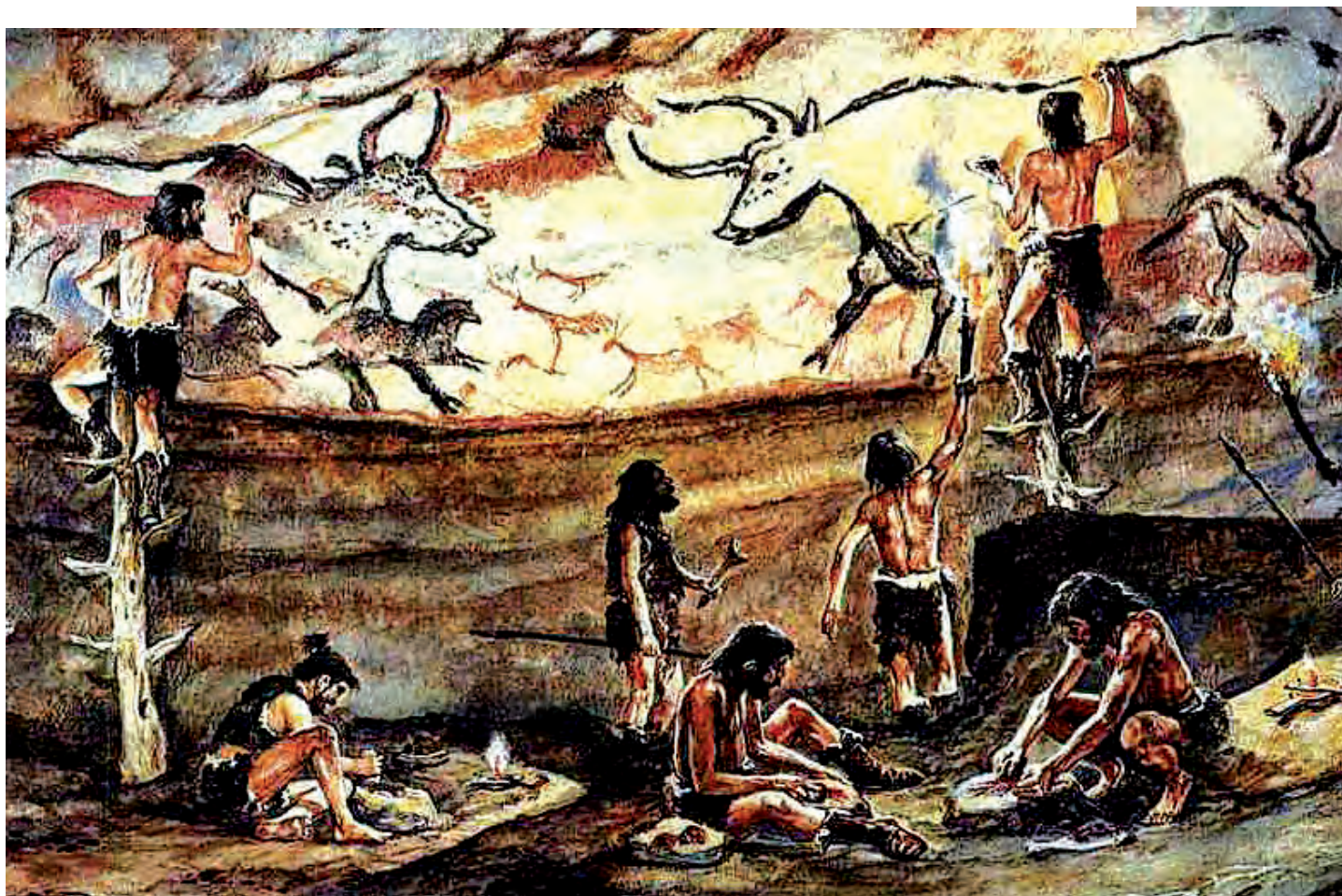
What could be more usual than the LED lighting that we have been using for over ten years now? However, young speleologists use it without sometimes knowing how their predecessors lighted up. Therefore, there is a historical interest in describing the lighting used since the origins. Here is this history which will remain limited to the use of light underground, without taking up all the technical evolution of all the material, well described elsewhere in the various manuals cited in the bibliography.

From the first men to Martel

The first men: torches, grease and oil lamps.

Since the domestication of fire 400,000 years ago to 1 million years ago, according to the authors, man has learned to use his light to light himself. He used softwood torches (as in the cave of Aldene, more than 30,000 years ago), but also many small stone, bone or shell lamps which were to be fed with animal fat or vegetable oils. The fire thus allowed the occupation of deep caves but above all the continuation of activities late at night by removing the dependence on natural light. It is its use that allowed the underground cave paintings, drawings and engravings that prehistoric men left us.

Figure 1 : Prehistoric men painting by torchlight. Source : Centerblog.





From Antiquity to Martel: torches, oil lamp, candles.

From Antiquity to Martel, the oil lamp succeeded the grease lamp and was widely used. From the Neolithic, vegetable oil, more fluid, was preferred to animal fat or resin. The principle is simple: in a container filled with oil, soak a wick of twisted or braided vegetable fibers (reed, hemp, linen, wool, then cotton) which is filled with liquid by capillary action, and which is lit. The oil is quite difficult to ignite, the flame does not go up along the wick, even in well designed open lamps (they are not all!).

The fuel used varies depending on the region and the means on board: vegetable oil from nuts, rapeseed, olive ... or animal oil (whale). Not all of them have the same cost or the same efficiency: for example, rapeseed is less rare, but less bright than nuts. Naphtha (petroleum) oil was used in Mesopotamia and then, in the Middle Ages in France, rapeseed vegetable oil in the North and walnut oil in the Midi.



Figure 2 : Oil lamp. Source : site reproductions-antiques.com.

Improvements will then take place until the appearance of electricity: nature of oil, wicks especially from the 18th century. These oil lamps seem to have been little used underground.

In the Middle Ages, the nobility and the clergy were enlightened with wax candles, and the people, too poor, used tallow (animal fat) in candles. Under the ground, it is the wooden torches which seem to have been more widely used by the various visitors who venture there then, for the ease of obtaining them and for the intensity of the light produced. The oldest inscription found underground was produced with a torch in 1213 in the Adelberg cave, now Postojna {30}.

Visitors to caves from the romantic period to the 19th century light up with torches, and the first explorers will light them up before using other more practical means: carbide and electric lamps.

From Martel to the present day

Martel, beginning of speleology : In the middle of the 19th century, the candle improved with the appearance of the stearic candle. The two components of tallow, stearic acid and oleic acid, are chemically separated. It is the first one that is kept in the candles, using in parallel wicks of braided cotton, which ensures a flame more fixed and brighter than ever.

The braiding allows the wick to bend and be consumed: no need to blow your nose, as before.

The miserable candle then disappears, and the wax loses its interest. It is this stearin candle that Martel uses and that he recommends, in preference to the other means available, "resin torches, straw fires, Bengal fires and fireworks of all kinds". In "les Abîmes" {30}, Martel writes: "In exploration, we ended up stopping at only two lights:

- 1 ° The simple stearic candle, as strong as possible, 3 to 4 centimeters in diameter, if necessary made expressly, with large wicks, so that the extinction does not occur too easily as a result of sudden movements. Against drafts and sometimes very violent seepage, it is good to have a folding pocket lantern, with blades of transparent and unbreakable mica as glasses;
2. The magnesium ribbon which is burned either by hand or in a small reflector lamp with clockwork movement. The price of this substance having considerably decreased in recent years and its white smoke being relatively low and not very dirty, it is par excellence the luminous agent at the same time powerful and portable...".



Figure 3 : On the Styx River in Mammoth Cave. Drawing of Gambard. Source : {36} Grottes, gouffres & abîmes page 13.



Figure 4 : Martel pocket lantern represented on the Rozier monument (Lozère). Photo via Daniel André.



Figure 5 : A magnesium ribbon lamp like that of Louis Armand, with a reflector and a clockwork movement. Photo Jean-Pierre Bonnebouche.



Figures 6, 7 et 8 : Three shots of the candle lamp that belonged to Martel. Photos via Daniel André.

At the same time, the oil lamp was also widely used, but Martel in "Les Abîmes" said that he had given up on it because of the drawbacks encountered : "Miners' lamps too we tried, without adopting them: they smell bad, smoke and dirty; when a drop of oozing water falls on the wick and turns it off, it cannot be turned back on; they are heavy and also require the addition of a can of oil, one more package to descend: or the more packages, the longer the stay and the more complicated the maneuvers. A dropped candle simply wipes; in such a case, the miner's lamp, with all baptized oil, is out of service. "

Acetylene, the first major development in underground lighting

At the end of the 19th century, the industrial preparation of calcium carbide made it possible to generalize the use of acetylene for lighting, both at fixed position, for dwellings, shops, warehouses, etc. than for mobile use, bikes, horse-drawn carriages or cars. Underground uses begin in quarries and caving.

The production of acetylene by carbide lamps of all shapes and capacities allows cavers to have easier to use lighting than candles and torches.

However, according to Daniel André, "Martel never used a carbide lamp, except perhaps around 1935 at Aven Armand, according to a testimony that I had received from Albert Curvelier (former guide chief, long deceased); Martel, that year, came to see Aven Armand and asked that the electric lighting be turned off. He then wandered around the cave with an acetylene lamp.

On the other hand, for the development of Padirac, a very large carbide lamp was used. "

The carbide lamp, colloquially called a dudule or calebombe by speleologists, provides a brighter and brighter flame than that of candles (about 10 times more according to my measurements) and brings an undeniable advantage to explorers of the underground world. But it also has its many constraints, we will come back to this later.

Before the Second World War, speleologists often used carbide lamps by carrying them by hand, such as Casteret (see Figure 10) or Bourgin (see Figure 11). The flame produced dazzles its wearer, even if it is reflected by a reflector, sometimes chromed to improve reflection. Reflector blackened and quickly rendered ineffective due to the smoke produced by the incomplete combustion of acetylene.

Carrying the lamp in your hand is a nuisance and you have to wait several years before you can imagine shifting the light onto the helmet and wearing the lamp at the waist or over the shoulder. It was Robert De Joly, a brilliant inventor, who first imagined this device and associated it with a lighter riveted to the reflector. His engineering skills freed cavers from the handicap of holding the lamp in his hand, which was later abandoned. He describes this material in his book "Comment on descend sous terre" (Nîmes, Chastanier and Alméras, 1937) {14}, just like Henry P. Guérin in his manual "Spéléologie, manuel technique" (Paris, Éditions J. Susse, 1944) {21} where he takes up a large part of what De Joly describes.



Figure 10 : Norbert Casteret in the Montsaunès rolling mill around 1960. Cover photo by « Norbert Casteret, explorateur d'abîmes » de Jacques Joffre. {26} Note the acetylene lamp carried by hand.

Figure12 : Robert De Joly type helmet. Photo via Bernard Sebillé. Note the protection of the beak by wire.

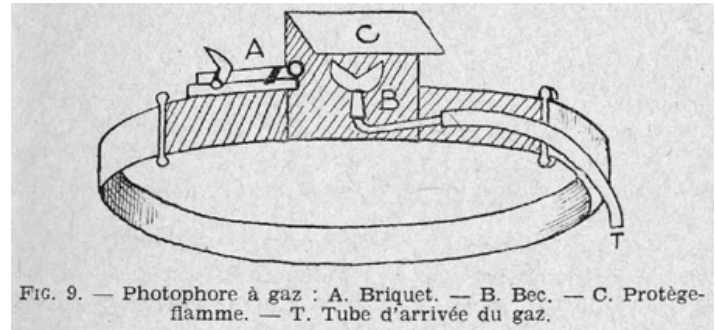


Figure 9 : Gas tealight equivalent to that of acetylene invented by De Joly. Source : manuel Guérin, édition 1951, page 27. {21}



Figure11 : Material used by Bourgin. We note the acetylene lamp and the electric lighting. Source : Dauphiné souterrain (1942) page 52. {6}



Figure 13 : Robert De Joly. Source: archives of the town hall of Orgnac via Fabien Darne et Françoise Prud'homme.

Acetylene and electricity.

Already in 1894 Martel wrote in "Les Abîmes" {30}. that he used electric lighting but only for topography sessions, given the drawbacks (fragility, size, risks associated with the handling and transport of acids). He wisely concludes: "The grottolologists of the future will not fail to find the desirable improvements. ". The future will prove him amply right.

The classic incandescent lamp was invented in 1879 by Joseph Swan and later improved by the work of Thomas Edison and others (halogen lamp). It produces light by carrying a filament of tungsten, the metal with the highest melting point (3,422 ° C), incandescent.

From the end of the 19th century Gustave Found (1839-1902), electrical engineer born in Descartes in Indre-et-Loire and inventor who filed no less than 32 patents, will create the very first electric headlamp for the medical world. with doctor Paul Hélot, surgeon in Rouen. It improves several times this "photophore" which will bear the name of Helot-Found headlamp and will be presented for the first time in August 1883.

In 1895, still interested in everything that can produce light, Gustave Trouvé and his company "Eureka" (in Greek) will be interested in the new acetylene gas because it provides very white light. In lamps it will therefore improve the distribution of water on the carbide in order to make the flame more stable, by regulating the production of gas.

It was not until the beginning of the 20th century, thanks to improvements brought about by Edison's work, that electric lighting began to compete with gas lighting. Between 1910 and 1940, a major work of electrification of the big cities of the country is undertaken. Electric lanterns using incandescent lamps are gradually replacing gas lanterns. The last gas lanterns disappeared in France in the mid-1960s.

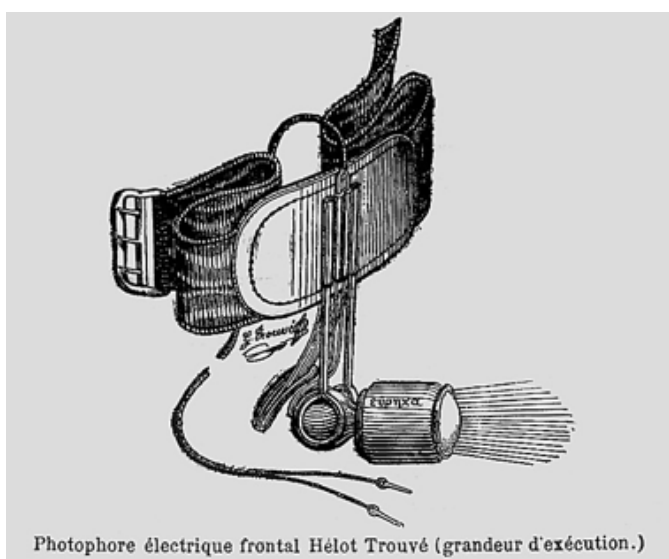


Figure 14 : The frontal Hélot-Trouvé of 1883.
Source : review « L'art dentaire » n°8, august 1891.



Underground, this competition between acetylene lighting and electricity will last from 1900, the beginning of the generalization of acetylene lighting, until the beginning of the 21st century, when its use becomes marginal. At the beginning of the 20th century, electric lighting was most often only a complement to acetylene lighting, as emergency lighting or when conditions required: rivers, waterfalls, spray. This varies according to the teams, and the old photographs clearly show the diversity of individual equipment. The lighting of the speleologist will strongly evolve from 1900 to the present day, we will see it by illustrating the various improvements with photographs of the great speleological explorations and famous explorers.

Let's start with Norbert Casteret (1897-1987) who marked the general public with accounts of his many explorations, the books that gave rise to the vocation of many cavers.



Figure 15 : helmet of Norbert Casteret. Photo Bernard Sebillé.



Figures 16 et 17 : Norbert Casteret and Marcel Loubens at Pierre Saint-Martin in the early fifties. Powerful electric frontal to probe the vertical entrance, the Lépineux well, of 315m, worn on an aviation helmet. Source : Paris Match et « Norbert Casteret, explorateur d'abîmes » de Jacques Jolfre page 106. {26}

Figure 18 : The leading team of 1955, victorious in the Cigalère: Jean-Pierre Van den Abeele, Yves Griotel, Norbert Casteret, Georges Conrad. Electric headlamps, carbide lighting, hand torch, classic range of lighting from the time. Source : « Norbert Casteret, explorateur d'abîmes » de Jacques Jolfre page 60. {26}



Figure 19 : Making of the movie « rivière sans étoiles » by the team Spéléos Grenoblois du Club Alpin Français (SGCAF) in Couffin cave in 1952. Source : Opération -1000 (figures between pages 80 & 81). {7}



Figure 20 : Mast transport in the gouffre Berger in 1954. Note the electric headlamp made of a torch cut for the caver in the foreground. Source : Opération -1000 (photos between pages 176 & 177). {7}

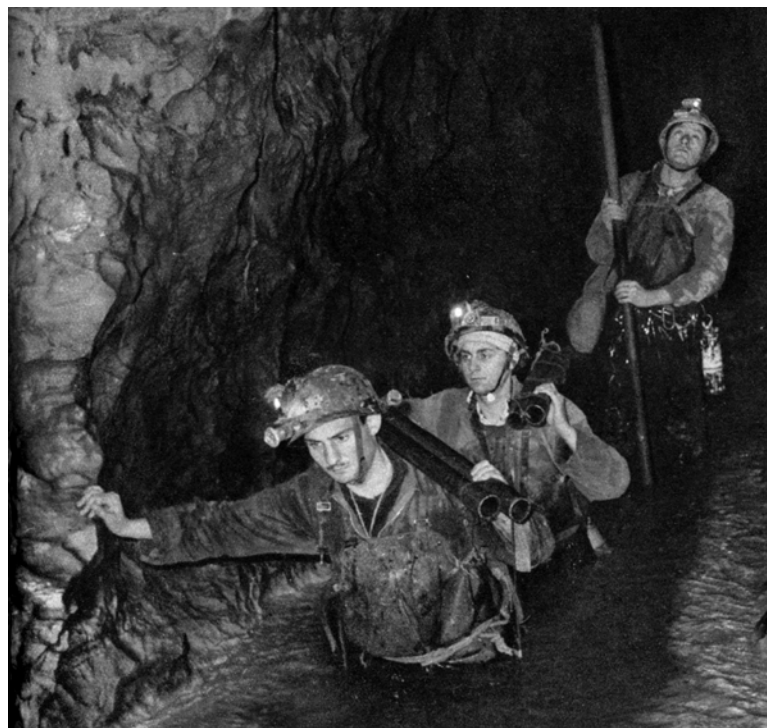




Figure 21 : A team during explorations at the gouffre Berger in 1954. Aldo Sillanoli, Pierre Chevalier, Pierre de Bretizel at phone. Source : collection Jean Lavigne, « Gouffre Berger, l'esprit d'équipe » page 89. {38}



Figure 22 : A team at Pierre Saint-Martin in 1962. Always the same DIY lights on helmets and an electric headlamp around the neck. Source : Corentin Queffelec « Jusqu'au fond du gouffre ». Photos between pages 56 & 57. {33}



Figure 23 : Helmet used by Fernand Petzl in gouffre Berger. Photo Petzl.



Figure 24 : Helmet of Louis Balsan. Photo A. Gautier via Daniel André.

Some even wear the acetylene lamp on the helmet, like the English caver Ken Pearce at gouffre Berger in 1963 (Figure 25 : collection Dave Gill, source : « Gouffre Berger, l'esprit d'équipe » page 115 {38}) or an electric box (Leclanché, Mazda, Wonder or other) (Figure 26 : Yves Griessel : « Pyrénées souterraines ». Photos between pages 126 & 127. {20})



Figure 27 : Brand caliper lamp Arras.
Photo Dominique Ros.

From the beginning of caving until the 1960s, there were no manufacturers of lighting equipment, just like the rest of caving equipment. Everyone must therefore manage to make their own lighting. You can easily find acetylene lamps, of any size, and electric headlamps, powered by 4.5 V flat batteries or batteries of different sizes (LR20 type D, LR14 type C) because the consumption of incandescent bulbs then halogen is high. Among the acetylene lamps, we will mainly retain the Arras caliper lamps, very widespread among post-war speleologists, but many others then exist and we will find more by consulting the specialized sites (including acethylene.com , thetunnel.free.fr).

Among the electric headlamps, we could retain the Winchester headlamp, with a narrow beam, useful for probing wells and large rooms, such as those in Figures 16 and 17 by Casteret and Loubens at Pierre Saint-Martin.

Carbide lighting, despite the heat it provides via the flame and the lamp body as well as its good ambient lighting, imposes many constraints, abundantly described in the many exploration books, novels and other writings. It would be too long to take them up in detail, let us quickly quote the lamp which blocks in tightness, the pipe which gets stuck or tears off, the water which spills, the spout which becomes blocked, the flame which goes out under the water or burning the ropes, the lack of water or carbide, the smoke that blackens the walls, the list goes on...



Figure28 : Electric lamp tinkered with a cut metal torch. Gouffre Georges, Ariège. Source: J.Jolfre «Au cœur des Pyrénées, l'aventure souterraine» page26. {27}

At the end of the sixties, a good number of cavers tinkered with mixed lighting, combining acetylene and electric on the helmet. The typical example is the photo of Michel Siffre, well known, where we see him with his large reflector blackened by the smoke of the flame and a side lighthouse. The size is large where a discomfort in the narrowing, meanders and narrowings, the reflector practically does not reflect the light because it is almost always blackened, there is no system of ignition of the flame and the electric is not very efficient. This is the lot of many DIY lights.

Some people imagine creating new, more compact, mixed lights, with an ignition of acetylene by an electrical resistance of a kitchen gas lighter, and more efficient electric lighting. The first seem to be the speleos of the "Speleo Groupe Fontaine La Tronche", including Georges Marbach and his colleagues from the "Speleo-Club de la Seine", followed by others, the "Association Spéléologique Nîmoise" (ASN), Tourbin who markets via the "Vieux Campeur" and especially Georges Marbach via his company TSA (Techniques de la Spéléologie Alpine). The author's club, the "Association Spéléologique de Côte-d'Or" (ASCO) published in 1972 plans of this type of lighting, with variable focal length (see figures 35 to 38).

This addition of an electrical resistance is a plus compared to the flint lighter which supports poorly water and mud and cannot be repaired underground. But the resistance also does not tolerate water and mud well; it crashes on impact with the walls and only works well when the battery that powers it is not too discharged. On the other hand, with a battery and an emergency resistor, it can be repaired underground, which the flint lighter does little. On the back of the helmet, the case with the 4.5 Volt flat battery also contains one or more spare resistors, in addition to the nozzles and Teflon tape for sealing.



Figure 29 : Michel Siffre with typical lighting of the sixties, reflector and lighthouse. Source : « Les carnets de l'aventure, grottes et cavernes » page 28. {1}



Figures 30 & 31 : Mixed lighting marketed by l'Association Spéléologique Nîmoise. Photos Samuel Azemard (left) et Bernard Sebillé (right).

Here is what Georges Marbach wrote that I questioned: "I myself used a flint lighter for a long time, the main defect of which was that it no longer worked when wet, which obviously happened frequently, especially in wells watered. A reliable resistance ignition having been developed for the ignition of household gas cookers, it became logical to adapt it on caving helmets, which was actually done in the early 70s when I was enrolled in the FLT. It is the fruit of the reflection of several people and of successive adjustments of a geometric order.

Previously, the flint lighter, being a very elongated object, was fixed along the side rim of the helmet. The acetylene front is obviously located in the axis thereof. The electric emergency lighting on the helmet was optional; it was sometimes a simple Wonder-like case carried in the pocket.

The gas lighter replacing the lighter had to be located above the spout, which changed everything.

As for the design with the two superimposed lighting sources, it was carried out with a view to compactness of the whole. In order for the optical axes of the two light sources formerly side by side to be parallel, their outer side had to be offset in front of the helmet due

to the roundness of the helmet. This not only complicated the assembly by requiring spacers, but made it bulky and very impractical in tightening and meandering, because these external sides tended to scrape the wall and to hang on it. The price to pay for the new design with a vertical axis was the reduction of the diameter of the reflector so that it did not go too far above the top of the helmet, which slightly reduced the power of the acetylene lighting. The Tourbin lighting, which was still sold in the early 1990s, had solved the problem differently, keeping a large parabola in the axis of the helmet, but miniaturizing the electric lighting until a simple candle placed on the side of the acetylene front. Our personal lighting of the new type largely preceded the commercialization of the mixed frontal TSA, which must date from the second half of the 1970s, without my being able to specify more, for lack of written elements. I started with a monobloc model in molded zamac, then improved it by replacing it with a lighter model made up of a dural tube element provided with a PVC bottom retracted in force. According to my collection of TSA and Expé catalogs, the TSA headlamp was still on sale in 1984, but disappeared from the following catalog two years later. "



Figure 32 :
Advertising for
Tourbin lighting.

LAMPE FRONTALE ACÉTYLENIQUE

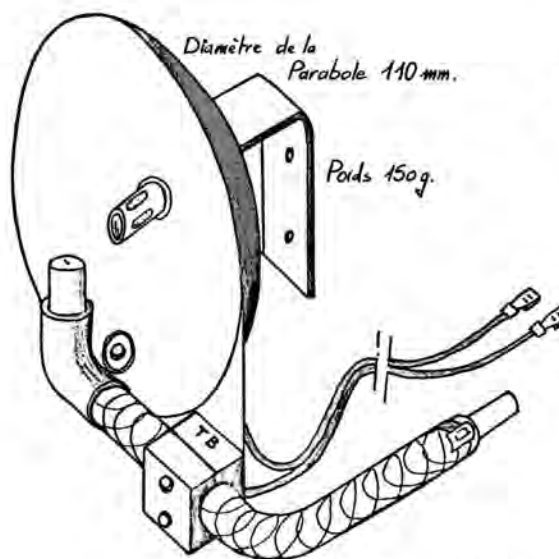
à dispositif électrique d'allumage breveté

Modèle déposé : TOURBIN & A.C.O.R.

- Parabole en acier inoxydable poli
- Bec d'éclairage débit 14 l
- vissé sur un support souple
- Dispositif électrique d'allumage breveté
- Palpe de fixation spéciale en acier inoxydable permettant la pose de l'appareil sur tous les modèles de casques

- Cette lampe a été spécialement étudiée pour présenter une résistance exceptionnelle contre les chocs et l'oxydation.

- Ensemble livré emballé et comprenant :
- Un fil conducteur double, long 45 cm pour le branchement de la pile de 4,5 V à l'arrière du casque.
 - Un bec d'éclairage débit 14 l
 - Un allume-gaz à filament



Diamètre de la Parabole 110 mm.

Poids 150g.

Prix 83,-

EXCLUSIVITE
AU
VIEUX
CAMPEUR
48 Rue des Ecoles, Paris 5
033 - 33.52
633 - 86.79
033 - 13.98
Conception :
TOURBIN Marcel
"Spéleo Club de Lutèce".

FABRICATION TOURBIN



COMPACT

Eclairage mixte d'un encombrement minimum très compact, évitant la gêne dans les étroitures. Parabole acétylène acier inox poli de 80 mm. Eclairage électrique incorporé. Allumage piézo pour l'acétylène. Un modèle très fiable.

21.0343022 FF 313,-

PARABOLE INOX

Ø 110 seule. (Quantité limitée).

21.0343015 FF 28,-



ELECTRON COMPACT

Principe de fabrication semblable au « compact » mais avec adjonction d'un éclairage électrique de Ø 40 mm. Possibilité d'y monter une ampoule halogène. Modèle particulièrement robuste. Poids 200 g.

21.0343031 FF 346,-

AMPOULE

3,5 V. Loupe.

21.0343016 FF 7,50



FOUSSOUBIE

Grande parabole inox de 11 cm, allumage piézo, ampoule incorporée dans la parabole. Poids 250 g.

21.0343018 FF 334,-

RESISTANCE

Allume-gaz.

21.0343017 FF 7,50

BOITIERS

Porte-pile Tourbin se fixe par 2 vis sur le casque. Blocage de la pile par caoutchouc. Avec tube de Ø 2 cm pour contenance du petit matériel.

21.0343026 FF 17,-

BOITIER A PILE PETZL

Corps plastique, se fixe par 2 vis.

21.0214053 FF 48,-

ADAPTATEUR PILES RONDES

Pour boîtier Petzl.

21.0214015 FF 30,40

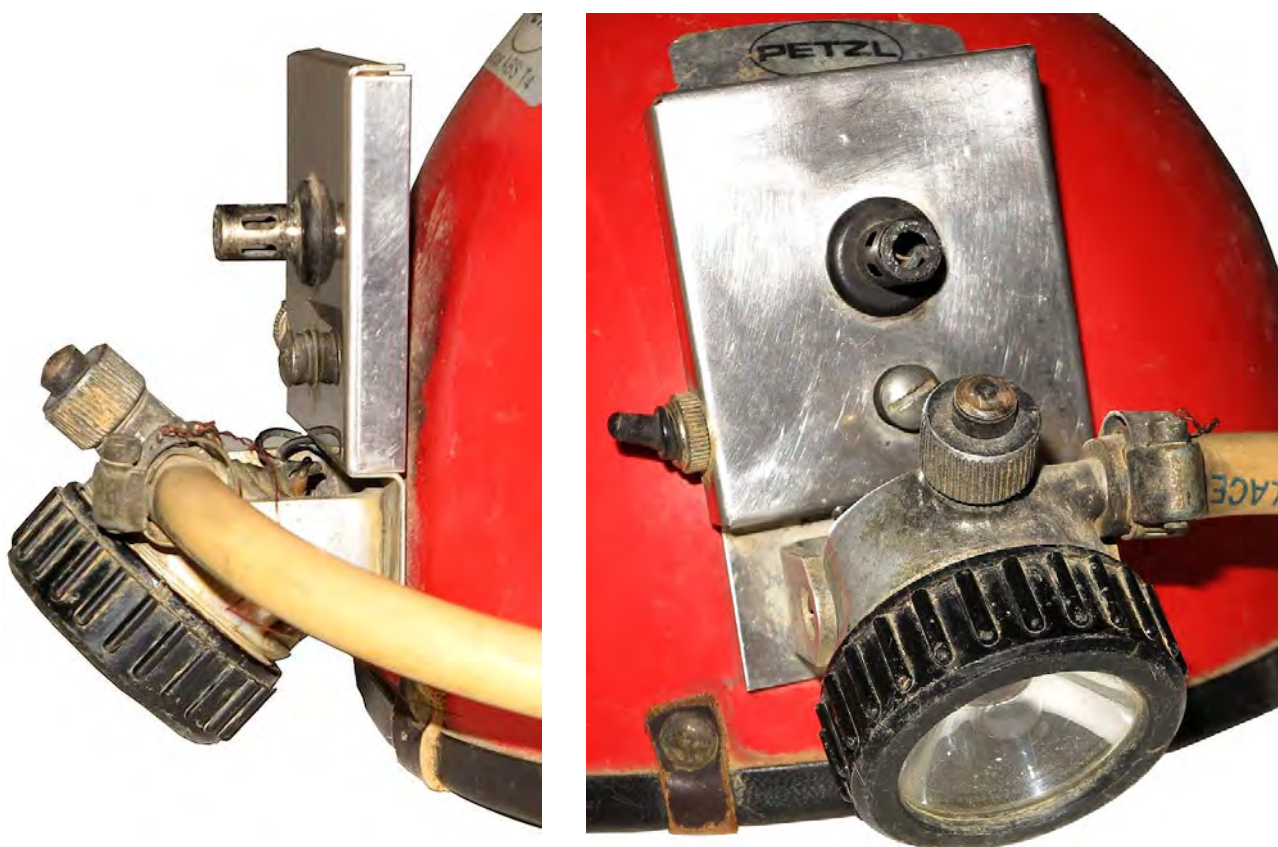


Figure33 : Lamps manufactured by Marcel Tourbin, patented in 1972 and marketed by the "Vieux Campeur". Extract from the "Vieux Campeur" catalog from 1981 with evolution of electric lighting. They are attached to the helmet via a dedicated support which allows other uses of the helmet. Information Daniel Teyssier (Spelaion). Figure 34 : A variant of Tourbin type lamp. Photo Bernard Sebille.





Figures 35, 36, 37, 38 : Éclairage mixte dont les plans ont été publiés en 1972 par l'Association Spéléologique de Côte-d'Or (ASCO) dans son bulletin ASCO n° 2 (1972 1-2) pages 24-28. Notez la focale variable de l'éclairage électrique empruntée à une lampe de poche Wonder. Casque de l'auteur, déposé en 2009 au Musée spéléo de la grotte de la Devèze. Photos JF Balacey.



Figures 39 et 40 : Éclairage mixte commercialisé par Georges Marbach via sa société TSA (Techniques de la Spéléologie Alpine) de la seconde moitié des années 70 à 1984 environ. Photos JF Balacey.

En 1972, la société Petzl commercialise son premier éclairage mixte pour la spéléologie, couramment appelé piezo. Révolutionnaire, il comporte en effet un allumage par piézoélectricité utilisé pour allumer le gaz des cuisinières domestiques, allumage à frappe qui ne nécessite pas d'alimentation par pile. La concurrence entre allumage de l'acétylène et éclairage électrique

diminue au profit de l'autonomie en électricité. Ce système est moins sensible à l'eau, la boue et les chocs. Un nettoyage sous terre est possible en cas d'encrassement. Fiable, ce piezo sera utilisé par la suite presque sans changement et jusqu'en 2012, année où Petzl arrête la commercialisation de toute sa gamme de lampes à acétylène.



Figure 41 : Premier éclairage piezo de Petzl, en rilsan. Photo Paul Petzl.

Figure 42 : Modèle final monté sur un casque Yannick Seigneur. Photos Petzl.



Figures 43 et 44 : Éclairage mixte commercialisé par Petzl en 1972. Photos JF Balacey.



Figures 45 et 46 : Lampes espagnoles Fisma. Petit modèle (capacité en carbure 200 g) à gauche et grand modèle (capacité en carbure 300 g) à droite. Photos Bernard Sebillé.

La frontale électrique peut être équipée indifféremment d'une ampoule à incandescence ou d'une ampoule halogène, plus lumineuse mais plus énergivore.

Cette période des années 70 voit aussi l'usage des lampes acétylène espagnoles Fisma. Sans étrier gênant en étroitures, comme la majorité des lampes Arras, alors prépondérantes, elles tendent à s'imposer et ne seront détrônées que par les lampes Ariane de Petzl à partir de 1986 (voir plus loin).

En 1987, Petzl propose un nouvel éclairage, le Laser. Toujours muni du même piezo, dont la fiabilité n'est pas globalement mise en cause par les spéléos, il comporte une frontale électrique à focale variable. L'allumage de la frontale et la variation de focale se font par rotation du corps de la frontale. Le support de la lampe est articulé, ce qui réduit l'intensité des chocs sur le piezo, évitant son écrasement, comme constaté sur le premier modèle rouge. L'usage de l'ampoule halogène et la variation de focale apportent un plus par rapport au modèle piezo. Cependant, on observe parfois des difficultés à monter la partie noire mobile assurant mise en marche et contact électrique. L'étanchéité étant imparfaite, de la corrosion se développe à l'intérieur, nuisant à l'allumage. Tout cela conduit Petzl à produire un nouvel éclairage.

C'est aussi à cette époque que Petzl commercialise sa lampe à acétylène Ariane, en nylon noir, notablement plus légère que les modèles en métal.

En 1994 Petzl propose un nouvel éclairage, la Duo, mais ce n'est qu'en 1996 que l'Explorer est présenté, éclairage mixte électrique acétylène avec le module piezo. Il s'agit d'un éclairage enfin étanche aux embruns et à une faible immersion (IP X8, étanche jusqu'à -1 mètre). L'éclairage électrique y est toujours situé sous le bec à acétylène qui demeure l'éclairage principal. Le nouveau module acétylène avec piezo est démontable, ce qui permet d'utiliser l'éclairage électrique seul si besoin. Cet éclairage électrique comporte un boîtier ovale étanche solide, précurseur de ceux des lampes Ultra qui apparaîtront ensuite. Il comporte une ampoule halogène comme éventuel éclairage principal et une mini-ampoule classique à incandescence, destinée à un éclairage large de longue durée en secours.



Figure 47 : Plusieurs modèles de lampes Ariane. Photo Bernard Sebillé.



Figures 48 et 49 : Éclairage mixte Laser commercialisé par Petzl en 1987. Casques et photos JF Balacey.



Figures 50 et 51 : Éclairage Duo Explorer commercialisé par Petzl de 1996 à 2012, monté sur casque Petzl Ecrin Roc. On note les deux molettes, une pour l'halogène, avec verrouillage et variation de focale, l'autre pour l'ampoule de secours. Source Petzl.

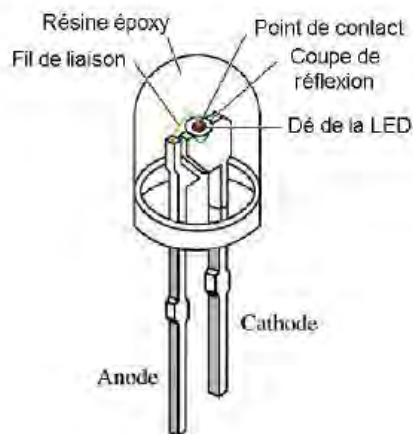


Figure 52 : Schéma d'une LED de 5 mm.
Source site energiedouce.com.



Figure 53 : LedLampe 1 de TechTonique (Suisse). En 1998, il s'agit de la première lampe frontale à LEDs du marché. En tout point innovante, elle exploite déjà les nouvelles possibilités offertes par les LEDs, comme un gradateur de lumière 0-100 %, la gestion électronique de la fin de vie des piles, une surface phosphorescente, etc. Source : TechTonique.



Figure 54 : Module de 14 LEDs de Petzl. Commercialisé à partir de 2005, il est toujours au catalogue Petzl en 2017 (Modu'LED 14 Duo, réflecteur double foyer + module de 14 LEDs avec trois modes d'éclairage constant, destiné à une installation sur les lampes frontales Duo et Duobelt). Source : Petzl.

L'apparition des LEDs, dernière grande évolution de l'éclairage souterrain

C'est en 1962 que la première diode électroluminescente rouge a été créée par Nick Holonyak Jr. et Sam Bevacqua de la compagnie General Electric (GE). Dans les années 60, des groupes industriels tels que International Business Machines (IBM), Radio Corporation of America (RCA), General Electric (GE)... travaillent activement sur les LEDs. Leur faible consommation et leur durée de vie leur assurent un attrait sans faille des industriels. Durant quelques années, les chercheurs se limitent à quelques couleurs telles que le rouge (1962), le jaune et plus tard le bleu (1972) ou le vert. Dans les années 1990, les recherches, entre autres, de Shuji Nakamura et Takashi Mukai de Nichia, dans la technologie des semi-conducteurs InGaN permettent la création de LEDs bleues de forte luminosité, ensuite adaptées en LEDs blanches, par adjonction d'un luminophore jaune. Cree Inc. fondée aux USA en 1987 commercialise en 1989 la première LED bleue qui sera à l'origine des blanches. En 1992 est fondée la société Seoul SC qui lance les LEDs P5, P7, utilisées entre autres plus

tard par Scurion. Cette avancée permet de nouvelles applications majeures telles qu'éclairages, écrans de téléviseurs et d'ordinateurs. Du fait de la disponibilité d'une palette quasi complète de couleurs, les LEDs deviennent rapidement des éléments incontournables des applications colorées en éclairage.

À cette même époque, apparaissent les premières LEDs pour l'éclairage, sous forme de tubes de 5 mm assemblés en plusieurs éléments. Petzl commercialise des modules de 3, 5, 8 et 14 LEDs. La Tikka sort en 2001, les modules 3 et 5 LEDs en 2002, 8 en 2003, 14 en 2005. À cette époque, il n'y a encore aucune mesure de l'intensité lumineuse (lumens) et il faut noter que les lampes frontales à LEDs changent quasiment chaque année pour plus de performance, sans que leurs caractéristiques précises ne soient vraiment communiquées.

D'autres fabricants commercialisent aussi des lampes avec LEDs, tels TechTonique et Scurion en Suisse (voir encadrés) avec un ou plusieurs modes d'éclairage (secours, moyen pour progression, maximum) selon les développements de l'électronique associée.



Figure 55 : Schéma d'une LED de puissance.
Source : site Futura-Sciences.

Au milieu des années 2000, de nombreuses lampes à LEDs sont alors commercialisées sous diverses formes : torches, frontales et autres. C'est le début de l'expansion des LEDs mais la lumière à dominante bleutée constitue une gêne, la puissance est réduite et l'éclairage à acétylène reste toujours l'éclairage principal pour le spéléologue.

Pourtant, les progrès des LEDs continuent et les modules 14 LEDs de Petzl constituent de plus en plus l'éclairage principal des spéléologues leur facilité d'emploi, liée aussi au développement simultané de batteries plus performantes. Par exemple, on voit ainsi apparaître en 2003 la Lampaled [28], première frontale à LEDs 5 mm française avec variateur de puissance, destinée spécialement au monde spéléo et fabriquée par le Centre d'Aide par le Travail de Vénissieux (Centre pour travailleurs handicapés ne pouvant s'insérer dans le secteur privé ou public classique).

À la fin des années 2000, l'apparition des LEDs de puissance, à la lumière blanche et au rendement élevé permet la commercialisation de lampes encore plus puissantes et marque la fin de la prédominance de l'éclairage à carbure comme éclairage principal. En 2008, Petzl commercialise la première Ultra suivie en 2011 par l'Ultra Wide, au faisceau large. En 2013, l'Ultra Vario, aux faisceaux variés, diffus et spot devient une des références françaises en éclairage spéléo. Début 2018, la Duo S la remplace, ainsi que la Duo, en service depuis 1994. Plus compacte, elle innove aussi avec un dispositif anti éblouissement, le Face2Face.



Figure 56 : Lampaled. Photo Dominique Ros.

En 2007, Scurion commercialise ses lampes P4, P7, K qui évoluent ensuite vers une gamme toujours plus performante, comme chez Petzl et d'autres, par remplacement des LEDs par d'autres aux rendements plus élevés. Ce rendement, exprimé en lumen par watt, passe de 50 en 2000 à 180 en 2017. Des publications présentent ces nouveautés, sans cesse plus lumineuses et moins énergivores, et annoncent la fin de l'éclairage à acétylène [15][18][19][28].

Depuis, chaque pays développe une ou plusieurs marques adaptées à la spéléo, avec une gamme parfois étendue. Pour information, voici quelques photos de lampes commercialisées en 2018, la liste étant non exhaustive (voir page Web <http://souterweb.free.fr/eclairage/accueilexpo.htm>). Les lampes qui ne sont plus commercialisées ou dont le site internet n'est pas fonctionnel ont été déplacées en bas de page.



Dans le réseau de la Dent-de-Crolles (Chartreuse), cliché Serge Caillault

À la fin des années 2010, l'éclairage à carbure ne conserve son intérêt que comme source de chaleur, dont l'absence est le principal point négatif des LEDs. Mais les spéléos ont développé des moyens alternatifs pour se réchauffer, bougies chauffantes, ponchos, qui n'entravent pas le développement des éclairages à LEDs (voir cahier EFS n°17 de Fabien Fécherouille {19}). La difficulté principale consiste à trouver le bon éclairage à LEDs adapté à ses besoins compte tenu de la variété des modèles proposés (voir plus loin « Études de divers éclairages à LEDs du commerce pour la spéléologie »). En parallèle des nouveaux éclairages à LEDs, des modules à LEDs pour la Duo - commercialisée jusqu'à fin 2017 par Petzl - permettent de rajeunir cette lampe possédée par de nombreux spéléologues. Mêmes moins performants que les derniers éclairages intégrant les LEDs récentes aux meilleurs rendements, ils comportent des LEDs de puissance et sont une alternative économique pour les spéléos moins fortunés ou pour les clubs qui trouvent ainsi des lampes d'initiation bon marché.

Le futur

Quel futur pour l'éclairage en spéléologie ? On pourrait raisonnablement imaginer une suite logique à court et moyen terme, vers toujours plus de lumière pour les LEDs (meilleur rendement) et d'autonomie des batteries, comme on l'a vécu pour l'informatique. Aller au-delà de cette simple extrapolation serait du domaine de la fiction, bien qu'on ait vu des effets d'annonce avec une alimentation de divers dispositifs via la température du corps, les piles à hydrogène ou, qui sait, la commande par implants cérébraux ou télépathie. Mais comme disait Martel : « Les grottologues de l'avenir ne manqueront pas de trouver les perfectionnements désirables. ».

STRUCTURES DES LAMPES À LEDS

JEAN-FRANÇOIS BALACEY

Les lampes à LEDs sont plus ou moins bien connues de tous mais la variété des modèles et des caractéristiques peut déconcerter les utilisateurs, aussi nous a-t-il paru utile de les décortiquer. Généralement, une lampe frontale à LEDs pour la spéléo est constituée de 2 boîtiers, lampe et alimentation, reliés par un câble. Elle est fournie – ou non – avec divers accessoires. Voici en détail leurs constituants, leurs caractéristiques, leurs accessoires éventuels et l'intérêt qu'ils présentent.

Le boîtier des LEDs

Omettons les lampes Duo de Petzl avec leurs modules à LEDs, récentes ou non - ou autres lampes anciennes actualisées avec des LEDs - et ne considérons que les lampes récentes.

Ce boîtier est en alliage d'aluminium ou en matière plastique. Sa forme est variable, on trouve des boîtiers circulaires (Scurion, Pulsar, Traq1500, El Spéléo, Caveman 3000, Viper), ovales (Duo S, Stenlight, Phaeton, Sbrasa, Ignivi), carrés (Minicube 400, Stoots). Des exemples figurent ci-contre. Voir aussi la liste des lampes en 2018 au chapitre historique de l'éclairage.

Délaissions l'aspect esthétique, subjectif et secondaire. Seul Scurion et Stoots proposent des choix de couleurs si vous souhaitez assortir votre lampe à votre tenue.

La taille du boîtier répond à plusieurs critères.

Tout d'abord le passage dans les étroitures et rétrécissements divers. C'est bien moins gênant qu'avec les réflecteurs des lampes acétylène de jadis, et ça n'est réellement important que pour ceux qui explorent souvent des cavités très étroites.

Ensuite le poids. C'est l'ensemble boîtier LEDs, boîtier d'alimentation et casque qu'il faut compter. Mais à casque égal, le poids des boîtiers influe beaucoup sur la fatigue des vertèbres cervicales, surtout dans les cavités étroites où la tête tourne souvent et pour les sorties de longue durée. C'est encore plus important pour les plongeurs, dans et hors siphons. Plongeurs ou non, certains abandonnent parfois à terme leurs lampes lourdes pour de plus légères, afin de ménager leurs cervicales fatiguées. Le poids des lampes varie d'un facteur 1 à 5 selon les modèles (128 g pour la Stoots Caldera à 611 g pour la Pulsar Explorer). Enfin, il ne faut pas oublier que les LEDs chauffent notablement et ont besoin de refroidissement. Ce point est négligeable en cavités froides mais important pour ceux qui explorent des cavités chaudes, comme en Asie ou en Afrique. La sécurité thermique va alors diminuer sa puissance voire arrêter la lampe, lampe qu'il faudra laisser refroidir pour obtenir à nouveau de l'éclairage. Nous y reviendrons.

Figures 57, 58, 59, 60 : Boîtiers LEDs.
Sources : sites des fabricants.



Scurion 900



DUO S



Minicube 400



Stoots Tiho



Le boîtier comporte une vitre de protection (en verre, plexiglas ou polycarbonate). Cette vitre peut être interchangeable (Scurion, Phaeton) ou non (Petzl, Stoots, Minicube 400).

Le point clé de la lampe est son éclairage et la façon de le moduler.

Les lampes comportent 2 à 4 LEDs qui assurent l'éclairage de proximité pour la progression et/ou l'éclairage lointain (spot). Ce point est détaillé au chapitre « Évaluation de l'éclairage des éclairages à LEDs » et ne sera pas évoqué ici.

Le choix des LEDs est généralement figé, parfois inconnu (Petzl) pour préserver le secret industriel. Certains fabricants (Scurion, Phaeton, Ignivi) proposent un choix de LEDs froides (éclairage blanc) ou chaudes (pour rappeler celui des lampes acétylène). Cette lumière chaude produit une ambiance plus chaleureuse et aurait un effet bénéfique sur le moral lors des camps souterrains. Ces lampes ont cependant un éclairage 20 % inférieur à celui des lampes à LEDs froides.

Tous les éclairages permettent le choix de l'éclairage (large, spot, combiné) et de son intensité. Mais il n'existe que deux configurations différentes : avec ou sans programmation.

Les éclairages sans programmation (Petzl, Stoots, Minicube 400) ont des modes figés, généralement optimisés par défaut pour les fonctions utiles. Exemple pour les 6 modes de la DUO S de Petzl avec un accumulateur Accu 2 (source site Petzl) : ambiance, à éclairage large et intensité faible (80 lumens) mais à grande autonomie (23 h) ; proximité, à faisceau mixte large ; et spot, à intensité moyenne (180 lumens), à autonomie moyenne (12 h 30) ; déplacement, à faisceau mixte large et spot, à intensité moyenne (350 lumens), à autonomie moyenne (6 h) ; déplacement rapide, à faisceau mixte large et spot, à intensité élevée (700 lumens), à autonomie limitée (3 h 30) ; vision lointaine, à faisceau concentré, à intensité élevée (450 lumens), à autonomie limitée (4 h 30) ; boost, à faisceau mixte large et spot, à intensité élevée (1100 lumens), pour une durée ponctuelle (5 secondes).

Les éclairages avec programmation permettent de choisir un éclairage large ou étroit, de combiner ou non les deux et de moduler leur intensité. Ainsi les Scurion permettent de 3 à 10 modes et jusqu'à 24 réglages.

L'absence de programmation est un avantage pour ceux qui recherchent la simplicité et un inconvénient pour ceux qui souhaitent moduler les réglages de leur lampe en fonction de leurs souhaits, selon la cavité qu'ils explorent et leur pratique (éclairage réduit et grande autonomie pour camp souterrain, faible autonomie et fort éclairage pour filmer, combinaisons éclairage large fort et spot fort pour profiter des paysages, etc.). La possibilité de programmation peut être un inconvénient du fait de la complexité à obtenir le réglage souhaité, surtout dans les premières heures d'utilisation ou après un temps assez long sans intervention.

Le choix de l'éclairage (large, spot, combiné) et de la variation d'intensité se fait via un (ou deux) interrupteur(s). Celui-ci a plusieurs fonctions : allumage, extinction, changement de mode, éventuellement programmation des réglages. C'est la variation du nombre de clics, correspondant à une action particulière, qui conduit au réglage. Cette variation est simple pour les lampes sans programmation (simple rotation ou appui long), plus complexe pour les lampes à programmation. Pour ces dernières, il y a un risque notable de se perdre dans les modes et d'obtenir un éclairage non désiré. Cette complexité d'usage peut rebuter certains utilisateurs.

Les lampes à deux interrupteurs (Pulsar, Traq 1500) permettent de moduler séparément l'éclairage large et spot. C'est un bon compromis entre les versions avec ou sans programmation.

Lorsque l'interrupteur est sur le côté de la lampe, il est sujet aux chocs en étroiture et ces derniers font varier l'éclairage. C'est un inconvénient mineur qui est vite corrigé après coup.

L'étanchéité annoncée suffit pour la spéléo hors plongée. La minimale, IP 64 (c'est-à-dire protégée contre les projections d'eau de toutes directions) convient pour résister aux embruns, aux cascades, à des immersions à faible profondeur tel le passage d'une voûte mouillante. Cette étanchéité est globale, elle intègre l'ensemble de la lampe, boîtier des LEDs et boîtier d'alimentation, nous y reviendrons. En dehors d'un éventuel changement de vitre, il n'y a pas de raison d'ouvrir le boîtier des LEDs, ce qui n'est pas le cas du boîtier d'alimentation.



L'orientation du boîtier vers le haut ou le bas peut apporter du confort pour lire une topographie ou ne pas éblouir la personne en face. Pour ce dernier point, certains fabricants proposent en option des LEDs de faible puissance, utiles aussi en bivouac pour économiser les batteries (voir plus loin « Accessoires »). Notons aussi la fonction Face2Face anti éblouissement des nouvelles lampes Petzl, Duo S et Z2.

Le boîtier des LEDs se fixe sur le casque via une fixation définitive (vis) pour la majorité des lampes, ou est amovible via une platine restant sur le casque (Petzl). La lampe peut être livrée avec un bandeau élastique, ce qui peut la rendre polyvalente pour d'autres usages, ou avec un câble long, ce qui permet d'alléger le casque en déportant la batterie (voir plus loin « Accessoires »).

Le boîtier d'alimentation

Il est relié au boîtier des LEDs par un connecteur interne (dans le boîtier d'alimentation) ou externe (positionné sur le côté, dans le casque, ou sous la batterie pour Petzl). Ce connecteur et les raccords aux boîtiers conditionnent l'étanchéité (voir chapitre « Éclairage pour la plongée ») et la fiabilité du contact.

Le matériau est de nature variable selon les lampes, les fabricants et les options. Il est parfois en matière plastique (Scurion 700, Minicube 400) mais le plus souvent en alliage d'aluminium (Pulsar, Scurion, Sbrasa, Phaeton, Ignivi). Certaines lampes n'ont pas de boîtier, la batterie étant sous plastique souple (Stenlight), dans un cadre plastique (Stoots), ou enrobée dans du plastique dur (Petzl). Toutes ces solutions ne sont pas équivalentes mais semblent avoir fait leurs preuves.

L'étanchéité du boîtier d'alimentation (ou des batteries quand il n'y en a pas) est équivalente à celle du boîtier des LEDs en termes de classement IP. Mais comme il doit être ouvert pour recharger les batteries, il comporte un couvercle avec joint d'étanchéité et vis de fermeture. C'est un point à soigner lors de l'usage.

La taille du boîtier varie selon celles des batteries ou piles qu'il contient. On trouve ainsi des boîtiers de taille réduite pour 2 éléments standards type 18650, format de référence des batteries en 2018, ou des boîtiers pour 4 éléments 18650 ou équivalent (la majorité) ou éventuellement pour une pile plate de 4,5 V (Minicube 400).

La technologie des batteries varie (électrochimie) mais les accumulateurs au lithium-ion dominent. Plusieurs couplages des éléments internes de ces batteries sont disponibles (voir page 84) : il est évident que l'autonomie et le poids seront plus grands avec 4 éléments. Chacun choisira selon ses contraintes et ses goûts.

Figures 61, 62, 63, 64 : Boîtiers d'alimentation.
Sources : sites des fabricants.



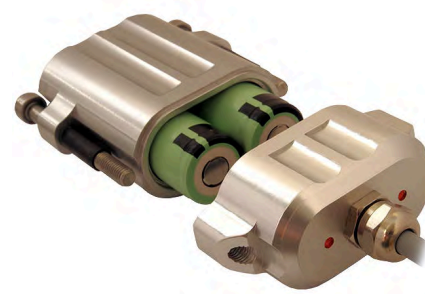
Boîtier Scurion avec batterie standard



Batterie Sbrasa



Batterie Petzl Accu 2



Boîtier Phaeton avec batterie

Figures 65, 66, 67 : Indicateurs de charge. Sources : sites des fabricants.



Bargraphe sur batterie Accu 2 (Petzl)



Indicateur numérique dans le boîtier des LEDs (Ignivi)



LEDs indicatrices (Scurion)

Les critères annexes et accessoires :

Les critères de choix sont décrits au chapitre suivant. Indiquons seulement ici les accessoires disponibles.

Presque toutes les lampes sont vendues avec un chargeur 220 V, sauf Stoots qui fournit un connecteur USB à brancher sur un chargeur de téléphone portable ou un ordinateur.

Toutes les lampes comportent un dispositif indicateur de l'autonomie, indispensable pour gérer la charge restante de la batterie. Cette fonction est généralement située dans le boîtier des LEDs où elle est assurée par des LEDs dédiées (Scurion, Pulsar), par des flashes lumineux des LEDs principales (Stoots), par leur clignotement (Sbrasa, Minicube 400, Phaeton, Petzl) ou enfin par un indicateur numérique digital chez Ignivi. Petzl se démarque en positionnant son bargraphe de niveau de charge directement sur la batterie.

Retenons qu'il est impératif d'avoir avec soi une seconde batterie (au minimum) et un éclairage de secours. Malgré le niveau de fiabilité élevé des lampes pour la spéléo, on n'est pas à l'abri d'une défaillance imprévue, peu probable mais pas impossible, et l'éclairage de secours porté au cou (ou sur le casque) sera alors vital. Choisissez une lampe de secours fiable, d'un éclairement et d'une autonomie suffisants {19}.

Scurion commercialise une large gamme d'accessoires : un adaptateur trépied qui permet de monter ses lampes sur un trépied standard pour photo ; un support pour traîneaux pour toutes les luges Pulka ; un bandeau frontal de course d'orientation ; un bandeau frontal de plein air pour porter la lampe sans casque ; un support pour vélo pour un montage sur le guidon ; un dissipateur de chaleur supplémentaire si les lampes restent immobiles ou dans un milieu chaud (par exemple pour la photographie dans des pays tropicaux) ; des étuis de batterie ; un adaptateur de réserve 9 V ; des batteries 2, 4 et 8 cellules ; des boîtiers de batterie.

Figures 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75 : Accessoires pour frontales. Sources : sites des fabricants.



Batterie Stoots 12 Wh pour lampe KISKA, OPALO et MISTI.



Batterie Traquet light 7800 mAh/3,6 V



Adaptateur Scurion pour trépied

Scurion propose également des options :

- LED UV (la lumière UV révèle beaucoup de choses qui ne sont pas visibles avec la lumière blanche : minéraux émettant de la lumière de différentes couleurs quand ils sont éclairés par UV, petits animaux vivant dans les grottes pouvant être mieux vus, petites quantités de colorant fluorescent au cours des traçages hydrogéologiques);
- une option projecteur qui affiche l'état de charge de la batterie en projetant sur la main (si vous la placez devant la lampe) ou une paroi à proximité.
- un câble long spécial fait d'un matériel très solide et résistant aux coupures.

Petzl propose : un câble rallonge; un harnais dorsal pour le portage de la batterie rechargeable déportée des lampes frontales Ultra; des platines avant et arrière pour la fixation des lampes frontales Duo sur les casques de spéléologie; des platines pour la fixation des lampes frontales Duo sur les casques de vélo et VTT à bord épais ou à bord fin; des platines pour la fixation des lampes frontales Duo sur un guidon de vélo et le transport des batteries rechargeables; des crochets de fixation d'une lampe frontale sur casque à bord fin ou épais ne possédant pas de crochets; des batteries de très haute capacité, 5200 mAh.

D'autres fabricants proposent ou non des accessoires, la liste serait trop longue, se référer à leur site.

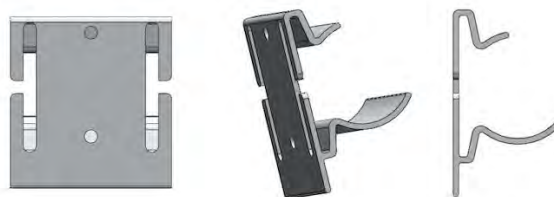
Une option rare est le changement de LEDs (upgrade), pour bénéficier de LEDs plus lumineuses et plus économes, proposé par Scurion, Ignivi, Phaeton. Notez que le coût de cette évolution est notable (frais de port, temps de main-d'œuvre, composants).



Adaptateur Scurion pour pile 9 V



Fixation Scurion pour casque



Fixation Stoots pour casque



Câble prolongateur Petzl



Câble prolongateur Scurion

ÉVALUATION DE L'ÉCLAIREMENT DES ÉCLAIRAGES À LEDS

PAR JEAN-FRANÇOIS BALACEY

Une lampe est faite pour éclairer, évidemment. Mais comment évaluer l'éclairage, le quantifier ? Il y a tant de critères, vision humaine, puissance lumineuse, éclairage ressenti... Comment s'y retrouver ? Tout cela a été abondamment évoqué dans mes articles parus dans Spelunca en 2011 et 2016 mais je vous propose quelques éléments de réflexion complémentaires.

La vision humaine

La vision humaine est la perception des rayonnements lumineux et leur interprétation cognitive, en clair ce que le cerveau traduit. Quand l'éclairage est suffisant, la répartition spectrale de ces rayonnements donne lieu à une sensation de couleur. On distingue ensuite la vision

diurne (photopique) et nocturne (scotopique), forme particulière que prend la vision la nuit ou en conditions de faible éclairage. En spéléologie comme ailleurs, on comprend aisément que plus on a de lumière devant soi, mieux on voit.

Il faut parler ensuite de champ visuel, portion de l'espace vue par un œil regardant droit devant lui et immobile. L'image ci-dessous montre que le champ de vision binoculaire ou « vision stéréoscopique », qui permet la vision en 3 dimensions, donc la perception de la profondeur et des reliefs, nécessite un angle de 120°.

La vision périphérique conduit à un angle de 188 à 220°.

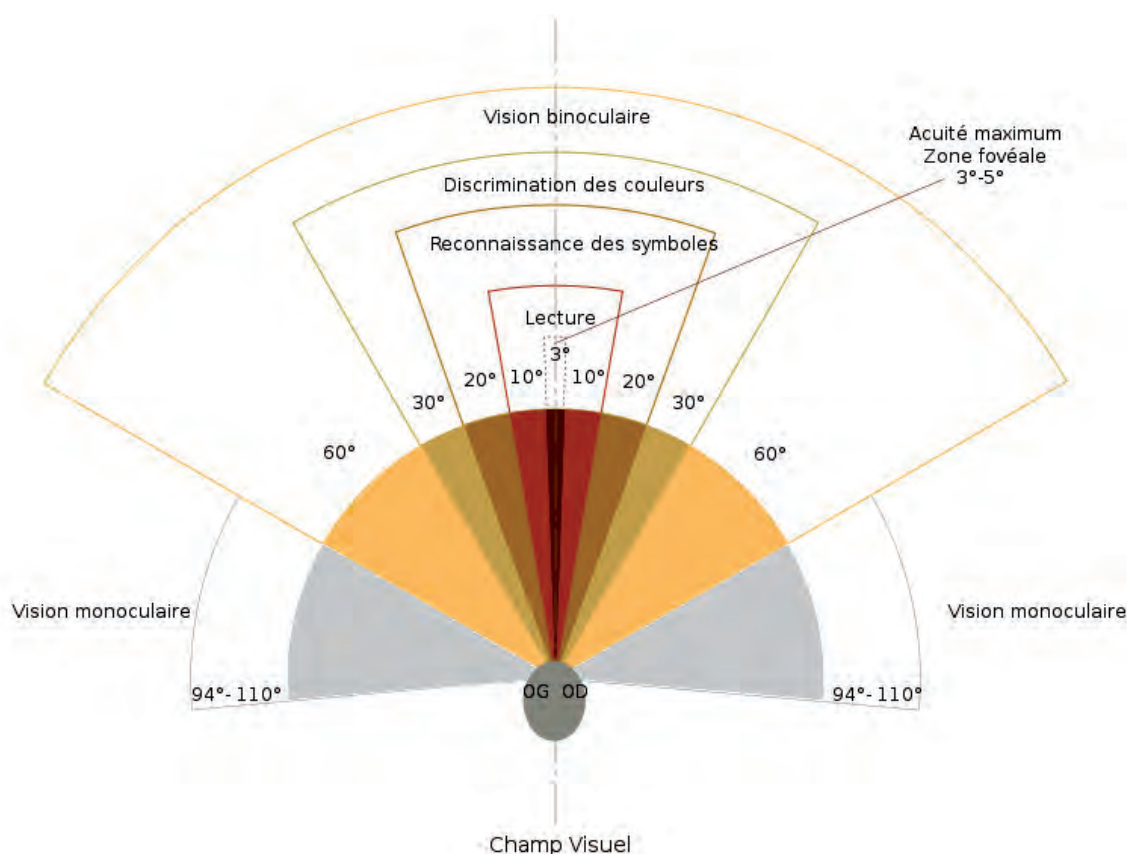


Figure 76 : Le champ visuel humain. Source : Wikipedia.

La lumière des lampes

Les diverses lampes produisent un éclairage quantifié de diverses façons. Pour résumer, les lumens (symbole : lm) correspondent à la « puissance totale » de la lampe, toute l'énergie lumineuse qui sort des LEDs et de l'optique pour aller éclairer une cible. Ces lumens sont mesurés via une sphère intégratrice normalisée, voir figure 77.

En résumé, la lampe éclaire l'intérieur de la sphère uniformément blanche et on intègre toute la lumière produite.

Ces lumens ne correspondent pas à ce que perçoit l'être humain. Lui, c'est une surface éclairée qu'il voit, éclairage traduit en lux (voir figure ci-dessous, source energie-environnement.ch/maison/eclairage-et-piles/ampoules-et-lampes).

La lampe émet son éclairage total (lumen) qui éclaire une surface ainsi éclairée (lux). Cette valeur en lux n'a de sens que si elle est définie pour une distance, la lumière diminuant avec le carré de la distance, voir plus loin.

Quel est le besoin de lumière exprimée en lux ? Le maximum serait le mieux, évidemment, sans éblouir (notion de luminance). Quel serait le minimum pour bien voir ? Voici des exemples de valeurs minimales recommandées pour des locaux affectés au travail données par la norme NF EN 12464-1 « Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 1 : lieux de travail intérieur ».

Et d'autres valeurs minimales pour des locaux affectés au travail données par le Code du travail (R4223-4) (tableau 2). Et d'autres valeurs trouvées dans la littérature (tableau 3).

Activité ou lieu concerné	Éclairage moyen (lux)
Zones de circulation et couloirs	100
Escaliers, escaliers roulants, tapis roulants	100
Vestiaires, sanitaires, salles de bains, toilettes	200
Classement, transcription, etc.	300
Écriture, dactylographie, lecture, traitement de données	500
Salles de conférences et de réunions	500

Tableau 1 : valeurs minimales recommandées pour des locaux affectés au travail.
Source norme NF EN 12464-1.

Activité ou lieu concerné	Éclairage moyen (lux)
Voies de circulation intérieures	40
Escaliers et entrepôts	60
Locaux et travail, vestiaires, sanitaires	120
Locaux aveugles affectés à un travail permanent	200

Tableau 2

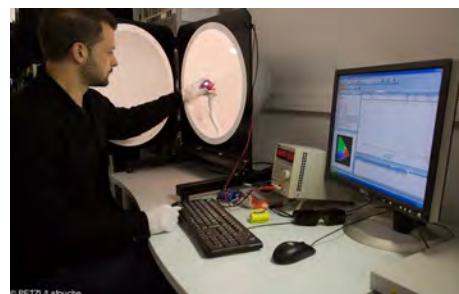


Figure 77 : Sphère intégratrice.
Source : Petzl.



Figure 78 : Lumen et lux.
Source <https://www.energie-environnement.ch>



Figure 79 : Correspondance entre lumen et lux. Dessin Marion Balacey.



Activité ou lieu concerné	Éclairement moyen (lux)
Nuit de pleine lune	0,5
Pénombre ou éclairage à la bougie	10
Ville éclairée	20 à 80
Luminosité minimale pour lire un texte	100
Éclairage domestique	100 à 200
Lieux publics	300 à 500
Local vraiment très bien éclairé	1 000
Extérieur par temps couvert	5 000
Extérieur par temps moyen	10 000
Éclairage artificiel intense (à proximité d'une lampe halogène 50 W)	20 000
Extérieur par temps ensoleillé	50 000 à 100 000

Tableau 3 : valeurs d'éclairement trouvées dans la littérature. Sources : sites lumiere-scene.be et sonelec-musique.com.

Mes observations montrent que, sous terre, le besoin minimal serait de 20 lux mais le biais est l'adaptation de la vision à la pénombre. En intérieur, chez soi, 200 à 300 lux sont nécessaires pour un confort visuel suffisant. Il serait intéressant de compléter ce ressenti personnel par celui d'un panel de spéléologues. Henry Schneiker {34} indique « qu'un flux de 50 à 200 lux d'éclairage est suffisant pour la plupart des tâches qui nécessitent une bonne reconnaissance des couleurs et une bonne acuité visuelle. ». Il détaille bien dans sa publication la vision humaine et le besoin de lumière.

En spéléologie, pour que ces valeurs aient un sens, il faut définir des distances représentatives pour mesurer des lux. Pour se déplacer, le spéléologue a besoin de voir à une distance proche, disons 2 m. Cela correspond à la zone où il va progresser à courte distance d'environ un pas et chercher à voir où poser ensuite son pied pour avancer sans risque. Au-delà, il a aussi besoin de voir les obstacles proches ou lointains pour anticiper sa progression ou simplement profiter du paysage. Fixons arbitrairement cette valeur à 10 m.

Pour que les mesures de lux à ces distances soient représentatives, il faut qu'elles puissent être réalisées dans un milieu spécifique, avec du matériel accessible à tous. Tout cela est évoqué en détail au chapitre : « Méthode de mesure de l'éclairement des éclairages à LEDs pour la spéléologie / Méthode de l'indice lux (éclairement cumulé). ».

Si on considère qu'on évalue l'éclairement des lampes à des distances de 2 et 10 m par la méthode décrite, il faut ensuite produire des données représentatives de cet éclairement.

On peut facilement obtenir un grand nombre de données dont voici une liste non limitative :

- Total mesuré sur un axe horizontal de 4 m de long (lux) (indice lux)
- Maximum mesuré (lux)
- Limite dite de « faisceau » (cm) : 50 % du maximum
- Limite dite de « champ » (cm) : 10 % du maximum
- Moyenne sur un axe de 4 m de long (lux)
- Pourcentage supérieur à 2 lux
- Pourcentage supérieur à 5 lux
- Pourcentage supérieur à 10 lux
- Pourcentage supérieur à 20 lux
- Pourcentage supérieur à 50 lux
- Pourcentage supérieur à 100 lux
- Largeur faisceau supérieure à 2 lux (cm)
- Largeur faisceau supérieure à 5 lux (cm)
- Largeur faisceau supérieure à 10 lux (cm)
- Largeur faisceau supérieure à 20 lux (cm)
- Largeur faisceau supérieure à 50 lux (cm)
- Largeur faisceau supérieure à 100 lux (cm)



Ces données peuvent être obtenues pour chaque mode de la lampe testée soit 3 à 10 selon les lampes et jusqu'à 24 réglages pour les Scurion. Voici celles qui sont les plus significatives ainsi que leurs limites.

- L'indice lux ressemble au nombre de lumens annoncé par les fabricants, un total de valeurs de lux qui approche la puissance lumineuse ressentie. C'est seulement un indicateur de puissance lumineuse, pas de sa répartition sur la largeur du faisceau. On pourrait avoir un point chaud (valeurs maximales) au centre et peu ou pas de lumière autour, produisant ainsi l'effet tunnel, effet obligeant à tourner fréquemment la tête pour voir autour de soi. Pour la majorité des lampes testées, cet effet n'existe que lors de l'utilisation en spot seul, mode où ce phénomène est nécessaire pour bénéficier d'une vision lointaine.
- Le maximum mesuré représente le maximum de lumière au centre du faisceau. Il a la même limite que précédemment.
- Les limites de faisceau à 50 % et de champ à 10 % (« beam » et « field » en anglais) sont des valeurs utilisées par la norme ANSI. Pourtant mesurer seulement deux valeurs est insuffisant pour tracer une courbe précise de répartition de la lumière. En conséquence l'indice lux, le maximum mesuré et la moyenne sur 4 m sont des données plus parlantes.
- La moyenne sur 4 m correspond à l'éclairement moyen de la lampe. Une valeur minimale est à obtenir pour obtenir une vision satisfaisante.
- Les pourcentages supérieurs à n lux sont presque équivalents aux largeurs de faisceau supérieures à n lux, ces dernières étant un peu plus parlantes. On pourrait aussi calculer un angle de vision pour ces valeurs de lux mais cela compliquerait encore plus.

Ces valeurs n'ont un intérêt que par comparaison des modes d'une lampe, et des lampes entre elles. La comparaison des modes d'une lampe permet de voir l'étagement des éclairagements disponibles. Par exemple, l'indice lux va de 1 à 14 pour l'Ultra Vario (du mode secours au mode maximum), de 1 à 14 pour la Scurion 900 en mode diffus, de 1 à 19 pour la Minicube 400, de 1 à 25 pour la Stoots Tiho en mode diffus, etc. Cela est à pondérer évidemment en fonction des valeurs de lux, notablement différentes selon les lampes.

Pour avoir une vision exhaustive, on pourrait rassembler toutes les données obtenues pour une lampe sous forme de tableaux, type data sheets. Cela serait complet mais bien trop complexe à interpréter aussi une vision simplifiée a été recherchée. Elle consiste à évaluer les modes représentatifs de l'exploration, à savoir les modes progression et spot.

Le mode progression est mesuré en éclairage diffus. Il correspond à celui permettant une autonomie d'environ 8 h d'après les notices des fabricants. Cette autonomie n'a pas été vérifiée car cela aurait été trop long et complexe pour obtenir des mesures représentatives. Il aurait fallu en effet reproduire au moins 3 fois les mesures pour limiter l'influence de la décharge de la batterie. Les mesures ont donc été faites à tous les modes diffus disponibles, et un mode particulier supposé correspondre à celui conduisant à une autonomie d'environ 8 h a été retenu. Ce choix peut constituer un biais car il n'est pas toujours facile à identifier, les indications des notices des fournisseurs étant variables.

Le mode spot est facile à identifier par son faisceau étroit, l'angle variant de 10 à 24° selon les dires des fabricants.



Interprétation des résultats

L'intérêt d'obtenir ces données est de conduire à terme à un choix de lampe reposant sur des critères simples d'éclairage. Ma réflexion conduit à plusieurs critères pour cet éclairage.

Pour le mode progression, ce sont les valeurs à des distances de 2 m les plus utiles car elles correspondent aux alentours immédiats du spéléologue donc sa distance de sécurité. Le tableau ci-dessous (tableau 4) rassemble les valeurs caractéristiques qui semblent pertinentes, indice lux, maximum au centre du faisceau, moyenne sur un axe horizontal de 4 m de long

Lampe	DUO S	Stoots Tiho	Scurion 700	Scurion 900	Scurion 1500
Fabricant	Petzl	Stootsconcept	Scurion GmbH		
Lumens annoncés par le fabricant (lm)	330	200	240	554	655
Autonomie annoncée par le fabricant (h)	6	14	15	7	6
Pourcentage du maximum large mesuré	100	33	100	100	100
Type de faisceau	faisceau mixte (large et spot)	Large	Large	Large	Large
Mode retenu	déplacement rapide	3	diffus maximum		
Indice lux (lux)	1172	295	251	505	663
Maximum mesuré (lux)	306	54	18	41	50
Moyenne sur 4 m (lux)	56	14	12	24	32
Largeur faisceau supérieure à 20 lux (cm)	200	80	0	200	280
Pourcentage supérieur à 20 lux (%)	52	24	0	52	71

Figure 80 : Résultats pour le mode progression. Mesures faites avec un luxmètre disposé à une distance de 2 m d'une ligne horizontale graduée tous les 20 cm et mesurant 4 m de long. Les cases en orange correspondent aux critères : au moins 50 lux au centre du faisceau et 20 lux en moyenne sur une largeur de 4 m et à une distance de 2 m.

Ce tableau ne permet pas la comparaison de la répartition de la lumière, mieux montrée par les graphes ci-contre.



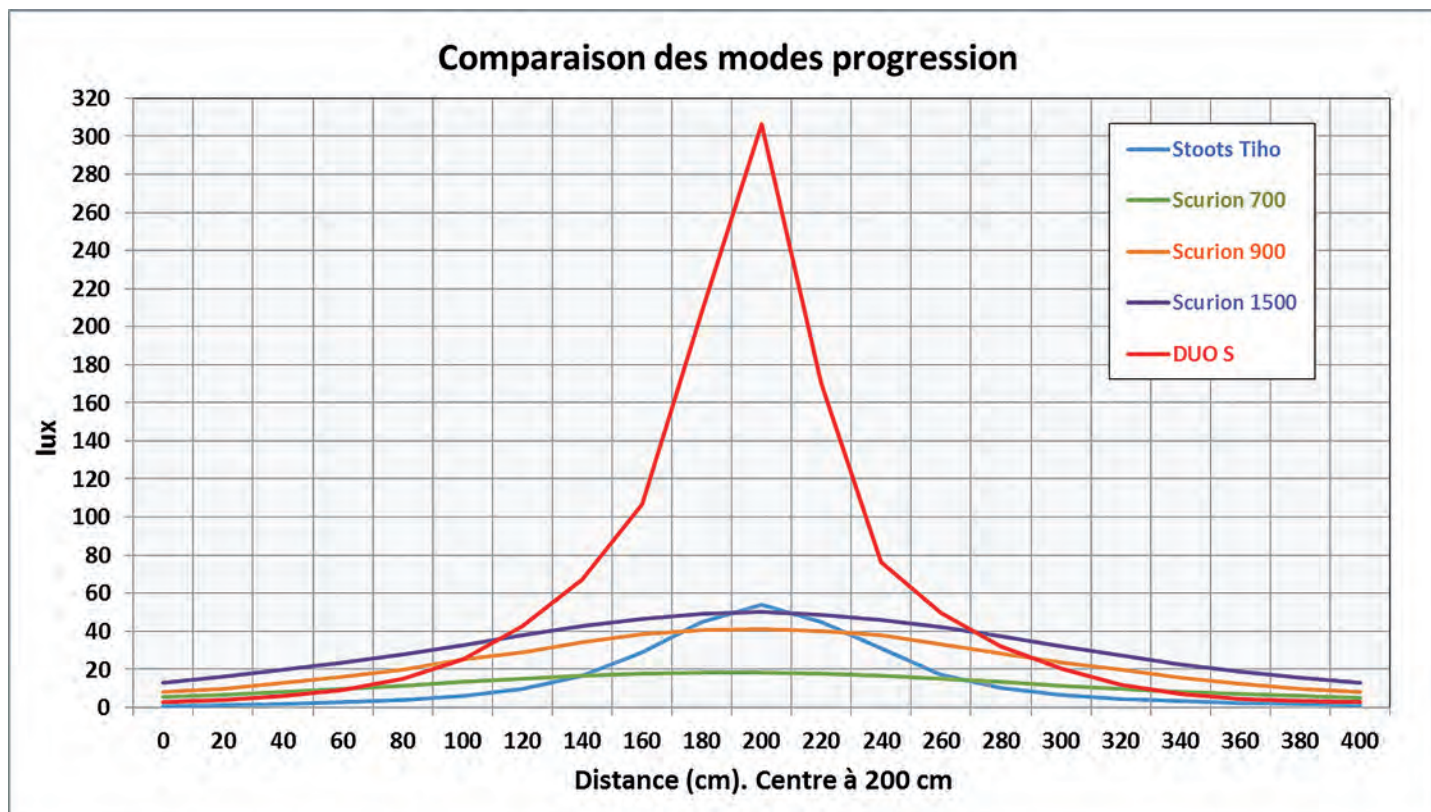


Figure 81 : Comparaison de la répartition de la lumière des modes progression (5 lampes).

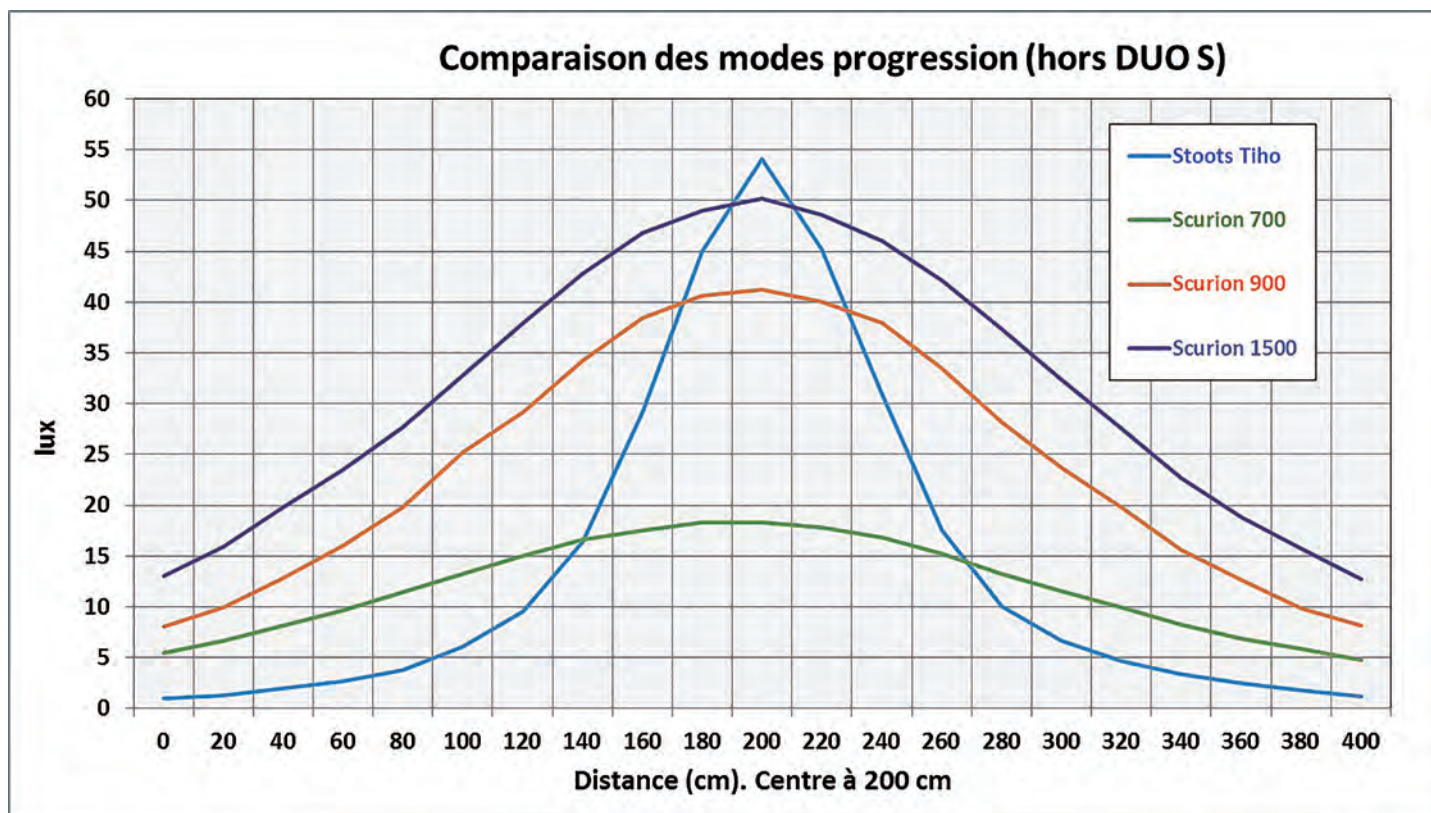


Figure 82 : Comparaison de la répartition de la lumière des modes progression (4 lampes).



L'interprétation est la suivante. On observe la bonne symétrie du faisceau de toutes les lampes, ce qui traduit la qualité géométrique des optiques. On distingue deux familles de lampes : celles qui ont un faisceau diffus très large, Scurion, conduisant à une vision étendue pour l'utilisateur et son voisinage ; celles avec un faisceau à la lumière plus intense et moins large, Petzl et Stoots, sans gêne notable pour l'utilisateur en vision latérale.

Il y a lieu de noter que la Duo S, en mode progression, propose un faisceau mixte : large et spot combiné, ce qui conduit à des niveaux d'éclairement supérieurs aux autres lampes. On obtiendrait probablement des valeurs similaires pour les lampes Scurion en sélectionnant un programme qui fournit une telle association de ces deux faisceaux.

Pour le mode spot, c'est le mode spot maximal qui a été retenu car le plus pertinent pour la vision lointaine. Il est plus approprié de comparer les mesures à une distance de 10 m, les plus lointaines, même si elles concordent souvent avec celles à 2 m. Le tableau ci-dessous rassemble les valeurs caractéristiques qui semblent pertinentes, indice lux, maximum au centre du faisceau, moyenne sur un axe horizontal de 4 m de long

La représentation graphique apporte peu. Elle confirme ce que montre la figure 83, la similitude entre Scurion et Petzl

S'il n'y avait qu'une conclusion à en tirer, ce serait que la caractérisation de l'éclairement peut se résumer à l'indice lux, représentatif de la puissance lumineuse perçue, plus pour le mode progression que pour le spot, où là c'est le maximum disponible qui compte. La représentation graphique peut permettre une meilleure comparaison des données et faciliter la comparaison des lampes.

	Lampe	DUO S	Stoots Tiho	Scurion 700	Scurion 900	Scurion 1500
Distance (m)	Fabricant	Petzl	Stootsconcept	Scurion GmbH		
	Lumens annoncés par le fabricant (lm)	450	1000	260	255	630
	Autonomie annoncée par le fabricant (h)	4 h 30 (accu 2 3,2 Ah)	4 h (accu 4 Ah)	15,1 h (accu 6,8 Ah)	14,7 h (accu 6,8 Ah)	6 h (accu 6,8 Ah)
2	Total mesuré sur 4 m (lux)	4133	2723	3027	3241	5091
	Maximum mesuré (lux)	2098	917	1969	2188	2242
	Moyenne sur 4 m (lux)	197	130	144	154	242
10	Total mesuré sur 4 m	1012	482	584	662	1055
	Maximum mesuré (lux)	114	37	76	86	93
	Moyenne sur 4 m (lux)	48	23	28	32	50

Figure 83 : Résultats pour le mode spot. Mesures effectuées avec un luxmètre placé à une distance de 2 m puis de 10 m d'une ligne horizontale de 4 m de longueur, graduée tous les 20 cm. Les cases en orange correspondent aux critères : au moins 50 lux au centre du faisceau à une distance de 10 m. Le total mesuré sur 4 m correspond à la somme des 21 valeurs mesurées de 0 à 4 m, tous les 20 cm (voir encadré).

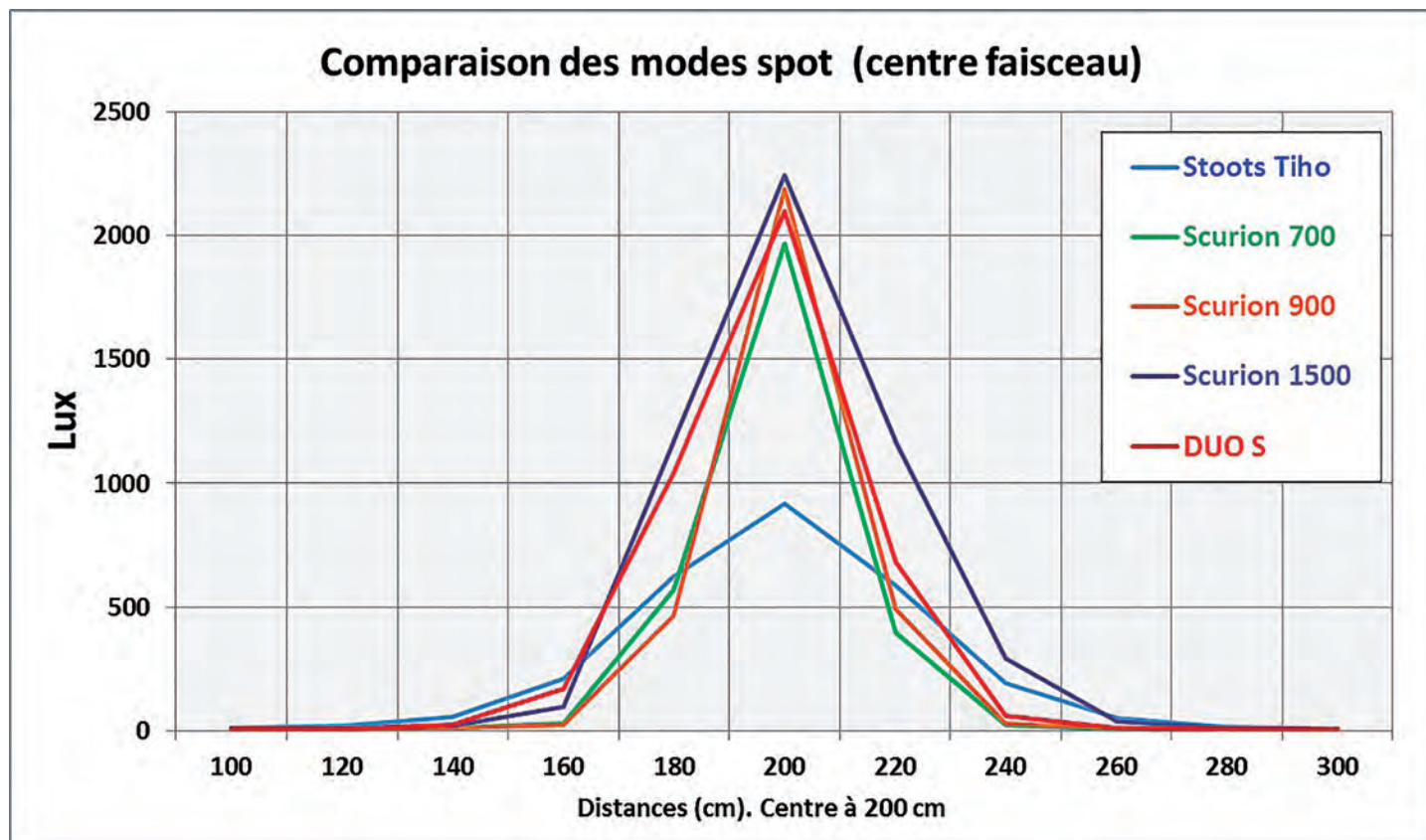


Figure 84 : Comparaison de la répartition de la lumière des modes spots (5 lampes).



Scialet des Saints-de-Glace (Vercors), cliché Serge Caillault



MÉTHODE DE MESURE DE L'ÉCLAIREMENT DES ÉCLAIRAGES À LEDS POUR LA SPÉLÉOLOGIE

Méthode de l'indice lux (éclairage cumulé)

Sommaire

Avant-propos

1 Domaine d'application

2 Références normatives

3 Termes et définitions

3.2 Caractéristiques des lampes

3.3 Matériels, documents et local de mesure

4 Données obtenues

5 Méthodologie

6 Vérifications avant essai

7 Déroulement de l'essai

8 Traitement des données

8.1 Saisie avec corrections d'étalonnage

8.2 Traitements complémentaires

Annexe 1 : Exemple de document de suivi des relevés

Annexe 2 : Exemple de feuille de calcul Excel pour un module 3 LEDs

Annexe 3 : Approche des incertitudes de mesure

Annexe 4 : Améliorations de la méthode

Annexe 5 : Besoins d'éclairage en spéléologie

Annexe 6 : Le système visuel humain



Avant-propos

Le présent document décrit une méthode de mesure de l'éclairement des éclairages à LEDs pour la spéléologie inspirée de la norme ANSI / NEMA FL1 (ANSI : American National Standards Institute ; NEMA : National Electrical Manufacturers Association - Flashlight Basic Performance Standard). Cette norme a été développée grâce à la collaboration des quatorze principaux fabricants de matériel d'éclairage portatif, dont Petzl. Elle définit un protocole commun de mesure des performances d'éclairage, divers paramètres caractéristiques des éclairages portables et les moyens de les mesurer, l'objectif étant de permettre la comparaison des lampes de différentes marques selon le même référentiel. Il s'agit de :

- la distance à laquelle l'éclairement atteint 0,25 lux (lumière du clair de lune) ;
- l'intensité lumineuse maximale mesurée le long de l'axe central horizontal d'un cône de lumière (en candela) ;
- l'autonomie, définie comme le temps au bout duquel la lumière atteint 10 % de la valeur initiale ;
- la quantité totale de lumière émise (en lumen) mesurée avec une sphère intégrant la totalité de la source lumineuse ;
- la résistance aux chocs, degré auquel un éclairage résiste aux chocs en tombant sur une surface solide ;
- l'étanchéité, à l'aspersion (IPX4), à l'immersion temporaire (IPX7), à l'immersion longue (IPX8).

Selon le sérieux des fabricants, ces indications figurent - ou non - dans les spécifications techniques de leurs lampes. Cette norme est d'application volontaire : les fabricants l'appliquent ou pas, sans obligation légale, la vérification donnant lieu alors à l'apposition d'icônes, représentés ci-dessous.

	Rendement lumineux Le rendement lumineux est le flux lumineux total. C'est la quantité totale d'énergie lumineuse générale émise telle que mesurée en intégrant le rendement angulaire total de la source de lumière portable. Le rendement lumineux dans ce standard est exprimé en unités de lumens.		Résistance à l'impact La résistance à l'impact est le degré auquel un dispositif résiste aux dommages après une chute sur une surface solide.
	Autonomie Le temps d'exécution est défini comme la durée depuis la valeur de rendement lumineux initiale – définie 30 secondes après que l'appareil ait été mis en marche – en utilisant des batteries neuves, jusqu'à ce que le rendement lumineux atteigne 10% de la valeur initiale		Protection du boîtier contre la pénétration d'eau Basée sur le standard ANSI/IEC 6029, les indices de protection suivants pour les dispositifs couverts par ce standard ont été définis : Résistance à l'eau : IPX4. L'eau projetée contre le dispositif de n'importe quelle direction n'aura aucun effet nuisible.
	Portée du faisceau La distance du faisceau est définie comme la distance du dispositif auquel le faisceau lumineux est de 0,25 lux (0,25 lux est environ l'équivalent de la lumière émise par la pleine lune par nuit claire dans un champ ouvert).		Water Proof : IPX7. Toute pénétration d'eau en grandes quantités entraînant des effets nuisibles ne sera pas possible lorsque le boîtier est temporairement plongé dans l'eau dans des conditions standardisées de pression et de temps. Submersible : IPX8. Toute pénétration d'eau en grandes quantités entraînant des effets nuisibles ne sera pas possible lorsque le boîtier est continuellement plongé dans l'eau dans des conditions qui seront indiquées par le fabricant mais qui sont plus sévères que pour IPX7.
	Intensité de faisceau maximum L'intensité de faisceau maximum est l'intensité lumineuse maximum généralement sur l'axe central d'un cône de Politzer. La valeur est exprimée en candela et ne change pas avec la distance		

Figure 85 : Icones selon norme ANSI / NEMA FL1.

La mesure des diverses caractéristiques de la lumière fait appel à des notions complexes liées, entres autres, à sa perception par l'œil humain (voir annexe 6). Aussi, pour permettre une évaluation simple des éclairages pour la spéléologie, la méthode développée ici ne repose que sur des moyens de mesure faciles à mettre en œuvre, permettant à chacun de caractériser l'éclairement des lampes qu'il aura fabriqué ou acheté.



1 Domaine d'application

La présente méthode peut s'appliquer à tout type d'éclairage pour la spéléologie ou pour toute autre application, que cet éclairage soit directif ou ambiant, de façon à ce que le faisceau soit mesurable par projection sur une surface plane. Pour la spéléologie, il s'applique aux bougies, lampes à graisses, à huiles, lanternes à pétrole, lampes à acétylène avec ou sans réflecteur, lampes électriques de toute nature dont les éclairages à LEDs.

La méthode n'est donc pas adaptée aux éclairages par seule diffusion, tels les lampadaires halogènes sur pied, les lampes de bureaux ou tout autre dispositif dont le faisceau n'est pas directement projeté sur la surface de mesure.

2 Références normatives

La rédaction de cette méthode est inspirée des 2 normes suivantes :

ANSI / NEMA FL1. Flashlight Basic Performance Standard. Copyright 2009 by the National Manufacturers Association.

NF EN 13272 (avril 2012). Applications ferroviaires. Éclairage électrique pour matériel roulant des systèmes de transport public.

3 Termes et définitions

3.1 Unités et définitions optiques

Eclairement (Wikipedia) : L'éclairement est le quotient du flux lumineux reçu par une surface sur l'aire de la surface éclairée ($\text{lux (lx)} = \text{lm/m}^2$). Le lux est une unité de mesure de l'éclairement lumineux (symbole : lx). Il caractérise le flux lumineux reçu par unité de surface.

Flux lumineux (Wikipedia) : Le flux lumineux est la grandeur photométrique mesurant la puissance lumineuse d'un éclairage, telle qu'elle est perçue par l'œil humain. Il s'exprime en lumen (lm). Le Lumen et le lux ont été définis dans le chapitre évaluation de l'éclairement. Réflexion diffuse (Wikipedia) : La réflexion est dite diffuse lorsque la lumière est réfléchiée dans un grand nombre de directions et l'énergie du rayon incident est redistribuée dans une multitude de rayons réfléchis.

Vision humaine (Wikipedia) : « La vision humaine est la perception humaine des rayonnements lumineux et leur interprétation cognitive. » Quand l'éclairement est suffisant, la répartition spectrale de ces rayonnements donne lieu à une sensation de couleur (vision photopique). Quand il est insuffisant (pénombre), c'est la vision scotopique qui intervient. L'angle de vision en vision binoculaire est de 120°. Voir annexe 6.

3.2 Caractéristiques des lampes

Faisceau large (ou diffus) : faisceau dont l'angle est destiné à un éclairage d'ambiance, différent du faisceau spot (focalisé). Pour les lampes étudiées, l'angle moyen est de l'ordre de 30°, variant de 25 à 33°. Faisceau spot (ou focalisé) : faisceau dont l'angle réduit est destiné à un éclairage lointain. Pour les lampes étudiées, l'angle moyen est de l'ordre de 10°, variant de 8 à 24°.

Mode secours : mode minimal de l'éclairement permettant un déplacement.

Mode progression : mode d'éclairement défini arbitrairement comme permettant une autonomie de 8 heures environ. Il correspond au mode optimisé (compromis confort de vision et autonomie). Pour les lampes étudiées, le nombre de lumens varie de 125 à 330 lumens.

3.3 Matériels, documents et local de mesure

Document de suivi d'essai : document permettant la saisie des données dans le local de mesure. Un exemple figure en annexe 1.

Local de mesure : local dans lequel sont réalisées les mesures et ayant les dimensions minimales suivantes : longueur 11 m, largeur 4 m et une hauteur de 2,4 m. Tout local ayant des dimensions proches peut convenir, avec des surfaces planes non réfléchissantes, comme du béton (coefficient de réflexion des parois : béton neuf 0,4 à 0,5 et béton ancien 0,05 à 0,15 (Source : www.energieplus-lesite.be)).

Luxmètre : « Un luxmètre est un capteur permettant de mesurer simplement et rapidement l'éclairement dans le spectre visible. La mesure est absolue et non relative. L'unité de mesure est le lux » (source Wikipedia). On peut utiliser un luxmètre industriel, à capteur semi hémisphérique, ou un capteur de laboratoire, plus directif (voir photos ci-dessous). La nature du luxmètre et du capteur sera précisée dans le document de suivi d'essai. Un luxmètre industriel (gamme habituelle 200 à 50 000 lux), d'une valeur de l'ordre de 60 €, peut suffire.



Figure 86 : Luxmètre de laboratoire.



Figure 87 : Luxmètre industriel.

Enregistreur de température : l'éclairement (rendement) des LEDs étant affecté par la température, celle-ci est enregistrée pendant toute la période de mesure, à un pas de mesure réduit (30 secondes). Des exemples d'enregistreurs se trouvent ci-dessous. Un enregistreur (gamme -30 à 70 °C, 32 000 points de mesure), d'une valeur de l'ordre de 25 €, peut suffire. Voir figures 88 et 89 ci-dessous.

Elitech® Official



Figures 88 et 89 : Enregistreur de température.

Surface de mesure : surface plane non réfléchissante (voir local de mesure) sur laquelle est projeté le faisceau de la lampe à tester.

Support de lampe : ensemble de supports permettant la fixation stable de la lampe et le centrage du faisceau au centre du trait gradué. Des exemples figurent en annexe 2.

Thermomètre Infrarouge : ce thermomètre sans contact permet des mesures complémentaires de la température du boîtier des LEDs et des diverses surfaces du local d'essai (sol sous la lampe en test, paroi visée). Un thermomètre (gamme habituelle 30 à 350 °C), d'une valeur de l'ordre de 15 €, peut suffire. Voir figure 90 ci-contre.



Figure 90 : Thermomètre Infrarouge.

4 Données obtenues

Indice lux : somme des valeurs mesurées tous les 20 cm sur le trait gradué de longueur 4 m soit la somme des 21 valeurs de 0 à 4 m. Cet indice est exprimé en lux. Voir le traitement des données au paragraphe 8.

Limite de faisceau : largeur du faisceau, exprimée en cm, correspondant à 50 % du maximum mesuré au centre du faisceau. Cette valeur a un intérêt limité.

Limite de champ : largeur du faisceau, exprimée en cm, correspondant à 10 % du maximum mesuré au centre du faisceau. Cette valeur a un intérêt limité.

Pourcentage supérieur à n lux : pourcentage obtenu en faisant le rapport du nombre de valeurs supérieures à un certain nombre de lux (2, 5, 10, 20, 50 et 100 lux) rapporté à 21, nombre total de valeurs mesurées (voir indice lux).

Largeur supérieure à n lux : largeur obtenue en calculant la largeur entre les valeurs supérieures à un certain nombre de lux (2, 5, 10, 20, 50 et 100 lux).

5 Méthodologie

La méthode consiste à mesurer l'éclairement fourni par la lampe à tester au moyen d'un luxmètre, éclairement exprimé en lux, obtenu sur une surface plane peu réfléchissante (coefficient de réflexion des parois inférieur à 0,5). Cet éclairement est mesuré sur une ligne droite horizontale graduée (longueur 4 m, graduation tous les 20 cm) située à mi-distance du sol et du plafond du local de mesure. Le faisceau de la lampe est centré et orienté de façon à être parallèle au sol.

La mise au point de la méthode dans divers lieux intérieurs a montré que le lieu de mesure le plus adapté est du type parking souterrain pour plusieurs raisons : ce type de local est aisément disponible en milieu urbain ; son éclairage peut être maîtrisé de façon à obtenir une obscurité quasi complète ; il possède des surfaces parallèles limitant la réflexion diffuse ; ses dimensions habituelles permettent des mesures à 2 m (éclairage large de progression) et 10 m (éclairage spot pour vision lointaine).

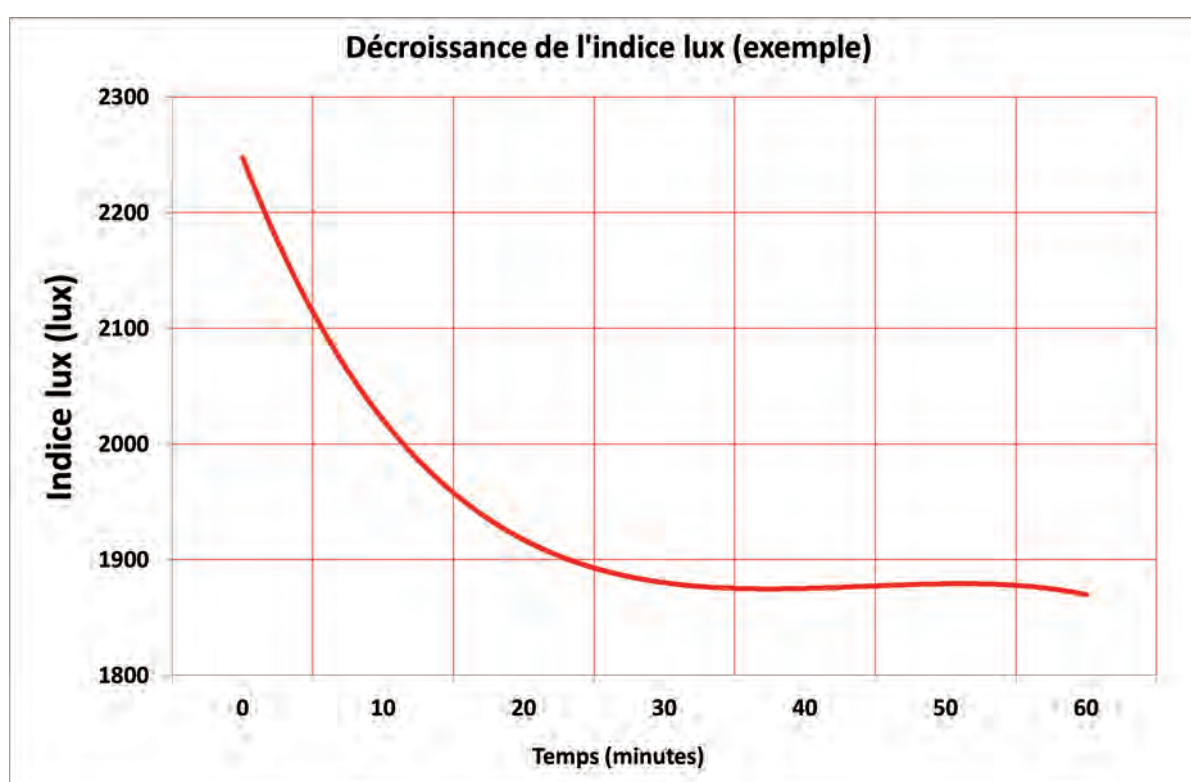
La méthode ne concerne pas les autres paramètres pris en compte par la norme ANSI / NEMA FL1 (distance où l'éclairement atteint 0,25 lux ; intensité lumineuse maximale ; autonomie ; quantité totale de lumière émise ; résistance aux chocs ; étanchéité).

6 Vérifications avant essai

On aura effectué le marquage sur le mur du trait gradué de 4 m et des points repères au sol à 2 et 10 m. On aura vérifié préalablement que le masquage des éclairages de secours conduit à un éclairement inférieur à 0,1 lux dans la zone de mesure.

On aura vérifié préalablement le temps de stabilisation de l'éclairement (voir courbe de décroissance de la luminosité en annexe 3). Une attente de 2 minutes peut suffire mais ce temps arbitraire n'est pas suffisant pour toutes les lampes qui peuvent mettre jusqu'à une heure avant d'avoir un éclairement stable ou à décroissance faible. Il est donc impératif de vérifier préalablement la durée de stabilisation. Cette absence de vérification peut conduire à des valeurs par excès, voir la courbe ci-dessous. On note qu'il faut attendre environ 30 minutes pour avoir une valeur stabilisée de l'éclairement.

Figure 91 : Exemple de décroissance de l'indice lux.



7 Déroulement de l'essai

Le matériel d'essai – support de lampe (escabeau, pied photo, autres), fixations diverses (cordelettes nylon, cordelettes D yneema, élastiques de chambre à air, mousquetons, autres), ca s que avec la mpe, matériels de mesures (luxmètre, enregistreur de température, mètre ruban, double décamètre, montre, thermomètre IR), documents de suivis d'essais, crayons, stylos, cartons de masquage, lampe frontale – est rassemblé dans le local d'essai. La batterie de la lampe a été pleinement chargée auparavant et on vérifie avec l'indicateur de charge – si la lampe en est munie – que la charge de la batterie est maximale. Une seconde batterie peut être nécessaire en cas d'essais de longue durée.

La suite des opérations se déroule ainsi :

- mise en marche de l'enregistrement de la température. Elle doit intervenir au moins quinze minutes avant le début des mesures pour obtenir une stabilisation du capteur de l'enregistreur ;



Le support principal est ici un escabeau à 5 marches. Les fixations sur le casque sont des cordelettes nylon et Dyneema, des élastiques de chambre à air et des mousquetons.

- le masquage des éclairages de secours est effectué (cartons, élastiques, autres) de façon à ce que la zone d'essai, sur une distance de 10 m, ait un éclairement inférieur à 0,1 lux. Ceci est vérifié au luxmètre.
- la lampe est fixée sur son support, avec ou sans casque associé. L'ensemble est positionné à 2 m du centre de la cible et l'exactitude de la position est vérifiée de façon que le centre de la face avant de la lampe soit exactement à 2 m. Il est également vérifié que la hauteur du sol est bien de 1,20 m. Voir photos ci-dessous.
- l'éclairage ambiant du local est éteint. La lampe à tester est allumée et on vérifie que le centre du faisceau en mode spot est au centre de la cible c'est-à-dire du trait gradué. Cette vérification se fait visuellement puis avec le luxmètre, les valeurs de part et d'autre du centre, à 20 cm, devant être équivalentes.
- La lampe à tester est allumée au premier mode à tester. Une attente suffisante pour obtenir la stabilisation de l'éclairement des LEDs est effectuée (voir 6). Cette vérification se fait avec le luxmètre au centre du faisceau où la valeur maximale est observée. Voir photo ci-dessous.
- L'heure de début des mesures est notée et les mesures débutent. Les 21 mesures sont notées dans le document prévu (voir annexe 1). L'heure de fin des mesures pour ce premier mode est notée.
- On renouvelle les mesures pour le second mode et les suivants de la même façon.
- La procédure est la même pour la distance de 10 m.
- On peut compléter par des mesures de température du boîtier effectuées à un endroit caractéristique de l'échauffement des LEDs, à l'arrière du boîtier. On peut aussi éventuellement mesurer les températures du sol et de la surface de projection.

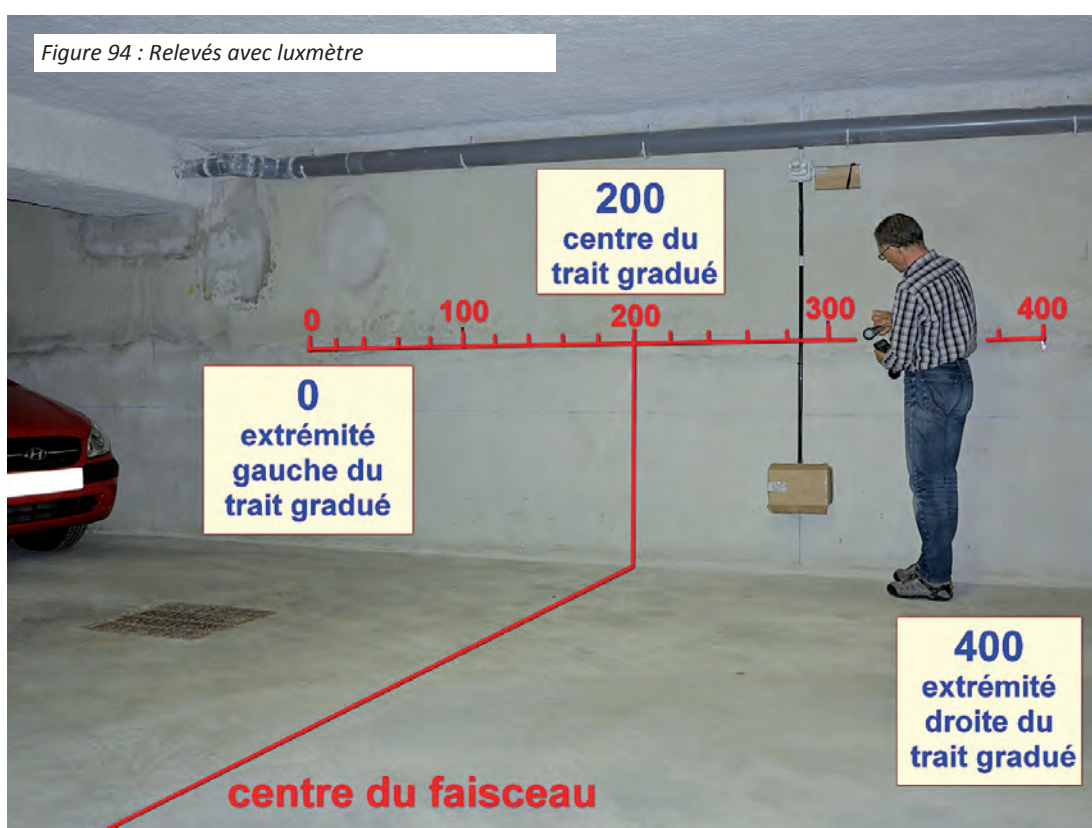
Il y a lieu de noter les phénomènes particuliers pouvant intervenir pendant les mesures, telles des variations de lumière (pour des lampes de qualité moindre) ou une chute de lumière traduisant une consommation excessive compte tenu de la charge de la batterie, ceci annulant la série de mesures et nécessitant une nouvelle série de mesures avec une autre batterie pleinement chargée.

8 Traitement des données

8.1 Saisie avec corrections d'étalonnage

Les données relevées manuellement sont saisies dans une feuille de calcul Excel. Si possible, les valeurs brutes sont corrigées par un facteur de correction obtenu via un luxmètre de référence (raccordement COFRAC). Ceci ne sera pas possible avec un luxmètre du commerce sans certificat d'étalonnage.

Les températures moyennes sont calculées via le logiciel dédié à l'enregistreur ou un tableur. Elles sont notées dans la feuille Excel. Elles serviront éventuellement pour comparer des mesures avec différentes lampes et étudier l'influence éventuelle de la température.





La feuille de calcul permet d'obtenir l'indice lux (somme des 21 valeurs mesurées) et la moyenne des mesures. On complète ensuite les champs en calculant les valeurs à partir des données au-dessus. Certaines (10 %, 50 % sont repérées en couleur). Voir exemple de résultats ci-dessous (figure 95) et en annexe 2 :

Total mesuré sur 4 m (lux)	30
Maximum mesuré (lux)	8
Limite faisceau (cm) (50 % du maximum)	40
Limite champ (cm) (10 % du maximum)	120
Moyenne sur 4 m (lux)	1,4
Pourcentage supérieur à 2 lux	24
Pourcentage supérieur à 5 lux	14
Pourcentage supérieur à 10 lux	0
Pourcentage supérieur à 20 lux	0
Pourcentage supérieur à 50 lux	0
Pourcentage supérieur à 100 lux	0
Largeur faisceau supérieure à 2 lux (cm)	80
Largeur faisceau supérieure à 5 lux (cm)	40
Largeur faisceau supérieure à 10 lux (cm)	0
Largeur faisceau supérieure à 20 lux (cm)	0
Largeur faisceau supérieure à 50 lux (cm)	0
Largeur faisceau supérieure à 100 lux (cm)	0

Figure 95 : Fiche technique éclairage Stoots Tiho.

8.2 Traitements complémentaires

Il peut être intéressant de comparer l'étagement des modes ou diverses lampes via un tableau de calcul ou un graphe. 2 exemples figurent ci-dessous.

Figure 96 : Exemple de tableau de comparaison de spots de lampes Scurion.

Lampe	Scurion 700	Scurion 900	Scurion 1200	Scurion 1500
Total mesuré sur 4 m (lux)	3027	3241	3480	5091
Maximum mesuré (lux)	1969	2188	1582	2242
Limite faisceau (cm) (50 % du maximum)	ND	ND	ND	40
Limite champ (cm) (10 % du maximum)	80	80	80	100
Moyenne sur 4 m (lux)	144	154	166	242
Pourcentage supérieur à 2 lux (%)	57	62	71	100
Pourcentage supérieur à 5 lux (%)	33	33	43	62
Pourcentage supérieur à 10 lux (%)	24	24	33	38
Pourcentage supérieur à 20 lux (%)	24	24	24	29
Pourcentage supérieur à 50 lux (%)	14	14	24	24
Pourcentage supérieur à 100 lux (%)	14	14	10	19
Largeur faisceau supérieure à 2 lux (cm)	220	240	280	400
Largeur faisceau supérieure à 5 lux (cm)	120	100	160	240
Largeur faisceau supérieure à 10 lux (cm)	80	80	80	140
Largeur faisceau supérieure à 20 lux (cm)	80	40	80	100
Largeur faisceau supérieure à 50 lux (cm)	40	40	80	80
Largeur faisceau supérieure à 100 lux (cm)	40	40	40	60

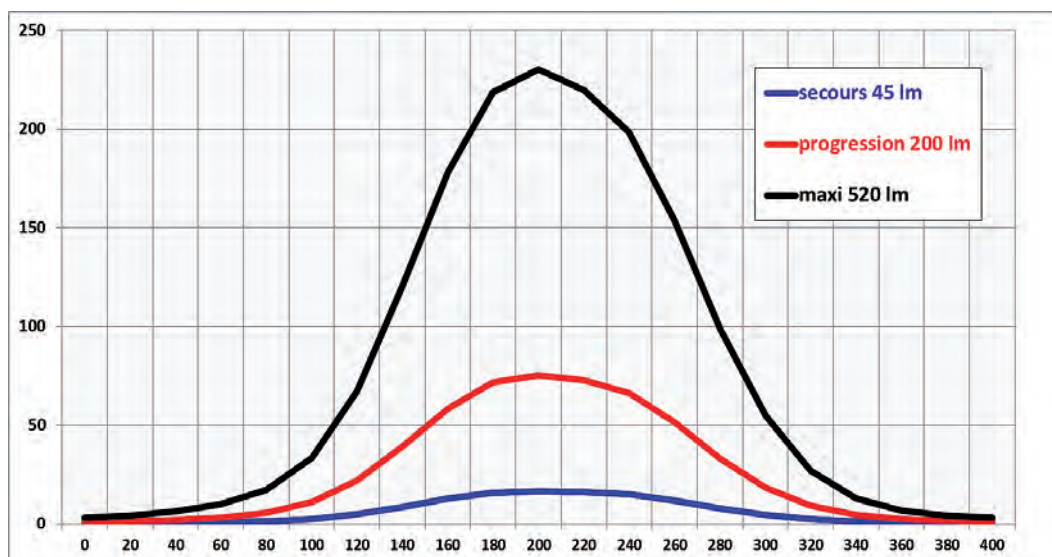
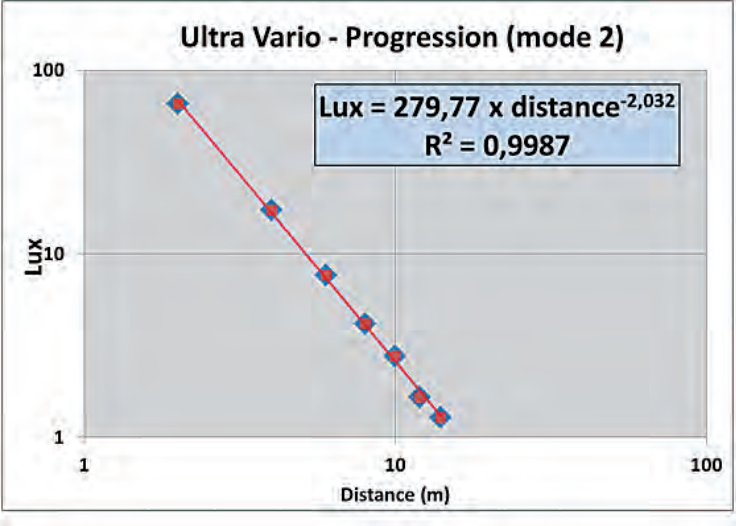


Figure 97 : Exemple d'étalement des modes de l'Ultra Vario (hors spot).

On pourrait aussi calculer l'angle d'éclairage pour différentes valeurs de lux. Ceci permettrait une meilleure comparaison des surfaces éclairées, ou d'autres valeurs extrapolées, comme des valeurs de lux pour des distances supérieures à 10 m, la lumière diminuant avec le carré de la distance. Ceci suppose des mesures à plusieurs distances. Un exemple figure ci-dessous (valeurs maximales au centre du faisceau pour l'Ultra Vario). Les cases colorées correspondent aux valeurs extrapolées.



ULTRA-VARIO		
m	Progression (mode 2)	Spot (mode 4)
2	65,3	1895,2
4	17,3	495,0
6	7,6	214,4
8	4,1	122,5
10	2,8	78,8
12	1,7	56,5
14	1,3	39,7
20	0,70	18,86
30	0,31	8,38
50	0,11	3,02
100	0,03	0,75
200	0,007	0,19
300	0,003	0,08



Figures 98 et 99 : Valeurs maximales (lux) au centre du faisceau pour l'Ultra Vario.

Annexe 1 : exemple de document de suivi des relevés

Figure 100 : Exemple de document de suivi des relevés, complété pour la lampe Ultra Wide, distance 10 m. Les températures ambiantes moyennes pendant chaque mode sont indiquées en vert.

(Distance 10m)

ULTRA WIDE					Température
Mesures 11 10 16					
	Batterie 2,7 Ah				
valeurs brutes non corrigées					
	45-lumen	200-lumen	520-lumen	330-lumen	
Point	4	2	3	1	
0	3,7	0,8	1,5	0,2	
20	4,2	1,0	1,8	0,2	
40	4,8	1,1	2,0	0,25	
60	5,4	1,2	2,25	0,3	
80	6,0	1,4	2,5	0,3	
100	6,6	1,5	2,7	0,4	
120	7,1	1,6	2,9	0,4	
140	7,5	1,7	3,05	0,4	
160	7,8	1,8	3,1	0,45	
180	7,7	1,8	3,2	0,45	
200	7,8	1,8	3,1	0,4	
220	7,3	1,8	3,0	0,45	
240	6,95	1,7	2,8	0,4	
260	6,5	1,6	2,6	0,4	
280	5,9	1,4	2,35	0,4	
300	5,3	1,3	2,1	0,3	
320	4,7	1,1	1,9	0,3	
340	4,2	1,0	1,65	0,2	
360	3,7	0,9	1,5	0,2	
380	3,2	0,8	1,3	0,2	
400	2,8	0,7	1,1	0,1	
	4	2	3	1	

Batterie 97h
pleine charge au début

Mode	Débit-Fin
1	11h 28 11h 32
2	11h 33 11h 36
3	11h 40 11h 44
4	11h 41 11h 44

Températures moyennes (en vert):
 Mode 1: 15,40°C
 Mode 2: 15,36°C
 Mode 3: 15,30°C
 Mode 4: 15,47°C





Annexe 2 : exemple de feuille de calcul

Figure 101 : Exemple de feuille de calcul Excel pour un module 3 LEDs.

13/12/16 - 3 leds PETZL (ABIMES)		
Parking - Distance : 2 m		
Batterie jaune Petzl chargée au maximum (matin des mesures)		
valeurs brutes non corrigées		valeurs corrigées
Point		Température
		12,9 °C
0	0	0,00
20	0,05	0,05
40	0,1	0,09
60	0,1	0,09
80	0,2	0,18
100	0,3	0,28
120	0,6	0,55
140	1,2	1,1
160	2,7	2,48
180	5,5	5,1
200	8,6	7,91
220	7	6,4
240	3,1	2,85
260	1,3	1,2
280	0,6	0,55
300	0,3	0,28
320	0,2	0,18
340	0,15	0,14
360	0,1	0,09
380	0,1	0,09
400	0,1	0,09
Total mesuré sur 4 m (lux)		30
Maximum mesuré (lux)		8
Limite faisceau (cm) (50 % du maximum)		40
Limite champ (cm) (10 % du maximum)		120
Moyenne sur 4 m (lux)		1,4
Pourcentage supérieur à 2 lux		24
Pourcentage supérieur à 5 lux		14
Pourcentage supérieur à 10 lux		0
Pourcentage supérieur à 20 lux		0
Pourcentage supérieur à 50 lux		0
Pourcentage supérieur à 100 lux		0
Largeur faisceau supérieure à 2 lux (cm)		80
Largeur faisceau supérieure à 5 lux (cm)		40
Largeur faisceau supérieure à 10 lux (cm)		0
Largeur faisceau supérieure à 20 lux (cm)		0
Largeur faisceau supérieure à 50 lux (cm)		0
Largeur faisceau supérieure à 100 lux (cm)		0
Le peak (le point chaud en français, l'endroit où il y a le plus de lux, et qui est présumé comme étant le centre du faisceau). le Beam (la limite du faisceau, la distance entre le peak et l'endroit où le luxmètre lit 50% de la valeur du peak) Le field (la limite du champ, la distance entre le peak et l'endroit où le luxmètre lit 10% de la valeur du peak).		
Mesures luxmètre Velleman DVM 1300		
Facteur réduction 0,92		

Annexe 3 : Approche des incertitudes de mesures

Toute mesure est entachée d'incertitudes. Celles-ci pourraient être calculées précisément via le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM), qui constitue le document de référence fondamental mais ce serait trop complexe et prématuré. Seuls seront évoqués les paramètres influant sur le résultat de la mesure.

Température ambiante : Il est établi que le rendement lumineux des LEDs varie avec la température. Les données des constructeurs montrent une décroissance de l'ordre de 10 à 30 % entre 25 et 125 °C. Les mesures ont été faites dans un local dont la température a varié de 7,3 à 16,4 °C. L'usage d'un local climatisé à température constante serait préférable. On pourrait aussi imaginer utiliser une cavité ou une carrière dans laquelle la température varie peu.

Courbe de décroissance de la luminosité : il est établi que l'éclairement d'une LED décroît tant que l'équilibre n'est pas atteint entre la production de chaleur de la LED et la dissipation de température de la lampe. Ce temps de stabilisation varie selon la lampe, c'est-à-dire en fonction de la présence ou non du radiateur et sa taille, de la taille du boîtier contenant les LEDs, de la quantité de chaleur produite par les LEDs, de la température ambiante et du renouvellement de l'air autour de la lampe. D'après les quelques mesures effectuées, ce temps peut varier de quelques minutes à une heure. Les lampes bien conçues sont étudiées pour maintenir sensiblement constante la décroissance de lumière tant que l'énergie fournie par la batterie est suffisante (voir exemple ci-dessous). Il pourrait être utile de mesurer la température de la lampe au point le plus chaud en parallèle de la luminosité.

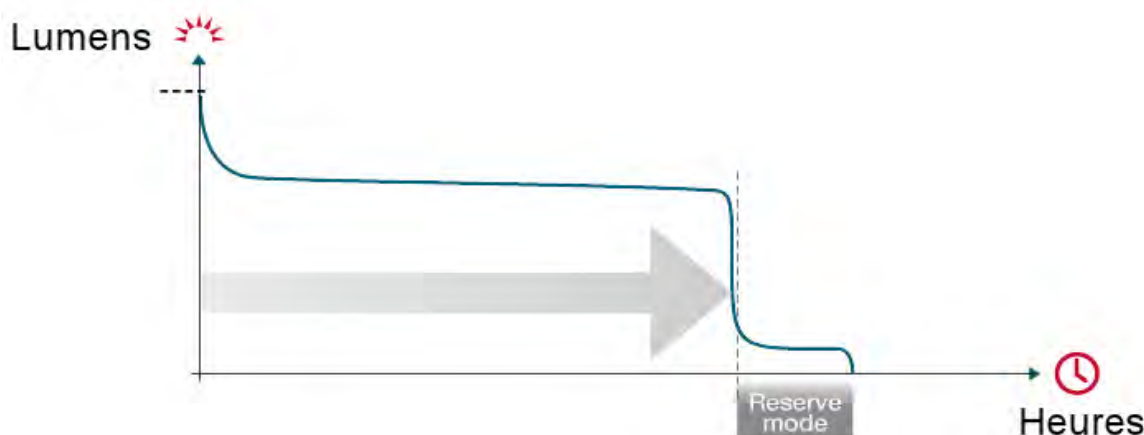


Figure 102 : Exemple de courbe stabilisée (constant lighting). Source Petzl.

Homogénéité du faisceau : Pour des raisons de facilité, la mesure n'a été faite que sur un seul axe horizontal. Or, le faisceau de certaines lampes n'est pas circulaire et cela induit un biais car la lumière n'est pas mesurée dans son intégralité. Voir ci-dessous.

Largeur de mesure : la mesure sur une ligne horizontale de 2 m représente bien l'essentiel de la vision humaine (angle de 90° pour une distance de 2 m alors que la vision humaine est de 120°) mais ne montre pas les performances d'éclairement des lampes qui ont un faisceau très large, comme les Scurion ou autres, faisceau qui fournit une quantité notable de lumière au-delà de 4 m. Il est bien connu que, pour profiter de la meilleure vision d'une galerie large, comme jadis du temps de l'acétylène, il est préférable d'être derrière celui qui a un bon éclairage plutôt que devant où la différence de lumière produit alors une ombre si son propre éclairage est de puissance inférieure. Il serait donc préférable d'étendre la mesure à une largeur supérieure, par exemple 6 m. Ceci augmenterait le temps de mesure mais rendrait justice aux lampes plus performantes.

Mesure des longueurs : elles ont été faites avec un mètre ruban (longueur 5 m) et un double décimètre. L'usage d'un mesureur laser (Disto ou équivalent) serait préférable. Ceci a une influence faible pour les courtes distances du domaine de mesure.



Annexe 4 : améliorations de la méthode

Pour des raisons de facilité, la mesure n'a été faite que sur un seul axe horizontal. En effet, le temps nécessaire à la mesure est déjà notable (1 h 30 à 3 heures par lampe selon le nombre de modes et le temps de stabilisation) car les relevés sont manuels et fastidieux, dans une semi pénombre (port de frontale pour noter les relevés), et malcommodes (torsion du dos pour ajuster la position du luxmètre sur la graduation). Or, le faisceau de certaines lampes n'est pas circulaire et cela induit un biais car la lumière n'est pas mesurée dans son intégralité. Il est possible d'envisager 2 manières d'améliorer l'évaluation de l'éclairement :

Par mesure sur une cible quadrillée, comme réalisé par l'auteur pour son article dans Spelunca en 2011. Un exemple figure ci-dessous :

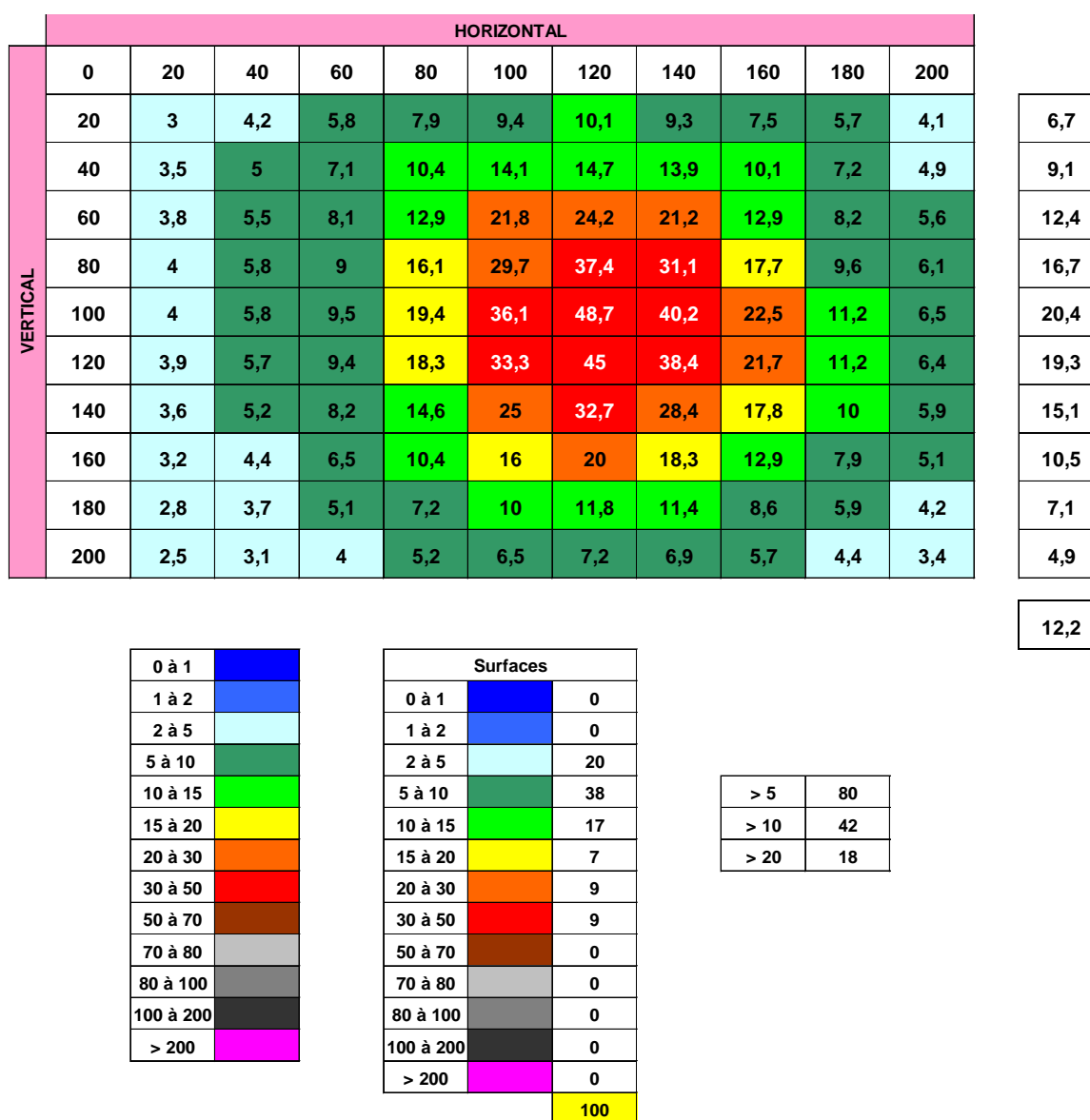


Figure 103 : Exemple de résultats de mesures pour le mode 2 (progression) de l'Ultra Wide (Petzl).

La représentation en fausses couleurs permet de préciser la forme du faisceau.

Cette méthode est plus précise mais nécessite des mesures beaucoup plus longues. Il est possible que la décroissance de l'éclairement via la décharge de la batterie nuise à la fiabilité de ces mesures plus longues.



Par mesure sur cible blanche (écran) et camera reliée à un spectrophotomètre, chaque pixel de l'image ayant été calibré.

Cette méthode existe chez certains fabricants d'éclairages mais nécessite un matériel coûteux et des locaux climatisés.

Il serait possible d'automatiser la mesure sur ligne droite horizontale via un dispositif simplifié : un rail gradué sur lequel couliserait le luxmètre qui enregistre des données. Aux bricoleurs de se lancer.

On pourrait aussi imaginer des mesures sur toutes les surfaces d'un cube devant la lampe mais ce serait complexe, long et fastidieux. On montrerait cependant des différences notables entre les diverses lampes.

Annexe 5 : Besoins d'éclairage en spéléologie

Ce point a été bien décrit sur 3 articles parus dans *Spelunca* :

- Balacey, Jean-François : L'éclairage à LEDs en spéléologie. *Spelunca* n°121, p. 51-58.
- Hamel, Francis : Grandeurs et misères des LEDs. *Spelunca* n°139, p.36-38.
- Balacey, Jean-François : Évaluation de l'éclairage des éclairages à LEDs pour la spéléologie. *Spelunca* n°143, p. 38-45.

Pour résumer ces articles, les fabricants indiquent toujours des valeurs en lumens, mesurées, calculées ou estimées, ce qui correspond à la « puissance totale » de la lampe, toute l'énergie lumineuse qui sort des LEDs et de l'optique pour aller éclairer une cible. Mais ce que voit le spéléo, et ce qui compte pour lui, c'est une surface éclairée, que l'on peut simplement mesurer avec un luxmètre. Voir plus haut de dessin 10.

Le débat n'est pas tranché entre lumen et lux. Et nul n'a défini le besoin de lumière du spéléologue car cela dépend de nombreux facteurs dont les caractéristiques de la portion de cavité où il évolue. Il a peu besoin de lumière en méandre, en étroiture, plus en galerie large, encore plus en grande salle, c'est une évidence. Mais les fabricants se contentent d'indiquer des lumens, sachant évidemment que le besoin de lumière est toujours plus grand et que si on a beaucoup de lumens, on pourra toujours moduler pour en avoir moins, selon la situation et l'éclairage souhaité. Ceci est possible si la lampe permet un étagement progressif des modes.

La législation des lieux de travail décrit quelques valeurs à respecter selon l'activité. Voir en particulier l'aide-mémoire juridique n°13 de l'Institut National de Recherche et Sécurité (INRS) : « Éclairage des lieux de travail ». Il recommande des valeurs minimales d'éclairage qui vont de 40 lux (voies de circulation intérieures) à 800 lux (« tâche très difficile dans l'industrie ou les laboratoires »). Une grotte fait-elle partie des « locaux aveugles affectés à un travail permanent » (200 lux), des « espaces extérieurs où sont effectués des travaux à caractère permanent » (40 lux) ? La spéléologie correspond-elle à de la « mécanique moyenne, dactylographie, travaux de bureaux » ou à de la « mécanique de précision, électronique fine, contrôles divers » (600 lux) ? À vous de juger : combien de lumière faut-il pour lire un lasermètre en opposition ? Pour progresser tranquillement dans une galerie de 20 m au carré ? Pour sonder un puits d'au moins 40 m ? Voir d'autres valeurs de la littérature citée au chapitre Évaluation de l'éclairage des éclairages à LEDs en page (x à compléter après mise en page).

Mes observations montrent que, sous terre, le besoin minimal serait de 20 lux mais le biais est l'adaptation de la vision à la pénombre. En intérieur, chez soi, 200 à 300 lux sont nécessaires pour un confort visuel suffisant. Il serait intéressant de compléter ce ressenti personnel par celui d'un panel de spéléologues d'âge et d'acuité visuelle variés. Voir aussi en annexe 6.

Les industriels du NEMA ont défini la portée du faisceau comme suit : « la distance du faisceau est définie comme la distance à laquelle le faisceau lumineux est de 0,25 lux (0,25 lux est environ l'équivalent de la lumière émise par la pleine lune par nuit claire dans un champ ouvert) ». Ceci leur permet d'annoncer des valeurs flatteuses, de portée bien éloignée de valeurs utiles où l'éclairage serait supérieur. Une nuit de pleine lune, c'est romantique, la lueur lunaire peut éventuellement suffire sur un terrain plat – ils parlent de champ ouvert – mais c'est notablement insuffisant en milieu accidenté comme sous terre. On aurait des valeurs notablement plus réduites avec un éclairage de 20 lux.



Annexe 6 : Le système visuel humain

Extrait de « Le livre blanc des lampes à LEDs » par Henry Schneiker, www.HdsSystems.com, 10 mars 2004, article paru dans : « Speleonics » n°24 vol. VI #4, août 2004. Traduction : Dominique ROS, <http://souterweb.free.fr/>, mars 2017.

Si vous regardez la documentation marketing classique des lampes à LEDs commercialisées, vous pourriez penser qu'il sera toujours mieux d'avoir encore plus de lumière. Mais permettez-moi de vous montrer pourquoi ce n'est peut-être pas le cas.

Vos yeux peuvent s'adapter à une large gamme d'intensités lumineuses. À midi, un jour d'été, le soleil peut illuminer une surface jusqu'à 120 000 lux, tandis qu'une pleine lune peut illuminer la même surface à seulement 0,1 lux. Vos yeux utilisent trois méthodes principales pour s'adapter aux changements de niveaux d'éclairage. Dans des conditions de forte luminosité, vos yeux éliminent l'excès de lumière en fermant les pupilles. Lorsque le niveau de lumière tombe au-dessous du point où les pupilles sont complètement ouvertes, les yeux subissent un changement chimique pour augmenter la sensibilité des cônes (cellules sensibles à la couleur). Enfin, quand le niveau de lumière tombe au-dessous de la capacité des cellules à cônes, les bâtonnets (cellules insensibles à la couleur) prennent le relais et deviennent sensibles au maximum. Il faut environ 20 minutes après avoir quitté une zone lumineuse intense pour s'adapter complètement à la pénombre.

Alors, de combien de lumière avez-vous réellement besoin pour effectuer une tâche ? De 1 000 à 2 000 lux sont recommandés pour les travaux de précision où l'acuité visuelle maximale et la reconnaissance des couleurs sont requises. 100 à 200 lux conviennent à la plupart des travaux de bureau.

Avec 10 lux, les couleurs sont moins vives tandis que l'acuité visuelle est encore bonne. Avec 1 lux, les couleurs ne peuvent être distinguées et la vision est seulement acceptable. À 0,1 lux, aucune couleur n'est visible et l'acuité visuelle est médiocre. Enfin, pour 0,01 lux, l'acuité visuelle est mauvaise et vous distinguerez mieux les objets si vous ne les regardez pas directement.

Ce qui précède illustre qu'un flux de 50 à 200 lux d'éclairage est suffisant pour la plupart des tâches qui nécessitent une bonne reconnaissance des couleurs et une bonne acuité visuelle. Beaucoup moins de lumière suffit pour les tâches qui nécessitent seulement l'identification de la forme de l'objet.

Il faut un lumen – c'est à dire une candela par stéradian – pour éclairer un mètre carré avec 1 lux. Notez que le flux lumineux – mesuré en lumens – est évalué selon la courbe de sensibilité des couleurs de l'œil humain. Cependant, le lux peut également être défini en termes de flux radiométrique à une fréquence unique et équivaut alors à 1,46 mW de puissance électromagnétique rayonnante par mètre carré à 555 nm (la couleur à laquelle vous êtes le plus sensible : une nuance de vert). La quantité de lumière éclairant un objet dépend donc de la puissance de la lumière émise et de la distance de la source lumineuse à l'objet. Si vous connaissez la quantité de lumière qui illumine un objet à une distance donnée, vous pouvez calculer la quantité de lumière éclairant un objet à une autre distance en utilisant la loi du carré inverse. Par exemple, si vous doublez la distance entre la source et un objet, l'illumination tombe à un quart (4 est le carré de 2 et l'inverse de 4 est 0,25 ou un quart). Par exemple, si vous avez une lampe qui génère 500 lux à 1 mètre, elle générera 100 lux à 2,2 mètres ou 10 lux à 7,1 mètres ou 1 lux à 22,4 mètres. La chute de l'éclairage va de pair avec une augmentation de la surface éclairée. En d'autres termes, vous avez besoin de 4 fois plus de lumière pour voir deux fois plus loin avec le même niveau d'illumination.

L'œil répond à la lumière de manière logarithmique. C'est-à-dire que pour que l'œil ressente une augmentation significative de la luminosité, c'est-à-dire une augmentation de la luminosité facilement reconnaissable, la quantité de lumière doit doubler. Pour faire face aux grandes variations de lumière dans votre environnement, c'est une chose merveilleuse. Pour les lampes essayant d'obtenir toujours plus de lumière, c'est un obstacle énorme, car il va falloir plus de deux fois plus de puissance pour générer deux fois plus de lumière tandis que l'autonomie de la batterie chutera à moins de la moitié en raison de l'augmentation des pertes citée plus tôt.





Par contre, si vous souhaitez augmenter l'autonomie de la batterie en utilisant des réglages de faible luminosité, c'est une bonne chose. Pourquoi ? Pour chaque diminution incrémentielle de la luminosité, vous allez plus que doubler la durée de vie de la batterie et après quelques minutes, vos yeux s'adapteront au nouveau niveau de luminosité de sorte que la baisse apparente de luminosité sera bien moins sensible. En réduisant la quantité de lumière en fonction de votre tâche, vous pouvez donc considérablement améliorer l'autonomie de votre batterie.

La réponse logarithmique de l'œil à la lumière impose que les niveaux de luminosité soient espacés de façon logarithmique. Autrement dit, l'étagement entre les paramètres de luminosité doit être d'un facteur constant – comme $\times 2$ – au lieu d'utiliser une approche linéaire. Cela donnera l'apparence de niveaux régulièrement espacés. Cette même méthode est utilisée dans l'industrie audio pour le contrôle de volume. En raison des caractéristiques adaptatives de l'œil, une variation continue serait inappropriée pour une lampe frontale. La raison est que votre corps s'adapte rapidement à une hausse de la lumière, mais bien plus lentement pour faire l'inverse. Par exemple, si vous tentez l'expérience lampe allumée d'augmenter le niveau de puissance pendant une minute, puis de le ramener au niveau initial, l'impression de luminosité résultante sera alors généralement plus importante qu'avant de commencer l'exercice. Les facteurs humains ne doivent jamais être oubliés lors de la conception des réglages d'une lampe.

Concentrer toute la lumière en un étroit faisceau est intéressant pour regarder un objet à une grande distance. Cependant, le contraste entre le centre du faisceau lumineux et la zone sombre juste à l'extérieur du faisceau sera tellement grand que vous aurez de la difficulté à distinguer des objets juste à l'extérieur du faisceau ; en conséquence, essayer de marcher en utilisant un tel faisceau peut être difficile ou dangereux. Un éclairage à usage général devrait fournir assez de lumière à l'extérieur du faisceau principal pour que vos yeux puissent se déplacer confortablement entre le centre du faisceau et les zones extérieures et ainsi appréhender une zone de visualisation large. Il est encore plus intéressant d'avoir une transition en douceur entre les deux domaines. Plus la zone de transition est large, plus le contraste est bas et plus vous serez en sécurité lorsque vous utilisez la lumière pour naviguer sur des terrains accidentés. Vous constaterez que vous pouvez utiliser moins de lumière totale avec un faisceau large et lisse. En fait, vous pourriez vouloir disposer de deux éclairages : l'une avec un faisceau large pour la marche et l'utilisation générale et une autre avec un faisceau étroit pour repérer les objets éloignés.





Grande rivière de la Borne aux Cassots (Jura) - Eclairage Méandre technologie.
Cliché Serge Caillaud



ÉTUDES DE QUELQUES ÉCLAIRAGES À LEDS DU COMMERCE

PAR JEAN-FRANÇOIS BALACEY

Parmi toutes les lampes du marché, toujours plus nombreuses, nous avons retenu 6 modèles représentatifs, parmi les plus utilisés. Ce choix est arbitraire et nous avons omis bien des lampes, testées ou non en éclairage. Six sur trente (environ), que l'on pourrait considérer comme les « meilleurs choix » du moment, mais qui ne sont plutôt qu'une simple photographie du marché début 2018. Pour chacune, des propositions d'usage sont présentées (initiation, exploration classique peu engagée, exploration engagée) ainsi que les points forts ou délicats

Stoots Caldera (Stoots Concept)

En résumé

Cette lampe compacte est un des meilleurs rapports qualité prix du marché. L'éclairage en progression est comparable aux lampes des grands fabricants mais le spot reste en retrait. Elle convient pour tous les usages spéléo, initiation et exploration.

Les points forts

- Compacité limitant les chocs en galeries étroites ;
- La plus légère du marché (128 g) ;
- La moins chère du marché (180 € en en mars 2018).
- Simplicité d'utilisation (5 modes plus secours) ;
- Bon éclairage en progression.

Les points délicats

- Éclairage limité du spot.



Figures 104 à 108 : Détails de la lampe Stoots Caldera (et Caldera Reverso). Source : site Stoots.

Figure 109 : Fiche technique éclairage Stoots Tiho.

Mode	secours	large	large	large	maxi	spot
Lumen fabricant (lm)	50	100	200	400	1000	700
Autonomie fabricant (h)	130	60	23	10	4	ND
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 2 m (lux)	27	144	295	697	2216	2723
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 2 m)	1,3	7	14	33	106	130
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 10 m (lux)	5	19	37	99	319	482
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 10 m)	0,2	0,9	1,8	4,7	15,2	23

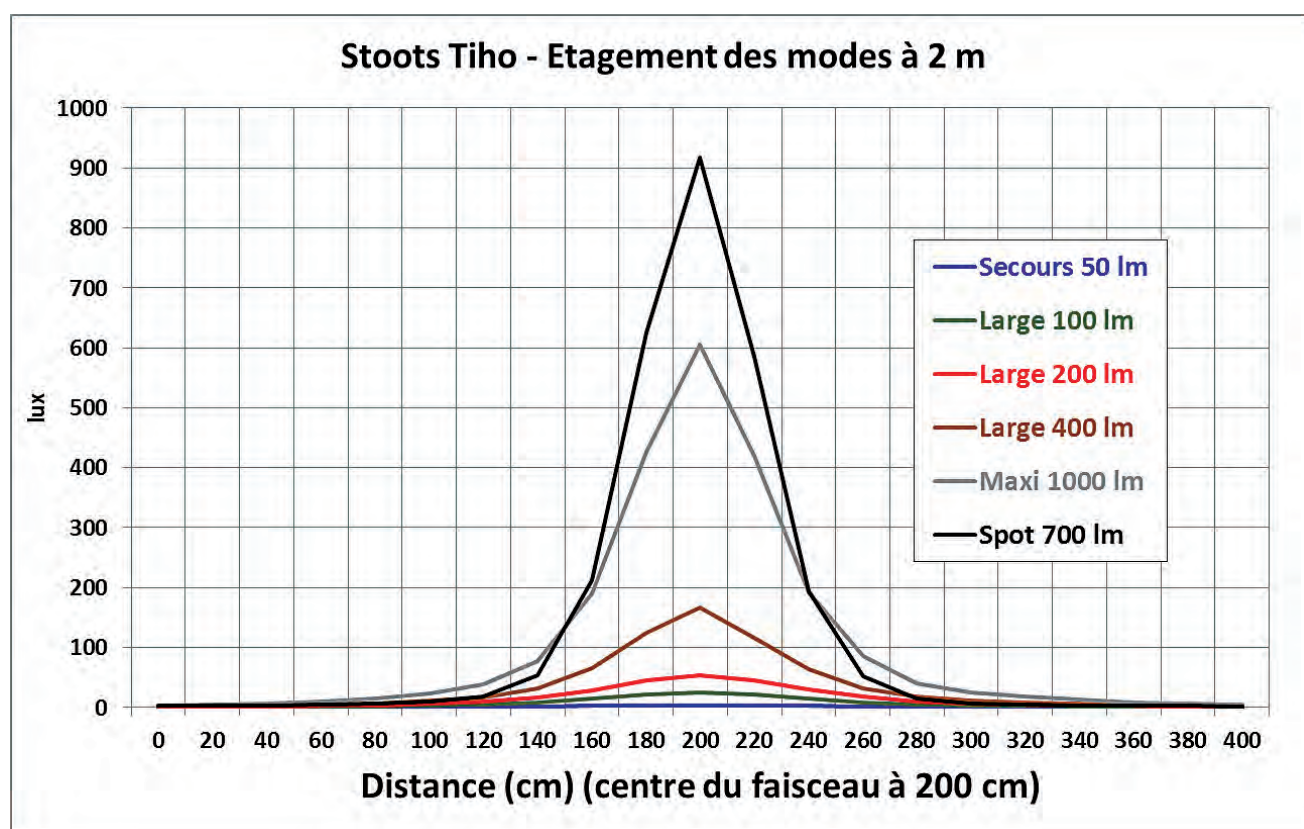


Figure 110 : Étagement des modes à 2 m.

Stoots a commercialisé depuis l'Opalo2, avec spot, à l'éclairage comparable.

Lampe comparable : Duo Z2 (219 €)





Figures 111 à 113 : Détails de la lampe Petzl Pixa 3. Source : site Petzl.

Pixa 3 (Petzl)

En résumé

Même si elle n'est pas à proprement parler faite pour la spéléologie, (chez Petzl elle est classée dans la rubrique professionnelle), cette lampe solide et simple à utiliser convient pour l'initiation ou l'exploration peu engagée. Sa robustesse et son autonomie la font souvent utiliser comme lampe de secours.

Les points forts

- Solidité, étanchéité ;
- Fonctionne avec 2 piles standard AA de 1,5 V (fournies), largement répandues ;
- Compatible avec accus Ni-MH, Ni-Cd et piles lithium ;
- Possibilité d'utilisation d'un accu lithium ion vendu séparément (38 €) ;
- Interrupteur verrouillable par rotation pour le stockage ;
- Protection de la vitre par rotation pour le stockage ;
- Grande autonomie en mode progression (60 lumens) et secours (20 lumens) ;
- Platine de fixation intégrée permettant de la fixer directement sur les casques Alveo et Vertex de Petzl ;
- Autres variantes possibles avec nombre de LEDs réduit (Pixa 1 et 2).

Les points délicats

- Poids léger (170 g avec 2 piles AA 1,5 V) mais un peu élevé par rapport à d'autres lampes comparables ;
- Prix un peu élevé (60,90 € en mars 2018) ;

Figure 114 : Fiche technique éclairage Pixa 3.

Mode	Large	Large + spot	Spot
Lumen fabricant (lm)	20	60	100
Autonomie fabricant (h)*	26	6 h 30	3 h 30
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 2 m (lux)	59	256	672
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 2 m)	2,8	12,2	32,0
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 10 m (lux)	7	42	125
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 10 m)	0,3	2,0	6,0

* Et mode réserve d'au moins 13 h à 10 lumens en sus.

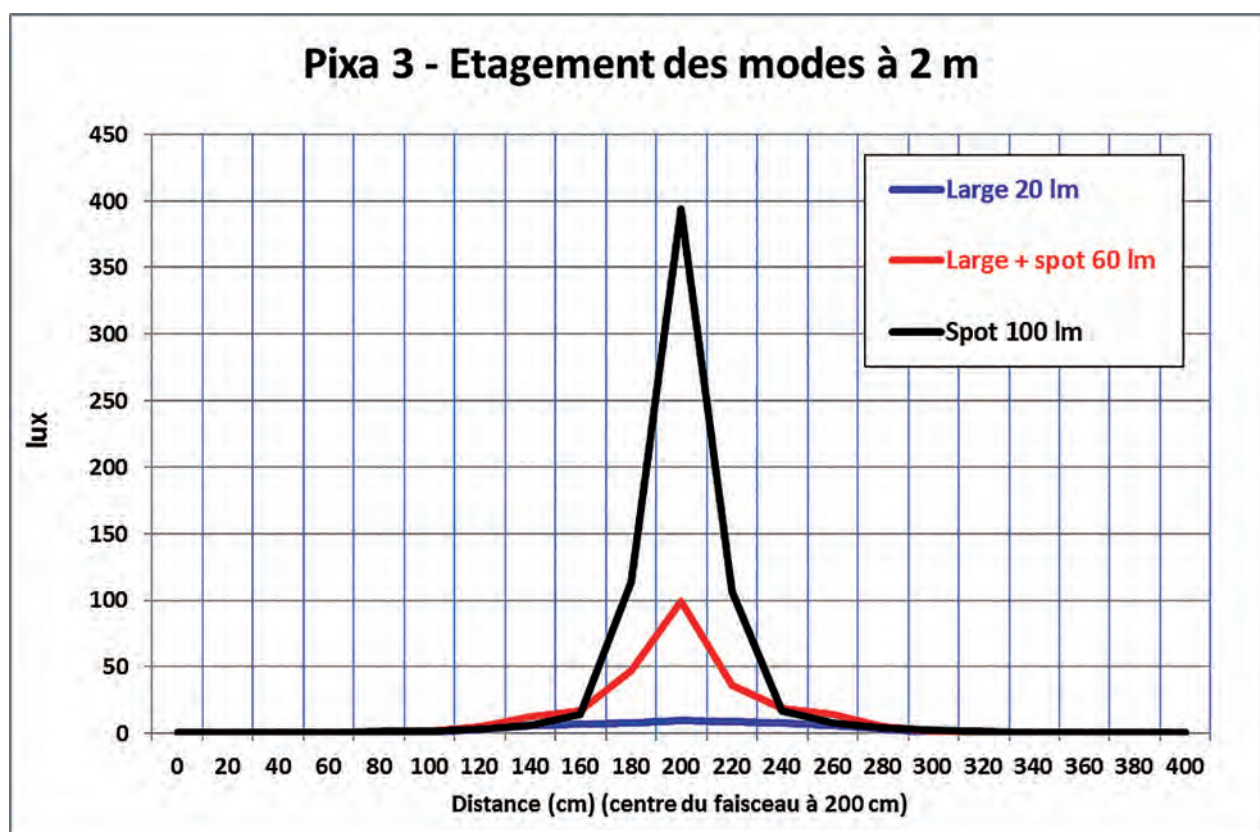


Figure 115 : Étagement des modes de la Pixa 3 à 2 m.



Figures 116 à 118 : Détails de la lampe Petzl Duo S. Source : site Petzl.

Duo S (Petzl)

En résumé

La Duo S, commercialisée en mars 2018, remplace la Duo, sortie en 1994 et l'Ultra Vario, sortie en 2013. Ses 6 modes et son système anti éblouissement (Face2Face) en font une lampe de référence pour l'exploration engagée.

Les points forts

- Simplicité d'utilisation (changement de mode par interrupteur rotatif) ;
- 6 modes dont 2 en progression et un boost ;
- Système Face2Face anti éblouissement ;
- Platines de fixation adaptables à tous types de casques ;
- Variante Duo Z2 moins chère (219 €) fonctionnant avec 4 piles alcalines AA de 1,5 V ou piles lithium ou accu Ni-MH.

Les points délicats

- Prix un peu élevé (419 € en mars 2018) par rapport aux précédentes Ultr
- Système Face2face ne fonctionnant qu'avec des lampes équivalente Duo S, Z1 et Z2.

Lampe comparable : Scurion 900 (584 ou 624 €)



Figure 119 : Fiche technique éclairage Duo S.

Mode	Ambiance	Proximité	Déplacement	Déplacement rapide	Vision lointaine	Boost
Lumen fabricant (lm)	80	180	330	700	450	1100
Autonomie fabricant (h)*	23	12 h 30	6	3 h 30	4 h 30	ND (durée 5 secondes)
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 2 m (lux)	191	497	1172	3807	4133	ND
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 2 m)	9,1	23,7	55,8	181,3	196,8	ND
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 10 m (lux)	23	75	232	864	1012	ND
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 10 m)	1,1	3,6	11,0	41,1	48,2	ND

* Mode réserve 20 lm pendant 45 minutes.

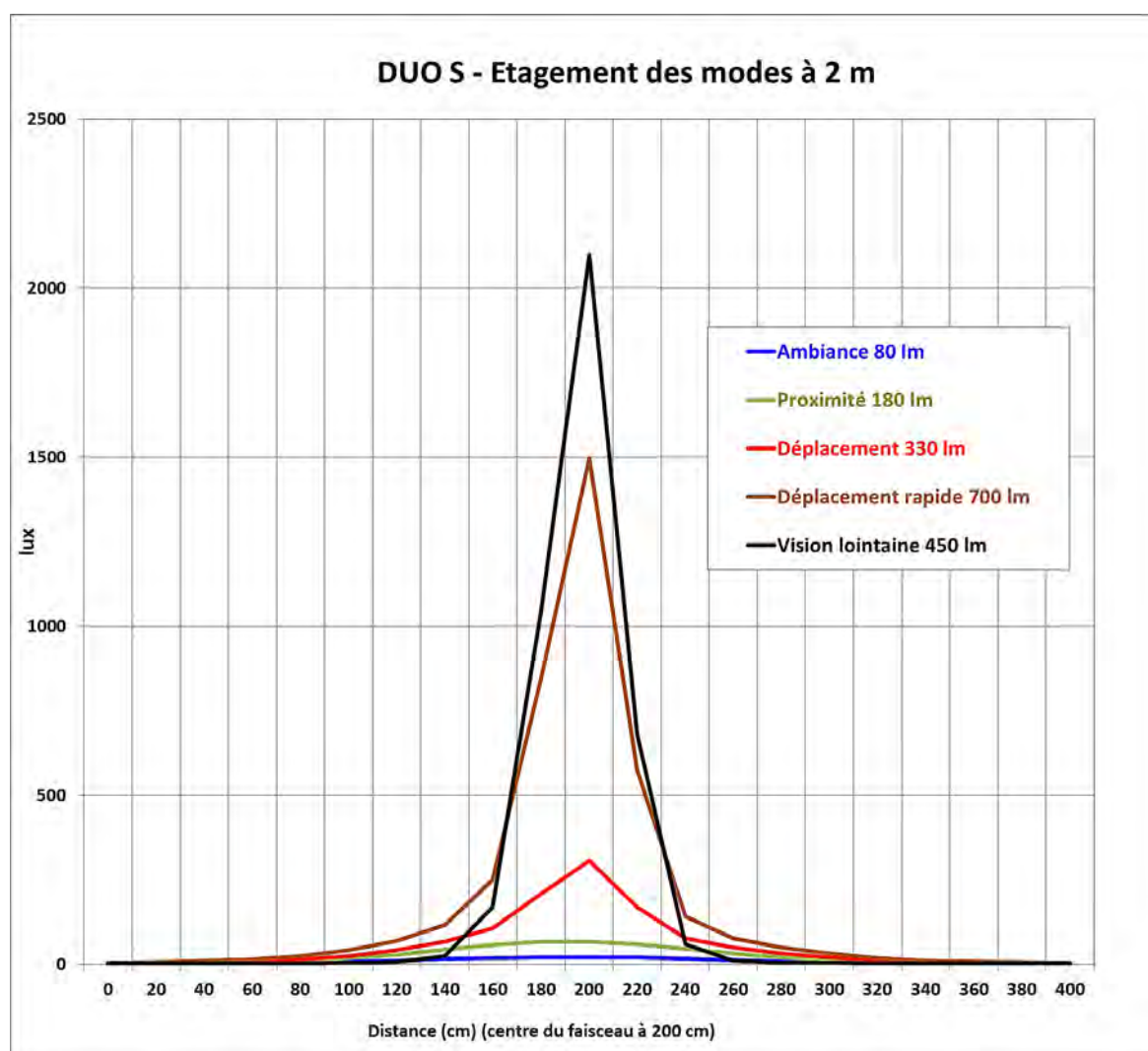


Figure 120 : Étagement des modes de la Duo S à 2 m.



Figures 121 et 122 : Détails de la lampe Phaethon Dual.
Source : site Phaethon Caving Light.

Phaethon Dual (Phaethon Caving Light)

En résumé

Cette lampe est d'un usage mixte, spéléologie « sèche » et plongée : elle est très utilisée parmi les plongeurs spéléologues pour son bon rapport qualité prix. Son interrupteur piezo est un peu déroutant de prime abord.

Les points forts

- Lampe utilisable en spéléologie et en plongée ;
- Batteries standard 18650 ;
- Prix raisonnable pour une lampe de plongée (520 € en mars 2018).
- Poids modéré (395 g avec batteries).

Les points délicats

- Interrupteur piezo un peu déroutant à l'usage ;
- Autonomie un peu réduite (seulement 2 batteries 18650) ;



Figure 123 : Fiche technique éclairage Phaeton Dual.

Mode	1 (large + spot)	2 (large + spot)	3 (large)	4 (large + spot)	5 (large + spot)	+1 (large + spot)	+2 (large + spot)
Lumen fabricant (lm)	50	300	300	600	1000	1000	2000
Autonomie fabricant (h)*	80	12 h 20	12 h 20	6 h 20	2 h 30	2 h 30	0 h 25
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 2 m (lux)	107	660	218	1228	782	960	4280
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 2 m)	5,1	31,4	10,4	58,5	37,2	45,7	204
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 10 m (lux)	15	101	16	190	64	ND	ND
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 10 m)	0,7	4,8	0,8	9,1	3,0	ND	ND

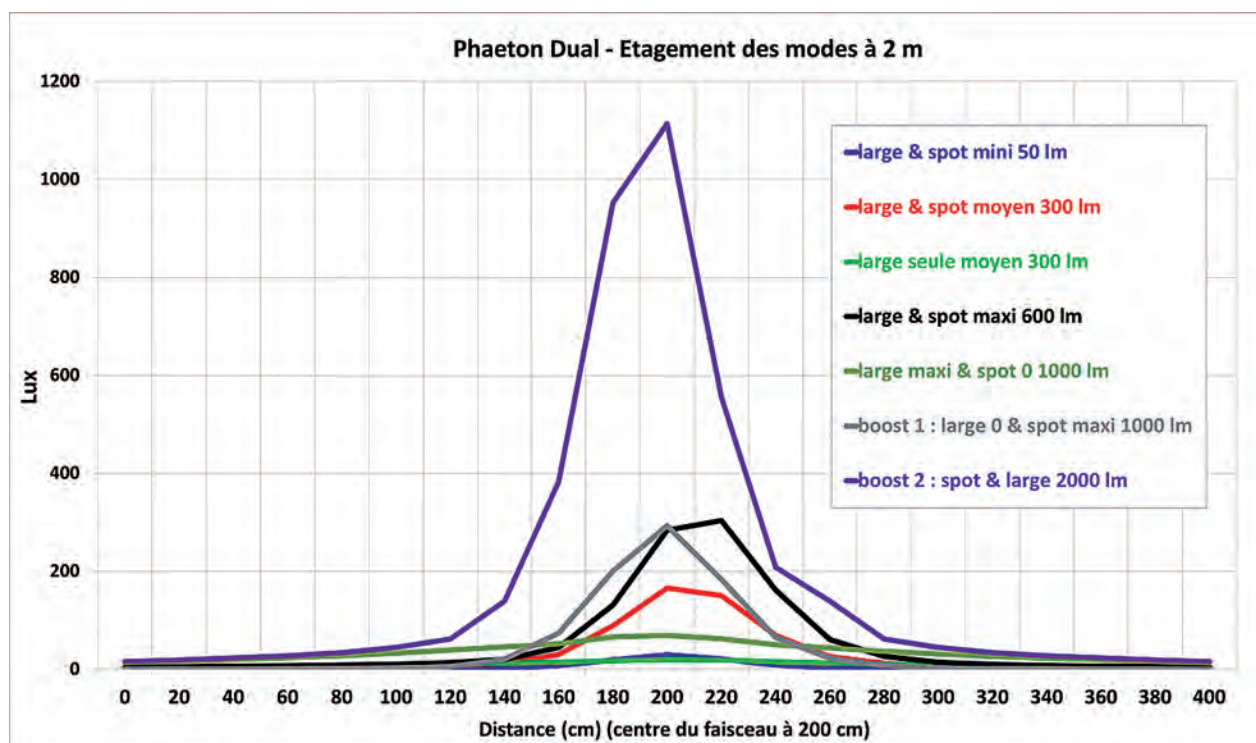


Figure 124 : Étagement des modes de la Phaeton Dual.



Scurion 900 (Scurion)

En résumé

C'est indéniable, depuis 2007, les lampes Scurion sont les références en spéléologie d'exploration. Fiables, presque indestructibles, ce sont de bonnes représentantes de la qualité suisse. La solidité conduit à un poids notable, peu apprécié de ceux qui ont les cervicales fatiguées. Et le coût élevé éloigne une part des utilisateurs potentiels.

La Scurion 900 est le milieu de gamme Scurion et le meilleur rapport qualité prix.

Les points forts

- Grande fiabilité ;
- Eclairage fort ;
- Faisceau large et homogène ;
- Grande autonomie ;
- Possibilité de programmation de l'éclairage selon l'usage ;
- Possibilité d'évolution des LEDs ;
- Options de batterie (basique et spéléo) ;
- Autres variantes possibles (700, 1200, 1500).

Les points délicats

- Prix des lampes et accessoires élevés (lampe 584 € (basic) et 624 € (spéléo) en mars 2018) ;
- Poids élevé (460 g avec batterie) ;
- Connecteur un peu fragile à l'usage (sauf connectique spéléo)
- Programmation délicate rendant son usage peu pratique sans entraînement préalable ;
- Encombrement parfois gênant en galeries étroites.

Lampe comparable : DuoS (419 €)



Figures 125 à 127 : Quelques lampes et leurs accessoires.
Source site Scurion et autres.



Figure 128 : Fiche technique éclairage Scurion 900.

Mode	Diffus 8 %	Diffus 16 %	Diffus 42 %	Diffus Max	Spot Max
Lumen fabricant (lm)	ND	ND	ND	550	360
Autonomie fabricant (h)*	153	74	29	7,4	14,7
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 2 m (lux)	37	85	217	505	3241
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 2 m)	1,8	4,1	10,3	24,0	154,3
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 10 m (lux)	4	7	17	38	662
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 10 m)	0,2	0,4	0,8	1,8	31,5

Figure 129 : Étagement des modes de la Scurion 900.

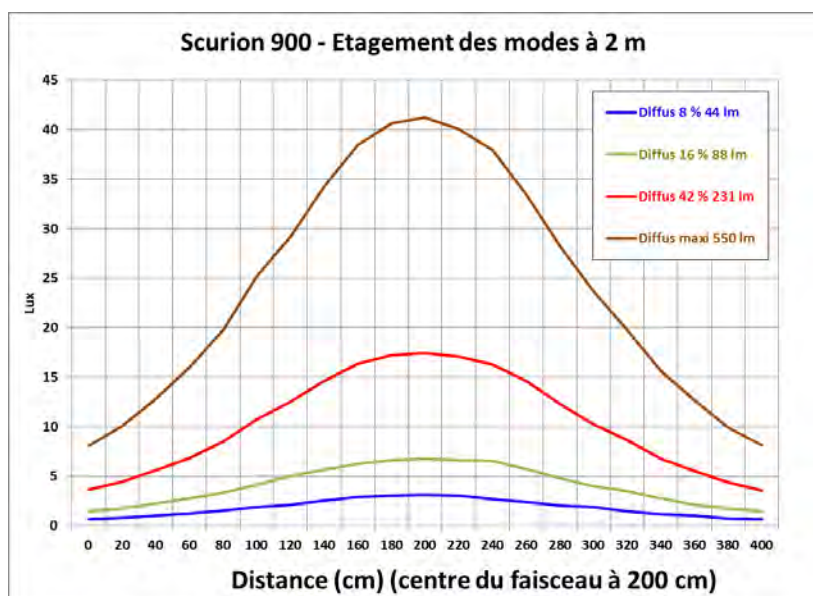
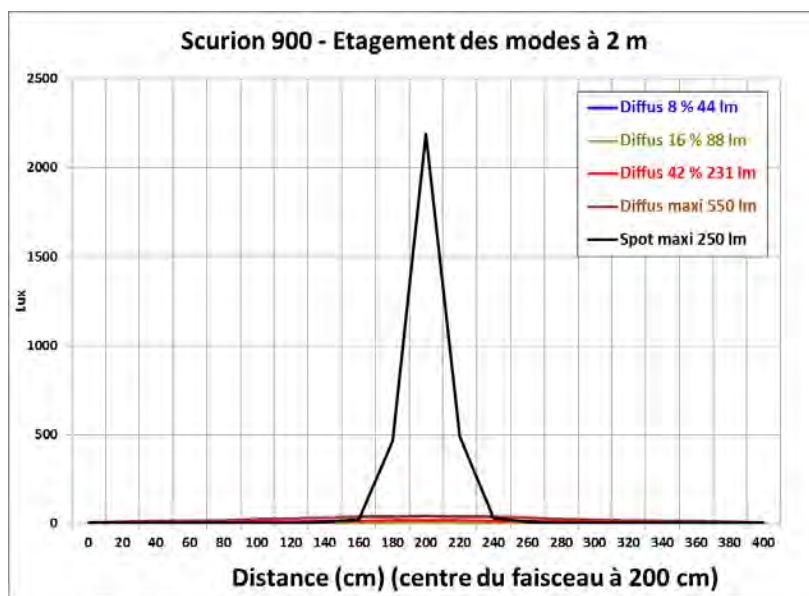


Figure 130 : Étagement des modes de la Scurion 900 (hors spot).



Scurion 1500 (Scurion)

En résumé

La Scurion 1500 est le haut de gamme des lampes Scurion, destinée à l'explorateur exigeant et fortuné. Son éclairage est le plus puissant du marché, son prix également le plus élevé. Comme sa petite sœur, la 900, elle a les mêmes qualités et défauts. Son éclairage puissant sera utile pour les grands volumes et en plongée, activité pour laquelle il y a un modèle spécifique (voir chapitre éclairages pour la plongée).

Les points forts

- Grande fiabilité ;
- Éclairage fort (le plus puissant du marché) ;
- Faisceau large et homogène ;
- Grande autonomie ;
- Possibilité de programmation de l'éclairage selon l'usage ;
- Options de batterie (basique et spéléo) ;
- Autres variantes possibles (700, 900, 1200) ;
- Option plongée.

Les points délicats

- Prix des lampes et accessoires élevés (lampe 835 € en mars 2018) ;
- Poids élevé (460 g avec batterie) ;
- Connecteur un peu fragile à l'usage (sauf connectique spéléo et plongée) ;
- Programmation délicate rendant son usage peu pratique sans entraînement préalable ;
- Encombrement parfois gênant en galeries étroites.

Lampe comparable : Méandre 2.6 (600 €) photo ci-contre



Figures 131 à 133 : Détails de la lampe Scurion 1500. Source : site Scurion.





Figure 134 : Fiche technique éclairage Scurion 1500.

Mode	Diffus 16 %	Diffus Max	Sport Max
Lumen fabricant (lm)	ND	665	630
Autonomie fabricant (h)	50	106	6
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 2 m (lux)	109	663	5091
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 2 m)	5,2	31,6	242,4
Total mesuré sur 4 m (indice lux) à une distance de 10 m (lux)	9	49	1055
Moyenne sur 4 m (lux) (mesure à une distance de 10 m)	0,4	2,3	50,2

Figure 135 : Étagement des modes de la Scurion 1500.

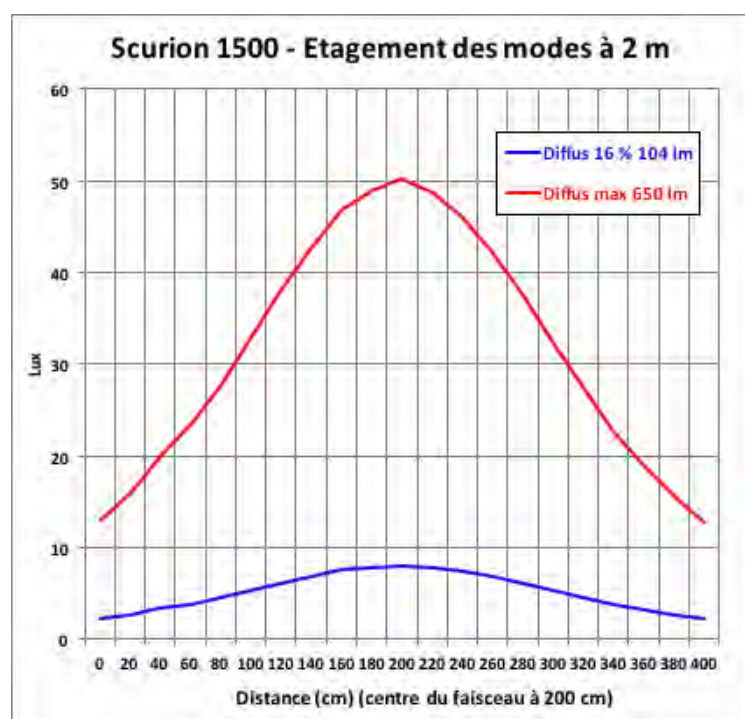
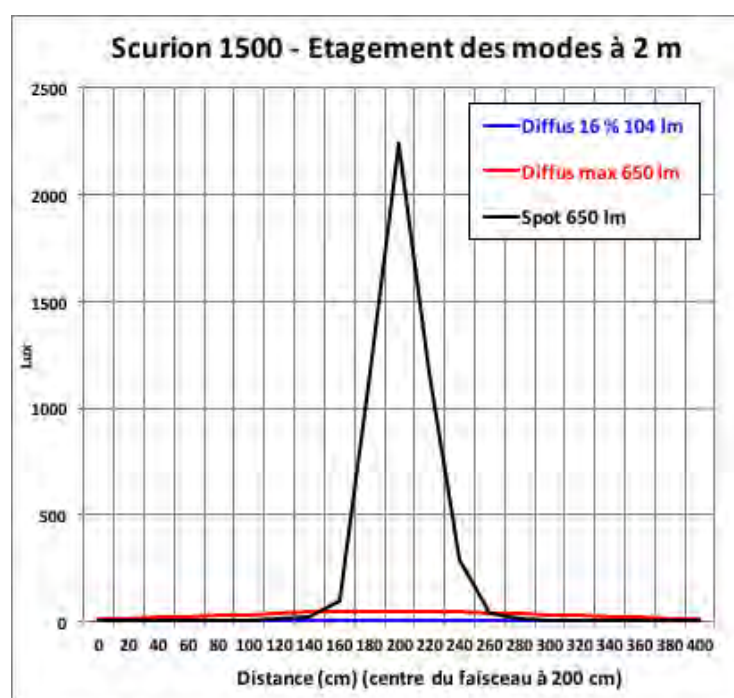


Figure 136 : Étagement des modes de la Scurion 1500 (hors spot).



Tableaux de synthèse : Caractéristiques

Nom	Pixa 3	DUO S	Stoos Caldera	Phaeton Dual	Scurion 900	Scurion 1500
Fabricant	Petzl		Stoosconcept	phaetoncavinglight	Scurion GmbH	
Pays	France		France	Grèce	Suisse	
Année de commercialisation	2009	2018	2015	2014	2010	2011
Nombre de led	2	3 (2 diffuses, 1 spot)	4 (1 diffuse, 4 spot)	2	2 (1 diffuse, 1 spot)	
Type de LED « large »	ND		Cree XHP35	Cree XML-2 U2 3C	Cree XML2 U2	Cree XML2 U2
Type de led focalisée « spot »			3 x OSRAM OSOLON SSL150 16° bords diffus	Cree XML-2 U2 3C	Cree XP-G (demi-angle ~8°)	Cree XM-L2 (demi-angle ~13°)
Température de couleur (K)			4000 K (diffus), 6000 K (spot)	4750-5000 K		6000 K (neutre)
CRI			70	75	72	70
Batteries	NON (compatibles accus Ni-Mh et Ni-Cd, accus lithium-ion possible)	Lithium-ion (3,2 Ah pour accumulateur ACCU 2 ou 5,2 Ah pour accumulateur ACCU 4).	Lithium-ion 2 x 3,7 V - 2000 mAh en parallèle soit 3,7 V - 4000 mAh -(15 Wh)	Lithium-ion Panasonic 18650 NCR-B 3400mAh	Lithium-ion 4 cellules 6,8 Ah (49 Wh) ou 2 cellules 2,5 Ah Panasonic	
Nombre de modes	3	5 + 1 (boost)	5	5 + 2 (boost)	3 à 10	
Possibilité de programmation	NON	NON	NON	OUI	OUI (24 réglages)	
Utilisation de batteries standard ou de piles	OUI (2 piles AA 1,5 V), Compatibles piles alcalines, accus Ni-Mh, Ni-Cd	NON (ou autre modèle DUO Z2)	NON	OUI	OUI (pile 9 V Alcaline ou Lithium en dépannage)	
Utilisation de batteries spécifiques	NON	OUI	OUI	NON	OUI	
Indicateur de niveau de batterie	NON	OUI	OUI (flashes lumineux)	OUI (clignotements)	OUI (5 leds dans le boîtier lampe)	
Autonomies annoncées (heures)	20 lumens (26 h), 60 lumens (6 h 30), 100 lumens (3 h 30) et mode réserve de 10 lumens (13 h)	80 lumens (23h), 180 lumens (12h30), 330 lumens (6h), 700 lumens (3h30), 450 lumens (4h30), BOOST 1100 lumens (5 secondes environ)	50 lumens (80h), 100 lumens (38h), 200 lumens (14h), 400 lumens (6h), 1000 lumens (2h20) + 4h de survie à 10 lumens	50 lumens (8h), 300 lumens (12h20), 600 lumens (6h30), 1000 lumens (2h40), 2000 lumens (0h25)	Selon réglages, 3h 48 à 153 h (avec batterie 4 cellules 6,8 Ah).	Selon réglages, 2h 48 à 106 h (avec batterie 4 cellules 6,8 Ah).
Poids corps de lampe (g)	122 (avec bandeau élastique)	140	44	ND	155 g (basic) / 160 g (speleo) / 166 g (plongée)	
Poids boîtier batteries (g) (avec batteries)	Pas de boîtier batterie	170	84	ND	205 g basic ou plongée, 190 g spéleo	
Poids total (grammes, avec batteries fournies)	170 (avec 2 piles AA 1,5 V)	310	128	395	460 g basic ou spéleo, 660 g plongée	
Étanchéité	IP67	IP67	IP68	IP68	IP68 (-1 m) basic, IP68 (-20 m) spéleo, IP68 (-150 m) plongée	
Contenu de l'ensemble fourni	Lampe sur bandeau élastique + 2 piles AA 1,5 V	Lampe, batterie 3200 mAh, chargeur avec 2 adaptateurs secteur USA Europe, bandeau élastique pour casque, étui de transport, jeu de fixation pour casque VERTEX ou ALVEO	lampe + 1 batterie 25Wh + chargeur USB + pochette de rangement + clip de fixation avec visserie	lampe + 2 accus Panasonic NCR-B 3400mAh + chargeur (3 modèles au choix) bandeau élastique GoPro, verre supplémentaire, 2 joints toriques supplémentaires	Lampe, 1 pack 4 cellules 6,8 Ah (7,2 V), chargeur, câble acier, kit de fixation sur casque	Lampe, 2 packs 4 cellules 6,8 Ah (7,2 V), chargeur, câble acier, kit de fixation sur casque
Prix lampe complète (€) (mars 2018)	60,90	399	180	520	basic : 584 spéleo : 624	835
Prix batteries (€) (mars 2018)	Piles AA du commerce (2 € les 2 environ)	89	35	2 batteries li-ion Panasonic 18650 NCR-B 3400 mAh environ 24 €	batterie 4 cellules 6,8 Ah (7,2 V) = 95 €, batterie 4 cellules modulaire (contacts en dessous) 6,8 Ah (7,2 V) = 112 €, batterie 2 cellules 2,5 Ah = 69 €	
Prix total (€) (mars 2018)	60,90 € (lampe fournie avec 2 piles AA)	399	180 (lampe fournie avec une batterie 15 Wh)	520 (lampe fournie avec 2 batteries li-ion Panasonic 18650 NCR-B 3400mAh)	584 (basic) ou 624 (spéleo) (lampe fournie avec une batterie 4 cellules 6,8 Ah)	835 (lampe fournie avec deux batteries 4 cellules 6,8 Ah)
Prix avec 2 ^{ème} batterie (€) (mars 2018)	62,90 € avec 2 piles AA du commerce	488	215 avec batterie 15 Wh	534 (prix de 2 batteries li-ion Panasonic 18650 NCR-B 3400mAh égal à 24 €)	679 (basic) ou 719 (spéleo) + batterie 4 cellules 6,8 Ah ; 653 (basic) ou 693 (spéleo) + batterie 2 cellules 2,5 Ah	835 (lampe fournie avec deux batteries 4 cellules 6,8 Ah)



Tableaux de synthèse : Éclairage

Nom	Stoots Caldera	Pixa 3	DUO S	Phaeton Dual	Scurion 900	Scurion 1500
Fabricant	Stootsconcept	Petzl	Petzl	phaethoncavinglight	Scurion GmbH	
Pays	France	France	France	Grèce	Suisse	
Année de commercialisation	2015	2009	2018	2014	2010	2011
Nombre de modes	5	3	5 + 1 (boost)	5 + 2 (boost)	3 à 10	
Mode progression retenu	large, 32,5 % du maxi, 200 lumens, autonomie 14 h	large + spot, 60 lumens, autonomie 6 h 30 (avec 2 piles AA)	déplacement, mixte (large et spot), 330 lumens, autonomie 6 h	large 500 mA, spot 0 %, 300 lumens, autonomie 12 h 20	large maxi, spot 0 %, 554 lumens, autonomie 7 h 25	large maxi, spot 0 %, 655 lumens, autonomie 6 h
Lumen annoncé	200	60	330	300	554	655
Mode progression : indice lux (lux) (total mesuré sur 4 m, à une distance de 2 m)	295	256	1172	660	505	663
Mode progression : maximum mesuré à 2 m (lux)	54	99	306	166	41	50
Mode progression : moyenne sur 4 m à 2 m (lux)	14	12,2	56	31,4	24	31,6
Mode spot retenu	spot, 700 lumens, autonomie 4 h	spot, 100 lumens, autonomie 3 h 30	vision lointaine, focalisé, 450 lumens, autonomie 4 h 30	large 0, spot 3000mA, 1000 lumens, autonomie 2 h 40	large 0, spot maxi, 255 lumens, autonomie 14 h 40	large 0, spot maxi, 630 lumens, autonomie 6 h
Lumens annoncés	700	100	450	1000	255	630
Mode spot : indice lux (lux) (total mesuré sur 4 m, à une distance de 2 m)	2723	672	4133	960	3241	5091
Mode spot : maximum mesuré à une distance de 2 m (lux)	917	394	2098	293	2188	2242
Mode spot : moyenne sur 4 m à une distance de 2 m (lux)	130	32	197	46	154	242
Mode spot : indice lux (lux) (total mesuré sur 4 m, à une distance de 10 m)	482	125	1012	Non disponible	662	1055
Mode spot : maximum mesuré à une distance de 10 m (lux)	36,5	15,1	114	45	86	93
Mode spot : moyenne sur 4 m à une distance de 10 m (lux)	23	6	48	Non disponible	32	50



UNE FRONTALE SPÉLÉO HOME MADE : POURQUOI, COMMENT ?

PAR DOMINIQUE ROS
À THIERRY VILATTE (ALIAS BRONTO)

1. Introduction

Vous avez aperçu sur la tête d'un de vos camarades de sortie un drôle d'éclairage inconnu sur les catalogues, vous avez envie d'originalité ou de quelque chose de spécial introuvable dans le commerce, vous avez été ébloui (au sens propre ou au sens figuré) par ce bricolage, vous vous dites que si les autres peuvent le faire alors pourquoi pas se lancer aussi dans l'aventure du [Do It Yourself technologique](#) ? Alors cet article est fait pour vous. Son défi ? Essayer de mettre le pied à l'étrier, en l'occurrence la main au fer à souder, même à ceux ou celles qui ont deux mains gauches (ou deux droites pour les gauchers) !

2. Avoir les idées claires

La première des choses à définir est votre envie de bricoler car, malgré toute notre bonne volonté, si vous n'avez jamais supporté d'avoir à sortir un tournevis ou un tube de colle, l'affaire est tout de même mal embarquée... Par contre s'il vous arrive de temps en temps de mettre vos doigts ailleurs que sur un clavier d'ordinateur, et si la souris n'est pas le seul outil que vous utilisez, alors assumez votre choix, nous sommes là pour vous y aider.

La décision est donc prise : vous aller vous fabriquer une frontale perso pour votre prochain casque, coûte que coûte et quel que soit le temps qu'il faudra y passer. Alors, par quoi commencer ?

Tout d'abord il est extrêmement important de bien avoir en tête que la lampe frontale c'est une chaîne : chaque élément dépendant des autres et les influençant. Si on n'a pas assimilé ça, on va droit à la désillusion. Les maillons de cette chaîne sont : ALIMENTATION (accumulateurs et chargeur) – DRIVER (électronique de pilotage) – SOURCE LUMINEUSE (LEDs), le tout relié par des fils. Cela signifie que votre réalisation sera inévitablement le fruit d'un compromis : hélas, comme vous vous en rendrez compte assez vite, même si les possibilités sont très nombreuses, tout n'est pas possible. En d'autres termes et pour résumer simplement, là pas plus qu'ailleurs on ne peut avoir le beurre et l'argent du beurre !

Il faut donc d'abord définir ce que l'on veut obtenir au final comme frontale autour de 7 critères essentiels : **autonomie, encombrement, poids, puissance, fiabilité/solidité, souplesse de réglages, coût.**

Comme vous ne pourrez pas, par exemple, obtenir une lampe très puissante, fiable et hyper modulable pour un coût dérisoire, il faut choisir parmi ces critères celui qui est primordial, et celui qui viendra en seconde position. Une fois ces choix posés, vous allez écrire le cahier des charges de votre future lampe. C'est en passant de ce cahier des charges au plan de la lampe que vous risquez de rencontrer des blocages technologiques (par exemple telle batterie au voltage incompatible avec votre électronique, ou alors la lampe s'avère trop lourde ou trop chère). Pas de panique, il y a des solutions à tout pour peu que vous acceptiez de revenir en arrière et de changer un des éléments de votre chaîne. En procédant ainsi, pas à pas, sur une feuille de papier ou sur votre ordinateur, et avec l'aide de ceux qui ont déjà pratiqué la chose, vous finirez par avoir un plan compatible qu'il ne restera plus qu'à concrétiser.

Tout cela se fait en amont de votre tentative de bricolage et c'est, à mon sens, absolument indispensable. Cela rend d'ailleurs la fabrication d'une lampe pour un(e) camarade de club plus difficile car il faudra que vous soyez tous deux en parfait accord sur cette première étape si vous ne voulez pas le (la) décevoir au final, ce qui serait dommage avouez-le.





Au pire vous réaliserez que la lampe à l'autonomie illimitée, éclairant comme un phare de DCA, étanche à 50 mètres, totalement indolore pour les cervicales et vous revenant à moins de 30 €, n'est pas faisable : vous vous éviterez alors des tracasseries et des achats de matériel inutile...

Voici par exemple un cahier des charges et le plan qui s'en est suivi. Ne soyez pas effrayé par le plan même s'il vous semble complexe ; nous allons ci-dessous détailler un peu les pré-requis techniques indispensables pour le mettre en forme correctement.

- Éclairage de progression très grand angle (180°) et variable (au minimum 5 niveaux d'éclairage étagés).
- Spot temporaire à puissance variable, commutable avec le grand-angle.
- Très forte puissance d'éclairage ponctuel : aux environs de 3000 lumens.
- Grande souplesse d'utilisation grâce à de nombreux réglages : puissance, alertes, niveaux, etc.
- Régulation thermique incorporée (variable et paramétrable).
- Système d'alerte de baisse de tension des accus paramétrable.
- Lampe orientable verticalement pour les bivouacs.
- Étanche à une immersion peu profonde (type IP67 ou IP68).
- Compatible avec plusieurs types d'accus (gamme de tension minimum de 3 V à 18 V).
- Pas plus grosse qu'une LedLampe IV de chez Spelemat.
- Moins chère qu'une LedLampe IV + boîtier Petzl + 2 accus + chargeur et bien moins chère qu'une Scurion® 1500.
- Autonomie avec 1 accus d'environ 8 h en régime moyen, 12 h à l'économie, et plus de 72 h en mode survie.
- Sécurité assurée par deux circuits d'éclairages indépendants.
- Équipement complet avec lampe orientable, chargeur et 3 accus Li-ion 5000 mA.



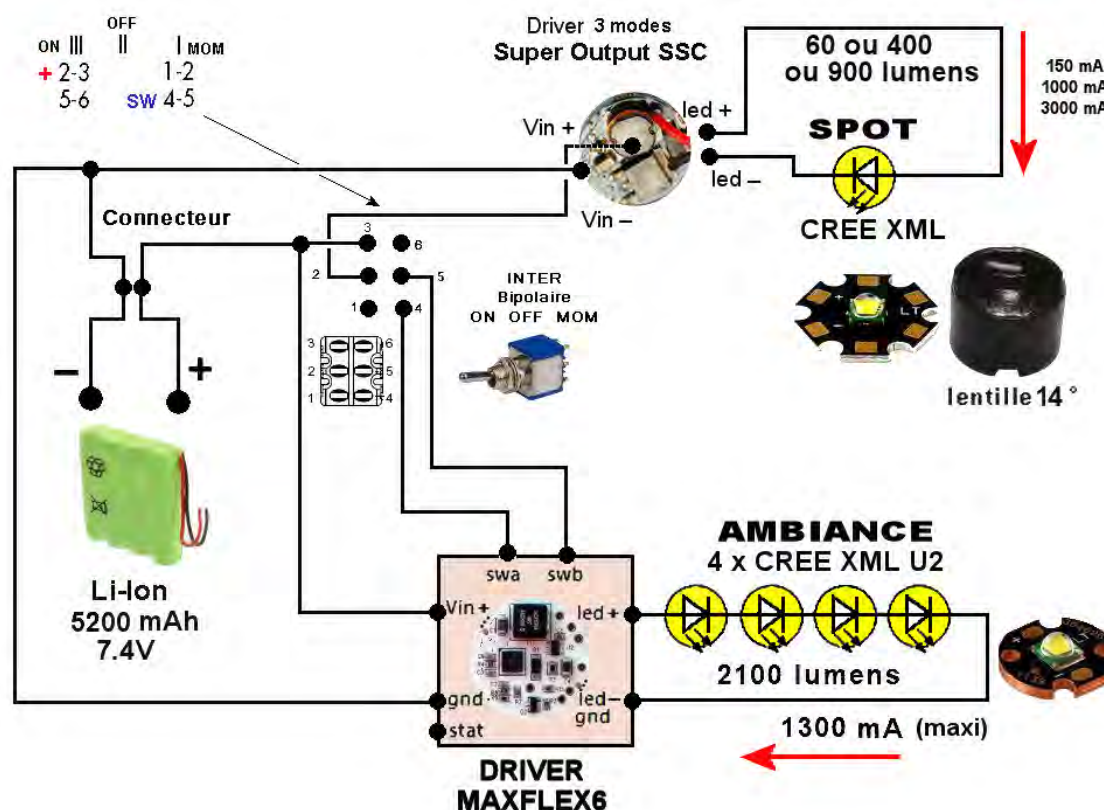


Figure 137 : Plan de la « Nipharled IV ».

3. Les connaissances basiques nécessaires

Quelles connaissances techniques de base faut-il avoir au préalable pour se lancer sereinement dans ce bricolage ? Assez peu de choses finalement et quasiment rien si vous travaillez en binôme avec un ami qui en sait un peu plus que vous et vous guide dans votre avancée de travaux. D'ailleurs, pour l'avoir testé, faire une lampe à deux ou deux lampes simultanées avec un autre spéléo parmi vos proches est une démarche sympathique.

Si malheureusement vous n'avez personne sous la main pour échanger, débattre ou réfléchir pensez à partager vos idées et vos questionnements sur le Web avec ceux qui ont déjà passé le cap. J'en profite ici pour saluer Thierry Vilatte alias Bronto, Cochonsauvage ou Ursuspeleus, spéléo grenoblois et bricoleur hors pair, membre du club des Furets Jaunes de Seyssins, hélas disparu bien trop jeune, et sans qui ce texte ne serait pas. En effet c'est lui avec sa verve, ses idées géniales et sa grande patience qui m'a permis de me lancer dans ma première lampe. Bronto, de là où tu es j'espère que tu guides un peu mes mots.

Venons-en maintenant aux fondamentaux techniques indispensables ou très utiles :

- les principes très basiques du courant continu : parallèle et série (niveau collège),
- la loi d'Ohm et ses variantes : $U=RI$, $I = U/R$, $P = U*I$. Identification des tensions, courant, résistance et puissance dans un circuit simple (niveau collège),
- le fonctionnement d'une LED : semi-conducteur, polarisation, dégagement de chaleur,
- les différents types de drivers : linéaires, boost, buck,
- le concept d'alimentation électrique : les différents types d'accus et de chargeurs.

Mis à part le premier point, tout ce qui précède n'est pas primordial, mais ça vous aidera quand même à mieux comprendre ce que vous faites ou ce qu'on vous explique et évitera que les copains que vous solliciterez ne s'arrachent les cheveux qui leur restent encore sous le casque.

Ensuite pour bricoler le montage il vous faudra :

- savoir utiliser un multimètre,
- savoir faire une soudure électronique propre (rien à voir avec la plomberie),
- savoir scier, percer, limer, meuler, coller...

Et par-dessus tout, il faut surtout être méticuleux et s'armer de patience : Rome ne s'est pas faite en un jour, votre belle lampe non plus !

Pour ce qui est des principes électriques de base cités ci-dessus, rien n'est plus facile que de ressortir un vieux livre de physique du collège ou d'aller sur le Web à la recherche de cours en ligne très nombreux et illustrés de schémas. En voici un exemple : <http://physique-chimie-college.fr/cours-5eme-electricite/>.

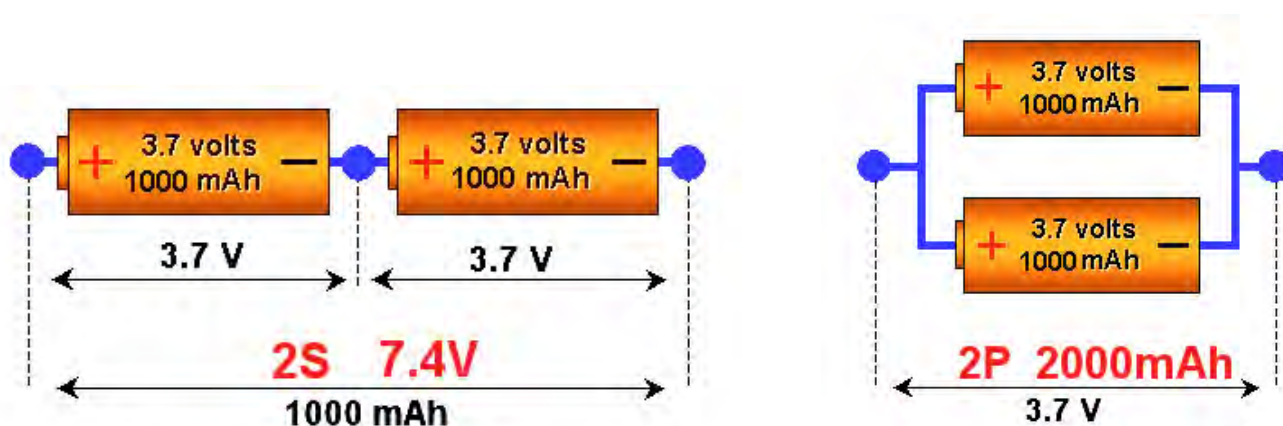
Les spéléos qui ont travaillé sur le projet de lampe « Light 1777 » ont également créé un Wiki pour partager leurs connaissances et sur lequel on trouvera des informations très utiles. Voici un exemple avec la page consacrée aux drivers : <http://light.1777.fr/base/drivers>.

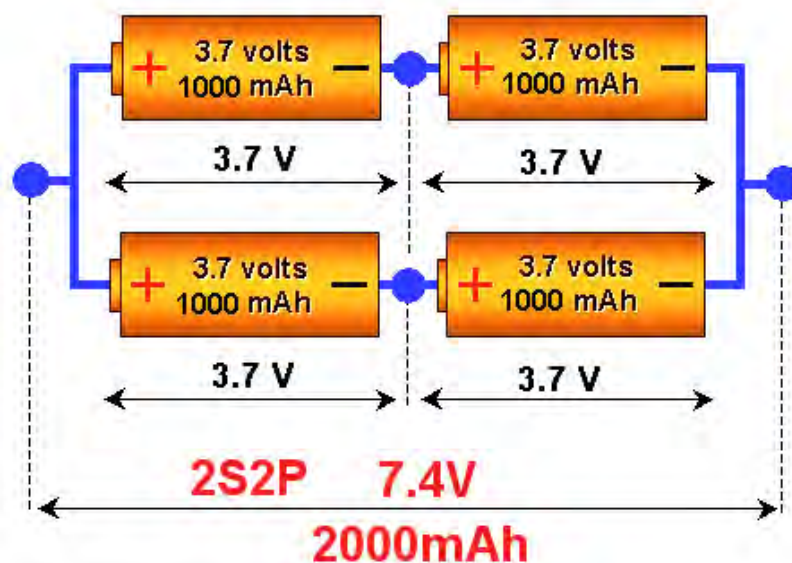
Nous nous contenterons donc ici de donner quelques éclaircissements issus de longues heures de discussions avec des collègues spéléos sur la liste de diffusion consacrée à la « Light 1777 » au cours des 3 années de gestation de ce projet collaboratif.

a. Sur l'alimentation de la lampe

Une alimentation rechargeable, sous forme d'accumulateurs, est à privilégier par rapport aux piles, pour les économies et le moindre impact écologique qu'elle engendre. Si vous devez aller faire de la spéléo à l'étranger et prendre l'avion, il sera plus judicieux de sauter cette étape et de vous fournir en accumulateurs du commerce déjà tout prêts et aux caractéristiques connues, dûment identifiés et bien étiquetés (à cause de la réglementation de sécurité sur les vols).

Les accus sont vendus à l'unité sous forme de cylindres appelés « cellules » ayant une tension (en Volts) et une capacité (en mAh) nominales. En général il faut en coupler plusieurs pour obtenir la tension et le courant désiré. On peut coupler (plus ou moins facilement suivant la chimie interne des accus) les différentes cellules en série (+ / - / + / -) ou en parallèle (+ / + - / -). Le couplage en série (S) permet d'augmenter la tension en Volts, le couplage en parallèle (P) permet d'augmenter la capacité de courant disponible en mAh. Il est possible de mélanger les deux pour profiter des deux avantages : plus de tension et plus de courant : c'est ce qu'on appelle un accumulateur 2S2P. Voir schémas ci-dessous.





Figures 138 : Différents couplages d'accumulateurs au Lithium

NB : d'autres configurations sont présentées en fin d'article en **Annexe 3**. Attention, certains de ces montages sont critiques, en particulier avec des cellules au Lithium, et demandent l'adjonction d'un circuit électronique de protection.

Si vous ne vous sentez pas l'envie, la possibilité ou le courage de fabriquer les accus de votre lampe, sachez qu'il en existe des packs tout montés dans un grand nombre de boutiques en ligne d'électricité ou d'électronique, voire sur eBay. Il ne vous reste plus qu'à leur adapter le connecteur que vous avez choisi s'il n'est pas fourni avec. Vous les trouverez en général sous cette forme :



Figures 139 à 141 : Divers packs d'accus commercialisés. Lilon 2S2P, NiMh 4S et NiMh 3P (de gauche à droite).



b. Sur l'électronique

Pas besoin de connaissances pointues en électronique si vous utilisez un « driver » déjà tout monté et disponible dans le commerce comme ceux de chez Taskled® (Californie, USA) par exemple. Les vrais électroniciens pourront s'amuser à composer leur système de commande à partir par exemple d'un Arduino (carte électronique programmable) et d'un Attiny (circuit intégré) plus quelques composants passifs (résistances, condensateurs).

La solution la plus simple et la moins chère pour alimenter votre lampe avec un courant à la tension adéquate est d'utiliser une résistance (ou un groupe de R) entre l'accu et la(les) LED(s). Le rendement est moins bon et on n'a évidemment aucune possibilité de réglage. Pour ce qui est des drivers du commerce, et en simplifiant, il suffit de savoir qu'il en existe trois types différents : linéaire, boost, et buck.

Linéaire

Un driver linéaire est une alimentation électrique qui stabilise et fixe une tension continue de sortie donnée en éliminant par dégagement de chaleur le surplus de tension qu'il y a en entrée. Pour ce type de driver il faut donc que la tension de l'accu soit légèrement supérieure (mais pas trop) à celle nécessaire pour la ou les LED(s).

Lien Wikipédia :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck-Boost

Boost

Un driver convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue d'entrée en une autre tension continue de sortie, mais de plus forte valeur.

Lien Wikipédia :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Boost

Buck

Un driver convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue d'entrée en une autre tension continue de sortie, mais de plus faible valeur.

Lien Wikipédia :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck

La tension fournie par vos accumulateurs et celle nécessaire à vos LEDs vont donc entraîner le choix

d'un de ces trois types de driver. Pour le reste, l'électronique de cet élément va aussi permettre un certain nombre de fonctions annexes comme la gestion d'une alerte liée à la température (en cas de surchauffe), le nombre de réglages possibles du niveau de puissance, l'avertissement de la décharge des batteries, etc. Pour avoir une idée du type de driver nécessaire en fonction du montage, voir **Annexe 2**.

c. Sur les LEDs

D'un point de vue électronique, la LED n'est pas une ampoule à incandescence, c'est une diode qui émet de la lumière (plus ou moins blanche). Comme toutes les diodes, elle est polarisée c'est-à-dire qu'elle a un pôle positif (+) et un pôle négatif (-). Si vous la branchez à l'envers elle ne va pas griller, mais elle ne fonctionnera tout simplement pas et le courant ne circulera plus.

Une LED fonctionne dans une plage de tension donnée, souvent autour de 3 V : si votre tension est trop basse elle va éclairer de moins en moins jusqu'à ne plus émettre du tout, et si vous dépassez un peu trop la plage limite, elle va griller. En ce sens, son comportement ressemble à celui d'une ampoule. Pourtant il n'y a aucun filament qui s'échauffe au passage du courant à l'intérieur.

N'allez pourtant pas croire qu'une LED ne chauffe pas : si à lumière fournie égale elle dégage beaucoup moins de chaleur qu'une ampoule classique, elle chauffe bel et bien. Elle dégage d'ailleurs tellement de chaleur que si elle n'est pas refroidie son espérance de vie sera des plus limitée ! Dans nos lampes frontales les LEDs demandent donc généralement à être couplées thermiquement à un radiateur ou, à minima, à être fixées sur un support métallique qui va dissiper les calories émises.

Si vous coupez plusieurs LEDs vous pouvez, là aussi comme pour les cellules d'accus, les associer en série ou en parallèle. En série il vous faudra additionner la tension nominale (en Volts) de chaque LED pour avoir la tension d'utilisation du groupe de LEDs : en général on utilise ce montage pour avoir plus de lumière émise. En parallèle ce sera la valeur du courant consommé (en A) qui s'additionnera : ici il s'agit plutôt d'optimiser le rendement.



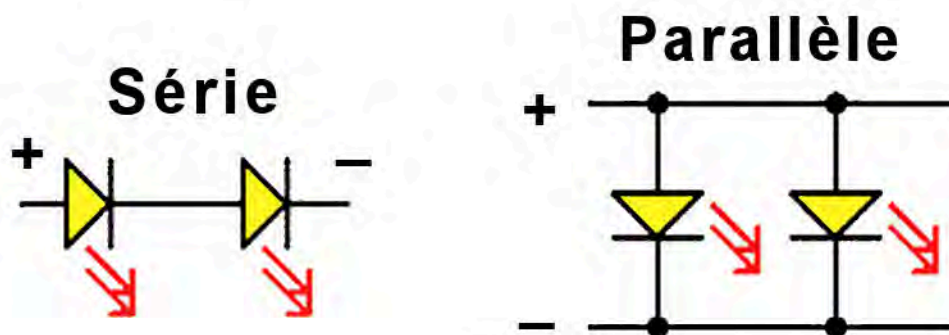
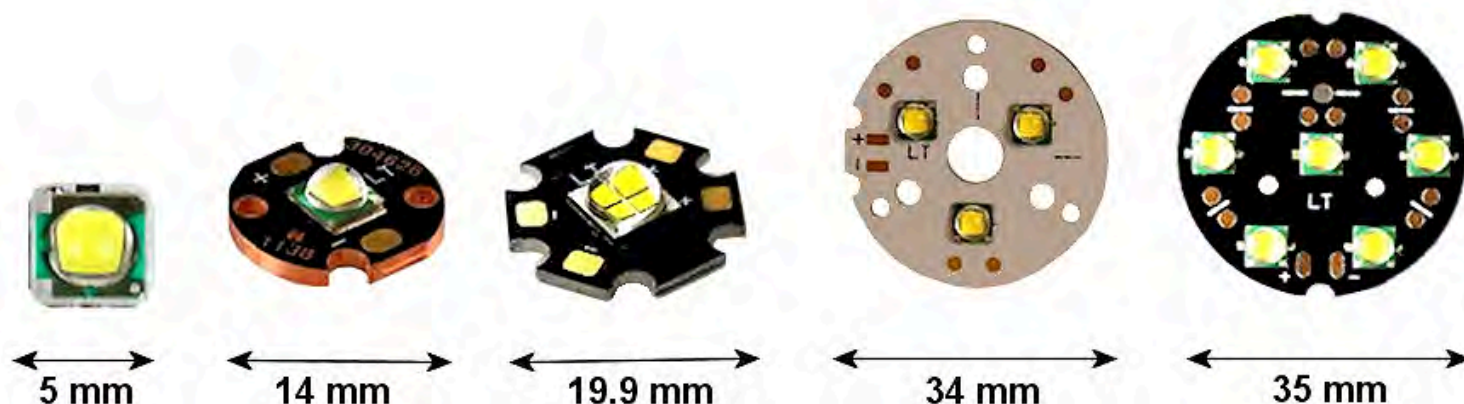


Figure 142 : Montage des LEDs en série ou en parallèle.

Arrivé à ce stade, certains se demanderont : « C'est très bien tout ça, mais quelle est la meilleure LED ? ». Répondre ici à cette question n'a pas vraiment de sens.

Tout d'abord choisir une LED c'est avant tout avoir fait un choix de lampe et nous ne pouvons pas, a priori, connaître les désirs de chacun. Sachez par exemple que contrairement aux bonnes vieilles ampoules à incandescence qui trônaient dans nos éclairages depuis Thomas Edison, et qui donnaient un spectre de lumière à peu près identique d'une ampoule à l'autre, les LEDs peuvent être disponibles en plusieurs teintes de blanc. Leur lumière peut aller d'un blanc relativement chaud (tirant vers l'orange) à un blanc très froid (tirant vers le bleu) ; c'est un peu comme dans le sketch de Coluche (humoriste français du XX^e siècle) : il y en a des « moins blanc que blanc » et des « plus blanc que blanc ». Cette coloration appelée « température de couleur » se mesure en degrés Kelvin et peut donc être un des critères de choix pour votre lampe. À titre d'exemple une des LEDs les plus récentes au moment de la rédaction de cet article est vendue en 6 modèles allant de 2700K (teinte la plus chaude) à 5000K (teinte la plus froide).

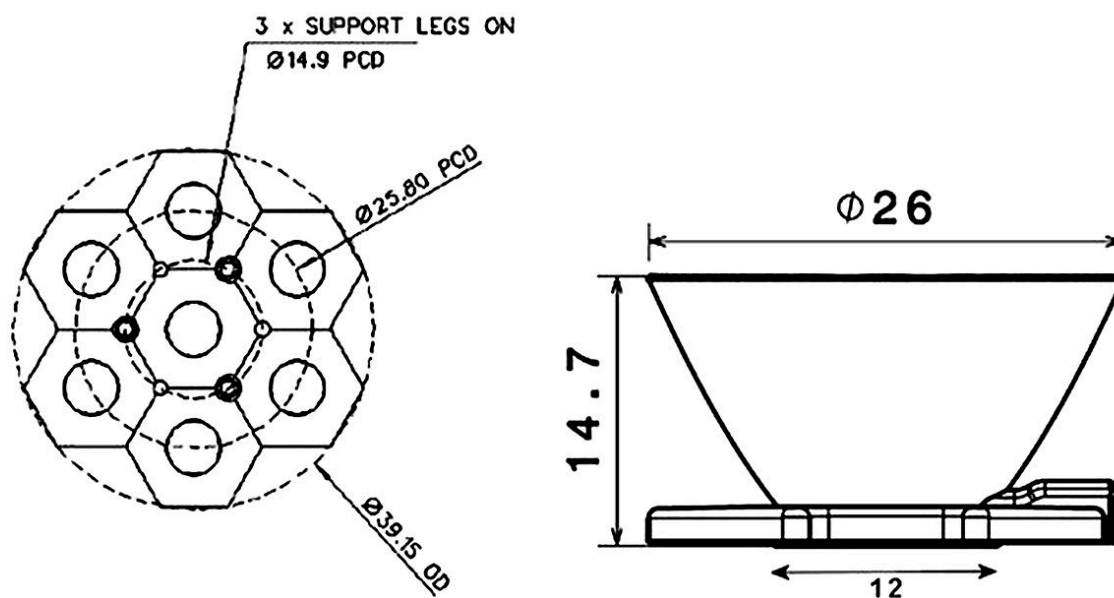
Une autre raison qui ne permet pas d'orienter votre choix ici est que la technologie des LEDs est en perpétuelle évolution ; cette rapidité est incompatible avec le temps de l'écriture, de l'édition et surtout de la pérennité du texte écrit. Pour faire simple si nous vous donnions un conseil aujourd'hui, il serait si rapidement obsolète que ce serait peine perdue. Une piste simple toutefois : généralement il est préférable de privilégier le rendement de votre éclairage. Meilleur sera le rendement et plus longue sera l'autonomie sous terre avec votre accu : c'est bien là que se situe d'ailleurs la grande révolution de l'éclairage électrique à LEDs et accus au Lithium par rapport aux piles alcalines et ampoules à filament. Il y a fort à parier que même dans 10 ans ce sera le rendement de la LED (ou tout autre source de lumière d'ailleurs) qui sera le premier critère de choix. Ce rendement est donné en général sur les fiches techniques des LEDs, il ne vous reste plus qu'à savoir le lire : il se mesure en Lumens fournis par Watt consommé. S'il n'y est pas, une simple division vous permet de l'estimer. À titre d'exemple les LEDs actuelles ont un rendement moyen de 100 à 150 Lumens par Watt, avec une limite théorique de 300 L/W avec les composants actuels ; mais qui sait ce qu'il en sera dans quelques années ?



Figures 143 à 147 : Quelques LEDs du début du XXI^e siècle (texte rédigé en l'an de grâce 2017).

Comme vous le constatez, le choix est déjà vaste : de la simple LED sans platine de support aux platines à LEDs multiples montées en parallèle ou en série, en passant par la LED unique montée sur platine ronde en cuivre ou étoile en aluminium. Et encore, ceci n'est qu'un échantillon de ce qui est disponible...

Alors aucun conseil ? Si, tout de même une astuce... La LED ne fait pas tout, bien souvent dans votre lampe une LED (au minimum) sera associée à une lentille optique qui va modifier le faisceau lumineux, par exemple pour le concentrer et en faire un spot ou au contraire le diffuser plus largement (communément appelée « wide » ou « grand angle » comme en photographie). Une des conséquences de l'avancée technologique (et de la course commerciale) est que les fabricants de LED vont bien plus vite que les fabricants d'optiques. De ce fait, le bricoleur de lampe frontale spéléo a tout intérêt à faire un choix couplé LED + lentille avec les lentilles disponibles sur le marché au moment de ses achats. Dans le cas contraire on s'expose à avoir la toute dernière LED en vogue, mais rien pour faire ce qu'on veut de sa lumière.



Figures 148 et 149 : Deux types de lentilles. Pour platine de 7 LEDs (à gauche) et pour spot à LED unique (à droite).

Parlons donc en quelques lignes de ces fameuses lentilles.

Sachez d'abord que toutes les LEDs en vente actuellement sont déjà munies d'une lentille, contrairement à nos anciennes ampoules qui n'étaient entourées que de verre transparent pour isoler le filament de l'air extérieur et l'empêcher de se consumer en une fraction de seconde, les LEDs ont leur partie émettrice enrobée dans une portion de sphère de matière transparente qui joue également le rôle de diffuseur de lumière.

En effet le défaut principal des LEDs est la ponctualité de leur émission. Ajouté à la puissance lumineuse émise et au spectre parfois très froid de celle-ci, ce défaut peut d'ailleurs entraîner un problème de santé pour la rétine : ne regardez jamais directement une LED à pleine puissance car, même si ce bulbe sphérique leur donne par exemple un angle de diffusion de 125°, ce n'est pas bon du tout pour vos yeux !

Pour autant, 125° ou tout autre angle de votre LED d'origine, peut très bien ne pas vous satisfaire ; d'où l'adjonction d'une lentille devant votre LED. Vous serez alors confronté à leur disponibilité, comme mentionné plus haut, mais aussi à leur encombrement. Pour faire simple, plus vous souhaitez concentrer le flux lumineux de votre LED en un pinceau étroit (par exemple pour avoir un spot permettant d'éclairer le haut des cheminées ou le bas des puits), plus votre lentille sera encombrante. Et là vous serez limité par l'espace disponible dans votre boîtier de lampe qui n'est pas extensible. Avec les LEDs on peut avoir une frontale qui éclaire autant qu'un phare de voiture mais on ne souhaite généralement pas qu'elle en ait la taille !



Figures 150 et 151 : Positions de la lentille spot.

Figure 152 : Lentille spot en place dans un boîtier LED1777.

L'encombrement des lentilles dans une lampe du projet « Light 1777 »

" <http://souterweb.free.fr/light1777/light1777V3.html> ". En plus du spot, on aperçoit à droite deux petites lentilles dont le rôle est de concentrer légèrement la lumière en mode progression.

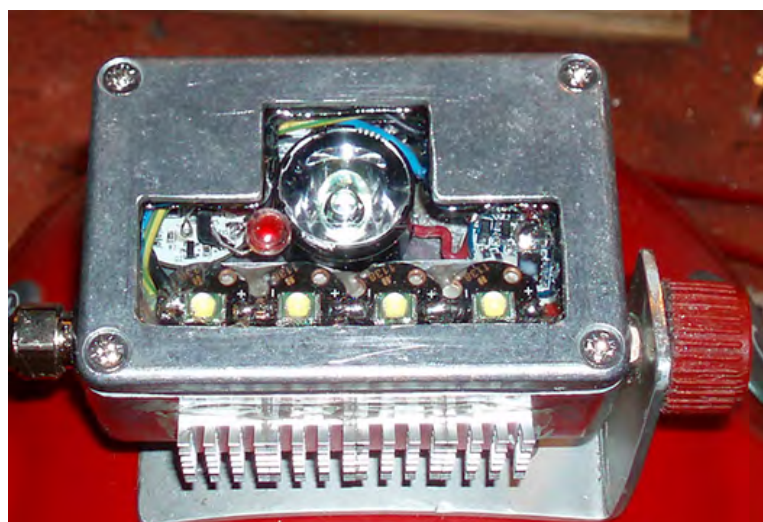
4. Avec quel matériel ?

Au vu de ce qui précède, il vous faudra donc avoir le petit outillage classique du bricoleur du dimanche : pinces, marteau, scie à métaux, tournevis, lime etc. Si vous le pouvez, dénichiez une mini perceuse type Dremel® qui vous sera très utile pour forer, tronçonner et meuler avec précision.

À cela vont s'ajouter quelques bricoles spécifiques :

- un multimètre que vous utiliserez surtout en position Ohmmètre (pour tester la continuité de votre circuit et la qualité de vos soudures) mais aussi comme voltmètre pour lire la tension et repérer où se trouvent le + et le -.
- un fer à souder d'électronicien (ne pas lésiner sur la qualité du fer et de la soudure sinon vous le regretterez amèrement). Prenez un lot de deux pannes : une plate et une pointue, ce ne sera pas du luxe. Inutile qu'il soit trop puissant : un modèle entre 20 et 25 W fera l'affaire (si possible avec un fil d'alimentation en silicone souple).
- une lampe frontale et une loupe sur pied, surtout si vous commencez à être presbyte !

Quant à votre poste de travail, un établi est bien pratique surtout s'il est muni d'un étau, mais au pire on peut bricoler dans sa cuisine ou sa salle à manger. Attention tout de même à votre conjoint qui risque de pousser des cris d'orfraie quand vous sciez la jolie table de sa grand-mère au lieu du support de votre frontale en alu qui était posé dessus...



La lampe Nipharled IV terminée

5. Les composants de la lampe

Là on rentre déjà dans les détails de votre projet : de ce fait la liste des éléments à se procurer peut varier du simple au quintuple simplement du fait de vos objectifs. Pour illustrer voici par exemple deux « paniers de courses » plus ou moins garnis pour deux lampes frontales à LEDs très différentes :

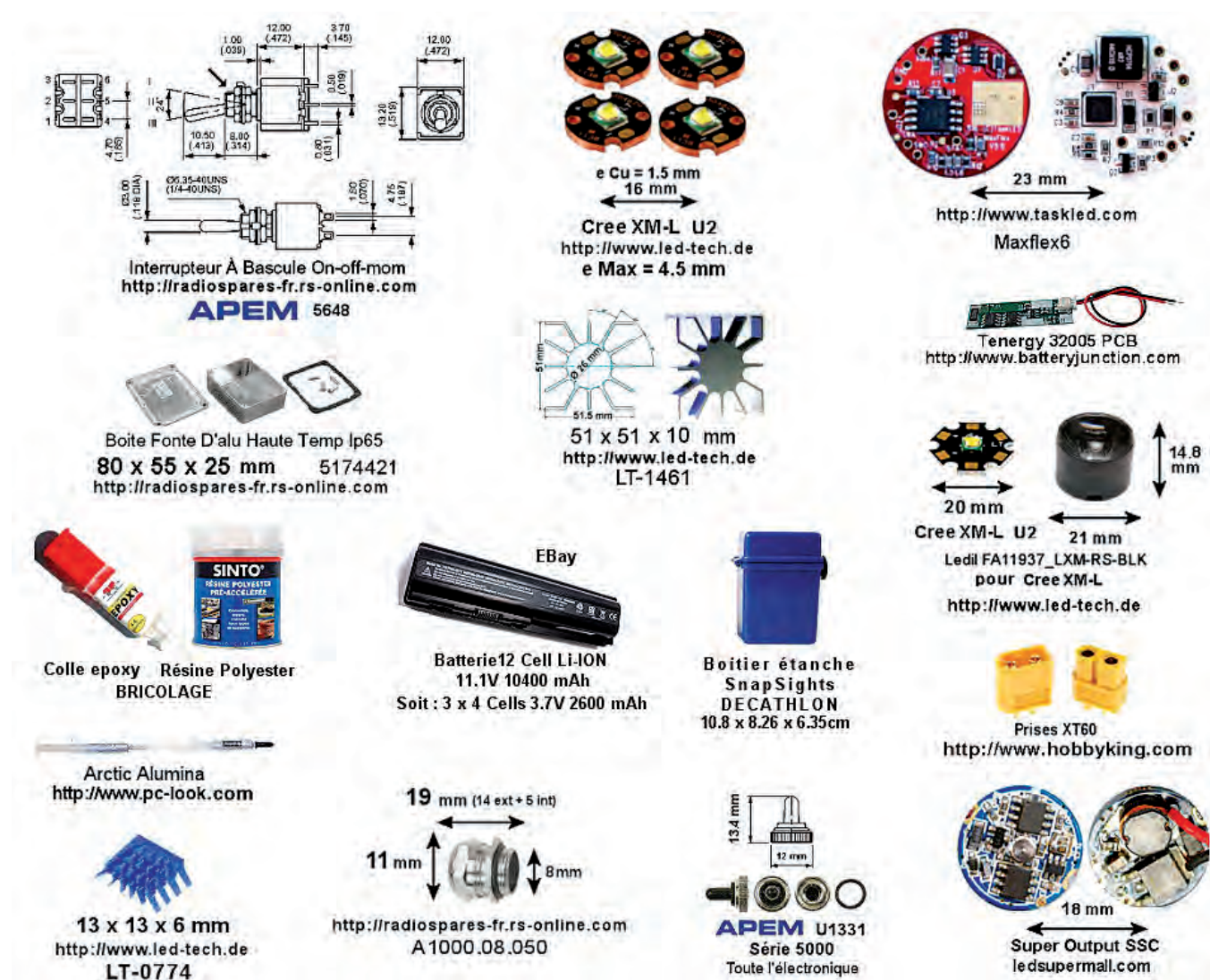


Figure 153 : Fournitures pour la « Nipharled IV ».

Et encore là, si vous êtes perspicace vous avez vu qu'il manque le chargeur pour les accus. Cela vous fait peur ? Normal, c'était fait exprès !

Maintenant regardez ci-après ce que vous pouvez faire aussi en nettement plus simple et aussi, bien entendu, en nettement moins cher (ajouter là aussi un chargeur pour les accus et de quoi les accrocher au casque) :



• **Projet n°2 : la « Nipharclub 1 »**



Figure 154 : Fournitures pour la « Nipharclub 1 ».

J'espère qu'avec ce « caddie » vous vous sentez mieux que tout à l'heure. Blague à part, il est assez difficile de donner une vue unique des éléments de base indispensables tant les projets sont variés. Voici tout de même une liste incontournable sur laquelle vous pouvez vous baser pour vos premières estimations. Pour une lampe complète, à partir de rien, il vous faudra :

- des accumulateurs (Ni-Mh, Li-Ion ou toute autre technologie en cours au moment de votre travail), leur nombre et leur montage dépendant de votre plan et cahier des charges,
- un chargeur adapté à la configuration de vos accus,
- du câble électrique de liaison entre accu et lampe et du fil de montage (pour relier les composants de la lampe),
- un ou plusieurs driver(s) et/ou une (des) résistance(s),
- un boîtier qui sera le corps de la lampe,
- une ou plusieurs LEDs,
- un ou plusieurs interrupteurs (voir **Annexe 6**),
- un ou plusieurs connecteurs (prises électriques),
- un peu de plexi pour servir de vitrage à votre lampe,
- de petites fournitures (comme indiqué souvent sur les factures des artisans) : colle, résine, vis, soudure...

Et là, je sens venir la question qui tue : « Oui, mais combien ça coûte tout ça ? Parce que si c'est plus cher que d'en acheter une toute faite, moi, hein... »



À titre purement personnel j'ai déjà répondu à cette question que, même si ça m'était revenu plus cher qu'une lampe Suisse bien connue, je me serais quand même amusé à fabriquer ma lampe ne serait-ce qu'une pour le plaisir de savoir que celle qui est sur mon casque est sortie de ma matière grise et de mes petites mains. Mais, on peut concevoir que le sujet mérite d'être abordé...

L'éternel problème est encore la pérennité des informations et leur obsolescence programmée. Les tarifs d'aujourd'hui ne sont pas ceux d'hier et ne seront pas ceux de demain. De plus, le budget de chacun est variable et il y a bien dans les premiers critères de choix (voir chapitre 2) le coût de la réalisation. Nous allons donc nous contenter ici d'un exemple concret, celui de la Nipharled IV qui date tout de même de 2012. Vous vous souvenez que mon cahier des charges mentionnait pour ma lampe frontale avec ses trois accus et le chargeur un objectif de coût nettement inférieur à celui d'une Scurion®. Le kit complet (avec deux accus) du modèle 900 de la célèbre lampe suisse valait à l'époque 900 €, voyons ce qu'il en a été de la Nipharled IV :

Matériel	Prix €	Matériel	Prix €
LEDs XML U2 x 5	47,00	Petites fournitures (environ)	16,00
Driver MaxFlex et driver SSC	38,00	Passe-fils x 2 + écrous	12,00
Batterie PC portable (pour 3 accus)	37,00	Prises XT 60 M+F x 5	9,00
Chargeur Li-Ion	30,00	Interrupteur + cocottes x 2	8,00
PCB pour accus x 3	22,00	Câblage	7,00
Colles et pâtes thermiques	21,00	Plexiglas + lentille spot	6,00
Boîtiers alu + boîtier plastique	17,00	Radiateurs x 5	5,00

Figure 155 : Coût des composants pour la « Nipharled IV ». Total 275 €.

Quelques précisions supplémentaires utiles :

- Si je me suis basé sur la Scurion® pour établir un comparatif, ce n'est pas par esprit de compétition, ni par défi. Simplement il s'agit d'une lampe connue de tous et probablement la référence actuelle des lampes frontales spéléo en Europe. Je tiens d'ailleurs à remercier au passage l'équipe Scurion® pour avoir répondu très sympathiquement à plusieurs de mes questions techniques alors que je ne suis pas un de leurs clients.
- Ensuite pour ce qui est de la Nipharled, certains coûts ont été mutualisés car le projet a été monté avec un ami ce qui a permis de diviser par deux les frais de port des différentes pièces (frais souvent élevés pour de petites pièces venant de Chine ou des USA).
- Il est bien entendu possible de faire une lampe simple pour un coût plus modique tournant autour de 130 €. L'écart n'est pas énorme car la part des prix fixes communs à chaque lampe (petites fournitures, frais de port, chargeur et accus) est majoritaire dans le coût d'une lampe. **À ce stade il devient** donc très difficile de « concurrencer » certaines lampes du commerce qui à moins de 200 € offrent une frontale de qualité. Au final, fabriquer soi-même sa frontale pour dépenser moins ne me semble pas un objectif très judicieux ; la faire pour le plaisir est bien plus motivant.





6. Conclusion : « Fiat lux, et facta est lux »

Voilà, vous savez l'essentiel et pour vous lancer il ne vous reste plus qu'à apprendre le reste (voir annexes ci-après). Sinon, si vous pensez que ces bricoleurs spéléos sont un peu fous et préférez consacrer votre temps libre à l'exploration souterraine, ne vous inquiétez pas : vous trouverez certainement une frontale qui vous conviendra chez votre distributeur de matériel habituel ou sur un stand de congrès spéléo. Que la lumière soit avec vous !

7. ANNEXES

a. Annexe 1 : petit glossaire technique

18650 : « Numéro de code » abrégé d'un élément d'accumulateur cylindrique, un peu plus gros que les piles AA, dont le nom complet est ICR 18650-26F. Dimensions moyennes : 65 x 18,3 mm sans PCB incorporé (voir **Annexe 4**) et 67 à 70 x 18,3 mm avec circuit de protection inclus. Un élément pèse aux environs de 40/45 g. Le courant nominal fourni (1C) est en général annoncé dans une fourchette de 1600 à 3400 mAh : les plus connues (Panasonic®, Samsung®) affichent 2600 mAh (en 2016). Un élément 3,7 V bien chargé peut donner facilement jusqu'à 4,2 V, il faut donc en tenir compte dans les calculs de puissance dissipée par l'électronique surtout en début de décharge (sur les notices Taskled® elles sont d'ailleurs indiquées à 4,2 V).

Linéaire : Un driver linéaire est une alimentation stabilisée qui régule la tension fournie aux LEDs en convertissant la tension excédentaire offerte par l'accu en chaleur. En conséquence, le rendement est d'autant meilleur que la tension d'entrée, bien que supérieure à celle de sortie, ne s'en éloigne pas de façon excessive. Dans le cas contraire, il devra dissiper trop de courant : les pertes seront importantes et il va surchauffer.

Buck : De l'adjectif anglais « buck » qui signifie « plus bas ». Le driver Buck, ou convertisseur série, (très utilisé dans les ordinateurs) est une alimentation à découpage qui va abaisser la tension continue d'entrée pour fournir en sortie une autre tension régulée moindre, généralement 3,6 V. Il diminue donc la tension V (en volts) fournie par l'accu si nécessaire pour vos LEDs. La part de l'énergie perdue au sein des composants influe sur son rendement et donc sa qualité.

Boost : Du verbe anglais « to boost » qui signifie « renforcer ». Le driver Boost, ou convertisseur parallèle, est une alimentation à découpage qui va rehausser la tension continue d'entrée pour fournir en sortie une autre tension régulée plus élevée. Il augmente donc la tension V (en volts) fournie par l'accu si nécessaire pour vos LEDs. La part de l'énergie perdue en chaleur dans des résistances parasites influe sur son rendement et donc sa qualité.

Buck-boost : Driver mixte aux deux fonctions. Il existe par exemple des convertisseurs 3-15 V en entrée et 0,5-30 V en sortie pour 3 A. Ils seraient bien pratiques pour ceux qui ont deux types d'accus : 3,7 V et 7,4 V par exemple et voudraient pouvoir les intervertir. Mais comme ils sont complexes à fabriquer si on veut obtenir un bon rendement (plus de composants que les drivers simples), ils sont généralement trop gros pour être utilisables dans l'espace restreint d'une frontale.

Lilon : Lithium-ion est un type d'accumulateur sans effet mémoire de charge-décharge, contenant des ions Lithium. Il doit être protégé contre les décharges et les surcharges excessives et en 2016 fournissait généralement 3,6V ou 3,7 V nominaux par cellule (voir ci-dessus à « 18650 »).

S ou P (dans la configuration batterie) : Soudure des éléments de l'accumulateur en Série (+/-/+-) ou en Parallèle (+/+/-/-). 1S = un élément seul, 2S : deux éléments soudés en série, 1S2P : un groupe de deux éléments soudés en parallèle, 1S3P : un groupe de trois éléments soudés en parallèle, 1S4P : un groupe de quatre éléments soudés en parallèle, 2S2P : deux groupes de deux éléments soudés en parallèle, eux-mêmes montés en série (voir **Annexe 3**).

Vf : « V » pour « Voltage » et « f » pour « forward » (adverbe anglais signifiant « devant »). Il s'agit pour une LED de la tension (mesurée en Volts) du courant entrant dans celle-ci et fournissant un fonctionnement optimum. En 2016 la plupart des LEDs avaient une Vf de 3 V, 6 V ou 11,7 V. On peut faire varier la tension entrante de quelques dixièmes de Volts autour de cette valeur avec des conséquences importantes sur le flux lumineux produit par la LED. Lorsque Vf dépasse légèrement cette valeur nominale, le courant (en Ampères) consommé par la LED croît rapidement (passant par exemple de 1 A à 3 A), le flux lumineux devient important et sa température de couleur « froide ». Par contre le rendement de la LED baisse : elle va se mettre à surchauffer (d'où l'intérêt de bien la refroidir avec un radiateur) et si on augmente encore Vf, elle claque... Conclusion : l'hypertension est mauvaise pour la santé des LEDs !



b. Annexe 2 : Tableau de correspondance entre driver et LEDs (figure 156)

Il est probable que ce tableau soit déjà obsolète au moment de sa parution car les LEDs se renouvellent très vite, mais son but est de mieux comprendre le lien entre les tensions dans la chaîne : accus / driver / LEDs. Toutes les combinaisons possibles ne sont pas représentées ici, il s'agit d'une sélection arbitraire parmi les plus courantes.

NB : Un glossaire des termes techniques employés dans ce tableau se trouve ci-dessus en **Annexe 1**.

Type de LED(s) CREE ©	Vf	Nombre de LED(s)	Montage des LEDs : ~ en série // en parallèle	Vf total	Type de driver : Modèle linéaire Modèle buck Modèle boost	Configurations S/P des cellules Lilon 3,7 V 18650	Tension et courant accu. (voir tableau)	Exemples de plans de lampes (voir Annexe 7)
Cree XM-L / XP-L	3 V	1	-	3 V	Linéaire	1S à 1S4P	3,7 V 1 C à 4 C	Nipharled VClub 1.0
Cree XM-L / XP-L	3 V	2	série ~	6 V	Boost	1S à 1S4P	3,7 V 1C à 4C	
Cree XM-L / XP-L	3 V	2	série ~	6 V	Linéaire	2S ou 2S2P	7,4 V 1C ou 2C	
Cree XHP	6 V	1	-	6 V	Linéaire	2S ou 2S2P	7,4 V 1C ou 2C	
Cree XM-L / XP-L	3 V	3	série ~	9 V	Boost	2S ou 2S2P	7,4 V 1C ou 2C	
Cree XM-L / XP-L	3 V	4	série ~	12 V	Boost	2S ou 2S2P	7,4 V 1C ou 2C	Nipharled V5.3
Cree XHP	6 V	2	série ~	12 V	Boost	2S ou 2S2P	7,4 V 1C ou 2C	Nipharled V5.3
Cree XM-L / XP-L	3 V	3	série ~	9 V	Linéaire	3S	11,1V 1C	
Cree XM-L / XP-L	3 V	2	parallèle //	3 V	Linéaire	1S2P à 1S4P	3,7 V 2C à 4C	Nipharled VClub 1bis
Cree XM-L / XP-L	3 V	2	1 par canal	3 V par canal	Linéaire	1S2P à 1S4P	3,7 V 2C à 4C	Nipharled VClub 2.0
Cree XM-L / XP-L	3 V	4	2 en ~ par canal	6 V par canal	Linéaire	2S2P	7,4 V 2C	Nipharled VClub 3.0
Cree XHP	6 V	2	1 par canal	6 V par canal	Linéaire	2S2P	7,4 V 2C	
Cree XM-L / XP-L	3 V	4	2 en // par canal	3 V par canal	Linéaire	1S2P à 1S4P	3,7 V 2C à 4C	Nipharled VClub 3bis
Cree XM-L / XP-L	3 V	6	3 en // par canal	3 V par canal	Linéaire	1S4P	3,7 V 4C	
Cree XM-L / XP-L	3 V	1	-	3 V	Buck	2S ou 2S2P	7,4 V 1C ou 2C	
Cree XM-L / XP-L	3 V	2	parallèle //	3 V	Buck	2S ou 2S2P	7,4 V 1C ou 2C	Nipharled VClub 2bis
Cree XHP	6 V	4	2 en ~ par canal	12 V par canal	Boost	2S2P	7,4 V 2C	
Cree XM-L / XP-L	3 V	4	série ~	12 V	Boost	2S2P	7,4 V 2C	
Cree XHP	6 V	3	série ~	18 V	Boost	4S	14,8 V 1C	
Cree XM-L / XP-L	3 V	6	série ~	18 V	Boost	4S	14,8 V 1C	
Cree MK-R	11,7 V	1	-	11,7 V	Boost	2S2P	7,4 V 2C	Nipharled VClub 4.0
Cree MK-R	11,7 V	2	parallèle //	11,7 V	Boost	2S2P	7,4 V 2C	
Cree MK-R	11,7 V	2	parallèle //	11,7 V	Linéaire	4S	14,8 V 1C	
Cree MK-R	11,7 V	2	1 par canal	11,7 V par canal	Linéaire	4S	14,8 V 1C	





c. Annexe 3 : différents types de montages des cellules d'accumulateur Lithium-Ion 3,7 V

Cette présentation peut devenir obsolète si de nouvelles tensions de cellules d'accumulateur (liées par exemple à un changement de leur chimie interne) apparaissent sur le marché, mais le principe physique de couplage électrique (ajout des tensions en série / ajout des courants en parallèle) devrait rester valable.
NB : certaines de ces configurations nécessitent d'utiliser un circuit additionnel dit « PCB » ; voir ci-dessous en **Annexe 4**.

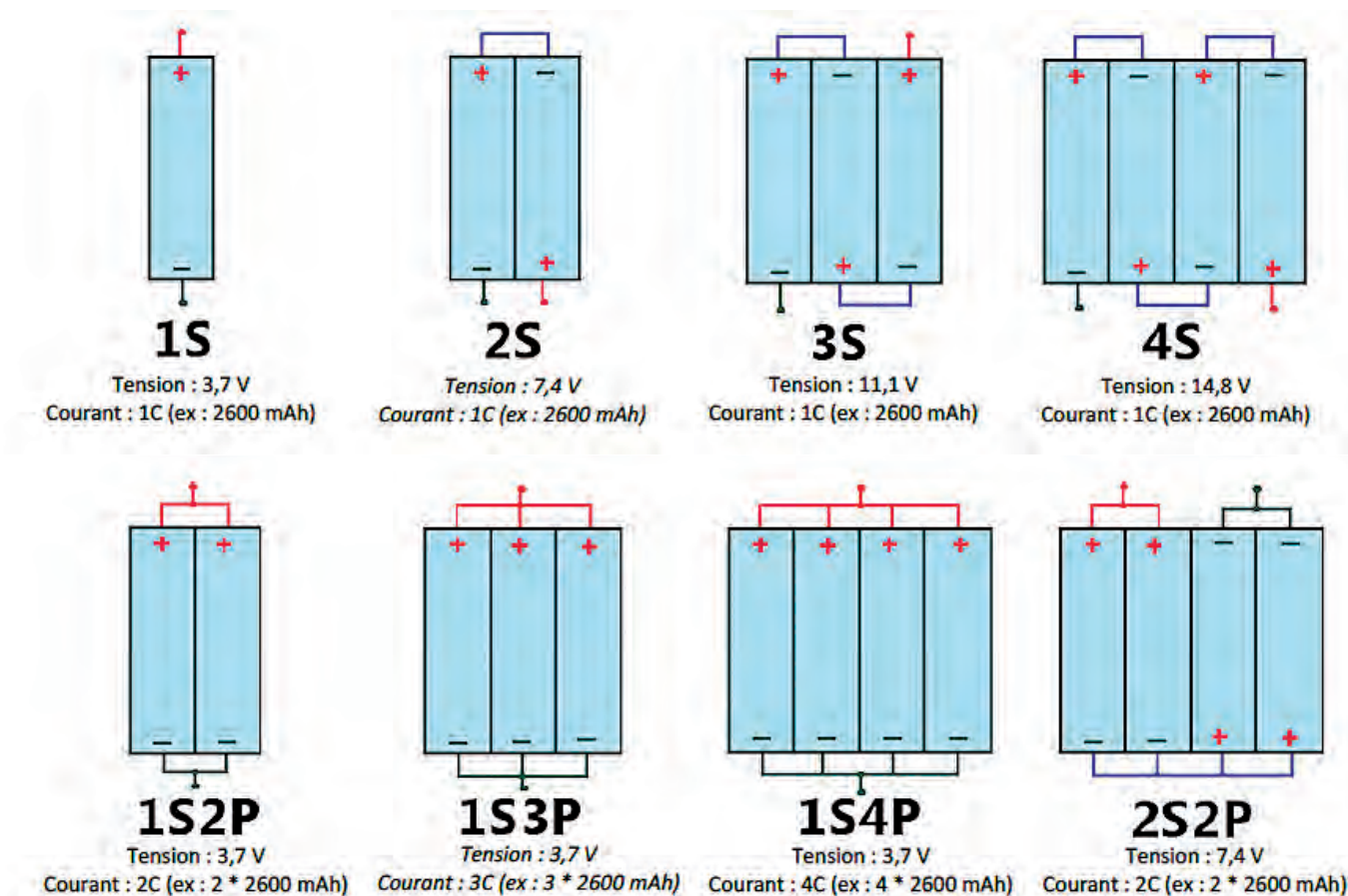


Figure 157 : Configurations d'accumulateurs.

ATTENTION : si vous utilisez des accumulateurs au Lithium-polymère et que vous êtes un puriste de la charge / décharge ou que vous souhaitez tout simplement que vos accus aient une durée de vie plus longue, à la place du PCB utilisé dans les accus Lilon dont nous parlerons en **Annexe 4**, vous aurez besoin d'adapter une prise d'équilibrage et de les relier à un chargeur adapté capable de moduler la charge de chaque élément indépendamment des autres (donc de gérer la fameuse prise d'équilibrage). Dans le cas contraire, certaines des cellules ne se chargeront pas au même potentiel que les autres et l'accumulateur verra ses performances décliner très vite à la décharge. En cas de surchauffe au moment de la charge il peut même y avoir un risque de détérioration de l'accu, voire d'incendie grave (certains incidents dont on a parlé dans les médias avec des smartphones d'une marque très connue qui avaient tendance à prendre feu étaient liés justement à des accumulateurs au Lithium-Polymère).

Voir le branchement de cette prise en **Annexe 5** ci-après.

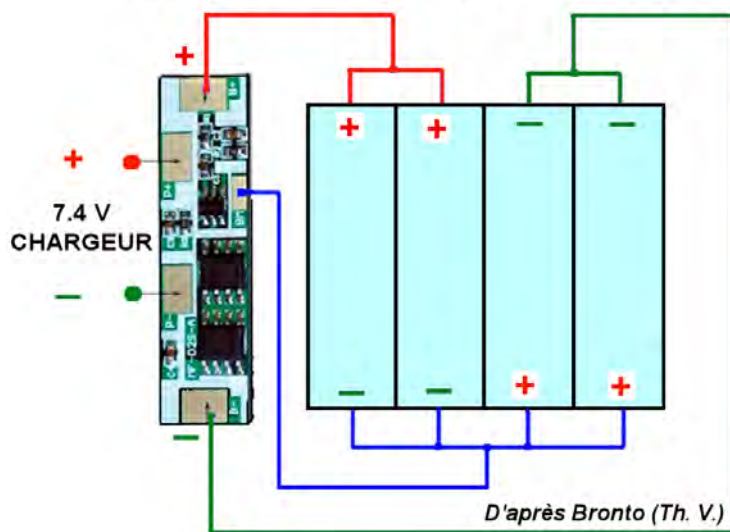
d. Annexe 4 : mais qu'est-ce qu'un PCB ?

En 2017 les batteries de frontales les plus utilisées sont celles au Lithium-Ion. Dans ce cas, vous avez probablement entendu parler dans certains accus au Lithium de l'utilisation d'un PCB ou PCM. Sur les catalogues de vente de piles et accumulateurs vous verrez également des cellules 18650 vendues avec ou sans PCB incorporé et, parallèlement, des PCB additionnels pour pouvoir se fabriquer ses propres accus. Mais de quoi s'agit-il ?

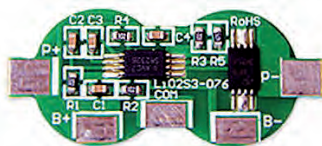
PCB est un acronyme anglais pour « Protection Circuit on Board » et PCM de « Protection Circuit Module ». Il s'agit d'un petit circuit électronique avec plots à souder et sans fils de liaison qui, une fois correctement relié aux accumulateurs, va permettre de réguler leur charge et leur décharge. Lors de l'utilisation de la lampe, ce circuit interdit par exemple les décharges trop profondes de vos cellules Lilon car elles leur sont fatales à la longue. Il va tout simplement agir comme interrupteur et va couper le circuit en dessous d'une certaine tension définie à la fabrication du PCB et non réglable. Évidemment dans ce cas votre lampe s'éteint brutalement ce qui, en spéléo, n'est pas très pratique. On couple donc en général l'utilisation de batteries avec PCB à un driver capable de vous informer sur l'état de décharge de vos accus afin d'éviter d'en arriver à se retrouver soudainement dans le noir. Le PCB se réinitialise ensuite dès que vous brancherez sur votre accu une source de courant (chargeur).

Il découle de ce qui précède qu'il existe des tas de modèles de PCB différents en fonction de la tension et du courant disponibles dans votre accu ainsi que de sa configuration (avoir **Annexe 3**). L'iconographie qui suit (figures 158 à 162) vous en montre quelques-uns ainsi qu'un exemple de branchement d'un PCB 2S2P.

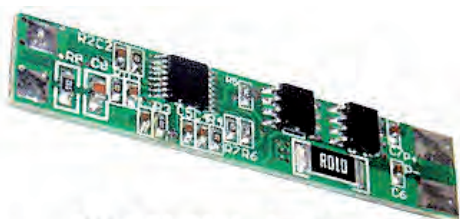
PACK ACCU Li-Ion 7.4V 5200 mAh



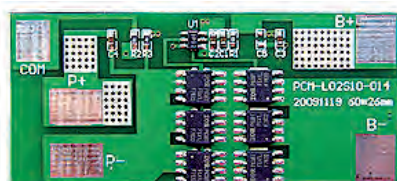
3.7V 3A pour cellule 18650



7.4V 3A pour pack 2S



11.4V 4A pour pack 3S



11.4V 10A pour pack 2S2P



e. Annexe 5 : charge des cellules au Lithium 3,7 V avec équilibrage (chargeur spécifique indispensable).

Dans le croquis ci-dessous (figure 163), il a été choisi de placer comme exemple des cellules d'accumulateur d'une marque connue et de valeur nominale 3,7 V pour 3400 mAh. Quand vous lirez l'article, peut-être que ce ne sera plus la référence en vogue mais le principe du couplage, donc le branchement de la prise d'équilibrage devrait rester le même ; en tout cas tant que la chimie des accumulateurs utilisée **nécessite un chargement rigoureux entre les différentes cellules d'un même pack**.

Peut-être que la technique permettra un jour de se passer de cette contrainte avec des accu par exemple mono-cellule de différentes valeurs nominales. Et si, a contrario, le système de couplage se complexifie et bien il faudra réécrire ce chapitre. L'avenir nous le dira. Pour l'instant il s'agit d'une alternative pour gérer la charge de vos accu sans PCB (voir ci-dessus) si vous avez dans votre lampe un driver vous permettant d'éviter les décharges trop profondes.

Différents types de prises (ou connecteurs) d'équilibrage

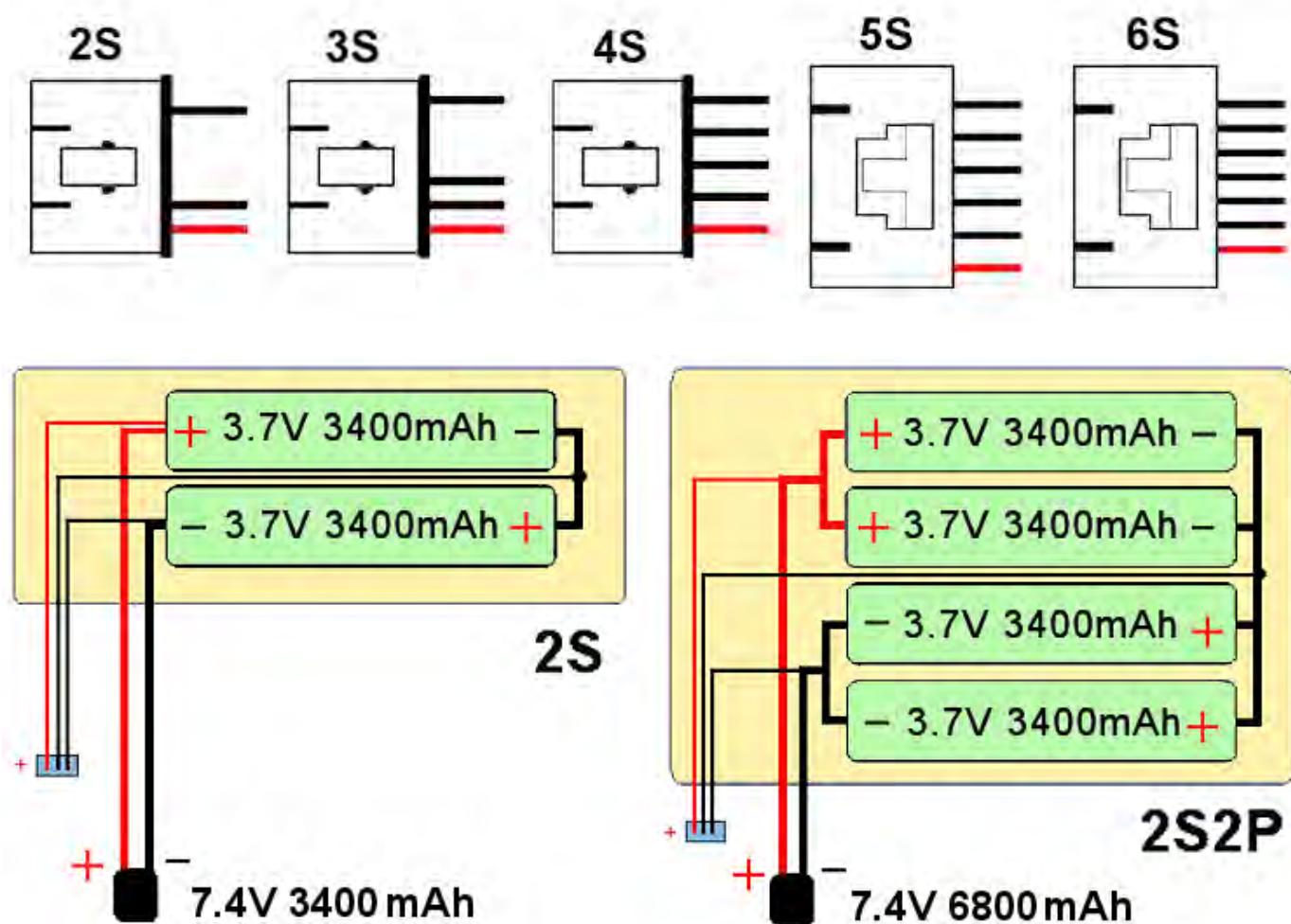


Figure 163 : Connecteurs d'équilibrage et montages en 2S ou 2S2P.



Figure 164 : Une prise type 4S.

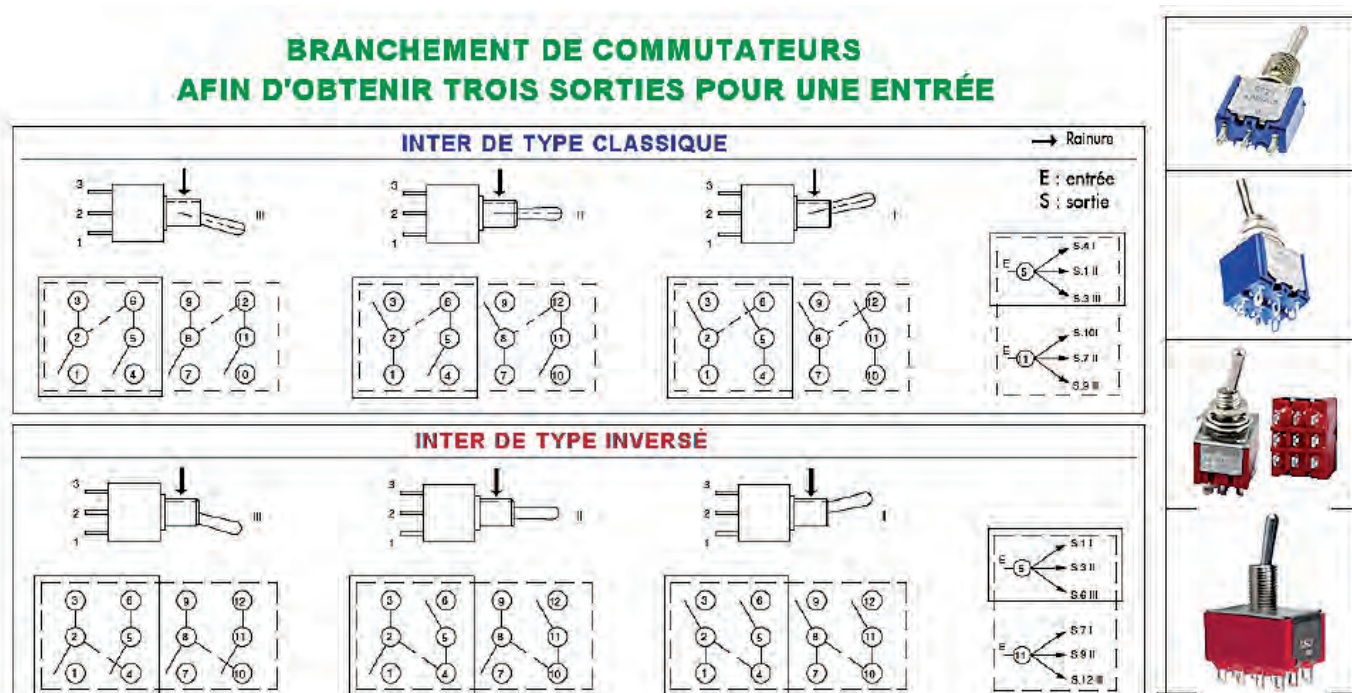


Figure 165 : Les sorties d'un chargeur dédié (6S).



Figure 166 : Un PCB positionné.

f. Annexe 6 : piloter deux canaux différents (spot et wide) avec un commutateur à 6 ou 12 plots à souder (figure 165)



D'après documentation APEM®

Figure 167 : Divers types d'interrupteurs. Unipolaire (3 plots), bipolaire (6 plots), tripolaire (9 plots), tétrapolaire (12 plots).

g. Annexe 7 : trois exemples de plans de lampes relativement simples (technologie 2015)

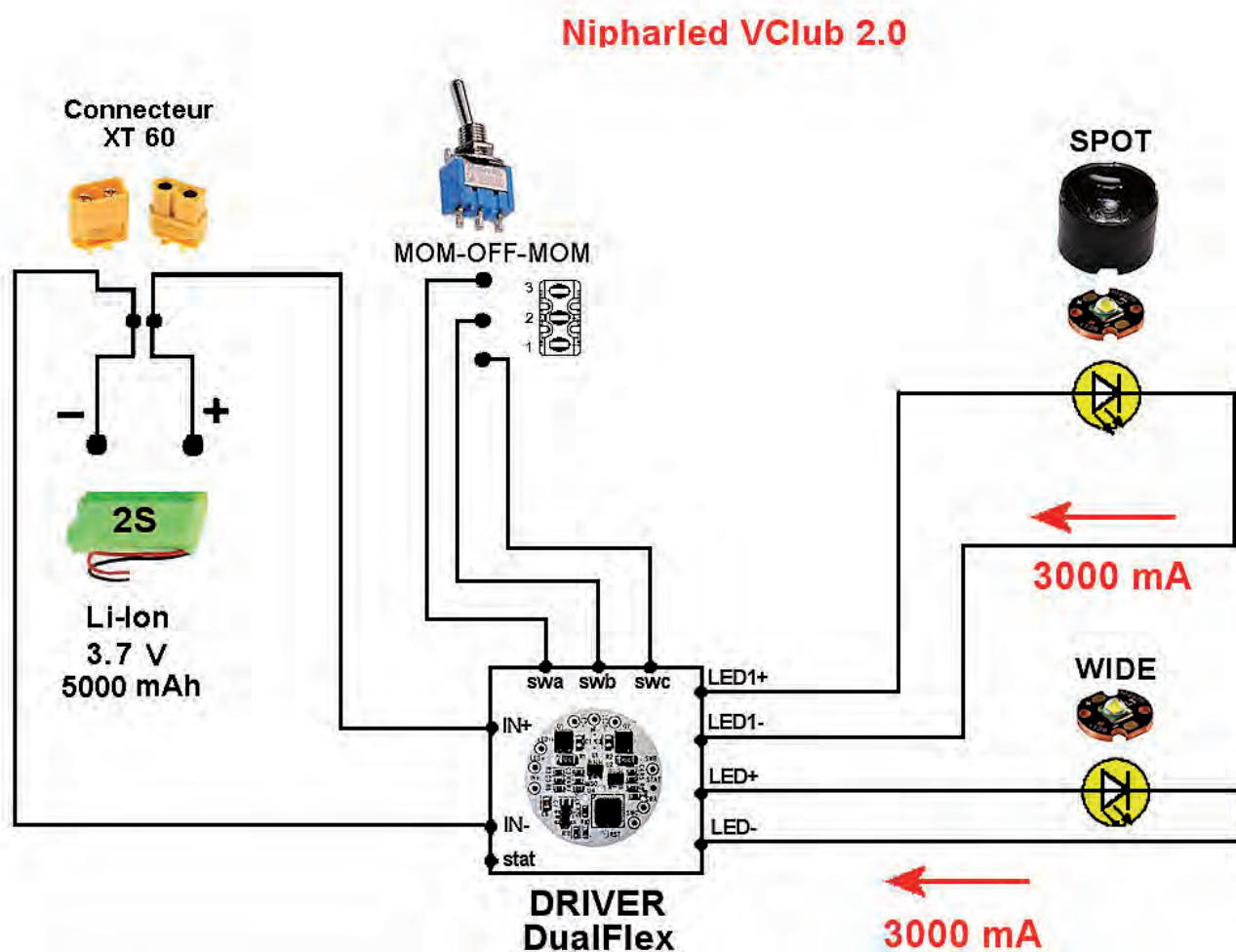


Figure 168 : « Nipharled VClub 2.0 » avec Driver linéaire à deux canaux :

1 pour le spot (focalisé) et 1 pour le wide (nu), 2 * 1 LED à 3 V, commutateur unipolaire, batterie 2P.



Nipharled VClub 3.0

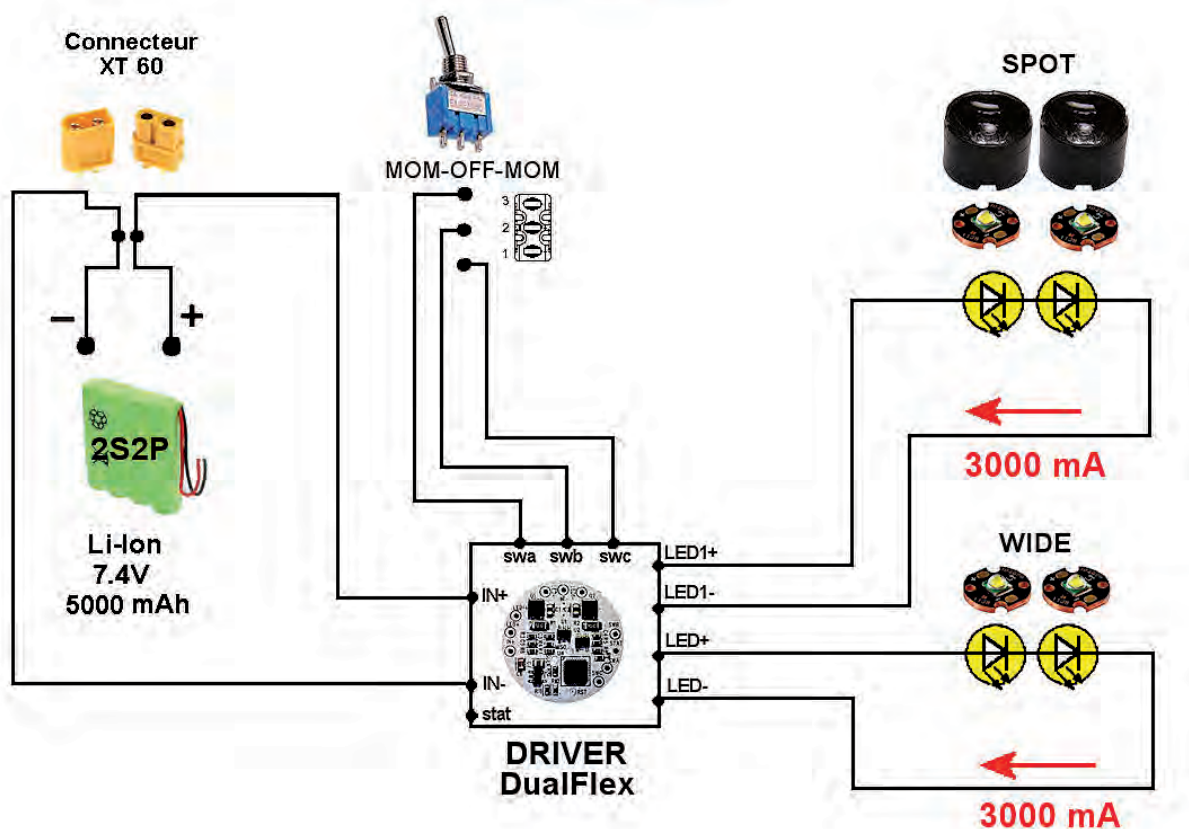


Figure 169 : « Nipharled VClub 3.0 » avec Driver linéaire à deux canaux : 1 pour le spot (focalisé) et 1 pour le wide (nu), 2 * 2 LEDs à 3 V en série, commutateur unipolaire, batterie 2S2P.

Nipharled VClub 4

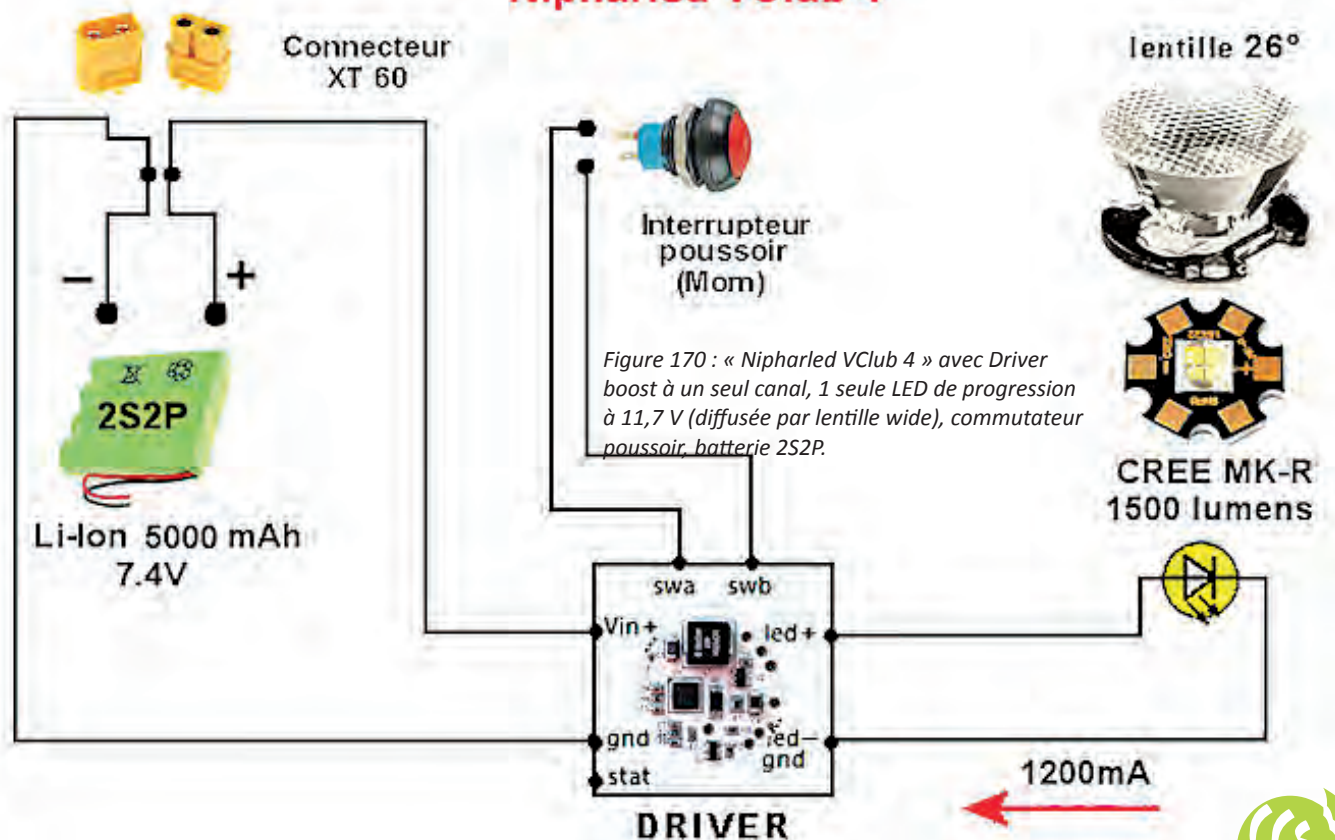


Figure 170 : « Nipharled VClub 4 » avec Driver boost à un seul canal, 1 seule LED de progression à 11,7 V (diffusée par lentille wide), commutateur poussoir, batterie 2S2P.





Scialet des Saints-de-Glace (Vercors), cliché Serge Caillault

LES LAMPES POUR LA PLONGÉE

PHILIPPE BERTOCHIO, BRICE MAESTRACCI, JEAN-FRANÇOIS BALACEY

Il y a de nombreuses façons de faire de la plongée spéléo. Ce peut être en phase d'apprentissage, en stage, en classique, en balade dans une galerie déjà découverte, pour faire de la photo ou de la vidéo, en exploration, en première, en résurgence ou en fond de trou. Chacune pourrait correspondre à des éclairages différents. La configuration classique avec deux lampes crayons correspond à un type de plongée seulement. Si on fait rapidement un tour des pratiques, on peut trouver :

- pas de lampes sur la tête mais une puissante sur la main et sur le scooter pour les plongeurs de résurgence (méthode DIR Do It Right (Bien Faire les Choses)) ;
- deux lampes sur les côtés du casque (méthode française pour les plongeurs de sources) ;
- deux lampes sur les côtés du casque et une lampe principale centrale sur le casque (méthode spéléo pour le post-siphon). La lampe frontale est utilisée en basse luminosité en siphon pour une lumière d'ambiance. Sinon, la luminosité de la lampe éblouit le plongeur par sa réflexion sur les particules en suspension dans l'eau. Pour percer l'eau chargée, on utilise les lampes latérales avec un faisceau étroit. Il y a moins d'éblouissement.

Nous allons seulement nous intéresser aux lampes mixtes, en clair les lampes qu'on utilise de part et d'autre des siphons, donc des lampes que les spéléologues « secs », non plongeurs, peuvent aussi utiliser mais qui ont une étanchéité suffisante pour la plongée. En plus des critères habituels que recherche tout spéléologue - autonomie, encombrement, poids, puissance, fiabilité/solidité, souplesse de réglages, coût – cette étanchéité est évidemment fondamentale car, si le spéléo sec se contente le plus souvent de ne passer que des voûtes mouillantes, voire de très courts siphons peu profonds, le plongeur spéléo plonge « profond », de quelques dizaines de mètres à plus de deux cents mètres. Après enquête, nous avons retenu une « short list » de 8 lampes mixtes aptes à résister aux plongées profondes. Les 2 tableaux ci-après présentent les caractéristiques habituelles, l'éclairage mesuré ou indiqué par les fabricants et l'étanchéité.

Que dire de ces lampes qui soit spécifique à la plongée ? Parlons déjà évidemment de l'étanchéité, point clé. Toutes les lampes retenues sont classées IP68 et testées entre 7 bars (Phaeton), 10 bars (CD-01) et 20 bars (Scurion). La Rude Nora 2x, qui n'est plus commercialisée, n'est pas faite pour la plongée mais était couramment utilisée sous l'eau.

L'expérience montre que, sous peine de noyade de la lampe, il faut prendre grand soin de la propreté des joints et adapter le serrage des presse-étoupes mais ce n'est pas une nouveauté pour les plongeurs.

Il faut insister sur le poids car, en plongée, la lampe sera nécessairement associée à d'autres lampes torches fixées sur le côté du casque, sécurité oblige. Pas question de se contenter d'une lampe autour du cou comme en spéléo sèche. Donc, pour ménager les vertèbres cervicales, et selon leur état, vous pourrez soit choisir une lampe avec un boîtier batterie de 4 éléments 18650 (Scurion 1500, Rude Nora 2x, CD-01) ou préférer un boîtier à 2 cellules (Sbrasa, Phaeton). Ce choix conditionne aussi l'autonomie, deux fois moindre avec un boîtier à 2 cellules. Et il y aura donc lieu d'emporter des batteries de rechange sans oublier la clé spécifique au boîtier (clé 6 pans pour Phaeton, Scurion).

Les lampes les plus répandues en plongée post siphon sont la Scurion 1500, la Phaeton Dual et la Sbrasa 1500. Chacune a ses points forts et points faibles.

On pourrait ajouter les lampes russes Ignivi, les Méandre-Technologie versions plongée, non testées début 2018, mais d'autres vont certainement encore apparaître. Au final, retenons qu'il n'y a évidemment pas de lampe idéale, chacun choisira selon ses critères propres.

Figure 171 : Lampes de plongée.

Lampe	Points forts	Points faibles
Scurion 1500	Autonomie (3 à 106 h)	Poids (661 g), prix (918 €, lampe fournie avec deux batteries 4 cellules 6,8 Ah)
Phaeton Dual	Poids (395 g) prix (520 €)	Autonomie (0,4 à 80 h)
Sbrasa 1500	Poids (279 g) prix (350 €)	Autonomie (1,5 à 48 h)



Figure 172 : Exemple de casque de plongée Casque de Philippe Bertochio au Grand Goul à Bourg-Saint-Andéol (07). Photo Florian Marécal.

Le classement IP

D'après Wikipédia : L'indice de protection (IPa) est un standard international de la Commission électrotechnique internationale relatif à l'étanchéité paru pour la première fois en 1989. Il est repris par la norme européenne EN 60529. Cet indice classe le niveau de protection qu'offre un matériel aux intrusions de corps solides et liquides. Le format de l'indice, donné par la norme CEI 60529, est IP 69 où les caractères 6 et 9 sont deux chiffres et/ou une lettre. Les chiffres indiquent la conformité avec les conditions résumées dans les tableaux ci-dessous. Lorsqu'aucun critère n'est rencontré, le chiffre peut être remplacé par la lettre X.
Par exemple, un indice de protection IP2x signifie que l'appareil est protégé contre l'intrusion de solides

supérieurs à 12,5 mm (premier chiffre), mais que son fonctionnement n'implique pas la nécessité de le protéger contre l'intrusion de liquides. On place donc un "x" à la place du deuxième chiffre, pour signifier l'inutilité de rendre ce matériel étanche aux liquides. En spéléologie « sèche », hors plongée, un niveau de protection IP67 (totalement étanche à la poussière, protégé contre les effets de l'immersion jusqu'à 1 mètre de profondeur) suffit. Toutes les lampes faites pour la spéléologie présentent ce degré de protection. Pour la plongée, c'est un niveau minimum IP68 qu'il faut rechercher (étanchéité à la poussière et à l'immersion de plus d'1 mètre de profondeur). La profondeur de test doit être indiquée. Le protocole de test peut varier selon les fabricants. Il s'effectue souvent dans un caisson sous pression, la lampe pouvant être immergée dans de l'eau.



Nom	CD-01	Méandre 2.6	Méandre 5.2	Phaeton	Phaeton Dual	Sbrasa 750	Sbrasa 1500	Scurion 1500 plongée
Fabricant	IGNIVI	Meandre-technologie	Phaethoncavingligh	Sbrasa	Scurion GmbH			
Pays	Russie	France	Grèce	Italie	Suisse			
Année de commercialisation	2016	2018	2014	2012	2011			
Nombre de LED	2	2	2	2	2			
Type de LED « large »	Cree XM-L2	Famille des XHP chez Cree	Cree XML-2 U2 3C 125°	Cree XML-L U2 125°	Cree XML-L U2 125°			
Type de LED focalisée « spot »	Cree XM-L2	Famille des XHP chez Cree	Cree XML-2 U2 3C 18°	Cree XML-L U2 36°	Cree XML-L U2 36°			
Température de couleur	Selon led choisie (2700, 4000, 5700)	6000	4750-5000 K (blanc neutre) (autres leds)	6200 K	6200 K			
CRI	65 à >90	ND	75	65	70			
Batteries	Batteries 18650 Panasonic	Batterie Ansmann 3 cellules 2,6 Ah	Batterie Ansmann 6 cellules 5,2 Ah	Batteries 2 cellules 18650 Panasonic 7,2 V 3400 mAh	Lithium-ion 4 cellules 7,2 V, 6,8 Ah (49 Wh)			
Nombre de modes	9	5	5	7	3 à 10			
Possibilité de programmation	OUI	NON	NON	OUI	OUI (24 réglages)			
Utilisation de batteries standard (ou piles)	OUI	OUI entre 7 et 12V	OUI	OUI	OUI (pile 9 V Alcaline ou Lithium en dépannage)			
Utilisation de batteries spécifiques	NON	OUI MAIS FACULTATIF	NON	OUI	OUI			
Indicateur de niveau de batterie	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI (5 leds dans le boîtier lampe)			
Autonomies annoncées (heures)	2 à 55	2 h 40 à 70 h	5 h à 140 h	0,5 à 80	2h 48 à 106 h (avec une batterie 4 cellules 6,8 Ah).			
Poids corps de lampe (grammes)	250	160	155	155	133			
Poids boîtier batteries (avec batteries) (grammes)	325	272	438	240	146			
Poids total (grammes, avec batteries fournies)	675	432	598	395	279			
Étanchéité	IP68 (test à 10 bars)	P69 (-150 m) (test à 16 bars)	250 m (test à 7 bars)	IP68	IP68			
Programmation	OUI	NON	NON	OUI	OUI			
Prix lampe complète (€) (mars 2018)	560	600 (avec batterie 2,6 Ah)	630 (avec batterie 5,2 Ah)	520	350			
Prix batteries (€) (mars 2018)	cout 4 batteries Panasonic 18650 3200 mAh environ 48	50 (2,6 Ah)	60 (5,2 Ah)	20	50			
Prix total (€) (mars 2018)	560	600 (avec batterie 2,6 Ah)	630 (avec batterie 5,2 Ah)	520	350			
Prix avec 2 ^{ème} batterie (€) (mars 2018)	608	800	840	520	400			

Caractéristiques des 8 lampes de plongée retenues

Nom	CD-01	Méandre 2.6	Méandre 5.2	Phaeton	Phaeton Dual	Sbrasa 750 lumen	Sbrasa 1500 lumen	Scurion 1500
Fabricant	IGNIVI	Meandre-technologie		phaethoncavinglight		SBRASA		Scurion GmbH
Pays	Russie	France		Grèce		Italie		Suisse
Année de commercialisation	2016	2018		2014	2014	2013		2011
Nombre de modes	9	5			5 + 2 (boost)	3 + 2 réglables	6 + 2 réglables	3 à 10
Mode progression retenu	ND	2. 300 lumens, autonomie 13 h (batterie 2.6 Ah) ou 26 h (batterie 5.2 Ah)		ND	Large, 500 mA, spot 0 %, 300 lumens, autonomie 12 h 20	moyen	Diffus moyen	large maxi, spot 0, 655 lumens, autonomie 6 h
Lumens annoncés	ND	300		ND	300	200 ou 400		655
Mode progression : total sur 4 m (lux), mesuré à une distance de 2 m	ND	277		ND	660	296	310	663
Mode progression : maximum (lux), mesuré à une distance de 2 m	ND	18		ND	166	22	23	50
Mode progression : moyenne sur 4 m (lux), mesurée à une distance de 2 m	ND	12		ND	31	14	15	32
Mode spot retenu	ND	4 (spot maxi)		ND	large 0, spot 3000 mA, 1000 lumens, autonomie 2h40	spot		
Lumens annoncés	ND	1500		ND	1000	ND		
Mode spot : total sur 4 m (lux), mesuré à une distance de 2 m	ND	1918		ND	960	ND		
Mode spot : maximum (lux), mesuré à une distance de 2 m	ND	256		ND	293	ND		
Mode spot : moyenne sur 4 m (lux), mesurée à une distance de 2 m	ND	84		ND	46	ND		
Mode spot : total sur 4 m (lux), mesuré à une distance de 10 m	ND	226		ND	ND	ND		
Mode spot : maximum mesuré à une distance de 10 m (lux)	ND	11		ND	45	ND		
Mode spot : moyenne sur 4 m (lux), mesurée à une distance de 10 m	ND	10		ND	ND	ND		

L'IMPORTANCE DE LA PUISSANCE ET DE LA FIABILITÉ DES LAMPES EN PLONGÉE, EXEMPLE DE L'OPÉRATION DE SECOURS AUX MÉES (2011)

PAR PHILIPPE BERTOCHIO

Le jeudi 1^{er} septembre 2011, la préfecture des Alpes de Haute-Provence nous réquisitionne pour la disparition d'un gendarme plongeur en opération dans le canal de Provence. Ils s'est égaré dans la galerie alors qu'il plongeait dans la zone d'entrée pour rechercher des indices. Avec Michel Ricou, le Conseiller technique départemental des Hautes-Alpes, nous arrivons en moins d'une heure trente sur place. Le commandant des opérations de secours nous fait rapidement comprendre qu'il n'a pas besoin de nous, les pompiers plongeurs de Valabre arrivant en hélicoptère. Ils arriveront une bonne heure après nous pour plonger plusieurs heures après... Je vous épargne les détails. Nous rentrons à la maison.

Le vendredi, le général de gendarmerie nous rappelle en signalant qu'il reprenait les recherches en main. Comme le COS a fait lancer une vague de crue dans le canal pour expulser, sans succès, le corps du plongeur de la galerie de 2700 mètres, il n'est pas possible de plonger tant que le courant est présent. Finalement, le samedi, toutes les conditions sont réunies. Les gendarmes plongeurs d'Oloron sont là pour nous donner un coup de main, dont notre ami Brice Maestracci. Ils seront terriblement efficaces en nous posant le fil d'Ariane dans l'axe sur les premières dizaines de mètres tout en fouillant la zone d'entrée.

Fred Martin et Laurent Tarazona plongent du côté aval. Avec Jean-Pierre Baudu, nous passons par l'amont équipés de nos deux recycleurs, d'un scooter, d'une bobine de 900 mètres de fil et de plusieurs kilogrammes d'écrous pour lester le fil. Dans l'eau, la manœuvre est simple : Jean Pierre déroule, je suis en lestant le fil. Nous partons sur l'extérieur du virage pour qu'au retour notre fil bloque sur tout obstacle. La plongée risque d'être longue, aussi je pars avec quatre lampes sur le casque, avec plus de deux heures d'autonomie

chacune. Dès la tête sous l'eau, je comprends que les lampes sont presque accessoires. La visibilité dans le bouillon ne doit pas excéder vingt centimètres. Je distingue avec peine mes doigts à cette distance. Mais le halo lumineux rouge que m'offrent les lampes est toujours rassurant. Impossible de lire les instruments, seuls les manomètres et la diode de mon recycleur sont visibles. Puisque la galerie est artificielle, nous connaissons la profondeur maximum : quatorze mètres. La quantité de gaz dans les bouteilles et l'oxygène dans mon recycleur sont des données suffisantes.

À environ deux-cents mètres dans la galerie, une de mes lampes s'éteint brutalement. J'en allume une autre. À l'oreille, j'entends le scooter de Jean-Pierre plus loin qui déroule le fil. Je mets plus de temps à faire des têtes d'alouettes pour fixer mes écrous. Beaucoup plus tard, peut-être à cinq cents ou six cents mètres de l'entrée, deux autres lampes s'éteignent. Il ne me reste qu'un seul halo. Pas question de continuer dans ces conditions. Je stoppe le scooter pour prévenir Jean-Pierre. Mais il déroule toujours et de plus en plus loin. Puis plus de bruit. À nouveau le sifflement du scooter qui semble s'éloigner et un nouvel arrêt. Difficile de savoir s'il a fait demi-tour, mais avec deux arrêts successifs, il a compris que je ne suivais plus. Je fais demi-tour avant un risque de collision. Le retour est long mais sans surprise. Dehors je suis étonné de la nuit déjà bien noire. Seules les étoiles nous éclairent. Mon casque semble aussi éclairer mieux. Finalement, deux lampes fonctionnaient encore mais la turbidité était telle que je ne voyais plus le faisceau de l'une d'elles. Jean-Pierre me rejoindra quelques minutes après en ayant déroulé huit cents mètres de fil sans succès. Le corps du malheureux gendarme sera expulsé par le courant trois jours après.



BOÎTIER SCURION NOYÉ AU PEYRAOU DE CHADOUILLET

PAR PHILIPPE BERTOCHIO

C'était lors du rassemblement que l'EFPS (École Française de Plongée Souterraine) avait organisé en Ardèche le 15 septembre 2012. Je venais d'investir, et le mot est faible vu son prix, dans la toute nouvelle Scurion plongée. J'avais déjà plongé deux ou trois fois avec, sur des siphons dont la configuration était verticale. À chaque plongée, je respectais scrupuleusement le mode d'emploi : démontage du boîtier d'accus pour la recharge, nettoyage, graissage du joint et remontage dans les règles. Je serre les vis jusqu'au contact du joint et un quart de tour pour chaque vis. Avec cela, le contact est bon sans risque d'écrasement du joint.

À Chadouillet, avec les copains dans une belle ambiance spéléo, nous partons faire un tour dans la branche « Bertrand Léger » du Peyraou. Nous sommes en balade. Les siphons s'enchaînent sans pression. On papote dans les inter-siphons tout en transportant notre matériel. Le taux de dioxyde de carbone est raisonnable. Équipés de petits volumes, nous atteignons rapidement nos cinquièmes et faisons demi-tour. Soirée autour du feu à se raconter nos histoires d'anciens combattants (spéléos). La nuit est bien entamée lorsque nous rejoignons nos duvets.

Le matin, nous attendons que le soleil nous réchauffe tout en préparant le matériel pour la plongée du jour. Ce sera la branche profonde du Peyraou. Je démonte l'arrière de la Scurion pour changer l'accu, histoire de partir avec le plein. Malheur : il baigne dans un jus immonde ! Il y a deux centimètres d'eau au fond du boîtier arrière et l'accu s'est mis en court-circuit. Il est mort. Je le retire, rince abondamment le boîtier et traite les contacts afin d'éviter l'oxydation. La motivation à plonger a disparu et je rage de devoir payer un nouvel accu à 95 euros pour une notice inadaptée à la spéléo. Avec les chocs répétés contre le plafond du laminoir, le couvercle du boîtier arrière a dû bouger et laisser entrer l'eau par petits filets. Ensuite, n'écoutant que mon expérience de spéléo, j'ai nettement serré les vis pour écraser le joint et je n'ai plus jamais eu de souci de fuite. Pour les accus, je les ai montés moi-même avec quelques soudures, du thermorétractable, une lame de cuivre et des batteries Lithium, prix de revient : moins de 30 euros. Si deux ans après, je me suis séparé de cette lampe, c'est à cause de son poids qui sollicitait beaucoup trop mes cervicales dans les parties exondées. Dommage.



EXTRAITS



Extrait sur l'éclairage du livre de EA Martel « Les abîmes : les eaux souterraines, les cavernes, les sources, la spéléologie : explorations souterraines effectuées de 1888 à 1893 en France, Belgique, Autriche et Grèce », pages 19 et 20.

Parlons maintenant de l'éclairage. Torches de résine, feux de paille, feux de bengale et pièces d'artifices de toutes sortes doivent être rigoureusement proscrits (1) ; leur fumée couvre à la longue d'une noire couche de suie les parois des grottes, et leur enlève leur principal attrait, le scintillement brillant et clair des stalagmites et stalactites : telles les cavernes de Han-sur-Lesse (Belgique) et des Demoiselles à Ganges (Hérault) sont, en plusieurs de leurs parties, encrassées pour longtemps sinon pour toujours, car le suintement finit par incruster la suie elle-même sous un dépôt de carbonate de chaux.

L'huile de naphte et les lampes à pétrole (incommodes à porter) usitées maintenant à Han-sur-Lesse sont encore beaucoup trop fumeuses.

L'éclairage électrique fixe tel qu'on l'a installé à Adelsberg (Autriche) est assurément l'idéal du genre : mais il n'est possible que dans les grottes déjà aménagées et suffisamment visitées pour permettre les dépenses qu'il entraîne.

En exploration, nous avons fini par nous arrêter à deux luminaires seulement :

1° La simple bougie stéarique, aussi forte que possible, de 3 à 4 centimètres de diamètre, au besoin fabriquée exprès, avec de grosses mèches, pour que l'extinction ne se produise pas trop facilement par suite de mouvements brusques. Contre les courants d'air et les suintements parfois très violents, il est bon d'avoir une lanterne pliante de poche, à lames de mica transparent et incassable en guise de verres ;

2° Le ruban de magnésium que l'on brûle soit à la main, soit dans une petite lampe à réflecteur et à mouvement d'horlogerie. Le prix de cette substance ayant considérablement diminué depuis quelques années et sa fumée blanche étant relativement faible et peu salissante, elle est par excellence l'agent lumineux à la fois puissant et portatif. Son usage comporte seulement deux précautions : d'abord, si on le fait consumer en le tenant à la main, il convient de ne pas laisser flamber le ruban jusqu'au bout, car la brûlure du magnésium est particulièrement douloureuse ; ensuite il importe de ne pas en user de trop grandes quantités dans les cavités de petites dimensions, parce que l'oxyde de magnésium développé par la combustion a des propriétés purgatives qui, combinées avec l'humidité des grottes, deviennent rapidement gênantes. Les Autrichiens fabriquent des torches de magnésium et de salpêtre qui éclairent merveilleusement, mais coûtent fort cher.

1. Il faut pourtant se résoudre à les employer sous des voûtes aussi colossales que celles de Saint-Canzian, qui atteignent jusqu'à 80 mètres de haut.

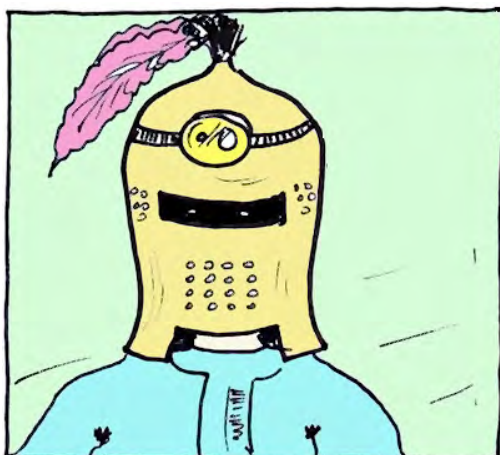


Convaincus de plus en plus, au cours de nos expéditions, que les appareils les plus pratiques sont les plus simples et les moins perfectionnés, nous avons dès la fin de notre troisième campagne renoncé aux piles électriques portatives : outre leur fragilité, elles sont encombrantes au possible, à cause de l'obligation qu'elles imposent de renouveler fréquemment le liquide chimique qui les actionne. Il faut en emporter d'embarrassantes bonbonnes de réserve, qui risquent de se casser, et de créer ainsi de sérieux embarras. Nous indiquerons cependant que la pile Trouvé (charbon et zinc) au bicarbonate de potasse, donne un bon éclairage pendant une heure et demie, et que, pour les travaux de longue haleine, tels que topographie régulière, fouilles, pêches en eau souterraine, etc., une autre pile (système Renard) à l'acide chloro-chromique combinée par M. Marcel Gaupillat, le frère de notre collaborateur, est d'une application pratique et dure de quatre à cinq heures (2). Mais pour nos rapides explorations de pure reconnaissance, la manipulation et le transport des acides se sont trouvés beaucoup trop compliqués. Les grottologues de l'avenir ne manqueront pas de trouver les perfectionnements désirables.

Des lampes de mineurs aussi nous avons essayé, sans les adopter : elles sentent mauvais, fument et salissent ; quand une goutte d'eau de suintement tombe sur la mèche et l'éteint, on ne peut la rallumer ; elles sont lourdes et imposent aussi l'adjonction d'un bidon d'huile, soit un colis de plus à descendre : or plus il y a de paquets, plus le séjour se prolonge et plus les manœuvres se compliquent. Une bougie tombée à l'eau s'essuie simplement ; en pareil cas, la lampe de mineur, avec une huile toute baptisée, est hors de service. La bougie enfin peut se tenir plus commodément à la main, entre les dents, ou fixée au chapeau, quand il s'agit de descendre à l'échelle ou de parer les chocs contre les murailles dans un puits étroit.

Il suffit de prendre garde d'enflammer les cordes qui vous retiennent ; il est vrai qu'au contact des roches humides elles deviennent rebelles à la combustion. On voit que magnésium et stéarine sont bien préférables à tout le reste.

2. En voici la constitution : sept éléments composés chacun d'un bâton de zinc et d'un mince cylindre d'argent plongeant dans autant de tubes en verre, que l'on remplit (à raison de 0,4 litre par tube) du liquide suivant : eau 2 litres ; acide chromique 0,750 g, acide chlorhydrique 0,245 litre, acide sulfurique 0,225 litre. — L'intensité lumineuse est de 12 bougies et la durée de 4 à 5 heures : au bout de ce temps on est forcé de changer et les zincs et le liquide, qui est très corrosif.





Extrait sur l'éclairage du livre de Casteret « Mes cavernes », pages 200 à 206

L'ÉCLAIRAGE

Ainsi équipé de pied en cap (et jusqu'au bout des ongles), impatient de faire connaissance avec les cavernes, le spéléologue ne pourrait encore rien faire car il lui manque l'essentiel. Il lui manque sa lanterne sans laquelle on ne peut pénétrer dans le royaume des ténèbres. On a donné des ailes et un parachute à l'aviateur, une embarcation de sauvetage et des bouées au marin, de l'air au scaphandrier ; qui donc donnera au spéléologue ce qui lui fait le plus défaut ; qui le dotera d'un luminaire convenable ? Cette question primordiale est encore dans l'enfance. Trop souvent, l'explorateur fait figure de ver luisant dans les ténèbres épaisses, et le meilleur éclairage proposé n'est, jusqu'à présent, qu'un pis-aller.

Ce chapitre est pourtant d'une importance capitale et doit être l'objet d'une grande attention et de toute la sollicitude du pionnier souterrain. De la caisse où sont entassés nos appareils d'éclairage nous extrairons en premier lieu le moins perfectionné, le moins lumineux, mais le plus sûr de tous : les bougies. Certes, la bougie ne dispense qu'une flamme insignifiante qui aveugle le porteur et n'éclaire guère que ses pieds ; mais c'est l'éclairage de secours par excellence, celui qui est toujours prêt, qui brûle jusqu'au bout, jusqu'à la dernière parcelle et qui ne craint rien, pas même l'eau. Une bougie qui tombe dans l'eau a l'avantage de flotter et pourra être rallumée après simple essorage. On devrait toujours avoir sur soi une bougie de secours pour parer aux pannes possibles des lampes à acétylène et électriques qui, elles, constituent l'éclairage normal en cours d'exploration.

Les lanternes à acétylène, dont je possède plusieurs modèles, ont l'avantage de fournir un éclairage de longue durée et économique. Une poignée de carbure de calcium donne une lumière satisfaisante pendant dix à douze heures. Mais dès qu'interviennent des escalades de parois ou les séances aux échelles de corde, la lampe à acétylène, préalablement éteinte puis fixée au ceinturon, doit céder la place à l'éclairage électrique frontal. La lampe de casque est alimentée par une pile sèche (placée dans une poche du vêtement) par l'intermédiaire d'un fil qui descend le long de la jugulaire et pénètre sous le col de la combinaison, n'offrant ainsi aucune prise aux accrochages. L'éclairage frontal a l'avantage de libérer les deux mains et de diriger le faisceau lumineux dans l'axe du regard. Une lampe électrique de poche ou une torche avec foyer variable est aussi très utile et permet d'éclairer des gouffres en profondeur ou de scruter des voûtes élevées jusqu'à près de quatre-vingts mètres.

Que l'ampoule électrique soit alimentée par une pile de poche ou une pile ménage, ce mode d'éclairage est assez dispendieux, son intensité décroît assez rapidement et sa durée est trop limitée pour en faire un usage continu dans les grottes.

Voilà pourquoi notre préférence va à la lampe à acétylène que chacun s'applique à perfectionner, dont on remanie constamment le mode d'attache, le réflecteur et le calibre des becs. Elle est la compagne fidèle avec laquelle on avance, on explore, on découvre sous terre. Elle illumine des parois, des enfilades de galeries, des salles vierges qui n'avaient jamais été éclairées et qui retombent dans les ténèbres éternelles après son passage furtif. Partout et toujours on la tient et on la manœuvre avec égard, prenant plus soin d'elle que de soi-même, car c'est d'elle que dépendra de bout en bout le succès de l'expédition, et c'est grâce à sa lueur que l'on traversera les labyrinthes obscurs pour reparaître à la surface de la terre.

Malgré ces précautions, la lanterne s'éteint parfois à la suite d'un heurt, d'une chute, d'un courant d'air, et il faut la rallumer.

Cet incident, si banal en d'autres circonstances, revêt sous terre, si l'on est seul, un caractère de solennité dont ne se défendront pas les plus aguerris. Il faut avoir connu ces ténèbres absolues, ce silence lourd, qui subitement vous écrasent et semblent pleins de menaces dès que meurt la flamme de la lampe, pour comprendre la gravité de la situation de l'insensé qui, en cette occurrence, se trouverait sans allumettes ni briquet. Il est indispensable d'être bien muni contre une telle éventualité ; c'est pourquoi la musette qui, à l'instar de la lanterne, nous suit partout doit renfermer au premier rang des accessoires : allumettes et briquet. Il sera prudent, en outre, d'avoir toujours sur soi un autre briquet et d'autres allumettes, cela afin de pouvoir parer à la perte, toujours possible, de la musette, soit qu'elle tombe dans une crevasse, dans un puits, soit qu'on l'égare.

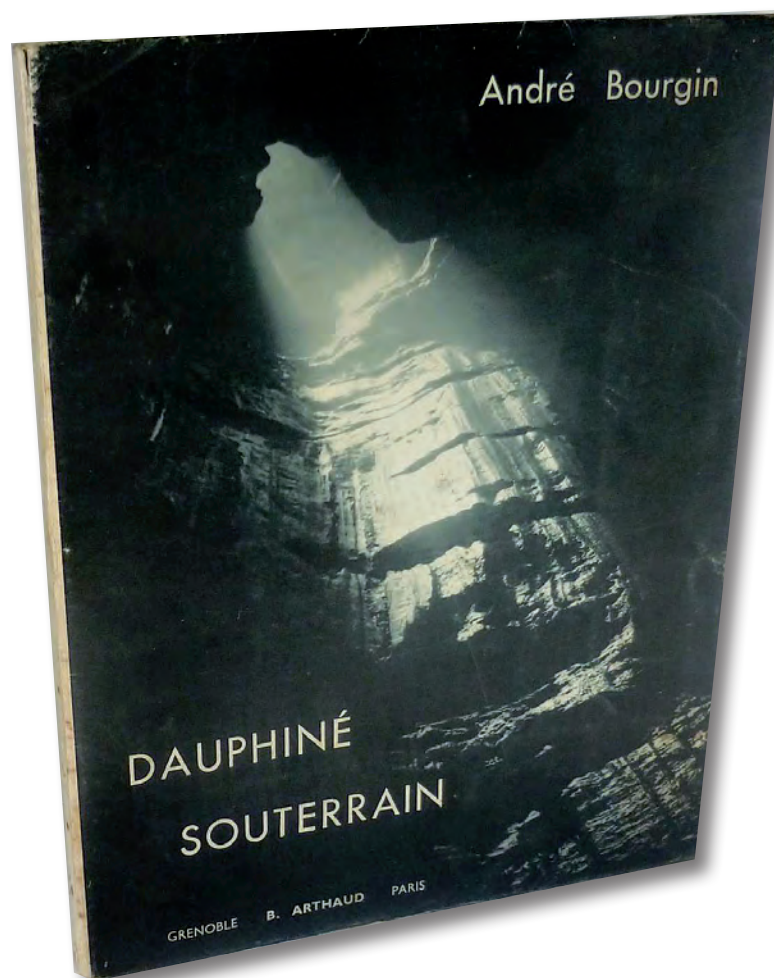
Le briquet sera placé à portée de la main dans une poche de la combinaison et attaché à l'aide d'un lacet de cuir, et les allumettes seront enfouies dans une poche intérieure. Ces dernières, qui ne sont là qu'en cas de mauvais fonctionnement des briquets, ne servent pour ainsi dire jamais ; elles constituent un luminaire de secours pour les cas graves. Notre collègue de Joly, qui a étudié, conçu et mis au point avec un soin extrême et une grande expérience l'équipement du spéléologue, conseille avec raison les seuls briquets actionnés automatiquement et non par contact direct des doigts sur la molette, car on a presque toujours les mains mouillées ou terreuses. Quant aux allumettes, il

serait peu indiqué de les laisser simplement dans leur boîte d'origine où elles deviendraient vite inutilisables. Une boîte métallique ou un étui de caoutchouc étanches s'imposent pour les préserver. Je possède deux boîtiers parfaits, absolument identiques mais de provenance différente. Durant des années j'avais utilisé des étuis dont l'imperméabilité n'était pas parfaite lorsqu'un jour, passant à Saint-Jean-de-Luz devant un magasin d'articles de natation, je vis, placés en vedettes, des étuis à cigarettes pour nageur. Une notice illustrée montrait une baigneuse entrant dans l'eau, ayant à la ceinture de son maillot un de ces étuis. Une deuxième photo montrait la même nageuse assise sur un rocher éloigné du rivage et fumant béatement une cigarette extraite de la boîte garantie rigoureusement étanche. L'objet peint de couleurs vives me parut remarquablement conçu et je décidai sur-le-champ d'en acheter deux pour les affecter au rôle de boîtes à allumettes pour les grottes. Mais il s'agissait d'une création nouvelle, d'un modèle exclusif ; le magasin était un magasin de luxe, et je dus payer un prix exorbitant un seul de ces boîtiers.

Quelques mois plus tard, je vis dans un grand magasin de Paris, non plus en place d'honneur mais en un amoncellement anonyme, un tas de ces mêmes étuis qui avaient manqué leur destinée et étaient soldés, bien au-dessous de leur valeur réelle, au prix de 3 fr. 50 pièce ! Sic transit...

Mes boîtes d'allumettes étanches me donnent toute sécurité dans les grottes, car si les briquets sont d'un maniement rapide et pratiques en général, ils ont parfois des pannes d'essence, de pierre ou de molette ; tandis que les allumettes, à condition d'être sèches, constituent le luminaire de réserve le plus sûr.





Extrait sur l'éclairage du livre d'André Bourgin « Dauphiné souterrain », 1942, page 5

L'éclairage est individuel et comporte une lampe électrique à foyer réglable fixée sur le casque, un câble solide la relie au boîtier placé dans une poche. La lampe électrique peut être remplacée par un brûleur à acétylène ou à butane. On emporte une bougie de secours.



Figure 173 : Matériel utilisé par Bourgin. Source : Dauphiné souterrain (1942) p.52 On note la lampe acétylène modèle « ÉTOILE » de chez MERCIER (Mercier & fils à Nancy) « type 45° » (bec orienté à 45° avec réflecteur) et l'éclairage électrique.

Figures 174 et 175 : Illustrations extraites de l'ouvrage montrant deux types de frontales (gaz et électrique).

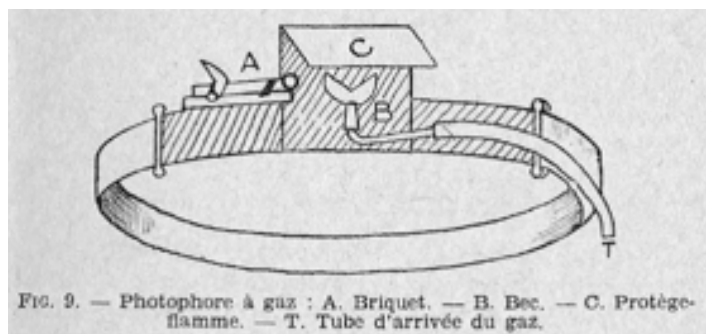


FIG. 9. — Photophore à gaz : A. Briquet. — B. Bec. — C. Protège-flamme. — T. Tube d'arrivée du gaz.

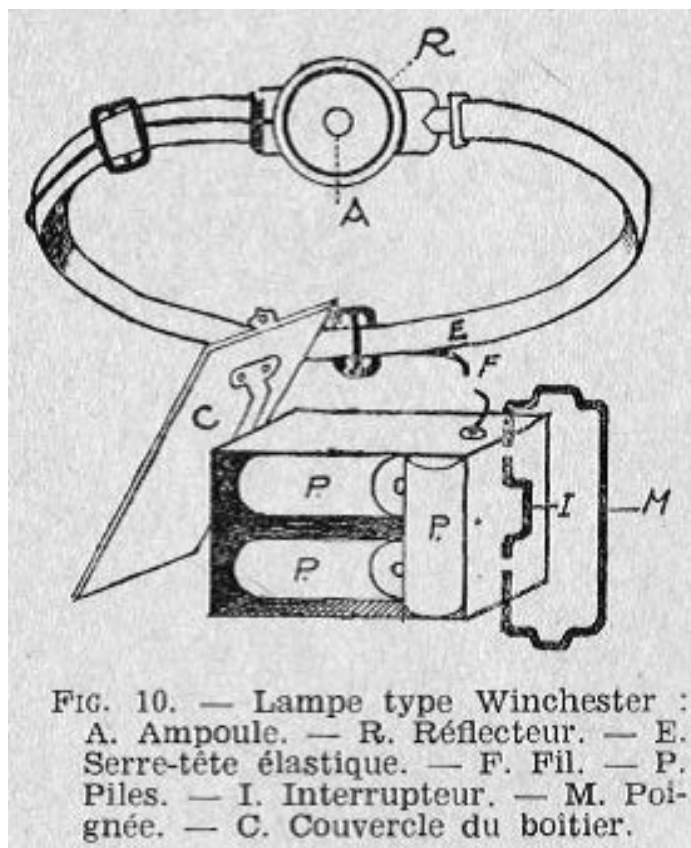


FIG. 10. — Lampe type Winchester : A. Ampoule. — R. Réflecteur. — E. Serre-tête élastique. — F. Fil. — P. Piles. — I. Interrupteur. — M. Poignée. — C. Couvercle du boîtier.

Extrait sur l'éclairage du livre de Henry P. Guérin « Spéléologie, manuel technique », édition 1951, pages 26 à 31

2. — MATÉRIEL INDIVIDUEL

Le matériel individuel sera placé en partie dans les poches de combinaison et sur l'explorateur et en partie dans un sac à dos ou de petites sacoches. Il comporte, en dehors des objets strictement personnels, l'éclairage, la nourriture et du petit matériel d'exploration.

A. - Éclairage. La question lumière est primordiale pour le spéléologue ; elle a été résolue de différentes façons par les explorateurs :

1°) LAMPES FRONTALES. Absolument indispensables pour permettre la liberté totale des mouvements et l'usage des deux mains, elles doivent être placées de façon à ne pas éblouir et à assurer l'éclairage dans la direction du regard. Il en existe plusieurs types :

a) Photophores à essence. Ce système comporte une sorte de lampe « Pigeon » qui donne à peu près la lumière d'une bougie et dure environ vingt fois plus (R. de JOLY). Il est lourd à porter et sa flamme est assez fragile.

b) Photophores à acétylène. On pourra employer, comme source de gaz, soit le générateur à carbure (lampe à acétylène ou dispositif spécial), soit une bouteille de gaz dissous, de petites dimensions, accrochée à la ceinture et reliée au photophore par un tube simple et solide en caoutchouc ou mieux en « durite » plus résistante à l'écrasement ou la compression accidentelle.

La bouteille de gaz comprimé pèse 1.200 gr. et fournit 12 heures d'éclairage (R. de JOLY). Son emploi est assez coûteux et nécessite des rechargements assez fréquents.

c) Photophores à butane. Le butane donne une lumière moins vive, à flamme assez fragile, mais il a l'avantage d'être moins onéreux et de nécessiter une charge moins lourde : un tube fournissant 20 heures d'éclairage pèse environ 500 grammes. Le réservoir de gaz liquéfié se porte à la ceinture, relié au bec par un tube souple. Le bec sera soit un bec « Auer » avec manchon et, de ce fait, assez fragile, soit un bec papillon nécessitant une double détente (R. de JOLY). Comme les précédents ce modèle comporte un briquet placé à proximité du bec et facilitant l'allumage (Fig. 9). Indépendamment de leur encombrement, tous ces systèmes ont l'inconvénient de dégager une chaleur qui, au bout de quelques heures,

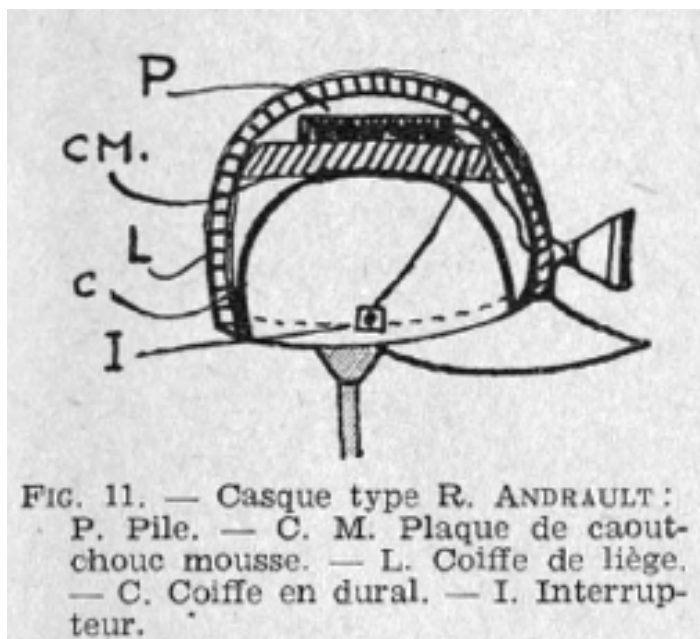


Figure 176 : Illustrations extraites de l'ouvrage montrant la pile placée dans le fond du casque en aluminium.

peut être incommode. De plus, sauf transformations diminuant de beaucoup l'éclairage, ces photophores ne sont pas protégés des chutes d'eau ni des courants d'air.

d) Photophores électriques à piles. Notre préférence personnelle va aux lampes électriques frontales. Le modèle le plus pratique est la lampe « Winchester » à trois éléments (piles de 1,5 volts) (Fig. 10). Le boîtier peut se porter dans une poche de la combinaison ou accroché à la ceinture ; il est relié par un fil souple au photophore avec réflecteur à foyer réglable permettant d'obtenir soit un pinceau de lumière à éclairage intense mais de surface réduite, portant jusqu'à cent mètres de distance, soit une lumière diffuse donnant un éclairage semblable à celui des photophores à gaz.

Bien que le prix de revient soit relativement élevé, ce mode d'éclairage a de multiples avantages : il ne craint pas les courants d'air et peu les chutes d'eau et il est moins lourd et moins encombrant que ceux qui utilisent des gaz combustibles.

R. ANDRAULT utilise pour l'éclairage électrique un dispositif spécial : la pile est placée dans le fond d'un casque d'aluminium (Fig. 11) entre une plaque de caoutchouc mousse (C. M.) et un revêtement intérieur de liège (L). Tous les fils sont à l'intérieur de la coiffe et l'interrupteur (I) placé sur le côté du casque.

On aura toujours soin d'employer des ampoules d'un voltage proportionnel à celui de la source d'énergie et de bien veiller à emporter des ampoules de rechange identiques, sinon on risque de « griller » les ampoules ou de ne pas obtenir de lumière.



e) Photophores électriques à accumulateurs. L'éclairage électrique, avec emploi d'accumulateurs ne semble pas être encore rentré dans la pratique courante. Les accumulateurs pour être utilisables par les spéléologues doivent être légers, peu encombrants, réversibles en tous sens et assurer un éclairage d'une durée qui doit varier entre 8 heures et 30 heures au moins ; encore dans ce cas ne sont-ils pas à envisager pour les très grandes explorations.

Il en existe dans le commerce un certain nombre de modèles dont certains ont donné satisfaction au cours d'explorations souterraines. Ils sont cependant en général ou trop lourds, ou trop encombrants, ou trop fragiles, ou d'une durée d'utilisation trop courte, (sans rechargement) pour être utilisés de façon courante. Les électrodes inoxydables ou insulfatées qui sont employées dans ces modèles rendent d'autre part leurs prix de vente élevés.

Tout laisse présumer toutefois que ce matériel est appelé à rendre de grands services aux spéléologues lorsque d'ici peu sans doute, de nouveaux progrès auront été réalisés dans leur conception.

2°) ÉCLAIRAGE DE SECOURS ET ÉCLAIRAGE POUR STATIONS PROLONGÉES.

Indépendamment de la lampe frontale il est nécessaire de toujours disposer d'un éclairage de secours ainsi que de bougies qui ont l'avantage de ne pas se mouiller. Pour la montée ou la descente aux échelles, il est utile d'avoir, indépendamment du photophore frontal, une lampe électrique fixée sur la poitrine et dont on se servira si, pour une raison quelconque (chute de pierre ou d'eau par exemple) l'éclairage frontal faisait défaut. Aux relais où de nombreuses manœuvres sont à prévoir : assurance, envoi de matériel, il est nécessaire d'être bien éclairé et utile de disposer d'une lampe à carbure qui éclairera l'ensemble de l'équipe et économisera les lampes individuelles.

3°) ILLUMINATIONS. Si l'on désire éclairer intensément une grande salle ou un puits pour obtenir une vue d'ensemble on pourra employer du magnésium, des feux de Bengale ou des poudres éclairantes.

a) Magnésium. Le magnésium s'utilise en ruban ou en poudre. Le ruban est placé dans un étui, un peu semblable à celui des mètres à ruban, qui permet de la faire brûler sans danger ; le ruban s'éteint de lui-même dès que la partie poussée hors de l'étui est consumée. Ce dispositif évite des brûlures douloureuses et profondes. La poudre de magnésium, conservée dans des boîtes bien étanches, sera disposée en traînée plus ou moins longue, sur une plaque métallique ou toute autre matière l'isolant de l'humidité ; on l'allumera de préférence au moyen d'une mèche.

b) Feux de Bengale. On ne doit employer que des feux de Bengale spéciaux, sans fumée (feux rouges ou verts). Les torches éclairantes Ruggieri, un peu semblables, donnent une lumière blanche éclatante ; elles existent en deux modèles : le grand d'une durée de cinq minutes ; le petit d'une durée d'une minute et demie. Ce dernier semble préférable car le grand modèle pèse relativement lourd (400 grammes) et il est encombrant. Ces torches sont cependant quelque peu fumigènes.

c) Poudres éclairantes. Indépendamment du magnésium il existe des poudres éclairantes à base de gomme-laque et de nitrate de strontium (flamme rouge) ou nitrate de baryum (flamme verte) ; ce sont les seules sans fumée. Elles sont composées de 90 % de nitrate et 10 % de gomme-laque passés au tamis n° 40. Ces poudres sont vendues en boîtes de 100 gr. et 500 gr. ; cette dernière présentation semble mieux convenir que celle de 100 gr., quantité par trop minime pour un éclairage des voûtes hautes.

L'emballage paraffiné est fragile et il est préférable de placer les poudres dans des boîtes métalliques bien étanches. On prendra pour leur allumage les mêmes dispositions que celles indiquées ci-dessus pour la poudre de magnésium,



The adventure of TechTonique :



Figure 177 : Screw-in bulb « Triled ».

Here is what Michel Demierre, one of the two founders of TechTonique writes:

“The first“ LedLampe ”dates from 2001. It was preceded many years before by LED bulbs for retrofitting existing lamps, including the Duo Ledlight 5 and 10 (5 and 10 white LEDs for the Petzl Duo), the Triled (three LEDs on screw cap), ...

We used the first LED caving light bulbs in 1999 (Nichia developed the first white LED in 1996). It was an extra-terrestrial light, very bluish and with performances without comparison with the current LEDs. However, it could stay on for days, which was a revolution compared to filament bulbs. I still remember the cavers that we crossed with our LED bulbs and without aceto ... !!! ... :-)

The first 1W LED bulb for DUO to replace halogen was marketed in 2005 (Power LedLight).



Figure 178 :
Screw-in bulb « Power LedLight ».

The LedLampe was followed by a version II machined from aluminum. It is the first "diffuse" lamp. Note that there was an aluminum border to avoid lighting the nose and the rim of the helmet ... ;-)

Version III was also in a machined housing, with optics rather focused on the LED (LED + separate optics).

Version IV is in a commercial electronic unit. It has the specificity of operating with lithium batteries and rechargeable batteries. It has had some commercial success, the big success being the LED bulbs for the DUO, the TriLed and the Power LedLight.

We had developed a V version which never came out, but which was remarkable. It had the specificity of having asymmetrical lighting, with inclined LEDs.

Here ! A great adventure! "



Figure 179 :
LED lamp model «LedLampe IV ».

Evolution of Scurion lamps

Here is what Rolf Siegenthaler, one of the two founders of Scurion, writes:

"The idea behind the" Scurion "was born in early 2006 in a small group of colleagues. There was a kind of "kick-off meeting" on March 7, 2006 when my (then "future") partner, Martin Melzer had launched a first series of 100 lamps.

The first invoices date from the end of January 2007 -> this is the start of marketing.

The precursor of the Scurion was the "Radon" with only 1 LED (but for the first time a "powered"!), Martin's project of the year 2000 which was well ahead of its time.

But even before that, he was doing the "Polaris" with 10 LEDs, conventional at the time.

It was a fiasco for him ...

My modest contribution was to convince the brilliant engineer to create a company so that we can finally make a good lamp accessible to the largest public of cavers. Martin had shown me the very first prototype of the "Scurion" in my garden in spring 2006 and immediately I had a little "forced" to found Melzer & Siegenthaler. At the beginning a general partnership then a Sarl and finally Scurion Sarl. "

The first Scurion lamps are called P4, P7 and K, named after the LEDs of Seoul SC. Over time, depending on changes, by changing LEDs and components, they become the 700 (entry-level), 900 (mid-range), 1200 (with warm LEDs) and 1500 (high-end), with many options for caving, diving, orienteering, running, cycling, mine exploration, film, photography, outdoors (pulka, mountaineering, hiking, geocaching, hunting, fishing) and professionals (mining, rescue, security, "working in dark places").



Figure 180 : The Radon lamp.
Photo Rolf Siegenthaler.



Figures 181 & 182 : the Polaris lamp.
Photo Rolf Siegenthaler.



Figure 183 : Scurion 700.



Figure 184 : Scurion 900.



Figure 185 : Scurion 1500.



BIBLIOGRAPHY

- {1} Antenne 2 (1984). Carnets de l'aventure, grottes et cavernes. Sélection du Reader's Digest, pp. 25-28.
- {2} Attout Jacques (1955) : Les hommes de la Pierre Saint Martin, couverture.
- {3} Balacey Jean-François (2011) : L'éclairage à LED en spéléologie. Spelunca, n°121, pp. 51-58.
- {4} Balacey Jean-François (2016) : Evaluation de l'éclairage des éclairages à LEDs pour la spéléologie. Spelunca, n°143, pp. 38-45.
- {5} Bedford Mike (2013) : State-of-the-Art Overview of Caving Lamps (Part 1). BCRA Cave Radio & Electronics Group, journal 84, décembre 2013, pp. 17-20.
- {6} Bourgin André (1942) : Dauphiné souterrain. Arthaud. Texte p. 51, photo p. 52.
- {7} Cadoux Jean, Lavigne Jean, Mathieu Géo, Potié Louis (1955) : Opération -1000. Arthaud. Photo p. 80 et 176.
- {8} Casteret Norbert (1961) : Ma vie souterraine. Flammarion. Illustration de couverture.
- {9} Casteret Norbert (1940) : Mes cavernes. Librairie académique Perrin. Matériel d'exploration, l'éclairage pp. 200-206.
- {10} Casteret Norbert (1949) : Ce que j'ai vu sous terre. Photo p. 18, entrée de la grotte de Coume Nère (Haute-Garonne).
- {11} Chevalier Pierre (1948) : Escalades souterraines. Susse.
- {12} Clément Sylvestre, Vennarecci Pierre (2003) : Réseau Félix Trombe – Henne Morte. Massif d'Arbas – Pyrénées centrales. CDS31, p. 274, 276, 284, 288, 310.
- {13} Darne Fabien (2001) : Du carbure de calcium à l'acétylène. Spelunca n°83, pp. 28-33.
- {14} De Joly Robert (1929) : Comment on descend sous terre : Manuel du spéléologue. Gap.
- {15} Demierre Michel (2003) : Les LEDs blanches : La nouvelle lumière spéléo. Spelunca n°89, pp. 12-16.
- {16} Dobrilla Jean-Claude, Marbach Georges (1973) : Techniques de la Spéléologie Alpine.
- {17} Dressler Bruno, Minvielle Pierre (1979) : La spéléologie. Denoël.
- {18} Durand Robert (2006) : La Nova, le nouvel éclairage du spéléologue. Spelunca n°104, pp. 28-30.
- {19} Fécherouille Fabien (2015) : La mort annoncée de la lampe à acétylène : et après ? Mémoire instructeur fédéral de spéléologie. Cahier de l'EFS n°17.
- {20} Griotel Yves (1959) : Pyrénées souterraines. Flammarion. Photo face p. 94, face p. 127, face p. 175.
- {21} Guérin Henry-Pierre (1944) : Spéléologie. Manuel technique. Le matériel et son emploi. Les explorations. Collection de la revue « Camping ». Les éditions J. Susse.
- {22} Groupe Spéléologie Valentinois (2008) : Grotte de la Luire, un siècle d'explorations, 1896-1996. L'aventure continue. Page de couverture (reconstitution de la première descente d'Oscar Decombaz à la Luire le 14 août 1898. La vire de -30 mètres. Acteur Max Thilbert. Cliché MG).
- {23} Hamel Patrice (2015) : Grandeurs et misères des LEDs. Spelunca, n°139, pp. 36-38.
- {24} INRS (2013) : Éclairage artificiel au poste de travail. Fiche pratique de sécurité. ED85.
- {25} INRS (2009) : Éclairage des locaux de travail. Aide-mémoire juridique. TJ13.
- {26} Joffre Jacques (1992) : Norbert Casteret, explorateur d'abîmes. Milan. Couverture, p. 106.
- {27} Joffre Jacques (1993) : Au cœur des Pyrénées, l'aventure souterraine. Milan, p. 6, 27, 71, 86, 153.
- {28} Limagne Rémy (2003) : L'éclairage aux LEDs : des idées lumineuses, Spelunca n°90, pp. 15-16
- {29} Marbach Georges, Rocourt Jean-Louis (1986) : Techniques de la Spéléologie Alpine (2ème édition).
- {30} Martel Edouard-Alfred (1894) : Les abîmes : les eaux souterraines, les cavernes, les sources, la spéléologie : explorations souterraines effectuées de 1888 à 1893 en France, Belgique, Autriche et Grèce. Pp. 19-20.
- {31} Minvielle Pierre (1967) : la conquête souterraine. Arthaud, Sempervivum.
- {32} Minvielle Pierre (1977) : Grottes et canyons. Les 100 plus belles courses. Denoël.
- {33} Queffelec Corentin (1968) : Jusqu'au fond du gouffre. Stock. pp. 56-57.
- {34} Schneiker Henry (2004) : Le livre blanc des lampes à LEDs. Speleonic n°24 Vol. VI #4,. Traduction : Dominique ROS, <http://souterweb.free.fr/>, mars 2017
- {35} Sebillé Bernard, Steger A. (2005) : L'éclairage individuel souterrain à travers le temps. Le carnet du collectionneur - Février 2005. pp. 6-7 ; Mars 2005, pp. 6-7.
- {36} Siffre Michel (1981) : Grottes, gouffre et abîmes. Hachette, p. 13, 44, 144, 150.
- {37} Soubiranne Alain (2004) : La Nova de Speleo Technics. Spéléo magazine n°49, pp. 28-29.
- {38} Wright Mark, Shone Robbie & autres (2014) : Gouffre Berger, l'esprit d'équipe. Vertebrate Publishing, p.89.





THANKS

1923/5000

Thank you to the authors, speleologists and manufacturers who loaned or supplied their lamps and / or answered my many questions: Daniel André (photos of Martel's lantern, information on Martel); Samuel Azemard (CAF Montpellier) (information on ASN lamp photos); Eric Bachmann (battery autonomy, smartphone luxmeter application); Marion Balacey (graphic aid); Michel Bouthors (scans from Guerin manual); Serge Caillault (photographs); Claire Gérard, Olivier Petzl, Paul Petzl (Petzl) (supply of lamps, technical and historical information, photographs of old lamps); Jean Charbonnel (ABIMES) (loan from Ariane); Jean-Paul Delacruz and Bernard Sebillé (information on old lamps, photographs of lamps); Michel Demierre (TechTonique) (history of TechTonique lamps); Michel Esperet (Spéléo-club de Saint-Céré) (supply of stearin candles); Nathalie Goffioul (Documentation Center - Union Belge de Spéléo) (scans of Alpine Speleology Technique, 1973 edition); Pavel Katkov (Ignivi); Elisa Le Conte des Floris (ABIMES) (diving information); Georges Marbach (history of mixed lighting); Jean Marc Mattlet (The Researchers of Wallonia); Leon Pikros, Komninos (Phaetoncavinglight) (ready Phaeton Dual lamp); Françoise Prud'homme and Fabien Darne (photo by De Joly); Michel Ribeira (first layout); Cathy Rosier (scan article Nova Speleomagazine); Jean-Jacques Rosier (scan article Spelunca 83); Philippe Sage (Méandre Technologie) (loan of Méandre 1.0 lamp); Rolf Siegenthaler (Scurion) (history of Scurion lamps, photographs); Ivan Yotov (Pulsarlights) (technical exchanges); Alberto (Sbrasa) (loan of Sbrasa 750 and 1500 lamps); Florian Desserée, Ghislaine Arzur (Stoots) (technical exchanges); Daniel Bize, Denis Motte (Traquetlight) (TRAQ1500 lamp ready); Cosimo Torre (ASCO) (loan of old helmets).

And especially :

Dominique Ros, for his patience in proofreading, his drawings, his article on the home made caving front, his extensive information on the history and electronics of LEDs, links with Souterweb. And his unwavering support from start to finish.

Gael Monvoisin (head of the EFS Technical Study Group), for his technical assistance, contacts and support throughout the writing.

Rémy Limagne, for his attentive and meticulous proofreading.





WARNING

The world of LED headlamps is evolving at great speed, much faster than the work of volunteers. The reason is simple : some work to run their small business and get a salary, while others make the best of their free time ...

As a result, part of this article will likely be out of date by the time it is released. In order to try to update it if possible we advise you to consult the following web page :

http://souterweb.free.fr/boitaoutils/eclairage/Nipharled%20IV/les_lampes_du_marche.htm

Credits photos :

Background photo of the front cover: Claire with Scurion lighting at gouffre de Vau, Doubs (photo Rémy Limagne)
Photo of the back cover : Benoît with APEX lighting by Princeton (photo Jean-François Balacey)

Thumbnails of the fourth cover (top to bottom):

Catherine with éclairage Scurion (photo Jean-François Balacey)
Dominique with Light 1777 lighting (photo Yoann Suberviolle)
Isabelle with Ultra Vario lighting by Petzl (photo Rémy Limagne)
Jean-François with ASCO lighting (photo André Balacey).

Production: Éditions Gap
Rue du Marais, 73190 Challes-les-Eaux, tél. 04 79 72 67 85

ISBN : 978-2-741706-37-3
EAN13 : 9782741706373
Legal deposit 4th quarter 2019

Printed in France in November 2019

Second edition, revised and corrected, January 2020





What is more important than light for the speleologist?

In this publication, we briefly retraced the history of underground lighting over the ages and provided some keys to better choosing or manufacturing its LED lighting. A plethora of solutions exist to enlighten, both among many manufacturers and among electronic cavers. We have tried here to help the speleologist wisely choose his main LED lighting commercially, or make it himself, mainly on the basis of the lighting actually measured but also on other practical criteria: reliability, weight, price, ergonomics. He will thus be able, in the light of the measurements carried out and feedback, to best adapt his choice to his objectives and his means in order to make a more sustainable purchase.



9 782741 706373



Ecole Française
de Spéléologie