

Article rédigé en collaboration avec Denis Savoie

Texte Denis Savoie © Photo François Bocqueraz

La nef solaire de Tavel Nord A9

Sculpteur : Odile Mir
Gnomoniste : Denis Savoie
Ingénieur : Robert Queudot
Octobre 1993



Google Maps Photos de Situation

Denis Savoie a calculé en 1993, la **nef solaire**, un des plus grands cadrans solaires du monde, il est situé sur l'aire d'autoroute de l'A9. Ce cadran est composé de quatre voiles dont la plus haute culmine à 17 mètres ; sa masse globale est de 240 tonnes.

Denis Savoie décrit son chef Œuvre ainsi :

« La sculpteur Odile Mir a imaginé dans les années 1980 une nef solaire dont elle a réalisé une maquette qu'elle m'a présentée en 1988. J'y ai apporté des changements afin que l'ensemble des quatre « voiles » puisse fonctionner avec deux styles polaires indépendants des surfaces. J'ai aussi fixé les paramètres des faces (ou voiles) et les dimensions de l'ensemble, de façon, d'une part que le futur cadran ait la même architecture globale qu'Odile Mir avait imaginée, et que, d'autre part, il fonctionne quasiment du lever au coucher du Soleil sans interruption. L'heure solaire se lit sur trois faces, inclinées et déclinantes : la face n° 1 sud-est ($D = -43^\circ$, $z = 70^\circ$), la face n° 2 quasi occidentale ($D = 98^\circ$, $z = 71^\circ$) et la face n° 3 sud-ouest ($D = 50^\circ$, $z = 63^\circ$). Il s'agit donc de trois cadrans solaires – sans compter ceux au sol – qui fonctionnent avec des styles polaires dits à « centre inaccessible » puisque l'intersection des surfaces avec les styles est fictive. Le midi solaire se lit sur les faces n° 1 et n° 3 ; le style n° 2 projette une ombre sur les faces n° 2 et n° 3. On notera l'effet provoqué par la brisure des lignes horaires au niveau de l'intersection des faces n° 2 et n° 3.

Parmi les nombreuses difficultés de gnomonique posées par ce cadran, celui de l'intersection des faces a donné lieu à un intéressant problème de trigonométrie sphérique. Deux plans d'inclinaison et d'orientation différentes déterminent une intersection (ou arête) dont la pente et l'orientation sont fonction des paramètres de chaque plan. Soient (fig. 1) D la déclinaison gnomonique de la normale K à un plan incliné de distance zénithale z , et D' la déclinaison gnomonique de la normale K' de l'autre plan incliné de distance zénithale z' . Appelons I l'inclinaison de l'arête avec le sol et ω la déclinaison gnomonique de la projection de l'arête au sol.

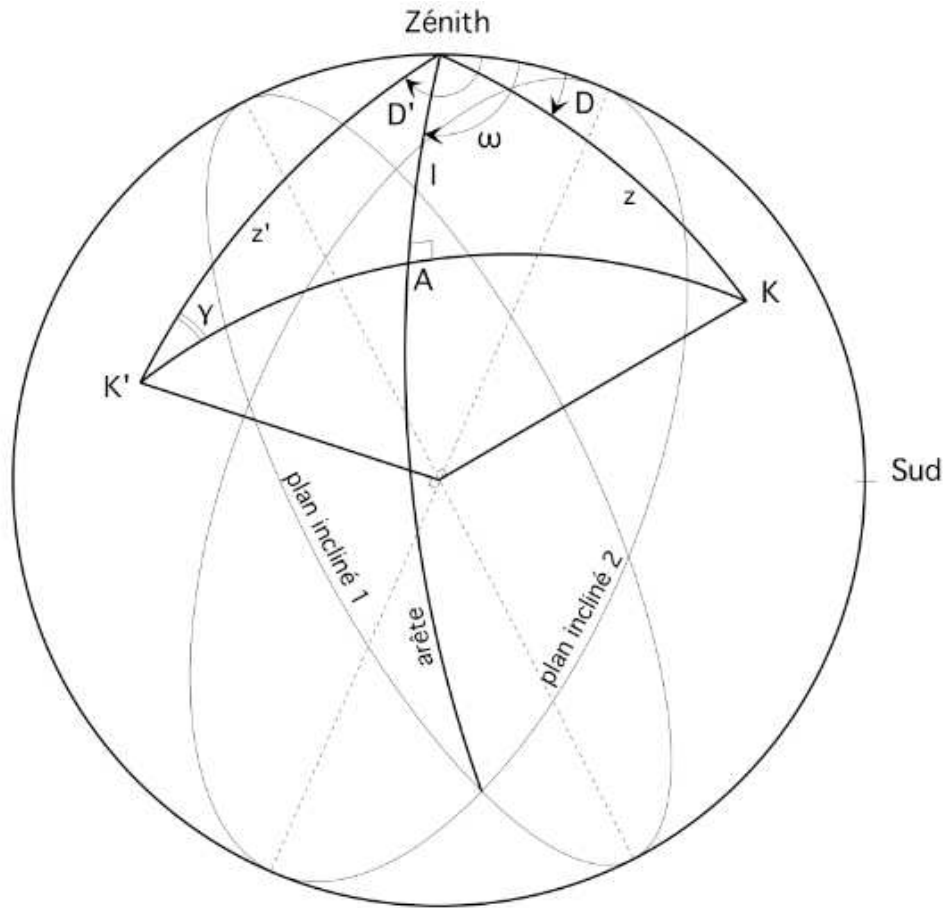


fig.1

On calcule successivement :

$$\tan \gamma = \frac{\sin (D' - D)}{\sin z' \cotan z - \cos z' \cos (D' - D)} \quad (1)$$

$$\tan \eta = \frac{\sin (D' - D)}{\sin z \cotan z' - \cos z \cos (D' - D)} \quad (2)$$

$$\sin I = \sin z' \sin \gamma; \quad (3)$$

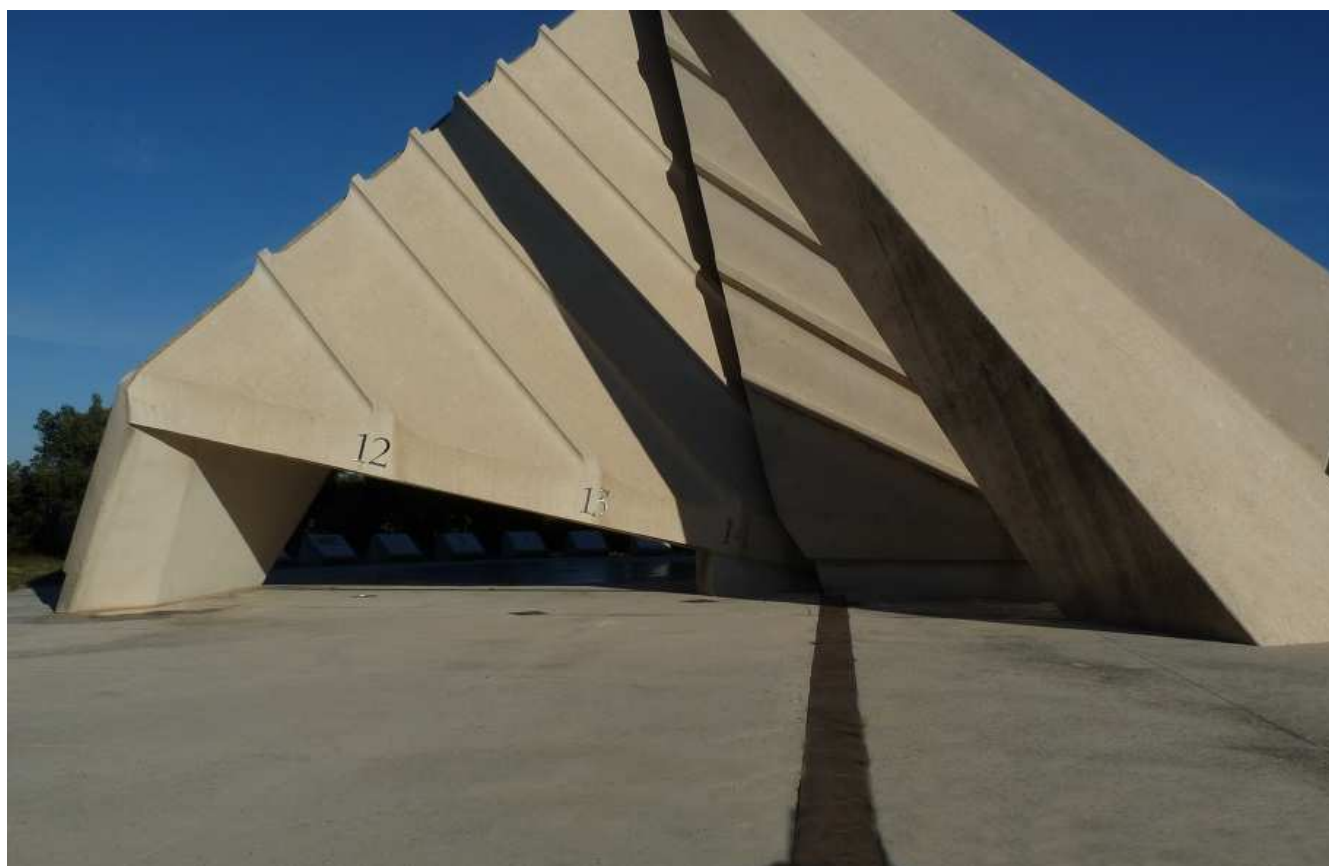
$$\tan (\omega - D) = \cotan \eta \sec z. \quad (4)$$

On notera que γ et η sont les angles de l'arête, comptés dans le plan, avec le sol. L'arête principale du cadran de Tavel est celle qui résulte de l'intersection des faces n° 1 et n° 2. Les formules précédentes donnent une inclinaison $I = 43^\circ 18' 18''$ et un azimuth de la projection au sol de cette arête $\omega = + 26^\circ 56' 14''$.

Les formules utilisées pour calculer le cadran de Tavel sont celles du chapitre VI de La Gnomonique, c'est-à-dire à la fois les coordonnées rectangulaires et polaires de l'ombre d'un style sur un plan incliné et déclinant. Après avoir testé le tracé des lignes horaires sur deux maquettes à l'échelle 1/31, l'ensemble des coordonnées fut transmis à l'ingénieur Robert Queudot (†) qui réalisa les calculs considérables de stabilité de l'ensemble de l'ouvrage. Les travaux commencèrent à l'automne 1992 et durèrent un an.



Face 1



Arrête de jonction entre les faces n°2 et n°3 : la brisure crée une rupture dans l'éventail horaire.



Face 2 et 3



Face 1 et 2 avec les 2 styles polaires prismatiques



Au dos du cadran, Denis Savoie a fait placer une fresque au sol montrant les constellations zodiacales.



Denis Savoie a également calculé le plus grand cadran solaire du monde au barrage de Castillon 04 - Alpes de Haute-Provence. Ce cadran couvre une surface de 13000 m². Plus récemment, il a conçu le cadran solaire de l'INES – Le Bourget du Lac - 73 Savoie

Le Cadran solaire de l'INES



Nord-Est (Photo 1) **Le cadran solaire occupe le mur courbe en béton brut de 520 m².**

Nord-Ouest



(Photo 2)

Le bâtiment de l'INES a une surface de 7000 m^2 ; il est implanté non loin de Chambéry dans la zone « Savoie Technolac » près du lac du Bourget¹. Sa façade principale, orientée vers le Nord, est un voile de béton courbe de plus de 500 m^2 de surface, haut de 9,60 m et long d'environ 52 m (Photo 1).

Si le projet de Michel Rémon et Frédéric Nicolas prévoyait dès l'origine d'habiller ce voile Nord par un immense cadran solaire muni d'une mire réfléchissante, il ne pouvait être question de donner une idée précise du tracé et du fonctionnement car une étude minutieuse était nécessaire. En effet, la structure du bâtiment de l'INES, avec sur son toit une imposante écope inclinée et recouverte de capteurs thermiques, tout comme l'implantation géographique -(le fond d'une large vallée - avec vers l'Est le Mont Revard et vers l'Ouest le Mont du Chat, font que le futur cadran solaire ne serait pas simple. La seule certitude que l'on avait, c'est qu'il serait à réflexion, autrement dit c'est une tache de lumière projetée par un miroir qui indiquerait l'heure et certaines dates remarquables. C'est fin 2009 que je fus contacté par les deux architectes afin de réaliser ce gigantesque cadran solaire, mais ce n'est véritablement qu'en 2012, lorsque le bâtiment fut bien sorti de terre que l'on commença sérieusement son étude. Ce laps de temps fut consacré à résoudre avec Marc Goutaudier, du Palais de la découverte, des problèmes de gnomonique inédits et assez difficiles : c'est donc à deux que nous avons calculé ce cadran très particulier.

1 – Un tracé complexe en fonction de nombreuses contraintes.

Le voile de béton de la façade Nord peut être divisé en trois parties : vers l'Est le voile est un mur plan orienté Nord-Ouest appelé mur 1 (Photo 1) ; vers l'Ouest le voile est aussi un mur plan mais orienté Nord-Est appelé mur 2 (Photo 1). Ces deux murs sont reliés par un cylindre à grand rayon de courbure qui rend les raccordements harmonieux. Coulé en une seule fois par l'entreprise Langain, du Bourget du Lac, il a d'abord fallu déterminer très précisément les paramètres de ce voile, à savoir la déclinaison gnomonique des deux murs plans ainsi que la valeur exacte du rayon du cylindre (Photo 2-3)

Une laser-grammétrie fut réalisée par l'entreprise Géode de Chambéry ce qui permet de fixer les éléments suivants, les coordonnées géographiques du lieu étant connues par Google Earth :

Latitude = $45^\circ 38' 27''$

Longitude = $5^\circ 52' 31'' \text{ E}$

= - 0 h 23 m 30 s

Mur 1 : déclinaison gnomonique
= $+144^\circ 3' 39''$

Longueur = 16,493 m

Mur 2 : déclinaison gnomonique
= $-178^\circ 23' 6''$

Longueur = 6,866 m

Rayon du cylindre = 46,59 m ;

Longueur = 28,982 m

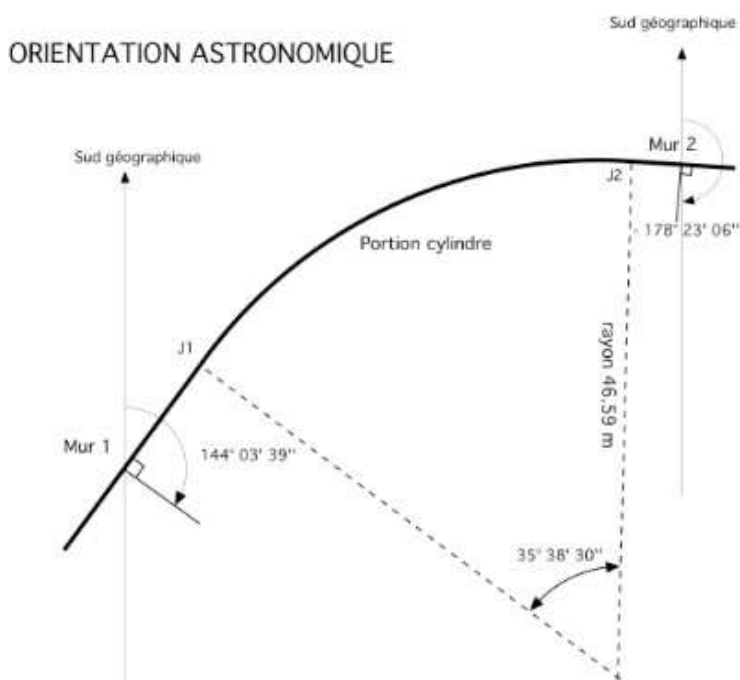


Fig : 1

On notera au passage que la déclinaison par le Soleil, de sorte qu'on peut avoir une tache de lumière qui se projette sur un mur éclairé.

La laser-grammétrie a également donné les dimensions et les coordonnées de l'écope, laquelle est désaxée par rapport au bâtiment : le bord supérieur de l'écope est orientée Sud-Ouest tandis que l'axe général de l'INES, parallèle à la route, est plutôt Sud-Est (et donc Nord-Ouest).



(Photo 3)

L'écopé recouverte de capteurs solaires est située au-dessus du bâtiment. Elle est orientée vers le Sud. Par rapport au voile de béton qu'elle surplombe, elle crée un obstacle très contraignant qui nécessite d'installer deux miroirs pour capter le Soleil du matin au soir sans hiatus.

Cette écopé engendre au sol un rideau d'ombre (Photo 2 - 10) important dont l'impact est majeur puisqu'il rend impossible l'utilisation d'un seul miroir pour indiquer l'heure en masquant le Soleil dans la journée : quelles que soient les positions testées d'un miroir unique par rapport au bâtiment, le tracé est soit limité à quelques lignes horaires occupant une toute petite surface du voile, soit à un éventail horaire très développé mais ne fonctionnant que quelques semaines par an.

Il a donc fallu imaginer un cadran fonctionnant avec deux miroirs : un premier miroir qui capte les rayons solaires le matin jusque vers 14 h solaire. Puis un deuxième miroir qui prend le relais et qui permet d'assurer la continuité dans la lecture de l'heure l'après-midi jusqu'en soirée. Cette solution impose de tracer en fait deux cadrans solaires mais elle assure une répartition équitable du tracé sur toute la surface du voile avec la particularité qu'après le midi solaire, on a deux taches de lumière qui indiquent l'heure simultanément quelques heures, chacune sur une partie du voile de béton.

Pour réaliser ce double fonctionnement, il nous est vite apparu qu'il fallait utiliser un miroir incliné et déclinant. En effet, si l'amplitude du tracé dépend de la position d'un miroir par rapport au mur, il faut également jouer sur les paramètres primaires de la surface réfléchissante. Déterminer la solution idéale a demandé de nombreux tests puisqu'il fallait tracer simultanément les lignes et les arcs diurnes des deux cadrans en cherchant où placer au mieux les miroirs par rapport au voile de béton courbe tout en faisant varier leur inclinaison et leur orientation. L'utilisation du logiciel Pov-ray a été déterminante dans cette étape.

Notons toutefois que si l'écopé a créé une contrainte majeure, son absence n'aurait pas pour autant supprimé les difficultés. Car un cadran solaire à réflexion se comporte comme un cadran à style droit, avec tous les inconvénients liés à ce type d'indicateur : les limites de l'épure sont vite atteintes !

2 – Influence des montagnes, de l'écopé et des miroirs

On ne peut pas négliger, dans la réalisation d'un tel cadran solaire, la limitation de l'éventail horaire provoquée par les montagnes, le surplomb de l'écopé et l'instant où les miroirs cessent de réfléchir les

rayons solaires. Autrement dit, une discussion minutieuse doit se faire bien en amont des calculs afin d'identifier les causes qui pourraient empêcher que les miroirs captent les rayons solaires.

a) Les montagnes

Le bâtiment de l'INES peut être plongé à l'Est dans l'ombre projetée par le Mont Revard et à l'Ouest dans l'ombre projetée par le Mont du Chat. Ces deux chaînes de montagne, sensiblement orientées Nord-Sud, engendrent le matin et le soir un rideau d'ombre dont il convient d'estimer l'importance. Deux paramètres sont à prendre en compte : la distance horizontale de la montagne au bâtiment et leur différence d'altitude. Pour le Mont Revard, on a pris une distance de 7000 m et une différence d'altitude de 1500 m. Pour le Mont du Chat, on a pris une distance de 4526 m et une différence d'altitude de 1230 m.

b) L'écope

Le traitement du rideau d'ombre projeté par l'écope est compliqué par le fait que cette structure possède une orientation vers le Nord-Est désaxée par rapport au bâtiment, d'où résulte une inclinaison par rapport au voile. Le but est toujours de chercher l'angle horaire du Soleil à l'instant où le rideau d'ombre projeté touche un miroir. On raisonne donc au niveau du plan horizontal passant par le miroir en exprimant les coordonnées de l'écope en conséquence.

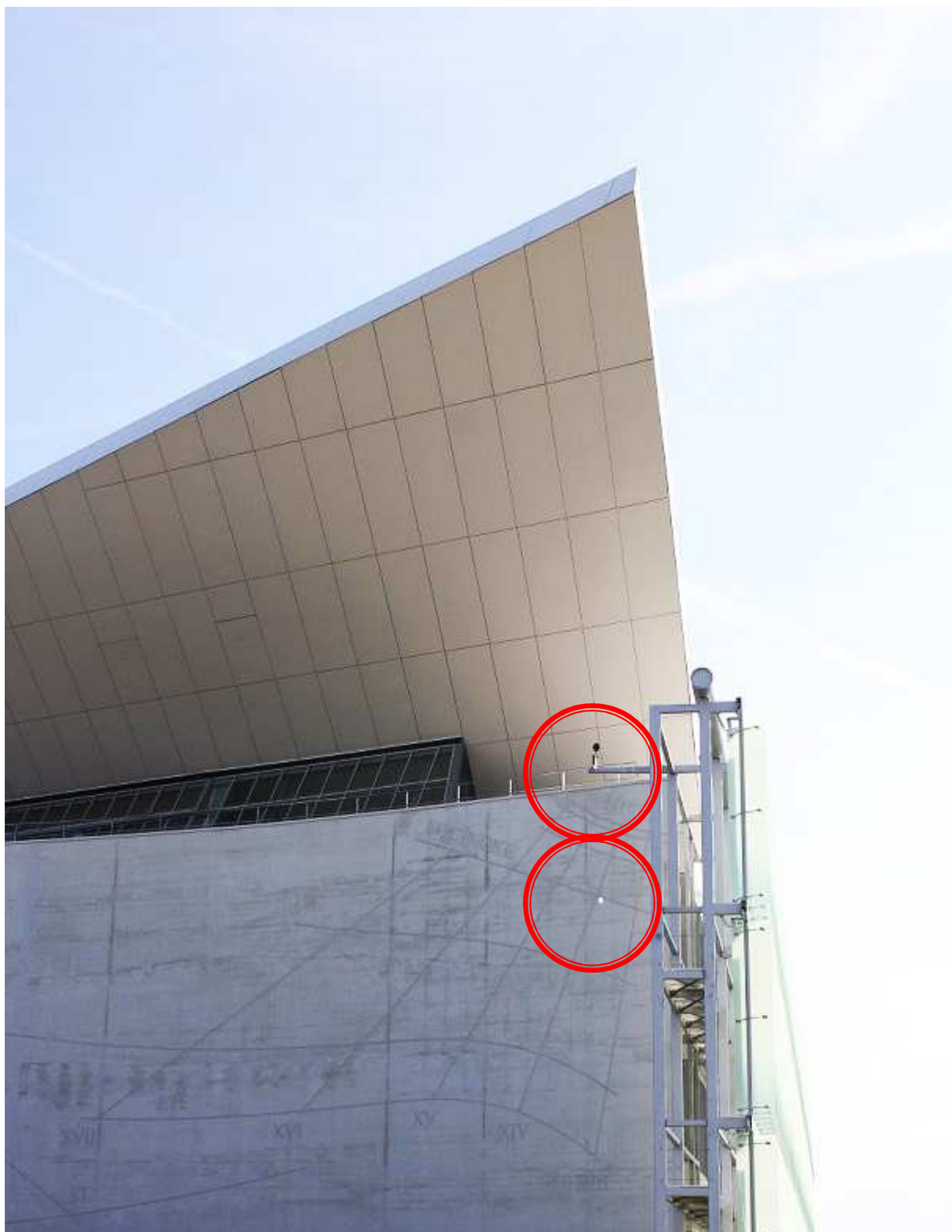
c) Les miroirs

Enfin, il convient de prendre en considération l'éclairement même des miroirs, car le Soleil peut passer dans leur plan – et donc derrière –, ce qui provoque l'extinction de la tache de lumière. Chaque miroir se comporte en fait comme un plan incliné et déclinant et il faut vérifier pour une date et une heure données si ce plan est éclairé et donc si le miroir fonctionne. (Photo 4-5-7)



(Photo 4) Côté Nord-Est

Côté Nord-Est, sur le sommet du mât d'une hauteur de 12 mètres, nous apercevons le miroir qui renvoie une tache solaire sur le mur gravé. Un mât de plus de 12 m haut porte le miroir qui renvoie une tache solaire bien visible sur le haut du cadran.

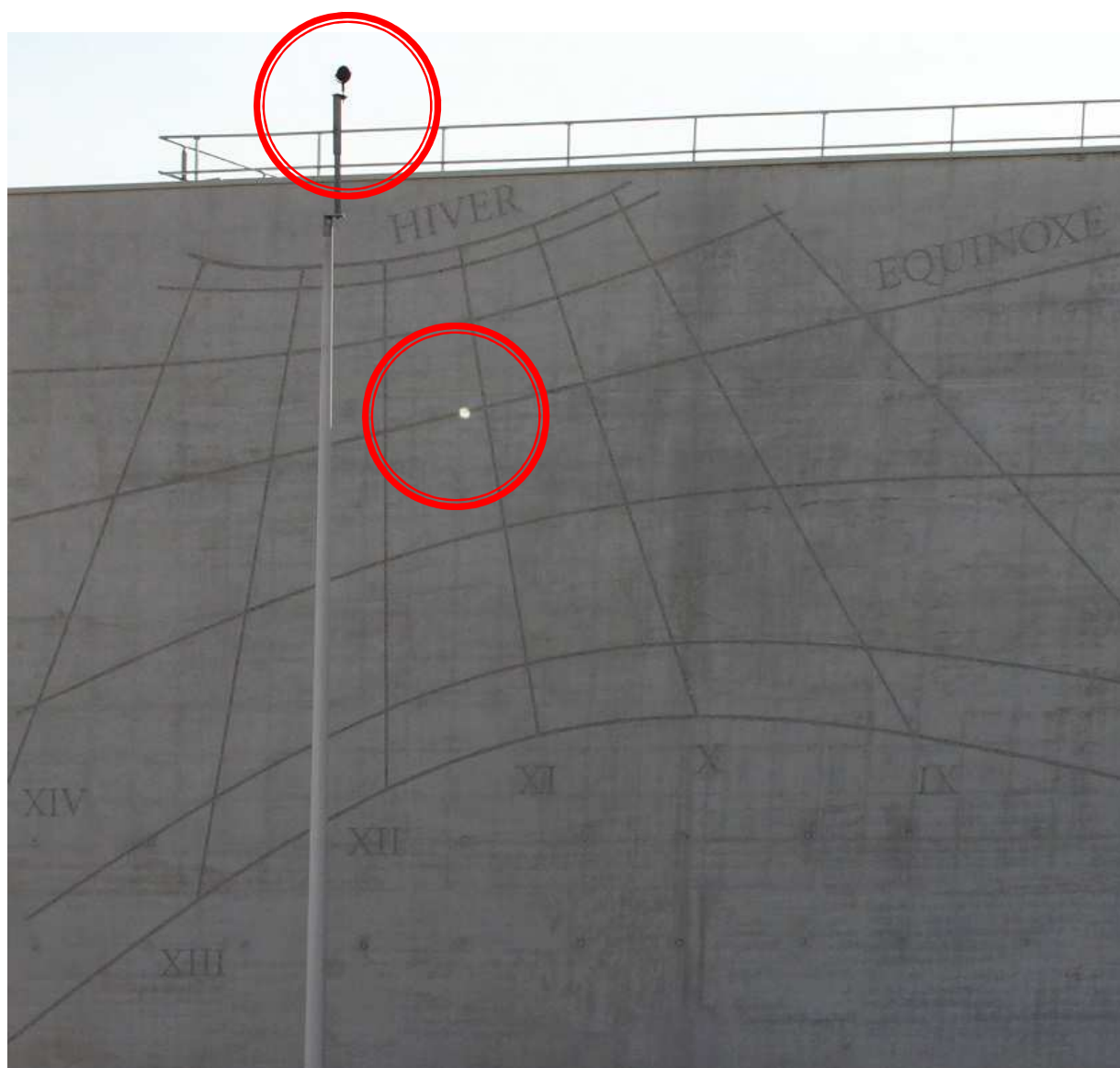


(Photo 5) Côté Nord-Ouest



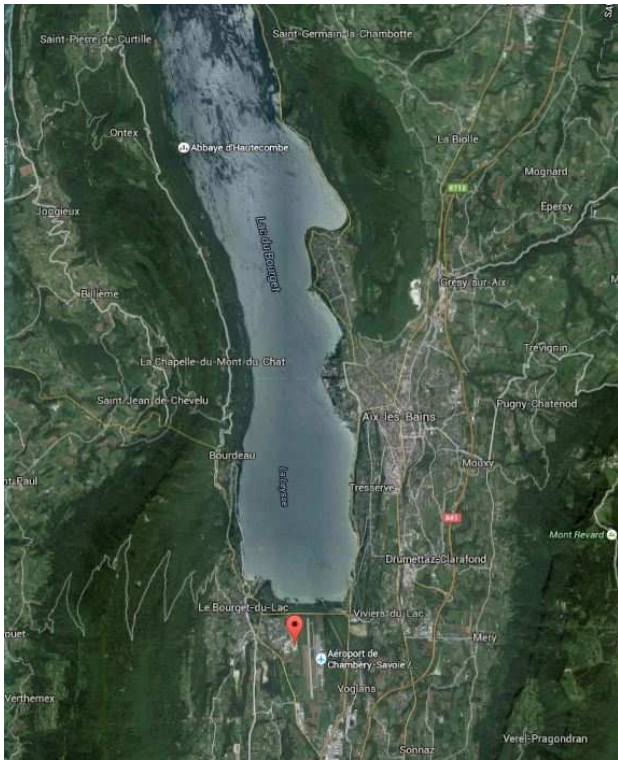
(Photo 6) L'écope

Le miroir Côté Nord-Est est fixé sur un bras articulé sur les pieds maintenant les panneaux de verre mobiles.



(Photo 7) Photo prise le 20/03/2014 à 14h02

Google Maps Photos de Situation



(Photo 8)



(Photo 9) Le bâtiment pendant sa construction



(Photo 10) Le bâtiment pendant sa construction

Nous remarquons l'ombre projetée par l'écope.