

Figure 1. Parement aval du barrage de Castillon avec l'ombre incurvée de la corniche. © EDF / G. Allain.



À l'heure des barrages

Financé par EDF, le plus grand cadran solaire du monde – 13 000 m² – conçu par Denis Savoie et Roland Lohoucq a été inauguré il y a près de un an sur le barrage de Castillon, au sud de la France sur le Verdon. L'exposition « À l'heure des barrages » qui s'achèvera le 29 août 2010 au Palais de la découverte retrace l'aventure de cette ingénieuse réalisation unique au monde.

PAR **KAMIL FADEL**, RESPONSABLE DU DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Les visiteurs du Palais de la découverte peuvent suivre l'histoire du barrage de Castillon depuis sa construction jusqu'à nos jours à travers l'exposition qui se tient sur le balcon de l'astronomie et qui présente de manière plus générale l'hydraulique et l'électricité en s'appuyant sur de nombreuses photographies, vidéos, maquettes... Les barrages et les cadrans solaires font partie des constructions de l'Homme remontant à l'Antiquité. Les

premiers barrages ont vu le jour il y a près de 6 000 ans, le plus ancien connu à ce jour étant celui de Jawa, dans le désert jordanien, 12 km au sud de Amman. Aujourd'hui en ruine, il faisait à l'époque 5 m de haut pour 80 m de long. Quant au gnomon, un bâton planté dans le sol dont l'ombre permet d'établir une division du temps, son usage remonterait – selon l'encyclopédie Britannica – à 5 500 ans, mais cela est contestable. Quoi qu'il en soit, la découverte de la description d'une horloge solaire datant



Figure 2. Parement amont du barrage de Castillon. L'usine hydroélectrique d'où s'échappe l'eau du Verdon est visible au pied du barrage. © EDF / G. Alloin.

du règne du pharaon Séthi 1^{er} (fils de Ramsès I^{er}), montre que ce genre d'horloge était déjà en usage il y a 3 300 ans. C'est en 2009, à l'occasion de l'Année mondiale de l'astronomie, célébrant les 400 ans de la découverte des satellites de Jupiter par Galilée (1564-1642), qu'EDF finance un projet grandiose, mariant ces deux inventions millénaires en un barrage-cadran solaire.

Genèse du projet

Transformer le parement d'un barrage en cadran solaire est une idée séduisante qui a germé il y a plusieurs années dans l'esprit de Denis Savoie et de Roland Lehoucq⁽¹⁾. S'agissant d'une opération difficile et coûteuse, il fallait attendre le moment propice pour la proposer. L'occasion s'est

présentée lorsque les Nations unies ont déclaré 2009 Année mondiale de l'astronomie. Aussi, fin 2008, le projet a-t-il été exposé au service hydraulique d'EDF, lequel a accueilli l'idée avec beaucoup d'enthousiasme et s'est montré prêt à financer l'opération. Dans un premier temps, sept « candidats », tous des barrages en forme de voûte orientés vers le sud, ont été examinés. Parmi ces derniers, celui de Castillon s'est révélé parfait et cela pour plusieurs raisons (fig. 1 et 2). Premièrement, son emplacement dans une région ensoleillée et touristique en faisait un site idéal pour la réalisation d'une telle curiosité. Ensuite, son parement bien lisse, dépourvu d'évacuateur de crue, le rendait parfaitement adapté pour y inscrire les lignes horaires du cadran solaire. Enfin, une heureuse coïncidence faisait de 2009 l'année du soixantième anniversaire de la mise en service du barrage de Castillon, construit par le grand barragiste André Coyne (1891-1960) concepteur de

(1) Denis Savoie dirige le département d'astronomie-astrophysique du Palais de la Découverte ; Roland Lehoucq est astrophysicien au CEA Saclay.





Figure 3. Photographie prise depuis le pied du barrage. Au premier plan on voit la partie cylindrique, immédiatement suivie de la portion en « limaçon de Pascal ». Plus haut, on distingue la frontière à partir de laquelle la forme devient parabolique. © D. Scavoie.



70 barrages dans 14 pays, dont le barrage de Tignes, aujourd'hui encore le plus haut barrage voûte de France avec ses 181 m. En janvier 2009, tout était donc réuni pour entamer le projet sans tarder...

Forme du barrage

DE LA THÉORIE...

L'étape préliminaire avant de débiter l'étude du tracé des lignes horaires consistait à déterminer la forme exacte du parement aval sur lequel ces lignes devaient être dessinées. À première vue, on pourrait penser que sa forme est cylindrique. En réalité, si le parement amont est effectivement une portion de cylindre vertical, le parement aval possède une géométrie bien compliquée, divisée de bas en haut en trois parties, visibles sur la photographie prise depuis le pied du barrage (fig. 3). Il n'est cylindrique que dans sa partie inférieure, sur 45 m de hauteur depuis sa base située à la cote 765 – soit à 765 m d'altitude – jusqu'à la cote 810 (fig. 4). De cette dernière jusqu'à la cote 850, l'intersection du parement aval avec des plans horizontaux donne des

courbes qui ne sont ni des arcs de cercles, ni des branches de paraboles, ni des branches d'ellipses... mais des branches de... « limaçons de Pascal » dont l'équation générale est de la forme $a + b \cos \varphi$. À chaque cote, son limaçon de Pascal, les constantes a et b dépendant de la cote justement (cela de la cote 810 à 850). De la cote 850 à la cote 880 correspondant au sommet – ou crête – du barrage, le parement aval possède une surface en forme de parabolicoïde, dont nous épargnons au lecteur l'équation précise. Bien entendu, toutes les équations relatives aux formes théoriques des différentes parties de l'ouvrage existent dans les archives et ont été consultées. Cependant, avant d'entamer les calculs relatifs au cadran solaire, il fallait connaître précisément la forme réelle du parement aval et déterminer de combien elle s'écarte de sa forme théorique donnée par les équations.

... À LA PRATIQUE

La détermination de la forme réelle du parement aval fut effectuée par le service de topographie d'EDF – dépendant de la DTG (Division technique générale) – qui mit en

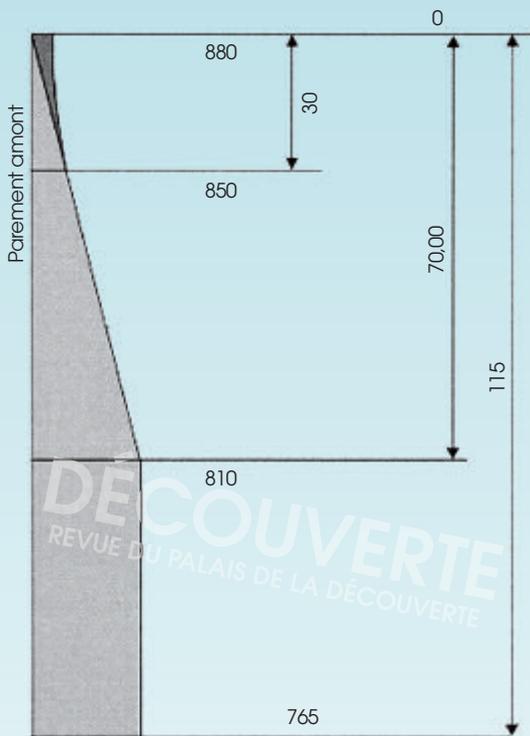


Figure 4. Coupe verticale du barrage. Le cadran solaire est tracé entre les cotes 810 et 880.

© D. Savoie, d'après A. Coyne.

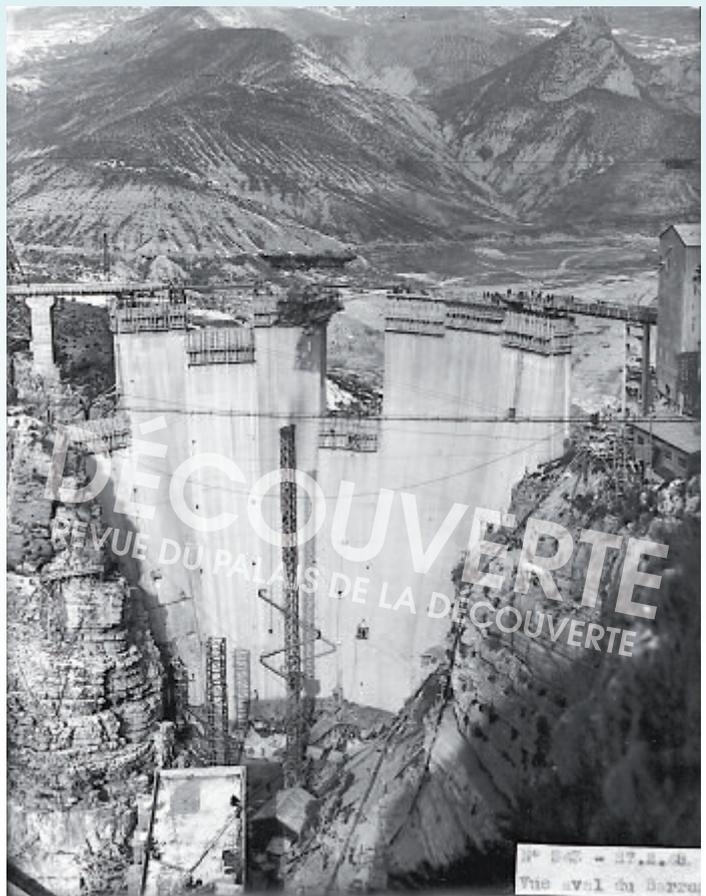
Figure 5. Le barrage en construction en 1948 vu de l'amont. Au premier plan, on voit le pont qui enjambait le Verdon. © EDF.

Figure 6. Le barrage en février 1948 vu de l'aval. Globalement, le parement ne s'écarte en moyenne que de 2,4 cm de la surface théorique, ce qui témoigne de l'excellent travail des ingénieurs et des ouvriers lors de la construction de l'ouvrage qui s'est étalée de 1942 à 1948. En fonction de la température et du niveau d'eau dans le bassin de retenue, le barrage se dilate et/ou se déplace de ± 2 cm. © EDF.

œuvre la technique de « lasergrammétrie ». Cela consistait à employer un laser pour scanner à la résolution centimétrique le parement aval « seulement » dans sa partie au-dessus de la cote 810, la partie cylindrique en dessous de cette cote n'ayant pas été retenue pour le tracé des lignes horaires. Le lasergrammétrie fournit ainsi un nuage très dense de points avec leurs coordonnées précises. Un autre paramètre, fondamental pour le cadran solaire, établit également par le service de topographie, fut l'orientation géographique du parement aval, une mesure qui révéla que l'axe du barrage était légèrement orienté vers le sud-est. Ces mesures montrèrent de manière stupéfiante la précision centimétrique avec laquelle le barrage a été édifié (fig. 5 et 6).



© EDF / DR.



© EDF / DR.



Figure 7. C'est à partir de cette photographie, prise le 15 juin 2008, qu'est venue l'idée d'utiliser l'ombre incurvée du parapet et de son encorbellement pour indiquer l'heure solaire. © D. Savoie.

Figure 8. Principe du cadran à corniche illustré sur une feuille enroulée et convenablement graduée. Il n'est pas tout à fait 9 heures. © G. Baillet.



Le cadran solaire

À l'origine, Denis Savoie et Roland Lehoucq prévoyaient pour le cadran solaire un style droit horizontal d'environ 20 à 25 m et de 1 m de diamètre dont l'extrémité de l'ombre projetée sur le parement du barrage devait indiquer l'heure solaire. Malheureusement, l'examen d'une photo prise en juin 2008 lors d'un séjour dans la région durant les vacances, réserva une mauvaise surprise : une ombre incurvée provenant du bord supérieur du barrage lui-même, plus précisément du parapet et de son encorbellement, se projetait sur le parement. Cette ombre allait-elle « parasiter » l'ombre du style, voire la couvrir totalement, rendant ainsi impossible la lecture de l'heure sur le cadran et anéantissant le projet ? C'est en réfléchissant à ce problème que D. Savoie eut l'idée d'éliminer purement et simplement le style et de repérer l'heure grâce à la position de l'ombre incurvée elle-même, une position qui varie justement avec l'heure... et la date (fig. 7) ! C'était une idée ingénieuse, mais encore fallait-il s'assurer de sa pertinence. Une étude de faisabilité fut réalisée par le gnomo-



Figure 9. Principe du cadran à corniche appliqué au barrage : la corniche (en mauve) engendre à la surface du barrage des ombres incurvées en fonction des saisons. L'ombre du haut correspond au solstice d'hiver, celle du milieu aux équinoxes et celle du bas au solstice d'été. Il est possible de faire passer une courbe (en rouge), appelée enveloppe, tangente à ces trois ombres. © D. Savoie.

niste Gérard Baillet, ingénieur en retraite. Il confirma le bien-fondé de l'idée grâce à des simulations numériques réalisées à l'aide de POV-RAY, un logiciel libre permettant notamment de calculer et de reproduire l'ombre d'un objet quelconque éclairé par une source fictive. Cette solution s'appuyant sur les ombres



Figure 10. Relevé topographique de la partie haute du barrage avec une coupe de l'encorbellement. © EDF.

Figure 11. On voit ici l'ombre du parapet se projeter sur le bourrelet à gauche tandis qu'au milieu il commence à être éclairé. Cela signifie que sur la voûte du barrage, une partie de l'ombre est due au parapet, l'autre au bourrelet. © D. Savoie.



incurvées s'imposa, car EDF fit savoir que l'installation d'un immense style de 25 m soulevait des problèmes insurmontables. Exposons à présent de manière plus précise le principe de ce cadran solaire inédit, de nouvelle génération, ou « cadran à corniche » (fig. 8).

LE PRINCIPE DU « CADRAN À CORNICHE »

Cela se conçoit, à une même heure prise à différentes dates correspondent différentes ombres incurvées. Pour une même heure, mettons 15 heures, il existe ainsi dans l'année 365 ombres incurvées différentes. Par la pensée, représentons-nous toutes ces ombres « 15 heures » sur le parement. Elles définissent une « ligne enveloppe », une ligne courbe que l'on peut tracer de sorte qu'elle soit tangente à toutes les ombres « 15 heures ». Appelons cette ligne « la ligne enveloppe 15 heures » (fig. 9). On comprend qu'en dessinant la ligne enveloppe de chaque heure, on obtienne un cadran solaire dont les lignes horaires sont justement les lignes enveloppes : pour connaître l'heure, il suffit de regarder l'ombre

incurvée et de repérer laquelle des lignes lui est tangente.

UNE DIFFICULTÉ

La solution des lignes horaires enveloppes était séduisante, mais elle allait bientôt se révéler plus subtile que ce qui avait été pensé au départ... En effet, l'examen de la coupe de l'encorbellement (fig. 10) laissait entrevoir une difficulté inquiétante due à la présence d'un « bourrelet » en saillie au pied du parapet. La photographie (fig. 11) confirmait l'inquiétude pressentie : elle montrait qu'effectivement le parapet et le bourrelet masquaient chacun la lumière, et qu'en conséquence l'ombre projetée sur le parement résultait de la conjugaison des deux ombres. Soulignons ici que s'il n'y avait eu que le parapet (comme c'était le cas sur le barrage d'origine), le tracé des lignes horaires n'aurait posé aucune difficulté importante. Mais la présence du bourrelet en saillie, dont l'ombre parasite celle du parapet, rendait la théorie des lignes horaires difficile et soulevait des questions délicates (fig. 12). L'heure peut-





Figure 12. Sur cette photographie prise durant l'hiver 2009, il est extrêmement difficile de savoir où se trouve le point de jonction entre l'ombre du parapet et l'ombre du bourrelet dans l'ombre incurvée. © D. Savoie.



Figure 14. Photographie de la ligne 11 heures tracée ici temporairement. On remarque bien l'ombre descendante du bourrelet éclairé qui vient toucher la ligne vers son extrémité gauche (nous sommes au mois de mai). © D. Savoie.

→ → →

elle être indiquée par la seule ombre du bourrelet ? Dans l'ombre résultante, quelle est la partie due au parapet et celle due au bourrelet ? Répondre à ces questions nécessitait d'établir la théorie de l'ombre du parapet puis celle du



Figure 13. Vue modélisée du barrage depuis le côté amont. La courbe verte représente l'ombre du parapet à la surface du barrage ; l'ombre mauve celle du bourrelet. L'ombre résultante est donc en haut du barrage celle du bourrelet puis, à partir du point d'intersection, celle du parapet. © D. Savoie.

bourrelet et de regarder ligne horaire par ligne horaire ce qui se passe lorsqu'ils sont éclairés par le soleil.

EN PRATIQUE

Dans la pratique, l'ombre sur le parement est la plupart du temps la résultante de deux ombres qui se chevauchent (fig. 13), leur point de jonction étant indéterminable à l'œil nu. L'ombre du bourrelet ne joue un rôle que dans la partie « haute » du parement, l'ombre du parapet prenant ensuite le relais. Quant aux lignes horaires, à part deux, elles dépendent toutes exclusivement de l'ombre du parapet. La ligne 11 heures, la plus haute des lignes, dépend intégralement de l'ombre du bourrelet, quelle que soit la date (fig. 14). Cette ombre, presque rectiligne, descend lentement pour finalement toucher la ligne 11 heures. La ligne midi, est la plus « vicieuse » de toutes : de la mi-octobre à la fin février, c'est l'intersection de l'ombre du parapet et de celle du bourrelet qui indique l'heure, tandis que le reste du temps, c'est l'ombre du bourrelet.

TESTS ET VÉRIFICATIONS

Après la mise au point de la théorie complète du cadran solaire sur le barrage, il fallait passer à l'étape des vérifications pour tester la théorie. Heureusement, le parement aval comporte six fenêtres qui ont joué le rôle de repères pour effectuer les tests. Plus précisément, grâce au relevé de



Figure 15. Ombre du parapet 5 minutes avant son passage théorique au coin inférieur gauche de la fenêtre d'accès, soit 9 h 05 min 46 s temps légal, le 22 avril 2009.

Figure 16. Ombre du parapet à l'instant de son passage prévu théoriquement, sur le coin inférieur gauche de la fenêtre d'accès, soit 9 h 10 min 46 s temps légal, le 22 avril 2009. On notera le parfait accord entre la théorie et la pratique.

Figure 17. Ombre du parapet prise 5 minutes après l'instant du passage théorique, soit 9 h 15 min 46 s temps légal, le 22 avril 2009. Désormais la fenêtre est complètement éclairée. © D. Savoie.



Figure 18. André Coyne photographié de dos devant le barrage de Castillon le 4 juin 1952. C'est grâce à l'examen de l'ombre incurvée de la corniche que cette photographie a pu être horodatée : il est 9 h 58 min temps légal. A. Coyne décède en juillet 1960, bouleversé par la rupture, quelques mois plus tôt, du barrage de Malpasset (près de Fréjus) qu'il avait conçu et dont la mise à eau avait eu lieu en 1954. © A. Coyne et J. Bellier.

lasergrammétrie, il était possible de déterminer avec précision les coordonnées (x, y, z) d'un point particulier, comme l'intersection de deux arêtes d'une fenêtre par exemple, puis de calculer à quelle heure l'ombre sur le parement allait passer par ce

point. Si l'heure prévue était correcte, il était raisonnable de penser que la théorie du cadran l'était aussi (fig. 15 à 17). Signalons ici que c'est grâce à cette méthode que la célèbre photographie de André Coyne prise le 4 juin 1952 a pu être « horodatée » (fig. 18).





Figure 19. Alpiniste en plein travail. Il scelle sur le parement des blocs de lave émaillée et les chiffres des heures. © EDF / G. Allain.

Figure 20. Photographie de l'inauguration. © D. Savoie.



On voit sur la photographie que l'ombre est incurvée vers l'est, indice que cette prise a été effectuée le matin. L'examen montre en outre que l'ombre passe au-dessus de deux fenêtres d'accès : la 2 (à droite sur la photographie) et la 4 (juste sous l'encorbellement). Le calcul montrait cependant une anomalie inquiétante et incompréhensible : l'ombre calculée passait bien au-dessus de la fenêtre 2 mais pas exactement au-dessus de la fenêtre 4. Renseignement pris, le parapet haut de 2,5 m à l'époque, a été rehaussé par la suite de 52 cm pour atteindre sa valeur actuelle. Après intégration de cette correction, la théorie indique que la photographie a été prise à 9 h 58 min 31 s heure légale des montres à cette époque.

RÉALISATION

Après validation de la théorie à travers de très nombreux tests effectués principalement en avril 2009, il a fallu passer à l'étape de la réalisation du cadran solaire, c'est-à-dire procéder au traçage des lignes horaires sur le parement. En réalité, dès la mi-avril 2009 les coordonnées des lignes horaires

étaient envoyées aux topographes pour la mise en place de lignes provisoires, matérialisées à l'aide de cordes fixées sur le parement par des alpinistes. Après quelques corrections et ajustements début mai les coordonnées définitives des lignes horaires étaient établies. Aidés des topographes, les alpinistes se remirent alors au travail pour tracer les lignes en « pointillé » en fixant au parement des blocs de 20 kg de lave émaillée de 100 cm sur 20 cm (couleur ocre pour les heures du matin, verte pour les heures de l'après-midi – fig. 19). L'inauguration eut lieu le samedi 20 juin 2009 en présence de nombreuses personnalités (fig. 20). Depuis, le plus grand cadran solaire du monde, d'une conception tout à fait originale et inédite indique l'heure solaire de 6 h à 18h avec une précision de deux minutes (fig. 21). Afin de mieux apprécier le travail effectué pour la réalisation de ce cadran solaire et de se familiariser avec l'électricité d'origine hydraulique, nous recommandons une visite de l'exposition ouverte jusqu'au 29 août 2010. K. F.

Merci à Denis Savoie pour les discussions et la fourniture de documents qui ont permis la rédaction de cet article.



Figure 21. Photographie du cadran solaire le matin le jour du solstice d'été : il est quasiment 9 heures au Soleil. © D. Savoie.