

# AUVERGNE

# Sciences

N° 47 - MARS 2000

**BERNARD BRUNHES**  
**CADRANS SOLAIRES**  
**LA SEMAINE DE LA SCIENCE**  
**POLYMÈRES**  
**NEWTON**  
**VULCANIA**

**BULLETIN DE L'ADASTA**

ASSOCIATION POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'ANIMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE EN AUVERGNE

Avec ce nouveau numéro, la Revue Auvergne-Sciences entre dans un nouveau millénaire. Elle en a profité pour rajeunir un peu sa page de couverture.

Nous remercions tous ceux qui ont participé à cette réalisation, non seulement notre dévouée rédactrice Jocelyne Allée mais aussi à Jean-Luc Gardette, directeur du Laboratoire de Photochimie à l'Université Blaise Pascal, qui a bien voulu rédiger le texte de sa passionnante conférence du 20 octobre 1999. Merci aussi au Professeur Jean Didier qui évoque l'attachant et brillant physicien auvergnat Bernard Brunhes, trop tôt disparu mais

dont le nom reste attaché, à jamais à la découverte de l'inversion du champ magnétique terrestre. L'A.D.A.S.T.A. continue ainsi vaillamment sa mission de développement scientifique, elle a participé activement à la Semaine de la Science du 18 au 24 octobre 1999.

Notre équipe reste dynamique et solidaire mais, après 3 années consacrées à l'A.D.A.S.T.A. le temps est venu pour moi de passer le relais de la Présidence.

En vous remerciant tous de votre soutien et de votre collaboration si fidèle, je forme



Suzanne Gély

les meilleurs vœux pour chacun de vous et pour l'avenir de notre Association.

## Merci à nos sponsors



MINISTÈRE  
DE LA RECHERCHE  
ET DE LA TECHNOLOGIE



## Sommaire

|   |    |
|---|----|
| Bernard Brunhes.....                                | 3  |
| Fascinants Cadrans Solaires.....                    | 10 |
| Semaine de la Science.....                          | 18 |
| Photovieillissement<br>des matériaux polymères..... | 19 |
| Isaac Newton et les "Principia".....                | 25 |
| L'ADASTA visite<br>le Chantier Vulcania.....        | 26 |

Photo de Couverture :

le plafond de l'horloge solaire au Lycée Stendhal de Grenoble

## Adhésions et Abonnements

|                                   |                    |
|-----------------------------------|--------------------|
| Adhésions à titre individuel..... | 150 F - 22,87 €    |
| Adhésions à titre collectif.....  | 500 F - 76,22 €    |
| Membre bienfaiteur.....           | 1 000 F - 152,45 € |

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites,...)

Permanences : du lundi au vendredi de 8 h 00 à 12 h 00  
Adressez le courrier à

**ADASTA, 19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand**

Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04

E-mail : [adasta@wanadoo.fr](mailto:adasta@wanadoo.fr)

Site Internet : <http://perso.wanadoo.fr/adasta>

# Bernard Brunhes

(1867-1910)

Physicien clermontois  
Pionnier du géomagnétisme



*Jean DIDIER Professeur émérite  
à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand*

*Alexandre ROCHE  
Directeur Honoraire  
de l'Institut de Physique  
du Globe de Strasbourg*

Cet article résume un article plus important paru aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, série Sciences de la Terre et des Planètes. 1999, 328, 141-152.

## AVANT-PROPOS

C'est en assistant à une conférence sur la tectonique des plaques faite à l'Université de Brest, aux alentours de 1975, par un collègue géophysicien, que j'ai ressenti la nécessité d'une biographie de Bernard Brunhes.

En effet, le nom de ce physicien, mort en 1910, venait d'être remis en lumière par la découverte de l'enregistrement par les fonds océaniques des inversions du champ magnétique terrestre découvertes par lui en 1905. Cependant, personne ou presque ne savait qui était Brunhes, certains ignorant même sa nationalité.

Ces quelques pages visent à réparer cet oubli.

*J.D*

## UNE MORT SUBITE

Dans la nuit du dimanche 8 au lundi 9 mai 1910, des agents de police faisant leur ronde dans les rues du vieux

Clermont découvrent le corps d'un homme inanimé qu'ils croient d'abord victime d'une agression. Grâce à ses papiers ils l'identifient, c'est une personnalité connue : le professeur Bernard Brunhes, Directeur de l'Observatoire du Puy de Dôme. L'homme ne porte aucune trace de blessure mais il est inconscient. On décide de le transporter à son domicile situé non loin de là, 37 rue Montlosier. En dépit des soins, il meurt le mardi à midi, sans avoir repris connaissance.

Bernard Brunhes venait ainsi de disparaître à moins de 43 ans, victime sans doute d'une hémorragie cérébrale. Il était revenu quelques heures plus tôt d'un voyage aux mines de Messeix (Cantal), dans lesquelles il avait procédé à des mesures de courants telluriques. Vers minuit, en dépit des fatigues de la journée et d'un temps particulièrement mauvais, il neigeait aux portes de Clermont cette nuit-là, il était ressorti de son domicile pour aller rue du Port, au siège d'un journal, l'Avenir du Puy-de-Dôme et du Massif Central, lire les dépêches qui arrivaient. C'était en effet un soir d'élections législatives et il était impatient de connaître les résultats de la circonscription de Saint-Flour où l'un de ses proches se présentait. La mort l'attendait sur le chemin du retour.

Les obsèques se déroulèrent le vendredi 13 mai en l'église Notre-Dame-du-Port au milieu d'une foule considérable. Puis le corps fut transporté à la gare de Clermont où furent prononcées neuf allocutions parmi lesquelles celles du Professeur Bouty son ancien maître parisien et de Pierre David son principal collaborateur clermontois. Enfin le cercueil fut placé dans un train pour Aurillac où l'inhumation eut lieu le lendemain.

Après la mort de Bernard Brunhes, Marie, sa veuve, qui n'avait que 34 ans, se retrouva seule avec quatre enfants âgés de 12 à 2 ans. En une époque où la protection sociale était beaucoup moins bien organisée qu'aujourd'hui, elle connut des difficultés financières. N'ayant droit à aucune pension, elle ne bénéficia que de quelques secours de l'État et de l'aide de sa famille. Avec cela elle parvint à subsister et à élever ses enfants.

Germaine (1898-1956), l'aînée, devint religieuse bénédictine, Julien (1900-1986), le deuxième, entra à l'École Navale, mais il dut quitter la marine pour raisons de santé. Après une carrière dans l'industrie, il devint député puis sénateur de Paris. Geneviève (1902-1971), épousa un chirurgien, Pierre Leflaive, qui exerça à La Rochelle, enfin Henri (1908-1972), qui n'avait que 2 ans à la mort de son père, fit une belle carrière de magistrat qui le conduisit jusqu'au Conseil Supérieur de la Magistrature.

Ses trois enfants mariés donnèrent à Marie Brunhes 14 petits-enfants. Elle mourut en 1960 à Paris où elle s'était retirée après la mort de son mari.



## LES ORIGINES FAMILIALES

Bernard Brunhes appartenait à une famille auvergnate originaire de Saint-Flour. En langue occitane le nom de cette famille signifie tout simplement *brun* et se prononce " Brugne ".

L'histoire de la famille commencera pour nous avec un autre Bernard Brunhes (1790-1842), grand-père du précédent, maître sabotier à Aurillac, à la tête d'une entreprise de 80 ouvriers. C'était un artisan prospère mais qui mourut à 52 ans en laissant une veuve et six enfants encore jeunes. Heureusement son frère, l'Abbé Jean-Baptiste Brunhes, aumônier d'un collège de la ville, prit en charge l'éducation de ses neveux et nièces auquel il inculqua le goût du travail et une éducation chrétienne sans faille.

L'un de ces derniers, Julien, qui n'avait que neuf ans à la mort de son père, fit de très bonnes études. Après son baccalauréat, il " monta " à Paris où, tout en travaillant comme précepteur dans une famille aisée, il prépara le concours d'entrée à l'École Normale Supérieure. Admis à la rue d'Ulm en 1856, il obtint l'agrégation de physique en 1862. Le jeune agrégé devint alors professeur de lycée à Vesoul, puis à Besançon et à Clermont avant d'être nommé au lycée de Toulouse où il enseignera de 1864 à 1883. Au cours

de ce séjour toulousain il épousera en 1866 la jeune Nathalie Durand qui lui donnera 7 enfants : Bernard né en 1867, Lucie en 1868, Jean en 1869, Louis en 1871, Gabriel en 1874, Joseph en 1876 et enfin Marie en 1877. Tous se révélèrent intellectuellement doués. Il y eut parmi eux, deux normaliens (Bernard et Jean), un polytechnicien (Louis), un évêque (Gabriel) et un maître du barreau (Joseph) pour ne parler que des garçons car, à cette époque, les filles ne faisaient pas encore de longues études. Le plus connu de ces enfants fut certainement Jean, futur Professeur au Collège de France et Membre de l'Institut, dont les ouvrages de géographie ont connu une très large diffusion.

En dépit de son travail au lycée et de ses charges de famille, Julien Brunhes soutint, en 1881, une thèse de doctorat qui lui permit d'être nommé à la Faculté des Sciences de Dijon, d'abord comme chargé de cours en 1883, puis comme professeur avant de devenir Doyen. Il mourut subitement le 27 février 1895.



## JEUNESSE ET DÉBUTS D'UNE CARRIÈRE

Antoine, Joseph, Bernard Brunhes est né à Toulouse le 3 juillet 1867. Il fait ses études secondaires dans cette ville

jusqu'à la première partie du baccalauréat, montrant autant de dispositions pour les lettres que pour les sciences. Son père ayant été muté à Dijon, il prépare son baccalauréat dans cette ville, où un remarquable professeur de philosophie, M. A. Blanchet, exerce sur lui une influence profonde. Cela ne l'empêche pas d'obtenir, en 1884, le premier prix de mathématiques pour les classes de philo au Concours Général. En 1885, il passe le bac math-élem, puis, il suit les cours de math-sup et de math-spé. Reçu n°2 à l'École Normale Supérieure et 11ème à Polytechnique, il choisit l'ENS. Il en sort agrégé de physique (n°1) au concours de 1889, ayant au même moment le plaisir de voir son frère Jean admis à l'École en section Lettres et son frère Louis à l'X. La joie de ces succès est malheureusement ternie par le décès de leur mère qui disparaît à l'âge de 45 ans.

Pendant son séjour à l'École, Bernard Brunhes tisse de nombreux liens avec des camarades. Avec d'autres normaliens, (en particulier Georges Goyau, historien, " cacique général " de l'ENS, futur Secrétaire Perpétuel de l'Académie Française) qui sont comme lui des catholiques militants, il s'engage dans l'action sociale. C'est l'époque du Pape Léon XIII et de son encyclique *Rerum Novarum*. Bernard Brunhes appartient avec son frère Jean au groupe des Jeunes Chrétiens Sociaux et donne bénévolement des cours du soir à des ouvriers. En 1892 les deux frères et Georges Goyau sont encouragés par le Pape qui les reçoit au Vatican. Ceux qui l'ont connu le décrivent comme un jeune homme mince, presque frêle, au caractère chaleureux et passionné, ne ménageant pas ses forces.

Après l'agrégation, Bernard Brunhes est nommé préparateur de physique à la Faculté des Sciences de Paris. Il y prépare une thèse d'optique sous la direction du Professeur Bouty, puis est nommé Maître de Conférences à Lille (1892-1895), Chargé de Cours (1895) et enfin Professeur (1897) à Dijon où il succède à son père qui vient de mourir. C'est là qu'il épouse, le 29 septembre 1896, Marie Renardet, fille d'un professeur de Droit, qui lui donnera quatre enfants. Le 1er novembre 1900 il est enfin nommé Professeur à la Faculté des Sciences de Clermont et Directeur de l'Observatoire du Puy de Dôme. Dans ces deux postes il succède à Louis Hurion qui le remplace à Dijon. Nous ne savons rien des conditions dans lesquelles cette permutation a été réalisée. Tout au plus peut-on remarquer que L. Hurion venait d'être Doyen de la Faculté des Sciences de Clermont et que celle-ci traversait une période troublée en raison de la pré-



Les 5 fils de Julien Brunhes : au premier rang à gauche Bernard, à droite Jean. Debout, de gauche à droite, Louis, Gabriel et Joseph.

sence dans son corps professoral de clans fortement opposés.

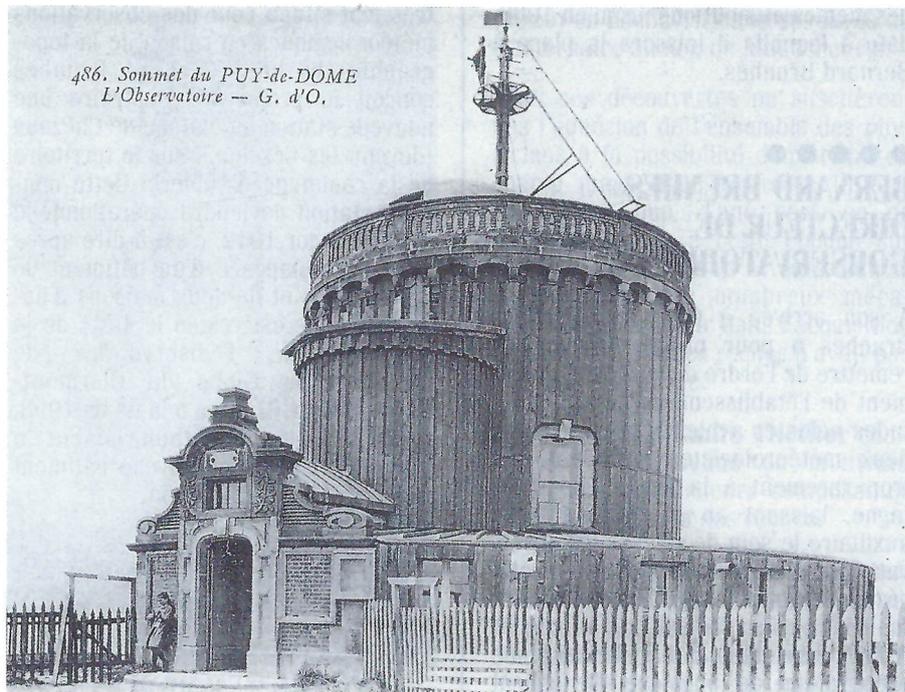
Bernard Brunhes et sa femme s'intégreront facilement dans la société clermontoise. Ils nouent des relations amicales avec de nombreux collègues, aussi bien scientifiques que littéraires et sont reçus dans leurs foyers. Des excursions dominicales à pied avec des collègues comme le géographe Desdevises du Désert ou le géologue Philippe Glangeaud permettent à Bernard Brunhes de mieux connaître le pays. Il participe aussi aux réunions de nombreuses sociétés, comme la Société d'Horticulture, car il s'intéresse à la flore et milite en faveur du reboisement des montagnes, et l'Académie des Sciences, Belles Lettres et Arts de Clermont-Ferrand dont il deviendra le président.

## ● ● ● ● ● FACULTÉ DES SCIENCES ET OBSERVATOIRE

L'histoire de l'observatoire du Puy de Dôme est profondément liée à celle de la Faculté des Sciences de Clermont, dans la mesure où le premier a été créé en 1874 par Émile Alluard, Professeur de physique et Doyen de la Faculté.

La Faculté existait depuis 1854, créée, en même temps que plusieurs autres par Napoléon III. Constituée initialement par les chaires de Mathématiques, Physique, Chimie et Histoire Naturelle, elle occupait à ses débuts les locaux de l'ancien hôpital des Charitains situé dans l'angle nord-ouest de l'actuel jardin Lecoq, près du carrefour des avenues Vercingétorix et Lafayette. En 1861 la construction du "Palais Académique" (rectorat actuel) l'amène à s'installer dans l'aile sud de celui-ci. Une extension lui permet en 1885 de s'agrandir dans des bâtiments voisins. Seuls, physiciens et géologues restent dans l'aile sud du rectorat. Bernard Brunhes et ses collaborateurs y cohabiteront avec le géologue Philippe Glangeaud. Cela permettra des échanges d'idées et d'informations qui auront un rôle déterminant sur les recherches que Brunhes entreprendra sur le magnétisme des roches.

L'idée de construire un observatoire météorologique au sommet du Puy de Dôme fut conçue par Émile Alluard en 1869. Alluard n'était pas un Auvergnat. Né à Orléans le 5 octobre 1815, il fait ses études à l'École Normale Supérieure. A leur terme il est affecté dans différents collèges de province puis à celui de Clermont-Ferrand où il arrive, selon ses biographes, "à son grand déplaisir... contre la promesse d'un retour pro-



486. Sommet du PUY-de-DÔME  
L'Observatoire — G. d'O.

L'Observatoire au sommet du puy de Dôme (Document fourni par M. Saugues).

chain à Paris". Heureusement pour notre région, le naturaliste Henri Lecoq lui fait aimer l'Auvergne et il s'y marie en 1853. La création de la Faculté des Sciences lui permet de soutenir une thèse sur la naphtaline (1858), première thèse scientifique présentée à Clermont. Cela lui ouvre l'accès à l'enseignement supérieur comme Chargé de Cours (1865), puis Professeur de physique (1866). Il succède à un certain Bernard, lui-même successeur de Deguin, premier titulaire de la chaire et premier Doyen de la Faculté. Il devient Doyen en 1877 et le restera jusqu'en 1880.

Quand le projet est formulé en mars 1869, il n'existe encore aucun observatoire météorologique de montagne dans le monde. Aussi Alluard est-il en butte aux sarcasmes de certains Clermontois. Des articles dans la presse locale suggèrent de l'envoyer à l'asile de fous. Heureusement des scientifiques extérieurs appuient son projet.

Alluard tient bon. Un décret du Président de la République, en date du 29 décembre 1871, autorise la construction et engage l'État pour une somme de 50 000 francs. Il sera suivi par la décision d'utilité publique du 4 mars 1874 qui permettra de réaliser les expropriations nécessaires. Les travaux commencent par la réalisation de baraques pour les ouvriers au col de Ceysnat, puis par celle des voies d'accès au sommet du volcan. Le premier bâtiment est fonctionnel au début de 1876 ; après quelques travaux supplémentaires, sa réception est faite le 19 novembre 1877. La ville de Clermont accorde un budget de fonctionnement de 5 000 francs par an pour frais de personnel et de matériel ; le départe-

ment du Puy-de-Dôme prendra le relais en 1879.

Parallèlement est installée à Rabanasse, dans la périphérie de Clermont, une station de plaine qui fonctionne à partir du 1er janvier 1874. Elle est reliée à la station de montagne par une ligne télégraphique ainsi qu'à l'Observatoire de Paris auquel elle communique les observations météorologiques faites à Clermont et au Puy de Dôme. Paris fournit, en contrepartie, la situation atmosphérique de l'Europe. Cela permet de rédiger des prévisions qui sont diffusées aux mairies du département et publiées dans les journaux.

La vie à la station du Puy de Dôme est particulièrement dure pour le météorologiste, le gardien et sa famille, qui y sont parfois isolés pendant des mois. Elle a été retracée par Jean Anglade dans son roman : *Le jardin de Mercure* (Presses de la Cité, edit.). Elle devient plus agréable en été avec l'arrivée de touristes de plus en plus nombreux qui accèdent au sommet en moins d'une heure de marche. Ils trouvent un restaurant temporaire, des cartes postales vendues par le gardien et même la possibilité de télégraphier à leurs amis grâce à la ligne de l'Observatoire. A partir de 1907 un train à crémaillère rendra l'ascension plus facile. Ce train fonctionnera jusqu'en 1926, date à laquelle il laissera place à une route à péage.

L'Observatoire est officiellement rattaché à l'Université. Alluard en est évidemment le premier directeur. Il perçoit à cet effet une indemnité. Après sa retraite, son successeur dans la chaire de physique, Louis Hurion, héritera

des mêmes attributions jusqu'en 1900, date à laquelle il laissera la place à Bernard Brunhes.

## ● ● ● ● ● BERNARD BRUNHES DIRECTEUR DE L'OBSERVATOIRE

A son arrivée à Clermont, Bernard Brunhes a pour premier travail de remettre de l'ordre dans le fonctionnement de l'établissement, où des habitudes néfastes avaient été prises. Les deux météorologistes n'allaient que trop rarement à la station de montagne, laissant au gardien ou à un auxiliaire le soin de relever les observations et de les transmettre par télégramme à la station de Rabanesse.

Ayant remarqué à la Faculté un jeune préparateur de physique d'excellent niveau, Pierre David, il lui propose de quitter la Faculté pour un poste d'aide-météorologiste avec responsabilité de la station de montagne. Celui-ci, compétent et d'un grand dévouement, s'installe au sommet du Puy de Dôme, assurant les observations, installant de nouveaux appareils dont un sismographe. Il deviendra le principal collaborateur de Brunhes, notamment pour ses recherches sur le paléomagnétisme. Ses relations avec les météorologistes de la station de la plaine qui le jalourent pour ses diplômes scientifiques et la confiance que lui accorde le directeur en souffriront.

Les bâtiments du sommet du Puy de Dôme étant restés dans l'état où ils étaient en 1876, c'est-à-dire inachevés faute de crédits suffisants, Bernard Brunhes décide de les rénover et de les agrandir. Après avoir organisé en 1902 la célébration du 25<sup>ème</sup> anniversaire de la station de montagne, il obtient les crédits nécessaires. En 1907 ce travail est terminé à la grande satisfaction d'Émile Alluard, toujours vivant. Ces améliorations permettront l'installation de nouveaux instruments scientifiques. L'électricité produite par un moteur à pétrole est installée.

Très attaché au site du Puy de Dôme, Brunhes vient y passer ses vacances d'été, s'intéressant jour après jour aux fouilles du temple de Mercure qui ont repris depuis peu, au reboisement des pentes du volcan et au projet de création d'un jardin alpin. Il ne néglige pas pour autant de procéder à des mesures géophysiques. Sa famille l'accompagne pendant ces séjours.

La station de la plaine posait elle aussi des problèmes. Installée dans une maison en location, dont les ruines sont encore visibles aujourd'hui, elle était

très mal située pour des observations météorologiques en raison de la topographie du lieu. Bernard Brunhes conçoit le projet de construire une nouvelle station au plateau de Chézaux (devenu les Cézeaux), sur le territoire de la commune d'Aubières. Cette nouvelle station deviendra opérationnelle le 1<sup>er</sup> janvier 1912, c'est-à-dire après sa mort. Composée d'un bâtiment de laboratoires et de deux maisons d'habitation, elle est restée le siège de la direction de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC) jusqu'à la fin de 1998, date à laquelle l'établissement a emménagé dans un nouveau bâtiment situé sur le campus voisin.

rons le lecteur intéressé à l'excellente analyse publiée par C. Matignon, Professeur au Collège de France, dans le numéro de 1912 de l'annuaire de l'Amicale des anciens élèves de l'École Normale Supérieure.

Installé à Clermont, Brunhes, conscient de ses nouvelles responsabilités, s'investit dans des recherches, toutes orientées vers la physique du globe : phénomènes atmosphériques, courants telluriques ou séismes. Mais c'est surtout le magnétisme des roches qui l'intéresse, en collaboration avec son élève Pierre David.

On savait depuis une cinquantaine d'années, grâce aux travaux de Melloni

## INAUGURATION

DE

### L'OBSERVATOIRE MÉTÉOROLOGIQUE DU PUY DE DÔME

Mardi 22 Août 1876

Départ de Clermont en voiture, à 6 heures du matin; les dernières voitures attendront l'arrivée du train de Paris.

Arrivée au col de Ceyssat à 8 h. 1/2; ascension du puy de Dôme.

Déjeuner froid à 11 heures.

A midi 1/2, visite de l'Observatoire et des ruines du temple gallo-romain, au sommet de la montagne.

Descente du puy de Dôme à 3 heures.

Départ du col de Ceyssat en voiture à 4 heures. — Arrivée à Clermont à 6 heures.

On recommande de se munir de pardessus, afin de se garantir du froid à la cime du puy de Dôme.

Clermont, typ. Mont-Louis.

## ● ● ● ● ● LES RECHERCHES SUR LE MAGNÉTISME

Avant son arrivée à Clermont, Bernard Brunhes n'avait pas eu l'occasion de s'intéresser à la physique du globe. Physicien très polyvalent, comme beaucoup de ses contemporains, il avait commencé sa carrière par des recherches en optique qui firent l'objet de sa thèse (1893) et de ses premiers articles. Sa nomination à Lille, où il enseigne simultanément à la Faculté et à l'Institut Industriel du Nord (IDN), l'amène à s'orienter vers l'électricité. Cette activité aboutit à la publication de son *Cours élémentaire d'électricité* (1895). Ensuite, il diversifie ses centres d'intérêt avec des articles sur l'acoustique, la thermodynamique et les rayons X qui viennent d'être découverts par Roentgen. La liste de ses publications donne une idée de la diversité de ses centres d'intérêt. Notre but n'étant pas de commenter ici l'ensemble de son œuvre, nous renver-

(1853), que les laves du Vésuve ont enregistré la direction du champ terrestre du moment où elles se sont refroidies. Par ailleurs, un autre Italien, Folgheraiter, avait montré en 1894 que les poteries étrusques et romaines conservaient, elles aussi, la trace du champ régnant au moment de leur cuisson. Cependant les poteries ayant été ensuite déplacées, il n'était pas question de les utiliser pour connaître les anciennes valeurs de la déclinaison. En revanche, si l'on supposait qu'elles avaient été placées en position verticale dans les fours des potiers, les valeurs d'inclinaison pouvaient être prises en compte.

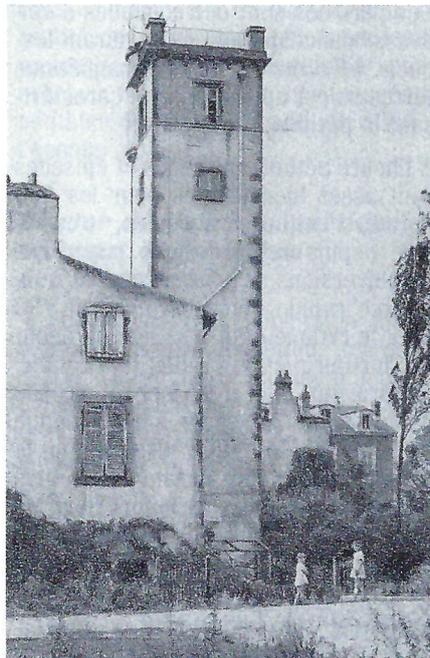
Le géologue clermontois Philippe Glangeaud attira l'attention de Bernard Brunhes sur l'existence de "briques naturelles" ou porcelanites, résultant du métamorphisme exercé par des coulées de lave sur un substratum argileux. Il lui en présenta plusieurs gisements dans l'aggloméra-

tion clermontoise, à Royat et Beaumont notamment. Intéressés par le phénomène, Brunhes et David récoltèrent des échantillons orientés qu'ils taillèrent en cubes de 8 centimètres de côté. A l'aide d'un déclinomètre Mascart, ils mesurèrent leur aimantation, constatant qu'elle était homogène à l'intérieur d'un même gisement et différente de la déclinaison actuelle. (Brunhes et David, 1901, *C.R.Acad.Sci., Paris*, 133, 155-157)

Les porcelanites sont donc intéressantes mais elles ont un défaut : elles sont rares. En revanche, les coulées de lave sont extrêmement communes en Auvergne, Brunhes et David décident donc d'étudier leur aimantation. Comme autrefois Melloni au Vésuve, ils constatent l'existence d'une aimantation rémanente de direction constante à l'intérieur d'une même coulée et différente de l'aimantation actuelle. La comparaison d'un basalte de Royat et de la porcelanite sous-jacente montre que les déclinaisons sont identiques. Le basalte est plus aimanté que la "brique", mais il donne des résultats moins homogènes. Dans une autre carrière de Royat où la "brique" est intercalée entre deux coulées basaltiques, la coulée inférieure plus vieille que l'argile qui s'est déposée sur elle, donne une direction d'aimantation différente. L'article qui présente ces résultats (Brunhes et David, 1903, *C.R.Acad.Sci., Paris*, 137, 975-977) est l'un des textes fondateurs des recherches sur le paléomagnétisme.

En 1904 (*C.R.Acad.Sci., Paris*, 138, 41-45), Pierre David apporte la preuve de la stabilité de l'aimantation acquise par les roches volcaniques au cours de leur refroidissement. En étudiant les dalles de trachyte ("dômite") du temple de Mercure au sommet du Puy de Dôme, il constate qu'elles présentent toutes la même inclinaison de l'ordre de  $57^\circ$ . Selon les cas, cette inclinaison est positive ou négative. Il en conclut que certaines dalles ont été posées en respectant leur orientation originelle, alors que d'autres ont été retournées par les bâtisseurs ? Point capital, le champ magnétique terrestre, agissant depuis près de 2000 ans, n'a pas altéré leur aimantation initiale. La dômite du temple de Mercure, (provenant des carrières souterraines d'un volcan voisin, le Clierzou) est donc un fidèle témoin du champ magnétique existant à l'époque de son refroidissement.

Cependant, la découverte essentielle restait à faire ; elle résulta d'un coup de chance. Un ingénieur des Ponts et Chaussées signala à Bernard Brunhes un gisement de porcelanite sous une coulée de basalte près du lieu-dit Pontfarein, commune de Cezens (Cantal). La mesure de l'aimantation



La station de Rabanesse, aux angles de la Terrasse, les supports des instruments (Document fourni par M. Saugues).

des deux roches donna un résultat extraordinaire, elles indiquaient l'une et l'autre une inclinaison de  $-75^\circ$ , correspondant à un pôle Nord magnétique proche du pôle Sud géographique. Folgheraiter avait trouvé des inclinaisons négatives sur certaines de ses poteries antiques, mais leurs valeurs étaient toujours faibles et l'on pouvait toujours imaginer que ces poteries avaient été cuites dans une position aberrante. A Pontfarein, en revanche, les roches prélevées étaient bien en place. De plus l'homogénéité des résultats sur une distance de 100 mètres excluait la possibilité d'intervention de la foudre. Bernard Brunhes (1905) arriva donc à la conclusion que l'inclinaison avait été négative dans cette région à l'époque de la mise en place de la coulée (*C.R.Acad.Sci., Paris*, 141, 567-568).

## RECHERCHES ULTÉRIEURES SUR LE CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

### Mise en doute de la réalité des inversions

L'importance de cette découverte nous paraît aujourd'hui fondamentale. Cependant, il fallut presque un demi-siècle pour qu'elle soit admise. Pourtant, après Brunhes, des physiciens travaillant dans d'autres régions du monde avaient fait des observations analogues. Le Suisse Mercanton (1926) découvrit des inversions au Groënland, aux îles Féroé, à l'île de Mull en Écosse, ainsi qu'en Australie. De son côté le Japonais Matuyama

(1929) en découvrit dans des laves du Quaternaire ancien de Mandchourie.

Mais ces découvertes ne suscitèrent pas l'adhésion de l'ensemble des physiciens à la possibilité d'inversion du champ magnétique terrestre. Il faut reconnaître que, d'une part, on ne connaissait rien à cette époque sur l'origine de ce champ et que, d'autre part, l'étude des nombreux mécanismes pouvant agir dans l'acquisition de l'aimantation des roches n'avait pas encore été réalisée.

**Les travaux d'Émile Thellier** comblèrent cette lacune en montrant l'existence de plusieurs composantes dans l'aimantation des roches.

En dehors de l'aimantation *thermorémanente* (A.T.R.), aimantation très résistante acquise par refroidissement des matériaux (en particulier volcaniques) dans la zone de températures inférieures au point de Curie, il existe aussi :

- Une aimantation rémanente isotherme (A.R.I.), qui intervient dans le milieu naturel sous l'action des coups de foudre. L'A.R.I. crée d'intenses anomalies à la surface des terrains volcaniques mais celles-ci diminuent spontanément avec le temps.
- Une aimantation rémanente visqueuse (A.R.V.), qui peut être créée dans certaines roches, à température ordinaire, par des champs faibles comme le champ magnétique terrestre et croît en fonction du logarithme du temps d'action. Elle peut devenir une composante très importante de l'aimantation naturelle. L'existence d'une A.R.V. dans certains basaltes d'Auvergne (1937) avait rendu Thellier très prudent vis-à-vis de l'utilisation des roches volcaniques comme témoins du passé du champ magnétique terrestre.

- Une aimantation piézorémanente (A.P.R.), pouvant être acquise sous l'action de pression ou de chocs.

- Une aimantation rémanente chimique ou cristalline apparaissant lorsqu'un minéral magnétique est créé dans une roche soumise à un champ magnétique (champ terrestre) et qui est très résistante.

Enfin dans les roches sédimentaires, il peut exister aussi une aimantation rémanente détritique (A.R.D.), susceptible d'apparaître lorsque des grains aimantés très fins se déposent en eau calme en s'orientant dans la direction du champ magnétique terrestre et en gardant en partie cette direction (surtout la déclinaison). Cette aimantation est à l'origine des techniques de magnéto-stratigraphie très utilisées aujourd'hui.

L'aimantation rémanente naturelle est la somme d'une ou plusieurs de ces aimantations dont l'importance respective est très variable selon qu'il

s'agit de roches volcaniques ou sédimentaires, ou même d'une roche volcanique à une autre.

C'est dans un contexte général de doute vis-à-vis de l'existence d'inversions du champ magnétique terrestre qu'intervient, en 1947, la **théorie de P.M.S. Blackett** selon laquelle le sens du moment magnétique créé par toute matière en rotation est indissolublement lié au sens de rotation de cette matière (la terre dans le cas considéré). Le sens de rotation de la terre ne pouvant s'inverser, son champ magnétique ne le peut donc pas.

**Louis Néel**, futur prix Nobel, partant de l'existence dans le réseau cristallin des minéraux ferrimagnétiques de deux sous-réseaux dont les aimantations spontanées sont de sens opposé, a imaginé (1951) plusieurs mécanismes pouvant donner à une roche, à froid, une aimantation de sens inverse à celui du champ ayant agi au cours de son refroidissement.

Le Japonais Takesi Nagata apporta une confirmation expérimentale aux théories de Néel : soumise à certaines conditions, la dacite du Mont Haruna acquerrait en effet une aimantation inverse du champ ayant agi durant son refroidissement. Mais les recherches ultérieures conduites sur de nombreuses autres roches ne permirent pas de retrouver ce phénomène.

### **Confirmation de la réalité des inversions. Périodes et épisodes**

À l'opposé les recherches poursuivies en Auvergne par A. Roche (Thèse, Paris 1953), aussi bien que celles menées sur les coulées basaltiques d'Islande par J. Hospers aboutirent à la même conclusion : les aimantations normales et inverses sont indépendantes de la nature minéralogique des roches, elles sont uniquement conditionnées par leur âge et ne peuvent s'expliquer que par des inversions du champ magnétique terrestre à certaines époques. Notons au passage que toutes les inversions connues alors concernaient le Tertiaire ou le Quaternaire ancien.

Certains chercheurs ont cru, au début, pouvoir attribuer une périodicité régulière à ce phénomène, mais celui-ci s'est révélé beaucoup plus irrégulier qu'ils ne le pensaient. On a distingué des *périodes* assez longues auxquelles l'Union Géologique Internationale a donné les noms des grands précurseurs de l'étude du magnétisme. Les plus récentes sont :

- *Brunhes*, normale, de 0 à 0,73 Ma (million d'années) ;
- *Matuyama*, inverse, de 0,73 à 2,48 Ma ;
- *Gauss*, normale, de 2,48 à 3,4 Ma ;
- *Gilbert*, inverse, de 3,4 à 5,4 Ma ; etc.

Ces périodes sont entrecoupées d'*épisodes* beaucoup plus courts durant lesquels le sens du champ magnétique terrestre est opposé à celui caractérisant la période.

À l'heure actuelle périodes et épisodes sont assez bien connus pour les 150 derniers millions d'années, c'est-à-dire depuis le Jurassique supérieur. Les inversions se sont succédées à un rythme rapide depuis l'Oligocène (30 Ma), le rythme était plus lent au début du Tertiaire et à la fin du Crétacé. Auparavant une très longue période d'aimantation normale s'est étendue de 83 à 120 Ma c'est-à-dire pendant le Crétacé supérieur. Durant le Crétacé inférieur et le Jurassique supérieur les aimantations ont été beaucoup moins stables.

### **L'épisode de Laschamp**

Le plus récent épisode a été découvert par N. Bonhommet, (Thèse Strasbourg 1972) au Puy de Laschamp et à la coulée d'Olby dans la chaîne des Puys. Cette découverte a suscité de nombreuses recherches qui ont apporté de nouveaux éléments pour la compréhension de l'évolution du champ magnétique terrestre lors d'une inversion.

L'application de la méthode de Thellier permet de retrouver, à partir de la valeur observée de l'aimantation thermorémanente (A.T.R.), l'intensité du champ au moment du refroidissement. Or les résultats parfaitement cohérents obtenus au Puy de Laschamp et à Olby (P. Roperch, N. Bonhommet et S.Lévi, *Earth Plan. Sci. Letters*, London, vol.88, 1988) indiquent une intensité de 7,7 microtesla soit 16% seulement de l'intensité du champ magnétique terrestre actuel dans la région. Les éruptions volcaniques intervenues au moment même où s'effectuait l'inversion ont donc fossilisé l'image de cette transition. A un champ dipolaire extrêmement affaibli se sont superposés des composants non-dipôle dont l'importance relative est devenue assez grande.

La similitude des directions d'aimantation aux différents lieux de prélèvement est remarquable :

Scories de Laschamp :  
I = -65°      D = 239°

Coulées de Laschamp :  
I = -66°      D = 241°

Coulée d'Olby :  
I = -68°      D = 231°

Cela implique que les mises en place des différents matériaux se soient succédées en un temps très court.

Les coordonnées des pôles géomagnétiques virtuels correspondants les placent à une grande distance du pôle sud ce qui s'accorde avec l'hypothèse d'une action relative accrue des composants non-dipôle :

Scories de Laschamp :  
latitude -46°      longitude 245°

Coulées de Laschamp :  
latitude -49°      longitude 246°

Coulée d'Olby :  
latitude -56°      longitude 245°

Pour préciser l'âge de l'épisode, de nombreuses datations utilisant différentes méthodes ont été effectuées. Les âges obtenus varient de 34 000 à 49 000 ans, un âge moyen de 46 600 ans a été proposé (P.Y. Gillot et al, 1979, *Earth Plan. Sci. Letters*, 42, 444-450).

L'épisode de Laschamp n'a généralement pas laissé de trace dans les séries sédimentaires. Les chercheurs en donnent deux explications possibles : un taux de sédimentation trop faible ou la trop courte durée de l'inversion.

En revanche des résultats obtenus en Islande sur les laves de la péninsule des Reykjanes dont l'âge est estimé à 42 900 ans ( $\pm 200$ ) ont confirmé le caractère global de l'épisode de Laschamp. Les mesures islandaises ont donné :

I = -15°      D = 258°

Elles correspondent à un pôle géomagnétique virtuel de latitude -12,1° et de longitude 255,2°.

Ici aussi, l'intensité du champ s'est considérablement affaiblie au moment de l'inversion. Elle n'était plus que de 4,2 microtesla soit moins de 1/10 de l'intensité actuelle dans la région qui est de 52 microtesla. Cela confirme qu'au cours de l'épisode l'intensité du champ est devenue extrêmement faible sans qu'il soit possible de savoir, pour l'instant, si l'inversion constatée a abouti ou non à la création d'un champ magnétique de caractère axial et de sens opposé au champ actuel.

Les auteurs (S.Lévi et al, 1990, *Earth Plan. Sci. Letters*, 96, 443-457) esti-



Plaqué en bronze posée à l'Observatoire du puy de Dôme le 23 juin 1912.

ment qu'il s'agit bien de l'épisode de Laschamp, à un stade différent de son évolution.

### **Inversions et tectonique globale**

La réalité des inversions d'un champ magnétique terrestre correspondant approximativement à un dipôle centré d'axe voisin de l'axe de rotation de la terre étant admise, l'intérêt s'est porté sur les variations systématiques et progressives de la direction des aimantations en un même lieu au cours du passé. Les travaux furent surtout le fait de chercheurs américains et britanniques (période 1955-1960). On imagina d'abord un déplacement des pôles (Polar wandering) par rapport à une écorce terrestre supposée indéformable. Mais, très vite, les divergences des résultats obtenus en Amérique et en Europe démontrèrent l'existence de dérives propres à chaque continent (Continental drift). On rejoignait ainsi les thèses proposées en 1912 par Wegener. Ces idées s'imposèrent rapidement en Amérique (1957-1958), un peu plus tard en France. Elles furent les premiers germes de la *Tectonique des plaques*.

En effet, les inversions du champ magnétique terrestre intervinrent à nouveau pour confirmer les dérives continentales et préciser leur mécanisme. Le mérite de cette découverte revint aux Britanniques Vine et Mathews (1963) qui, les premiers, découvrirent la signification des enregistrements des magnétomètres tractés par des navires océanographiques traversant les océans.

Les relevés bathymétriques et les dragages avaient, depuis longtemps déjà, mis en évidence, au milieu des océans, l'existence de dorsales volcaniques. Or les magnétomètres enregistraient, de part et d'autre de ces dorsales, des bandes symétriques de fonds océanique, aimantées alternativement de façons normale et inverse. Vine et Mathews comprirent que ce dispositif résultait à la fois du volcanisme permanent de la dorsale et de l'inversion périodique du champ magnétique terrestre. Les laves basiques émises au niveau des dorsales s'aimantent en se refroidissant et repoussent vers l'extérieur les laves qui les ont précédées. Celles-ci s'écartent donc de la dorsale en conservant la marque du champ régnant au moment de leur émission. Ainsi les inversions apportent-elles la preuve de l'expansion océanique, un des moteurs de la tectonique des plaques.

La comparaison de l'échelle des inversions établie en fonction de l'âge des matériaux continentaux étudiés (volcaniques ou sédimentaires) et la succession des anomalies à partir des dorsales révèle une concordance parfaite.

Cela confirme, s'il en était besoin, la réalité des inversions qui constituent un outil de valeur inestimable pour préciser le rythme des dérives continentales depuis le Jurassique jusqu'à l'époque actuelle.

### **Origine du champ magnétique terrestre et mécanisme des inversions**

A l'heure actuelle, l'inversion épisodique du champ magnétique terrestre est donc enfin universellement admise. De très nombreux chercheurs s'activent pour en connaître la cause et les modalités.

La cause est encore hypothétique comme l'est, à un moindre degré, l'origine du champ lui-même.

Dans un récent ouvrage (*Le noyau de la terre*, Collection Dominos, Flammarion, 1996) le physicien Jean-Paul Poirier rappelle la complexité du problème. Il est plausible que le champ magnétique soit la conséquence de courants électriques circulant dans la partie externe, fluide, du noyau et que celui-ci fonctionne comme une dynamo auto-entretenu. A l'origine de tout cela il y aurait dans la partie externe du noyau, des mouvements de convection produits à la fois par un

dégagement de chaleur venant de la graine et par un dégagements d'éléments légers.

Poirier écrit : "Les mouvements du noyau liquide, métallique, donc conducteur, à travers les lignes de force du champ magnétique, induisent des courants électriques qui, se déplaçant dans le champ, engendrent à leur tour un champ magnétique". Comment cela a-t-il commencé ? Voilà la question !

Quant aux inversions, leur origine n'est pas claire. Si l'on admet que le champ est lié à des mouvements convectifs, attribuer les inversions à une perturbation de ces mouvements est assez logique, mais le scénario nous échappe encore. Les géomagnéticiens ne sont pas d'accord entre eux sur la façon dont le champ évolue pendant l'inversion, pas plus que sur la rapidité du phénomène. Ainsi le phénomène découvert par Bernard Brunhes en 1905 est-il aujourd'hui encore, et pour longtemps sans doute, source de nouvelles interrogations.

## **ANNEXE**

### **PIERRE DAVID, PRINCIPAL COLLABORATEUR DE BERNARD BRUNHES**

*De 1900 à 1910 Pierre David a été le principal collaborateur de Bernard Brunhes.*

*Né le 1<sup>er</sup> mai 1877 à Thiers, David avait obtenu la licence ès sciences physiques en un temps où ce grade n'était délivré qu'à un très petit nombre de candidats. Ceci lui valut d'être recruté comme préparateur à la Faculté dès l'automne 1899 et de devenir ainsi le collaborateur direct de Brunhes à l'arrivée de celui-ci (automne 1900). A ce titre David enseigna les travaux pratiques des certificats de physique générale et d'électricité industrielle dont Brunhes assurait les cours.*

*Bernard Brunhes qui éprouve de grosses difficultés pour réorganiser l'Observatoire du Puy de Dôme demande à David de laisser son poste de préparateur à la Faculté pour un emploi d'aide-météorologiste à l'Observatoire. Celui-ci accepte et s'installe au sommet du Puy de Dôme où il va résider presque 10 ans, cohabitant avec le gardien et sa femme.*

*Quel que soit le temps, il effectue les relevés météorologiques*

*journaliers et les transmet par télégrammes à la station de Rabanasse. Dès le début il améliore considérablement l'installation en créant des abris pour les appareils, il conçoit et construit lui-même de nouveaux appareils car c'est un excellent physicien. Brunhes le rejoint au sommet aussi souvent que possible. Ensemble ils entreprennent l'étude du magnétisme des roches et en publient les résultats. En 1904 David démontre la stabilité de l'aimantation rémanente des dalles de trachyte du temple de Mercure dans une importante Note aux Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (**Sur la stabilité de la direction d'aimantation dans quelques roches volcaniques**, C.R.Acad.Sci., Paris, 138, 41-45). Bernard Brunhes le fait nommer météorologiste adjoint.*

*La mort subite de Bernard Brunhes porte à Pierre David un coup très dur. Ses relations avec le personnel de Rabanasse ont toujours été médiocres. Sa santé s'est dégradée au cours des longs hivers passés au sommet du Puy de Dôme. De plus, il est désormais marié. Il cherche alors une possibilité de quitter l'Observatoire. Après son accession au grade de météorologiste de 1<sup>ère</sup> classe, il est nommé, à compter du 1<sup>er</sup> janvier 1917, Directeur de la Station de Météorologie Agricole de Montpellier dépendant du Ministère de l'Agriculture. Nous perdons alors sa trace.*

# Fascinants Cadrans solaires



**Jocelyne ALLEE**  
Inspectrice Pédagogique  
Régionale Honoraire

Depuis l'aube de l'humanité  
le soleil est notre horloge.

Le temps est une notion subjective et il semble impossible d'en donner une définition : "Quand on ne m'interroge pas sur le temps, je sais ce qu'il est ; quand on m'interroge, je ne le sais plus.". Pourtant, la nécessité d'organiser les activités agricoles, les contraintes de la vie en société, puis la rigueur exigée par les scientifiques ont amené les hommes à définir un paramètre temps uniforme, dégagé des perceptions subjectives, et pour cela, à trouver ou construire des garde-temps. Depuis des temps reculés, les phénomènes astronomiques (les mouvements apparents des astres, soleil et lune en particulier) ont été utilisés, grâce à leur périodicité, pour définir une unité conventionnelle, et fournir les repères de la vie quotidienne.

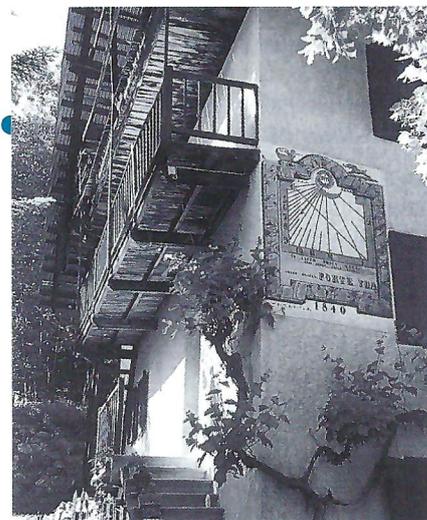
## LA MESURE DU TEMPS... AU COURS DU TEMPS

Les cadrans solaires existent depuis l'Antiquité, notamment dans les civilisations méditerranéennes. Les pre-

miers gnomons furent de simples bâtons plantés dans le sol. Mais les cadrans solaires ne peuvent rendre service la nuit ou en l'absence de soleil. Ils étaient donc suppléés par d'autres instruments comme les sabliers et les clepsydres, également utilisés dans le monde asiatique. Une clepsydre ou horloge à eau est un récipient percé d'un orifice à sa base, de sorte que l'eau s'écoule dans une cuve munie d'une échelle ; pour que soit assuré un écoulement régulier de l'eau, il faut que le récipient supérieur ait une forme particulière évasée.

Chez les Anciens la mesure du temps présentait une difficulté à cause de la non constance de l'heure. En effet ils partageaient en 12 heures de jour la durée séparant le lever du coucher du soleil, et en 12 heures de nuit la durée séparant le coucher du lever du soleil, de sorte que l'heure de jour n'était en général pas égale à l'heure de nuit, et que leur durée était variable au cours de l'année. Ces heures anciennes sont appelées heures temporaires. Notons qu'il devait être bien difficile de se donner rendez-vous à cette époque.

Jusqu'au XIV<sup>ème</sup> siècle, les Arabes développent la science des cadrans. En Europe la gestion du temps est longtemps l'affaire des églises et des monastères. Les cloches règlent non seulement la prière mais aussi les activités de tout un chacun. Enfin les cadrans solaires connaissent une expansion spectaculaire du XVI<sup>ème</sup> au XVIII<sup>ème</sup> siècle. C'est en 1784 que Jérôme de la Lande écrit " ...Le temps moyen et uniforme est celui qu'on devrait toujours employer dans l'usage de la vie comme dans les observations et tables astronomiques. " Mais il y a désormais un concurrent sérieux : l'horloge mécanique fondée sur la périodicité d'un mouvement pendulaire entretenu. Depuis le XIV<sup>ème</sup> siècle les cités se dotent de magnifiques tours d'horloge munies de cloches et parfois d'automates. Quant aux montres elles



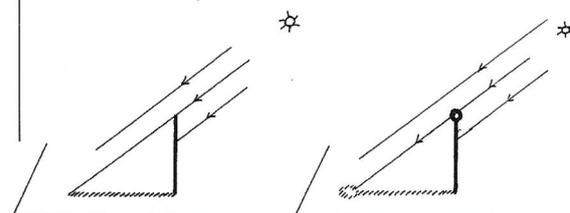
apparaissent au début du XVI<sup>ème</sup> siècle. Plus près de nous, c'est au XIX<sup>ème</sup> siècle que les horloges deviennent électriques, et au début du XX<sup>ème</sup> que l'on met à profit le phénomène de piézo-électricité dans les horloges et montres à quartz : Une lame de quartz soumise à une tension alternative devient un oscillateur de fréquence particulièrement stable. Enfin les garde-temps modernes sont des horloges atomiques dont la marche régulière est garantie à 10<sup>-10</sup> près.

Malgré cette course à la précision, les cadrans solaires ne sont jamais vraiment tombés en désuétude et on a continué d'en construire jusqu'à nos jours. Lorsque les horloges mécaniques les ont supplantés en raison de leur meilleure précision, on les a recherchés comme éléments décoratifs des façades. Aujourd'hui leur succès perdure et on voit aussi bien de petits cadrans orner les murs de maisons individuelles, que des œuvres prestigieuses contribuer à embellir notre cadre de vie. Peut-être leur attrait tient-il au fait qu'ils manifestent l'intégration de l'homme dans son environnement et dans l'univers tout entier.

## L'HEURE SOLAIRE ET SES VICISSITUDES

Une horloge solaire est un instrument permettant de rythmer le temps au moyen d'une ombre ou d'une tache lumineuse.

Figure 1- Ombre portée ou tache lumineuse



Une horloge solaire fonctionne donc sur le mouvement apparent du soleil, qui est le résultat des mouvements de rotation diurne de la terre sur elle-même et de rotation annuelle de la terre autour du soleil. La terre tourne sur elle-même autour d'un axe passant par les pôles. Le plan perpendiculaire à cet axe est le plan équatorial. Les grands cercles de la terre passant par les pôles sont les méridiens.

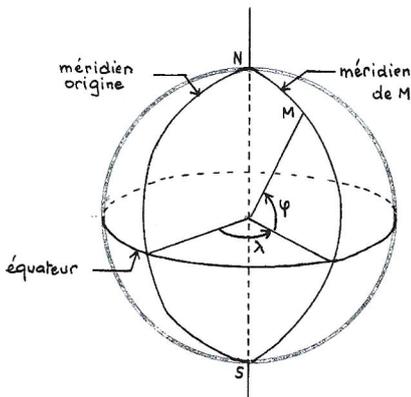


Figure 2- Latitude et longitude d'un lieu

La figure 2 montre comment on repère un point de la surface terrestre par deux angles, la latitude  $\varphi$  et la longitude  $\lambda$ , moyennant le choix d'un méridien origine.

En un lieu donné il est midi vrai lorsque le soleil passe au zénith du lieu, c'est-à-dire dans le plan du méridien. Connaissant l'heure solaire au méridien origine, on peut prévoir l'heure sur un autre méridien, en tenant compte de la longitude. Sachant que  $360^\circ$  correspondent à 24 h, le décalage horaire est :

$$L = 24 \lambda / 360$$

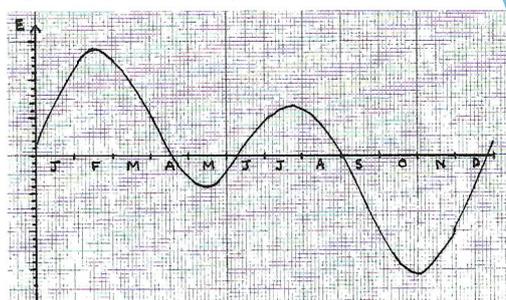
(où L est en heures et  $\lambda$  en degrés)

Ce décalage est une avance si le lieu considéré est à l'est du méridien origine, et un retard dans le cas contraire.

En réalité, la terre est partagée en 24 fuseaux horaires qui ne sont pas exactement des fuseaux, car, pour des raisons pratiques, ils tiennent compte des frontières.

En outre, en un lieu donné, la durée du jour solaire, soit le temps séparant deux passages consécutifs du soleil au zénith, n'est pas invariable au cours de l'année. Le jour devrait valoir 86400 secondes, la seconde étant définie à partir d'un étalon de temps fiable.

Figure 3- Equation du temps



Mais le mouvement de la terre autour du soleil est elliptique et il s'ensuit que sa vitesse n'est pas uniforme, d'où un décalage de l'heure qu'on appelle équation du temps, et qui sera noté E. La figure 3 représente l'équation du temps.

Il est possible de traduire cette courbe d'une autre manière en portant, le long de l'axe des abscisses, l'écart de temps de gauche à droite pendant 6 mois, et de droite à gauche les 6 mois suivants ; on obtient alors une courbe qui se ferme sur elle-même, qu'on appelle, en raison de sa forme, la courbe en huit. On verra plus loin que cette courbe figure sur certains cadrans solaires.

Il faut encore tenir compte de l'heure qu'on ajoute en hiver et des deux heures en été, et en définitive, l'heure H que nous devons lire sur nos montres est liée à l'heure solaire  $H_s$  par :

$$H = H_s + L + E + 1 \text{ (en hiver) ;}$$

$$H = H_s + L + E + 2 \text{ (en été).}$$

## PRINCIPAUX TYPES DE CADRANS SOLAIRES

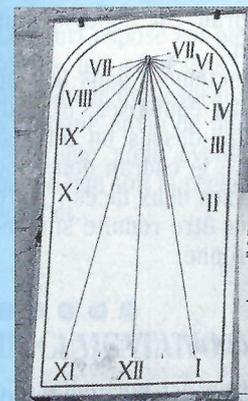
Un cadran solaire comporte un objet dont on va observer l'ombre portée : le style, et une surface plane, la table, sur laquelle sont tracées les lignes horaires c'est-à-dire les traces de l'ombre aux différentes heures de la journée (le style peut être remplacé par un cailleton qui donne une tache lumineuse sur la table comme sur la figure 1). Le style est toujours parallèle à l'axe de rotation de la terre. Les lignes horaires convergent au point où aboutit le style rectiligne et qu'on appelle le centre du cadran. On a l'habitude de classer les cadrans suivant l'orientation du plan de la table.

### Cadran équatorial

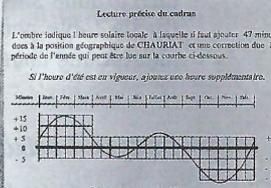
Le plan du cadran est parallèle à l'équateur terrestre, donc perpendiculaire à l'axe de rotation de la terre et

## QUELQUES CADRANS SOLAIRES EN AUVERGNE

(liste non exhaustive)



**Chauriat** : cadran sur la façade sud de l'église



- ALLIER**  
**Bourbon-l'Archambault** : cadran dans une tour du château  
**Chantelle** : cadran du matin peint dans le cloître de l'abbaye Saint-Vincent  
**Charroux** : vestiges de cadran sur le beffroi  
**Malicorne** : grand cadran rectangulaire sur une tour à côté de l'église  
**Mayet-de-Montagne** : cadran analemmatique dans le collège  
**Montluçon** : deux cadrans du matin au lycée Paul Constans  
**Saint-Pourçain-sur-Sioule** : cadran méridional sur un bâtiment près de l'église

- HAUTE-LOIRE**  
**La Chaise-Dieu** : cadran semi-circulaire dans le cloître  
**Lavaudieu** : grand cadran semi-circulaire dans l'ancienne abbaye  
**Le Puy-en-Velay** : cadran sur la cathédrale  
**Monistrol d'Allier** : cadran déclinant du matin sur l'église  
**Saugues** : cadran légèrement déclinant du matin gravé et peint sur l'hôtel de ville

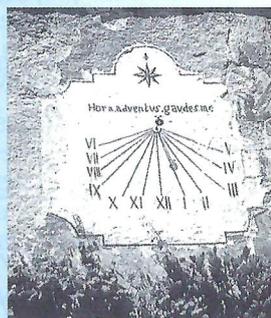
- PUY-DE-DÔME**  
**Aigueperse** : cadran déclinant du matin sur l'hôtel de ville  
**Ambert** : cadran moderne au Moulin Richard de Bas  
**Chamalières** : vestige de cadran sur l'église

- Clermont-Ferrand** : cadran sur la façade sud de la cathédrale

- Davayat** : Sur l'un des murs du château de Davayat, un cadran solaire vertical déclinant du matin avec la devise : "Hora adventus gaudet me" - L'heure de ton arrivée me réjouit.

- Issoire** : cadran déclinant du matin porte sud

- Oloix** : cadrans sur deux maisons avant l'église en montant  
**Orcival** : plusieurs cadrans sur l'église  
**Romagnat** : cadran déclinant du matin sur la façade de la mairie  
**Saint-Sandoux** : cadran méridional près de la tour des remparts  
**Volvic** : cadran méridional sur une fontaine



# CADRAN EQUATORIAL

Figure 4- Cadran équatorial

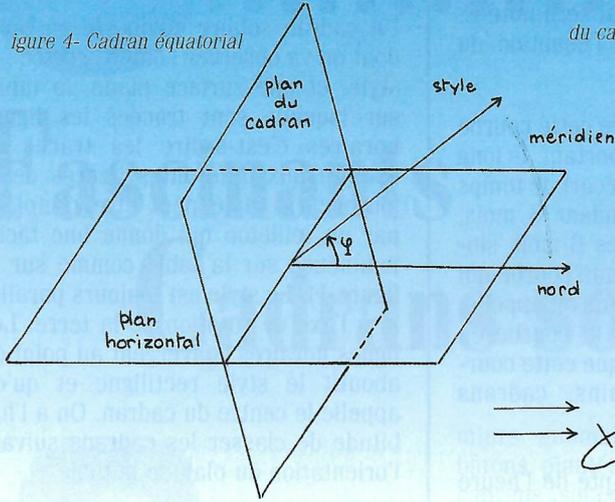


Figure 5- lignes horaires du cadran équatorial

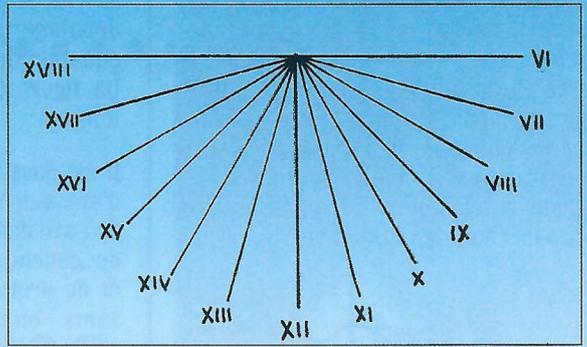
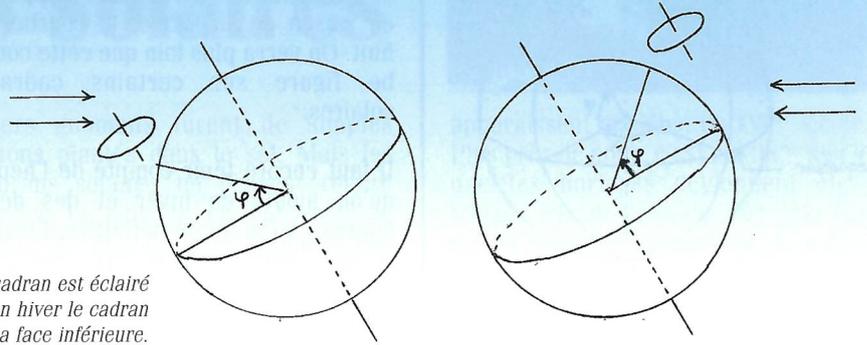


Figure 6- En été le cadran est éclairé par sa face supérieure, en hiver le cadran est éclairé par sa face inférieure.



au style. L'extrémité de l'ombre décrit un arc de cercle ayant pour centre le centre du cadran et les lignes horaires sont équidistantes. D'une heure à l'autre elles font entre elles des angles de 15°. Ce cadran est donc le plus simple à réaliser.

Le soleil est exactement dans le plan de l'équateur aux équinoxes, et, suivant la saison au-dessus ou au-dessous de ce plan : le cadran doit donc être gradué sur ses deux faces (figure 6). La table peut être réduite simplement à une couronne.

## Cadran horizontal

Le plan du cadran est horizontal ; le style fait donc avec la table un angle égal à la latitude. Les lignes horaires sont les projections sur le plan horizontal des lignes horaires du cadran équatorial, elles ne sont plus équidistantes mais peuvent être calculées par la géométrie.

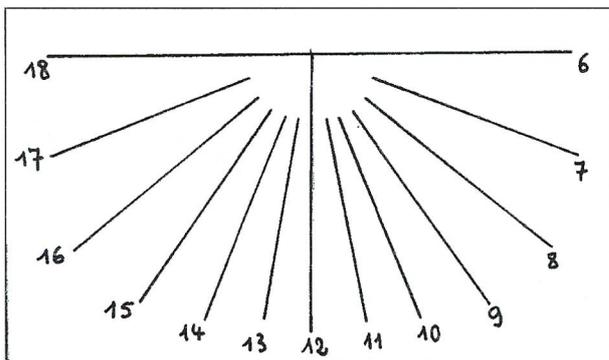


Figure 7- Lignes horaires d'un cadran horizontal

## Cadrans verticaux

De nombreux cadrans solaires sont fixés sur les façades d'édifices et sont par conséquent verticaux. Le style, parallèle à l'axe du monde, pointe vers le sol.

Si le plan du cadran est orienté exactement vers le sud, le cadran est dit méridional.

Si le plan vertical du cadran n'est pas exactement orienté vers le sud, le cadran est dit déclinant. Pour les cadrans placés sur des murs orientés vers l'est, on observe que les lignes horaires sont plus serrées et plus nombreuses le matin ; seules quelques heures de l'après-midi sont indiquées :

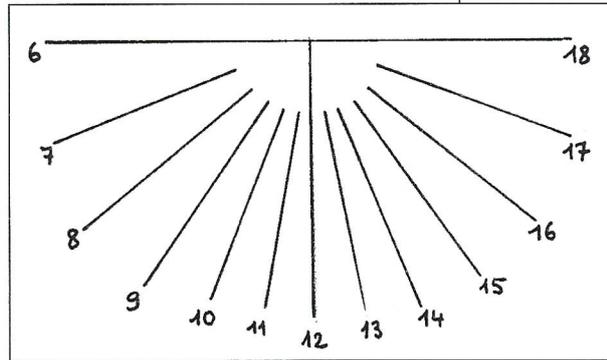


Figure 8 lignes horaires d'un cadran méridional

La figure 8 indique la disposition des lignes horaires. Le cadran ne donne l'heure que si le soleil est plus au sud que la ligne est-ouest.

On remarquera que par rapport au cadran horizontal les lignes du matin et les lignes de l'après-midi sont inversées ; cela permet d'identifier un cadran du commerce vendu sans notice de montage.

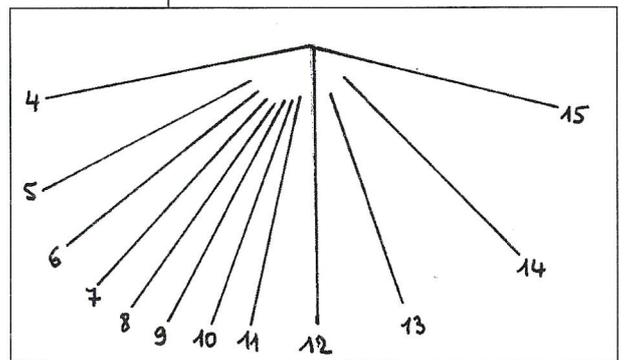


Figure 9 cadran vertical déclinant du matin

il s'agit de cadrans solaires verticaux déclinants du matin. Les choses s'inversent pour les cadrans verticaux déclinants de l'après-midi.

## Cadran analemmatique

Il s'agit d'un cadran horizontal elliptique associé à un style vertical mobile le long du petit axe de l'ellipse. Ce type de cadran peut être construit directement sur le sol et c'est l'observateur, qui, en se déplaçant sur une graduation correspondant à la date, projette son ombre sur l'ellipse.

## Cadran à fibres optiques

Ce type de cadran ne comporte pas de style, mais une fente, traversée par un pinceau de rayons solaires. En se déplaçant au cours de la journée, ce pinceau parcourt un ensemble de fibres optiques, qui, par une succession de réflexions totales, transmettent la lumière à différents points d'un écran, lesquels vont donc s'allumer l'un après l'autre. Le cadran du forum des halles à Paris fonctionne sur ce principe.

## LA LECTURE DES CADRANS

Les cadrans les plus simples, construits pour un lieu donné, n'indiquent que l'heure solaire locale. D'autres, plus sophistiqués, indiquent les corrections de longitude et d'équation du temps. Enfin certains fournissent beaucoup plus d'indications encore.

### Utilisation de la courbe en huit

Elle fut tracée pour la première fois en 1730 par Granjean de Fouchy. On peut y inclure les deux corrections de longitude et d'équation du temps et la tra-

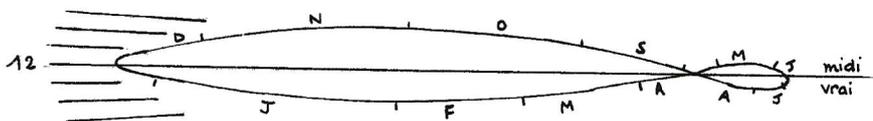


Figure 10- La courbe en huit

cer autour de la ligne horaire du midi vrai. Dans ce cas elle permet de trouver l'heure moyenne pour chaque époque de l'année. Sur certains cadrans elle est même tracée autour de chaque ligne horaire.

### Lecture de la date

Suivant la saison, le soleil à une heure donnée, se trouve plus ou moins haut dans le ciel et, en conséquence, l'ombre portée d'un style présente une longueur variable. La figure 11 montre que, sur un plan horizontal, l'ombre est plus courte en été, plus longue en hiver,

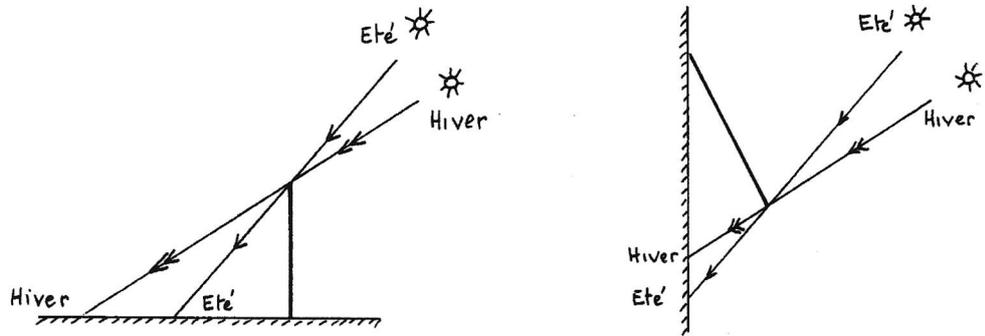


Figure 11- Variation de la longueur de l'ombre sur un plan horizontal et sur un plan vertical

et que les choses s'inversent pour l'ombre portée sur un plan vertical. Le lieu de l'extrémité de l'ombre pendant une journée est une courbe qui coupe les lignes horaires et qui varie avec la date : on peut l'appeler arc diurne. Le réseau formé par les arcs diurnes est compris entre deux courbes extrêmes relatives au solstice d'hiver et au solstice d'été. Bien entendu il n'est pas question de représenter les arcs diurnes de tous les jours de l'année. Sur de nombreux cadrans figurent seulement les arcs des solstices et celui de l'équinoxe pratiquement rectiligne.

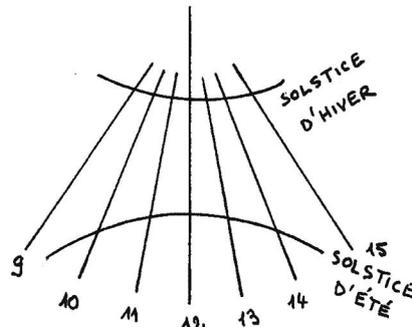


Figure 12- Arcs diurnes sur un cadran méridional

Pour d'autres cadrans, les arcs diurnes sont plus nombreux et correspondent aux signes du zodiaque.

### Les heures anciennes

Certains cadrans donnent les heures anciennes. Nous avons cité plus haut les heures temporaires, appelées aussi artificielles. Dans ce système le laps de temps qui sépare le lever du coucher du soleil est partagé en 12 heures et par conséquent le midi vrai est noté 6 heures.

Les heures babyloniennes (utilisées par les Anciens en Egypte et Asie Mineure)

sont comptées à partir de l'heure du lever du soleil. Par exemple si le soleil s'est levé à 8 heures, à midi il sera seulement 4 heures pour les heures babyloniennes. Pour passer de l'heure babylonique à l'heure classique, il faut ajouter un nombre variable suivant l'époque de l'année. Inversement si un cadran donne à la fois l'heure classique et l'heure babylonique, on peut trouver l'heure de lever du soleil et la date.

Utilisées par les Romains, puis pratiquement jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle par les Italiens, les heures italiennes sont, elles, comptées à partir du coucher du soleil du jour précédent.

## CONCLUSION

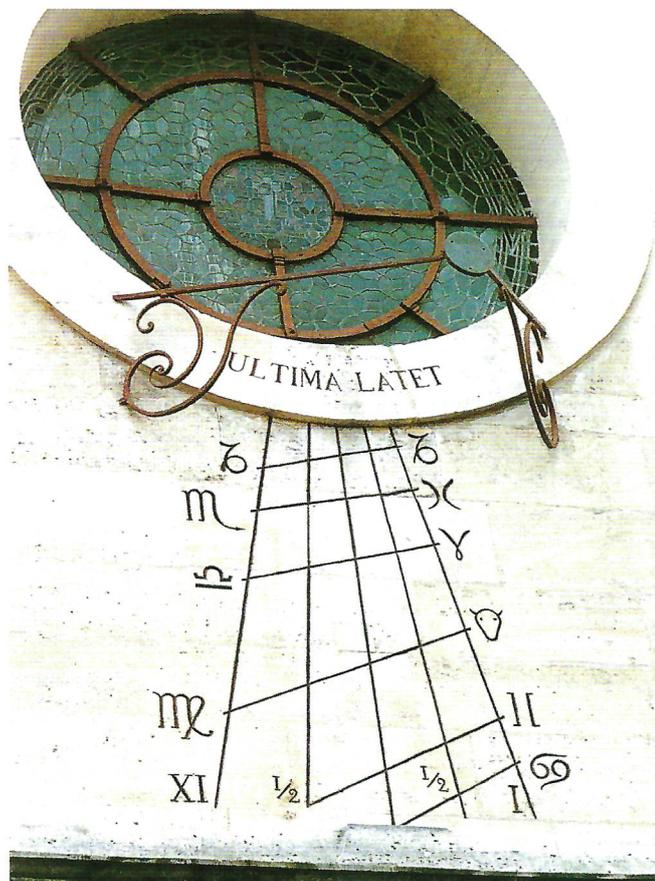
Ce court exposé est bien loin d'épuiser toutes les richesses scientifiques et artistiques des cadrans solaires. Mais, s'il donne envie de mieux comprendre ceux que nous avons sous les yeux quelle que soit la région, il aura atteint son but.

## DOCUMENTATION

### Quelques exemples parmi tant d'autres

Hôpital de la Salpêtrière (Paris 12<sup>e</sup> arr.) ①

Sur la façade méridionale de la chapelle Saint-Louis qui se trouve dans la cour de l'hôpital, on peut voir une petite méridienne placée sous une verrière circulaire. Il s'agit d'un cadran solaire vertical déclinant, surmonté de la devise : "Ultima latet" - La dernière est cachée. On peut y distinguer 3 lignes horaires et les chiffres romains XI et I, le XII n'étant pas inscrit, ainsi que deux lignes correspondant aux demi-heures intermédiaires. Ces lignes sont coupées par 6 arcs diurnes dont certains portent les signes du zodiaque, et qui matérialisent le déplacement de la tache lumineuse aux différentes époques de l'année. Les



1 Le cadran de l'hôpital de la Salpêtrière

|   |              |   |            |
|---|--------------|---|------------|
| ♐ | : capricorne | ♊ | : verseau  |
| ♐ | : sagittaire | ♋ | : poissons |
| ♏ | : scorpion   | ♈ | : bélier   |
| ♎ | : balance    | ♉ | : taureau  |
| ♍ | : vierge     | ♊ | : gémeaux  |
| ♌ | : lion       | ♋ | : cancer   |

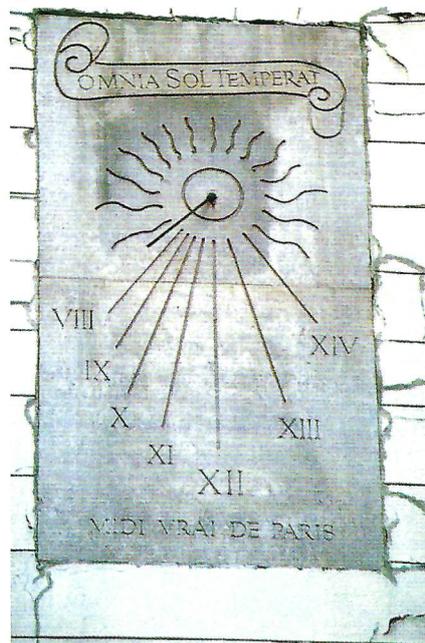
Figure 13- Les symboles des signes du zodiaque

signes du lion, du sagittaire et du verseau ne figurent pas sur le tracé. La tache lumineuse est obtenue à partir d'un disque percé soutenu par deux bras fixés au cadran.

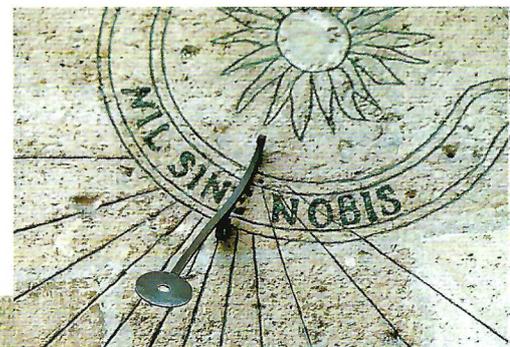
### 56 rue du Cherche-midi (Paris 6<sup>e</sup> arr.) 2

Ce cadran vertical déclinant du matin est récent. Il est installé sur un ancien hôtel du XVII<sup>e</sup> siècle. On y lit la devise : "Omnia sol temperat" - Le soleil gouverne tout. Sept lignes horaires y sont inscrites et numérotées de VIII à XIV.

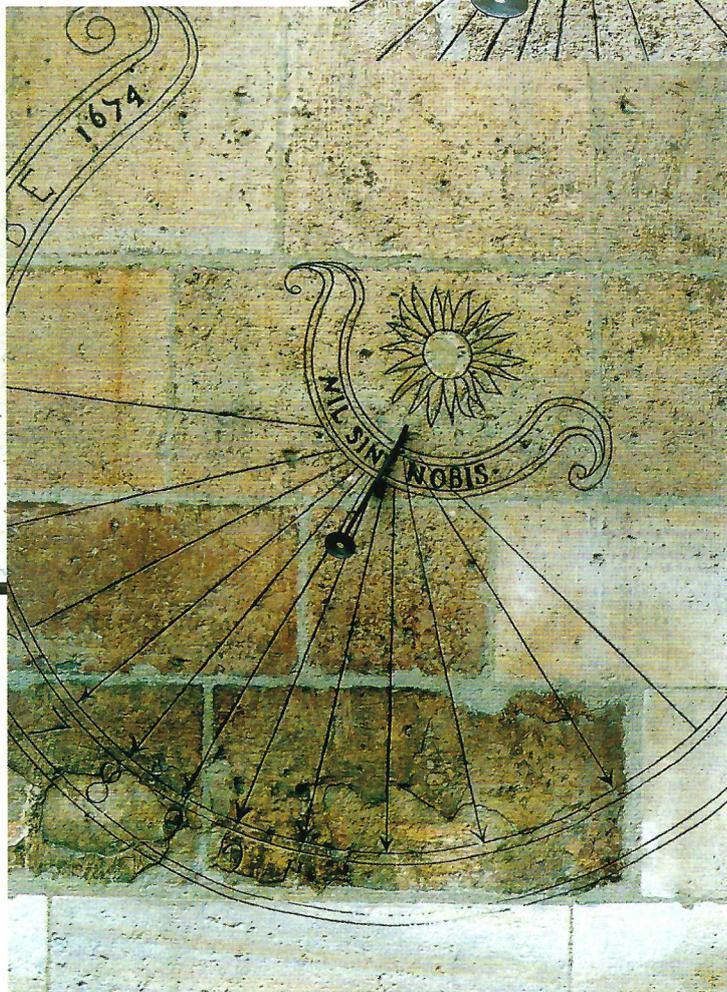
2 Le cadran de la rue du cherche-midi



3 La devise



4 L'ensemble du cadran



### Le musée de Cluny

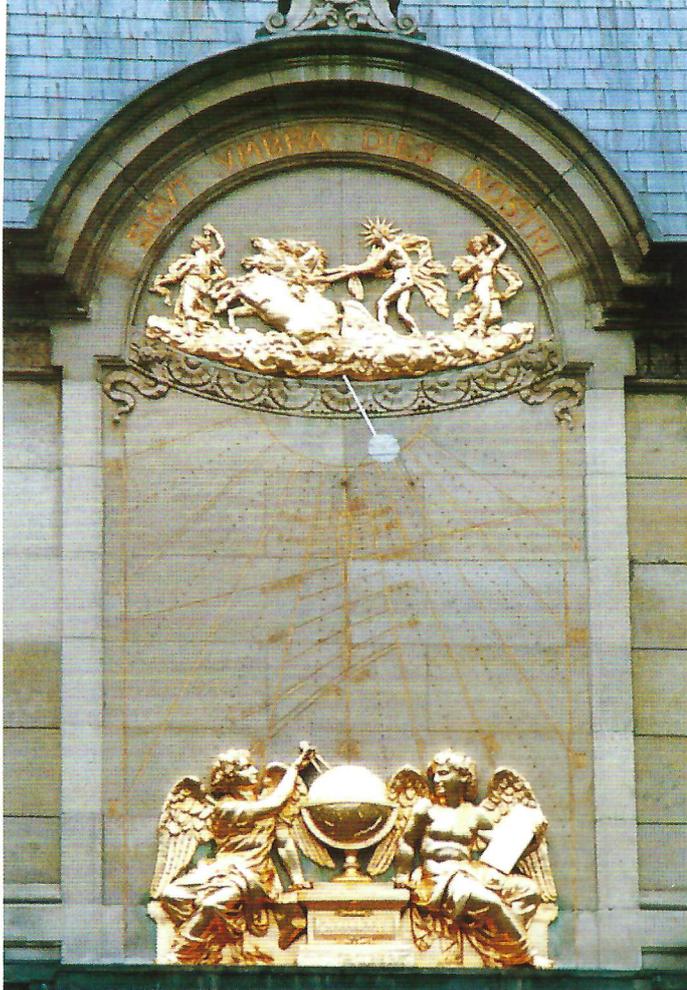
(Paris 5<sup>e</sup> arr.) 3 et 4

En pénétrant dans la cour du musée, on découvre, gravé sur une tour, un cadran vertical déclinant du matin. Les lignes horaires sont numérotées en chiffres arabes de 4 h du matin à 3 h de l'après-midi, sur une banderole où l'on peut également lire la date : 1674. Une banderole, plus petite, annonce : "nil sine nobis" - Rien sans nous.

### La Sorbonne (Paris 5<sup>e</sup> arr.) 5

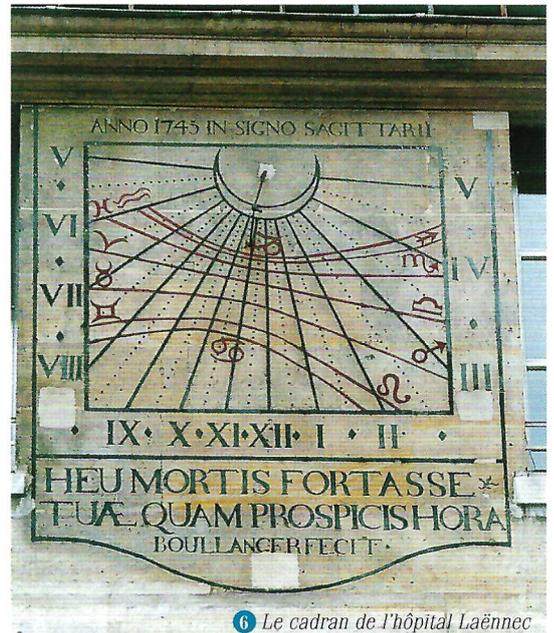
Le cadran déclinant de l'après-midi qui se trouve dans la cour d'honneur de la Sorbonne est assez haut placé et peu visible. On peut toutefois distinguer dix lignes horaires numérotées en chiffres romains de VIII (matin) à V (après-midi), dix lignes pour les demi-heures, et la courbe en huit qui permet de passer de l'heure solaire à l'heure moyenne.

Le cadran est surmonté d'une sculpture représentant le char de Phebus, et



5 Le cadran de la Sorbonne

d'une inscription : "sicut umbra dies nostri" - Comme l'ombre, passent nos jours. Sous le cadran on lit la date : MDCCCLXXVI (1876), qui est celle de la restauration du cadran.

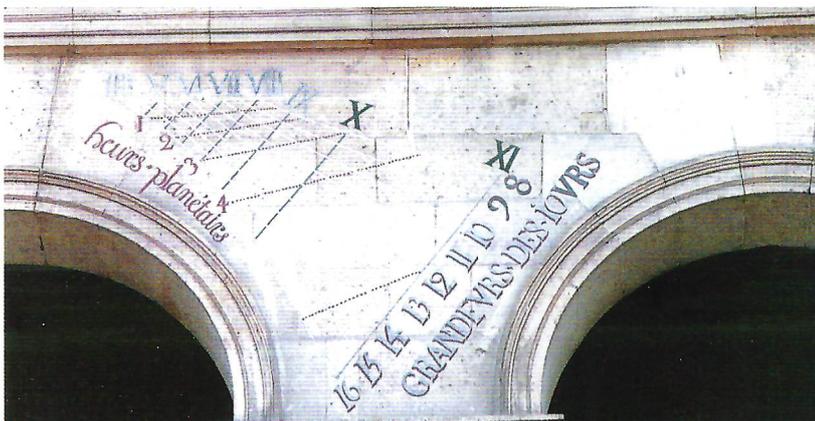


6 Le cadran de l'hôpital Laënnec

#### Hôpital Laënnec (Paris 7<sup>e</sup> arr.) 6

Dans une des cours de l'hôpital Laënnec, sur une façade exposée au sud, est peint un cadran solaire vertical déclinant du matin, daté de 1745, portant des lignes horaires de 5 h du matin à 5 h de l'après-midi, inscrites en chiffres romains. Figurent aussi, mais peints en rouge, les lignes et signes du zodiaque. La phrase : " Heu mortis fortasse tuae quam prospicis hora " signifie : hélas, cette heure que tu regardes est peut-être celle de ta mort.

7 et 8 Les cadrans exposés à l'est

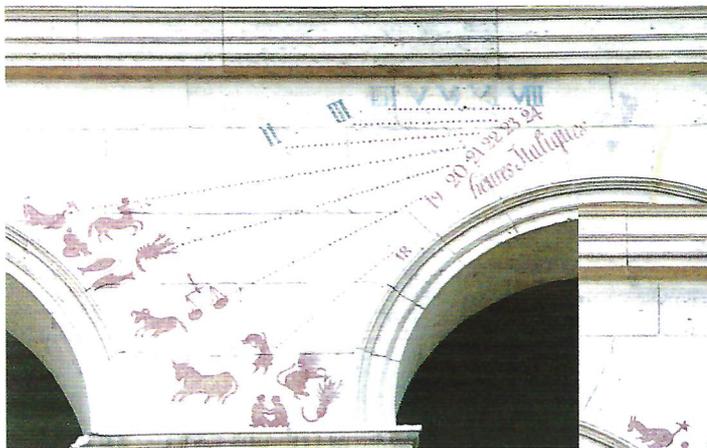


#### Hôtel des Invalides (Paris 7<sup>e</sup> arr.)

Dans la cour d'honneur de l'hôtel des Invalides, on peut voir 8 cadrans, datant du XVI<sup>ème</sup> ou du XVII<sup>ème</sup> siècle. Seule la façade orientée au nord n'en possède pas.

Sur la façade est (7 et 8), se trouvent deux cadrans verticaux déclinants du matin, indiquant les lignes horaires en chiffres romains. Ces lignes sont coupées par les lignes des heures temporaires, numérotées par des chiffres arabes, et appelées ici "heurs planetaires" ou "heurs artificielle". A la base des lignes horaires, on lit la durée des jours ou la durée des nuits.

Sur la façade ouest (9 et 10), on peut voir deux cadrans verticaux déclinants de l'après-midi, donnant en chiffres romains les heures de II à VIII, ainsi que les heures babyloniennes ou italiennes en chiffres arabes. En outre les lignes du zodiaque sont tracées en pointillé et identifiées par les symboles des signes zodiacaux. En partant de gauche et du bas, on reconnaît : capricorne, vierge, poissons, bélier, taureau, gémeaux, cancer, lion, verseau, balance, scorpion, sagittaire. Il y a donc eu inversion entre vierge et verseau. Sur le document, on distingue le style sur le cadran de gauche, celui de droite a disparu.



9 et 10 Les cadrans exposés à l'ouest



Les deux cadrans de la façade méridionale sont identiques et remontent au XVII<sup>ème</sup> siècle. Légèrement déclinants, ils sont gradués de VII (matin) à V (après-midi). Par la suite à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, furent tracés les deux cadrans des piliers avec les devises : " Sub umbra quiescunt "

11 Les cadrans de la façade méridionale

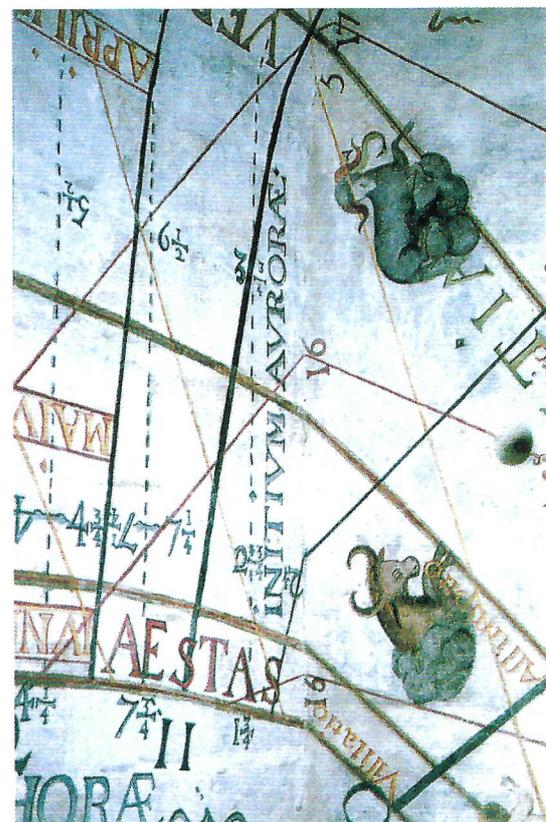


Lycée Stendhal (Grenoble) 14 et 14bis

Le lycée Stendhal est installé dans un ancien collège jésuite datant de la fin XVII<sup>ème</sup> – début XVIII<sup>ème</sup> siècle. On peut y visiter une horloge solaire dont le principe est le suivant : un pinceau de rayons solaires tombe sur un petit miroir posé sur le bord d'une fenêtre exposée au sud et la lumière réfléchie vient donner une petite tache lumineuse sur le plafond de l'escalier. Suivant l'heure et la saison la tache se déplace sur des lignes qui permettent de lire l'heure, la date, le signe du zodiaque,

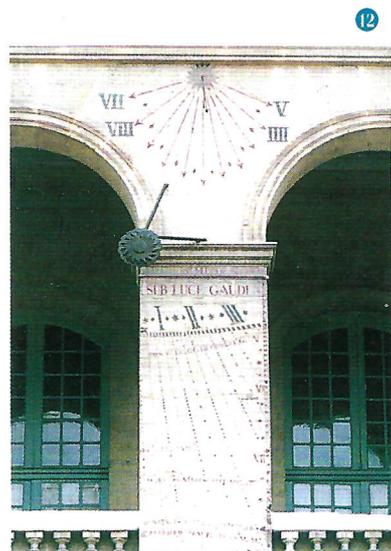
Ils reposent à l'ombre- et " Sub luce gauden " (pour gaudent)- Ils se réjouissent sous la lumière. Sur le pilier de gauche, la ligne de midi est complétée par une courbe en huit. On peut lire aussi les noms de Choiseul, qui fut secrétaire d'état aux Affaires Etrangères en 1758 puis ministre de la guerre, et du Maréchal de Segur, secrétaire d'état à la guerre de 1780 à 1787.

11 Les lignes qui ornent le plafond

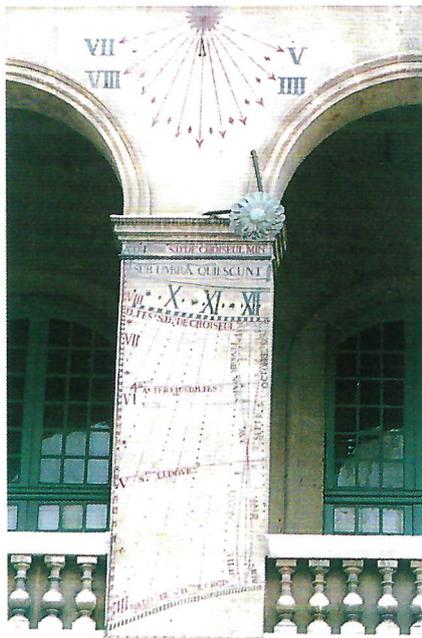


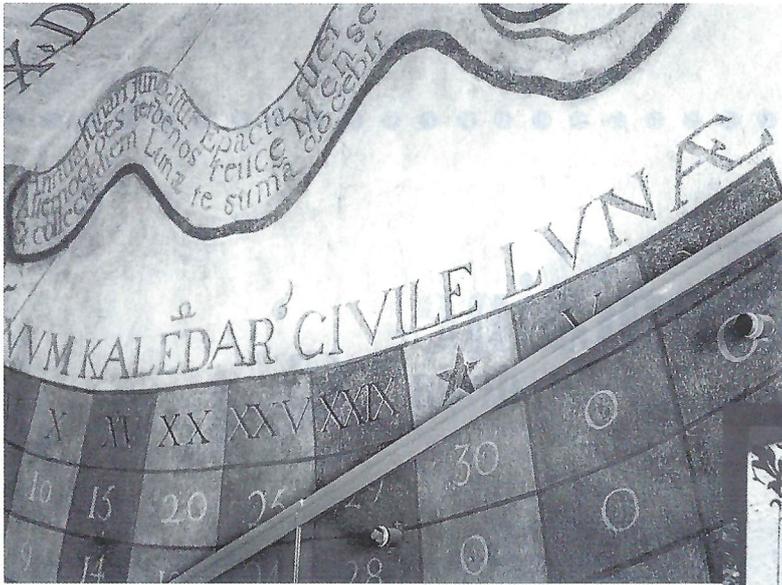
11 12 13

13



12





les heures de lever et de coucher du soleil etc... Les lignes correspondant aux heures classiques sont tracées en noir, en rouge ce sont les heures italiques et en jaune les heures babyloniennes. La restauration des peintures a permis de retrouver la signature du père jésuite Jean Bonfa (1638-1724), qui a probablement réalisé ce cadran avec ses élèves, et la date de la construction : 1673. Jean Bonfa, cartographe et astronome, fut également directeur de l'école des ingénieurs hydrographes fondée par Colbert à Marseille.

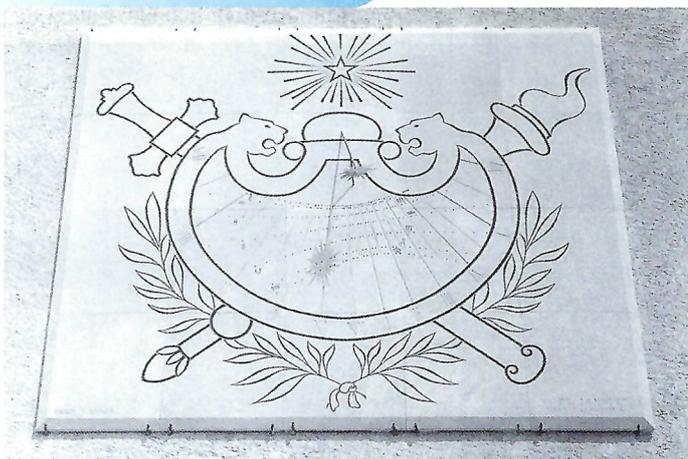
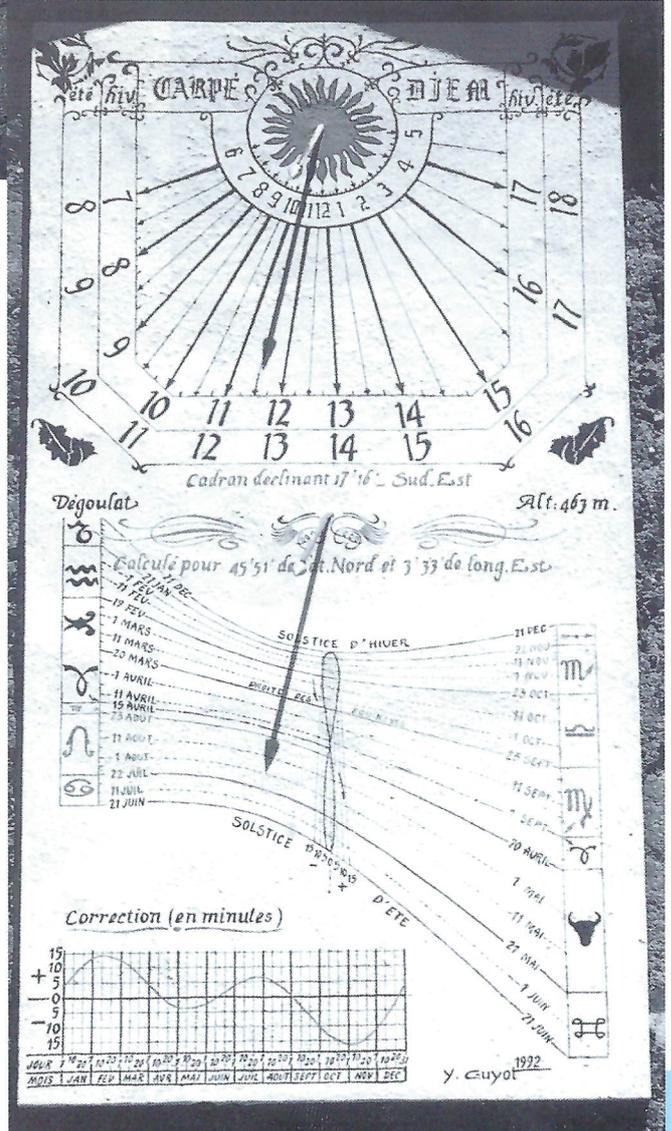
## ILS RÉALISENT VOTRE CADRAN SUR MESURE

Nous avons pu contacter deux cadraniers gnomonistes qui, d'une part savent restaurer les cadrans anciens, d'autre part réalisent des cadrans modernes, parfaitement calculés pour un lieu et une orientation donnés.

**Yves GUYOT** est installé à Thiers (A la bonne heure, 20 Place Saint-Genès, 63300 Thiers). La photo montre une de ses réalisations. Ce cadran déclinant du matin, installé à Dégoulat (Thiers), indique l'heure solaire locale, l'heure légale, la date et les signes zodiacaux, l'équation du temps. Il porte la devise : "Carpe diem". YVES Guyot a obtenu en 1999 le Prix

Artisans et Métiers d'art de l'an 2000 pour la région Auvergne, et travaille entre autres au projet "Euro-pyramid 2000", place de la Concorde à Paris. <http://perso.wanadoo.fr/eliote/cadran.htm>

**Philippe LANGLET** (8 Grande rue, 89100 St-Martin-du-Tertre), maître artisan, meilleur ouvrier de France, membre de la Société Astronomique de France a réalisé le cadran solaire ci-contre pour la caserne du Groupe Géographique à Joigny (89) <http://perso.wanadoo.fr/philippe.langlet> e-mail Philippe.Langlet@wanadoo.fr



### Bibliographie

Les renseignements sur les cadrans solaires de Paris sont tirés de CADRANS SOLAIRES DE PARIS, Andrée GOTTELAND et Georges CAMUS, CNRS Editions, 1997

Les photos sont de R. Mouchet, Y. Guyot, P. Langlet et J. Allée.

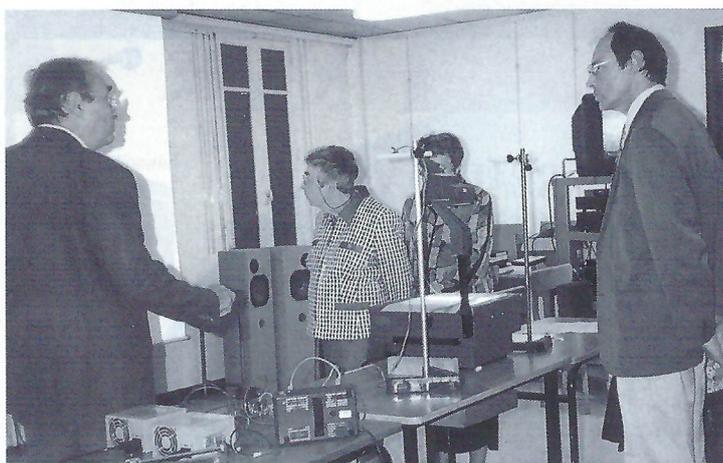
La liste des cadrans solaires d'Auvergne est un extrait d'une liste plus complète communiquée par Michel LEBLOND, spécialiste de glyptographie, épigraphie et gnomonique. L'auteur du présent article remercie M. Leblond pour cette participation.



Manipulation du compteur de radioactivité CRAB par Jocelyne Allée

## Semaine de la Science

Les expériences présentées par Bernard Ragout



L'A.D.A.S.T.A. a participé sous plusieurs formes à la Semaine de la Science "du 18 au 24 octobre 1999"

1 - Journées "portes ouvertes" à l'A.D.A.S.T.A., 19, rue de Bien-Assis avec

- Présentation d'expériences sur :
  - L'électromagnétisme par M. Bernard Ragout
  - la Radioactivité par Mme Jocelyne Allée
- Exposé de M. Paul-Louis Hennequin sur :
  - La mesure de la Terre avec projection de films

2 - Participation du Lycée Marie Curie

- Séance de manipulations de spectrophotomètre par M. Sahnoune

3 - Conférence de M. Jean-Luc Gardette sur le vieillissement des polymères



Au Lycée Marie Curie, Monsieur le Recteur, Monsieur le Proviseur du Lycée, Madame l'Inspectrice de l'Education Nationale.



L'assistance à la conférence de Monsieur Gardette.

# Photovieillissement des matériaux polymères

**Jean-Luc Gardette**  
**Professeur à**  
**l'Université Blaise Pascal**  
**Directeur de l'UMR CNRS-UBP 6505**  
**Laboratoire de Photochimie**  
**Moléculaire et Macromoléculaire**  
**Université Blaise Pascal**  
**(Clermont II)**  
**63177 Aubière cedex**



*Monsieur Gardette, pendant la conférence.*

L'exposition d'un matériau polymère aux contraintes de l'environnement entraîne à plus ou moins long terme une dégradation de ses propriétés mécaniques. Cette évolution apparaît plus comme la conséquence d'un vieillissement chimique que celle d'un vieillissement physique. Le polymère soumis au vieillissement doit alors être traité comme un "réacteur photochimique": on doit donc identifier les événements chimiques qui interviennent sur les chaînes macro-moléculaires et qui sont réellement responsables de la dégradation physique. L'étude d'un tel système est basée sur des expériences conduites en conditions de laboratoire, à l'aide de dispositifs destinés à accélérer les phénomènes mis en jeu, et permettant d'étudier le substrat pendant toute sa durée de vie.

La transposition des données obtenues au laboratoire au comportement en vieillissement dans les conditions d'usage du matériau est une tâche par-

fois difficile. Il est en effet essentiel de s'assurer de la représentativité des phénomènes étudiés au laboratoire par rapport au vieillissement "réel". Les approches développées pour assurer cette transposition sont basées sur l'observation expérimentale de l'évolution du matériau polymère par des techniques d'analyse variées. Deux méthodologies d'étude de photovieillissement accéléré sont actuellement proposées.

La première consiste à simuler exactement les agressions chimiques ou physiques naturelles (distribution spectrale et intensité lumineuse, chocs thermiques, aspersion d'eau, alternance jour-nuit...); la dégradation du matériau est alors suivie par examen de la détérioration des propriétés d'usage (par exemple des propriétés mécaniques comme l'allongement ou la force à la rupture) en espérant que la représentativité des agressions impliquera la représentativité des phéno-

mènes de vieillissement. Cette approche, résolument simpliste, ne permet généralement pas de prévoir la durée de vie du matériau sur des échelles de temps différentes de celle de l'expérience réalisée.

La seconde méthodologie dite "mécanistique" consiste à appliquer au matériau des agressions de même nature que celles qui interviennent sur le terrain, mais sans objectif de simulation exacte. La représentativité du vieillissement accéléré est, dans ce cas, contrôlée à partir de l'examen de l'évolution chimique du matériau à l'échelle moléculaire, moyennant le respect de certains critères et conditions expérimentales. Cette méthodologie qui implique la reconnaissance des mécanismes chimiques de dégradation du polymère, présente l'avantage de déboucher de façon rationnelle sur des stratégies de stabilisation par additifs chimiques destinés à augmenter la durée de vie du matériau.

Dans cette approche du photovieillissement des polymères, le contrôle de l'évolution chimique du matériau nécessite la connaissance des paramètres suivants :

- identification des photoproduits intermédiaires,
- évolution de la stabilité thermique et photochimique de ces composés intermédiaires,
- analyse des mécanismes de conversion de ces composés intermédiaires,
- identification des produits finaux de phototransformation qui s'accumulent dans la matrice solide.

Ces analyses font largement appel aux techniques de spectrométrie vibrationnelle. L'analyse par spectrométrie infrarouge permet d'identifier les différents produits formés par oxydation du polymère. Cette analyse doit être couplée à des traitements chimiques dont le but est de convertir sélectivement les produits d'oxydation (acides, alcools, hydroperoxydes, esters...) et ainsi de modifier, ou de simplifier le spectre de l'échantillon vieilli. Les produits responsables des modifications spectrales peuvent alors être identifiés et un mécanisme rendant compte de leur formation peut être proposé.

A partir de l'analyse cinétique de la photodégradation, des corrélations entre les variations des propriétés mécaniques et l'avancement de la chimie (mesuré par l'accumulation d'un produit "critique") peuvent être établies ; la prévision des durées de vie en exposition naturelle à partir d'expériences accélérées au laboratoire peut alors être faite.

L'accélération du photovieillissement d'un matériau polymère doit seulement être due à l'augmentation de l'intensité lumineuse de la source (limitée aux processus d'excitation monophotonique), de la température de l'échantillon (limitée au domaine d'invariance de l'énergie d'activation) et éventuellement à l'application de contraintes mécaniques. La représentativité du vieillissement accéléré en enceinte de laboratoire sera assurée dans les conditions suivantes :

- l'évolution chimique du polymère doit être étudiée à l'état solide pour tenir compte de l'hétérogénéité du matériau,
- l'avancement des réactions chimiques dans le polymère doit être contrôlé par son effet sur les propriétés physiques de l'échantillon,
- tout déficit d'oxygène doit être évité durant le photovieillissement accéléré; ce point est essentiel dès lors que l'on veut, à partir de l'expérience effectuée

en conditions de laboratoire, prévoir le comportement du polymère en conditions d'exposition naturelle. La distribution des produits d'oxydation au sein du substrat peut être caractérisée par une technique originale largement développée au laboratoire. Cette technique fait appel au couplage de la spectrophotométrie infrarouge et de la microscopie. Elle permet d'effectuer l'analyse de couches élémentaires de 10 nanomètres.

- aucune radiation de longueur d'onde inférieure à  $295 \pm 5$  nm ne doit être émise par la source de photons,
- l'équilibre entre photovieillissement et thermovieillissement doit être respecté,
- dans les échantillons stabilisés, la migration des additifs doit être contrôlée pour s'assurer que, durant la période d'irradiation, ils sont consommés par réaction chimique et ne disparaissent pas par migration,
- pour évaluer un éventuel rôle chimique de l'eau, sa concentration dans l'échantillon doit être maintenue constante (immersion de l'échantillon)

En dehors des points précédents qui doivent être strictement respectés, la distribution spectrale de la source (spectre continu ou spectre de raies) n'a pas d'influence notable sur la stoechiométrie de la chimie dans le polymère.

Cette analyse de l'évolution chimique qui intervient en conditions de vieillissement naturel (ou en conditions d'usage) et en conditions de vieillissement artificiel a au moins trois conséquences positives. La première est de permettre d'assurer la représentativité de l'essai de laboratoire en vérifiant que le mécanisme de l'évolution chimique est identique dans les deux conditions, la deuxième est de permettre d'établir des corrélations entre les deux modes de vieillissement sur la base de l'avancement de la chimie, la troisième est de permettre de convertir une durée de vie en conditions artificielles en une durée de vie en conditions naturelles.

## VIEILLISSEMENT DES POLYMÈRES : EMPIRISME OU SCIENCE ?

Trois questions principales :

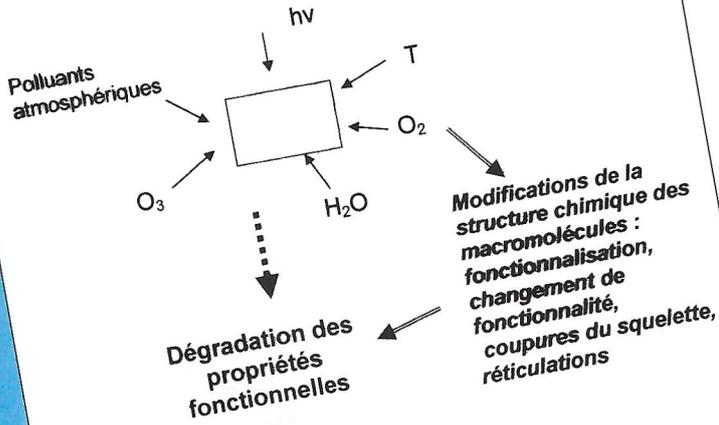
- Pourquoi le matériau polymère est-il défaillant ?
- Comment peut-on améliorer son comportement dans le temps ?
- Quelle est la durée de vie du matériau stabilisé, dans les conditions réelles de son usage ?

- Défaillance du matériau

Dégradation des propriétés d'usage :

- aspect (couleur, brillance...)
- tenue mécanique (résistance à la traction...)
- propriétés électriques (isolation...)
- étanchéité, perméabilité...

## CAS D'UN MATÉRIAU POLYMÈRE EXPOSÉ AUX CONTRAINTES DE L'ENVIRONNEMENT



Hierarchie entre les différentes agressions  
Conjugaison lumière, température, oxygène  
processus photochimiques et processus  
thermiques

Matériau polymère : « réacteur photochimique »

➔ Identifier les événements chimiques qui interviennent sur les chaînes macromoléculaires et qui sont responsables de la dégradation des propriétés

## ETUDE EN LABORATOIRE DU VIEILLISSEMENT DES MATÉRIAUX POLYMÈRES

- Enceintes de simulation : temps réel
- Enceintes de vieillissement accéléré : approche « mécanistique » des phénomènes de vieillissement

Analyse de l'évolution chimique du polymère

En vieillissement naturel

En vieillissement accéléré

- Représentativité de l'essai de laboratoire
- Corrélation entre les deux modes de vieillissement
- Conversion de la durée de vie en conditions accélérées en une durée de vie en conditions naturelles

Analyse complexe :

- État solide
- Degré d'avancement limité
- Chemins réactionnels d'importance relative variable

⇔ Photoproduit critique

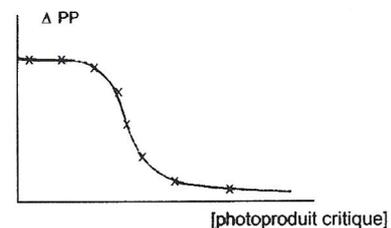
... approche "mécanistique"

Séquences réactionnelles associées aux structures "normales" ou aux "défauts" de structure ⇒ on peut classer les polymères selon leur comportement photochimique :

- Type A : **polymères non absorbants** dont le comportement photochimique n'est contrôlé que par la structure normale (PP)
- Type B : **polymères non absorbants** dont le comportement photochimique est contrôlé à la fois par la structure normale et par des défauts non chromophores (PE)
- Type C : **polymères absorbants** manifestant une double photochimie : phototransformation directe des groupes chromophores et phototransformation induite par l'absorption des défauts chromophores (PC, PU aromatiques)
- Type D : **polymères non absorbants** dont le comportement photochimique n'est contrôlé que par des défauts chimiques chromophores (PVC).

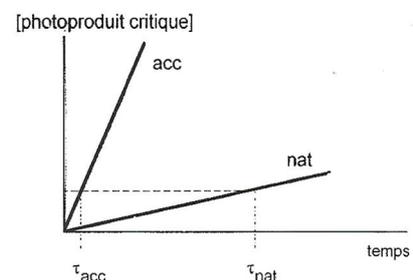
## PREVISION DE LA DUREE DE VIE

- Corrélation entre évolution chimique et évolution des propriétés physiques



photoproduit critique = photoproduit stable issu d'une rupture de chaîne

➤  $\tau_{acc} \xrightarrow{f_{acc}} \tau_{naturel}$

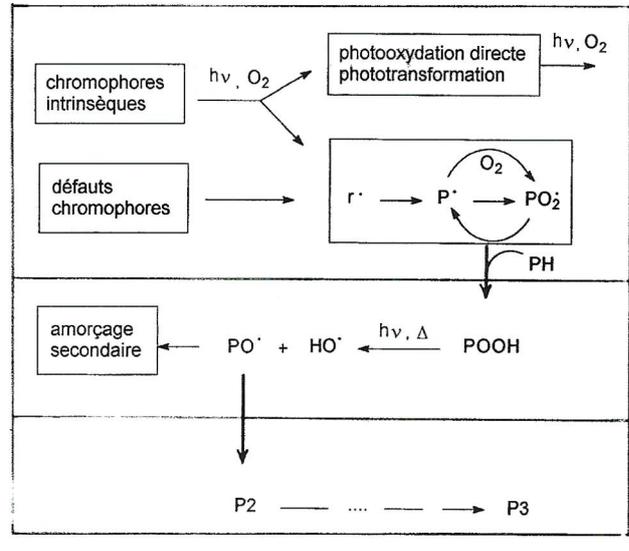


## MECANISME D'EVOLUTION CHIMIQUE DANS LE CAS D'UN VIEILLISSEMENT OXYDANT

### Description en séquences réactionnelles :

- formation des hydroperoxydes : amorçage photochimique, thermique, mécano-chimique
- décomposition des hydroperoxydes
- réaction des produits de décomposition des hydroperoxydes et accumulation des produits stables

## Schéma simplifié du mécanisme de photooxydation d'un polymère PH



## ABSORPTION DE LA LUMIERE PAR LES POLYMERES

spectre solaire :  $\lambda > 300 \text{ nm}$

polymères "absorbants" / polymères "non absorbants"



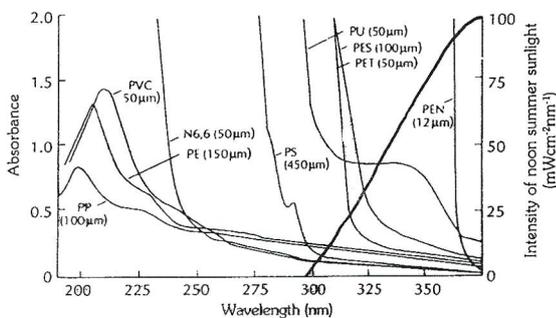
amorçage résultant de l'absorption par les chromophores intrinsèques

(ex. polym. aromatiques, PA ...)



amorçage résultant de l'absorption par les défauts chromophores

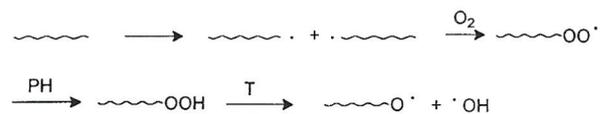
(ex. PE, PP, PVC ...)



## ORIGINE ET REACTIVITE DES DEFAUTS DE STRUCTURE

### ► Mise en oeuvre du polymère

oxydation mécano-chimique → formation de groupements oxydés (à très faible concentration) par un mécanisme "classique" d'oxydation en chaîne



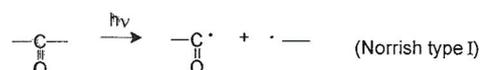
### ► Défauts chromophores

- hydroperoxydes, peroxydes

$$\text{ROOH} \quad \epsilon_{360} = 1 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$$



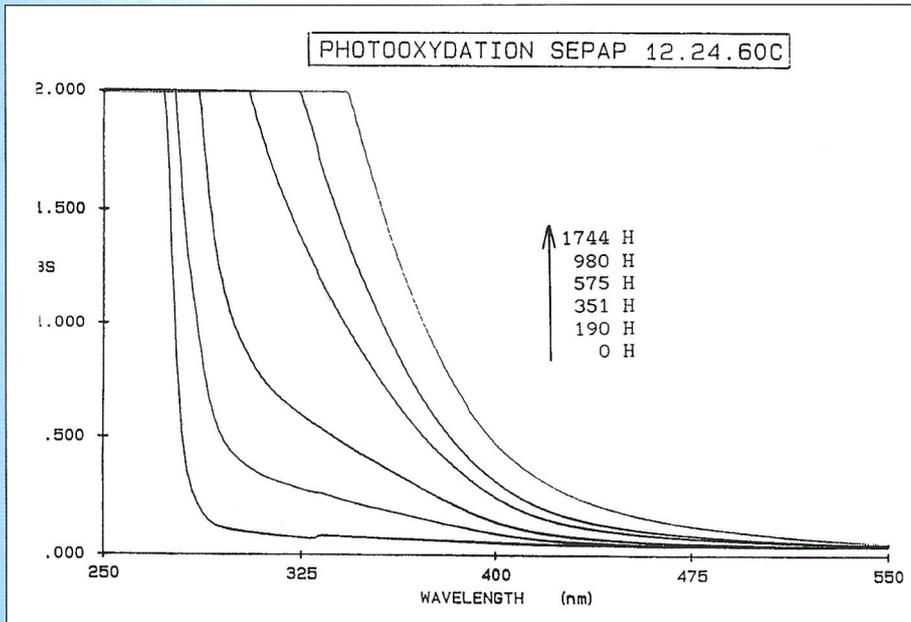
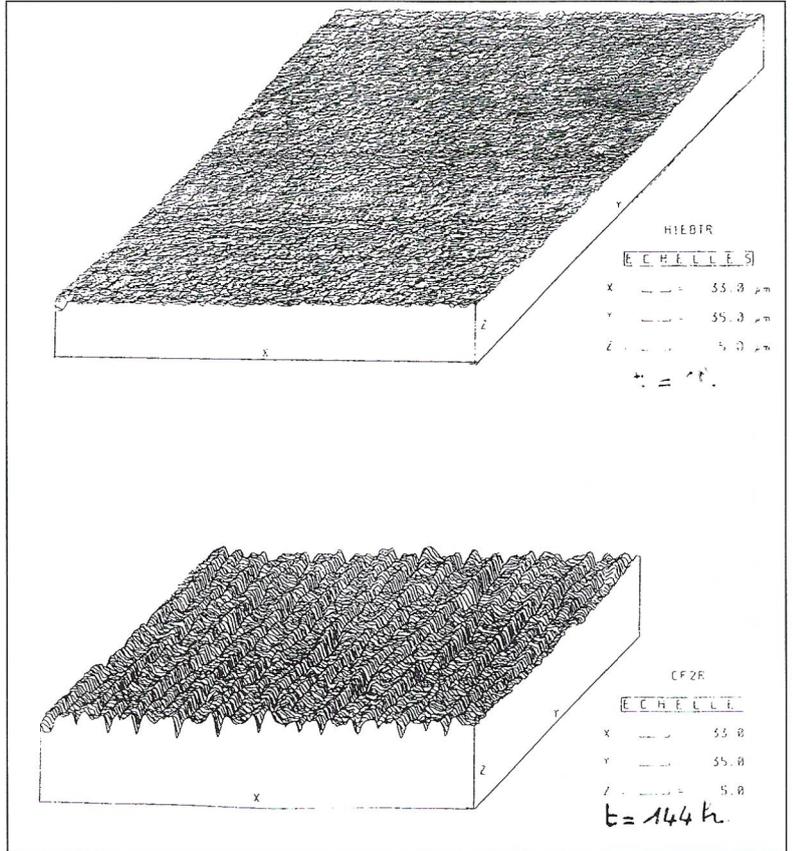
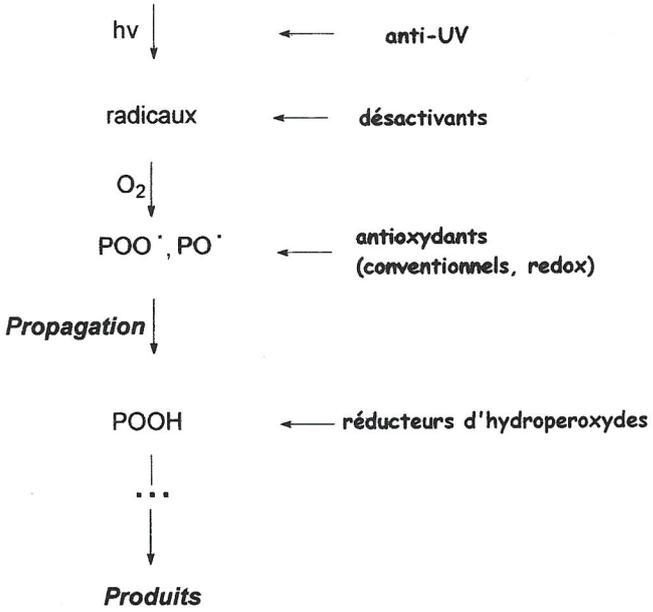
- cétones, cétones insaturées





# RÔLE DES ADDITIFS DE STABILISATION

Polymère, défauts chromophores



# Isaac Newton et les "Principia"

**L'ADASTA vous propose le texte qui figure sur le deuxième panneau de l'exposition célébrant le Tricentenaire de la publication de "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica". Le texte du 1<sup>er</sup> panneau et sa traduction sont parus dans le numéro 46.**

Au début du 17<sup>e</sup> siècle, une réponse à la question de la cause du mouvement des planètes faisait appel au magnétisme cosmique. William Gilbert (1546 - 1603) découvrit et annonça dans le *Magnete* (1600) que la Terre était un grand aimant sphérique et il suggéra que le Soleil pouvait mettre en mouvement les planètes par des effets magnétiques. L'idée fut reprise par Johannes Kepler (1571 - 1630) qui soutenait que toutes les planètes étaient des aimants et qu'elles étaient maintenues en rotation sur leur orbite par l'action magnétique du Soleil. Il pensait qu'une "poussée" magnétique continue était nécessaire pour maintenir ce mouvement et que les axes magnétiques individuels des planètes étaient la cause des variations de la distance au Soleil. Kepler établit aussi les caractéristiques géométriques de ces orbites - relatives à la forme, au mouvement et à l'arrangement dans l'espace - caractéristiques exprimées dans ce qui est devenu "les lois de Képler" pour le mouvement des planètes. Galiléo Galilée (1564 - 1642) fut le plus célèbre partisan de la théorie copernicienne des planètes, au début du 17<sup>e</sup> siècle ; il affirma qu'une poussée continue n'était pas nécessaire pour maintenir le mouvement et qu'une planète continuerait à se déplacer sur une trajectoire circulaire par une sorte de mouvement d'inertie. Il s'intéressa aussi au mouvement d'un point sur la Terre et en déduisit des lois caractérisant ce mouvement sous une accélération constante. (Newton montra plus tard dans "les Principes" que ces lois et les lois de Kepler pouvaient être déduites des mêmes prin-

cipes dynamiques). Pour Galilée, la composante d'inertie du mouvement d'un projectile pouvait être considérée, en un point déterminé, comme une horizontale rectiligne même si une plus grande vue d'ensemble la révélerait comme un cercle concentrique de la Terre.

Dans la Mécanique de René Descartes (1596 - 1650) au contraire, le cas particulier de Galilée, appelé approximation locale d'inertie rectiligne, était considéré comme typique et universel. Descartes soutenait que tout corps en mouvement sur une trajectoire circulaire subissait une action vers l'extérieur ou "centrifuge" qui devait être vaincue pour maintenir la trajectoire et réaliser une orbite

Il présentait aussi une autre explication du mouvement des planètes, basée non sur le magnétisme mais sur la mécanique. Pour René Descartes, le monde physique était une grande machine ; les corps ne s'influençaient pas à distance mais au contact ; la force retenant les planètes en mouvement orbital était l'action

continue d'autres corps dans le grand tourbillon ou "vortex" du système solaire.

*The earliest 17th-century answer to the question of what moves the planets invoked cosmic magnetism. William Gilbert (1546-1603) discovered, and announced in De magnete (1600), that the Earth was a great spherical magnet, and he suggested that the Sun could incite movement among the planets by magnetic means.*

*The suggestion was taken up by Johannes Kepler (1571-1630), who held that all planets were magnets, and were carried round in their orbits by the magnetic action of the Sun. He thought that a continuous magnetic "push" was required to sustain this motion, and that the individual magnetic axes of the planets caused variations in distances from the Sun. Kepler also established the geometrical characteristics of these orbits - in terms of shape, motion and arrangement in space characteristics embodied in what became known as his laws of planetary motion. Galileo Galilei (1564-1642) was the most celebrated protagonist for Copernican planetary theory in the early 17th century, and he argued that a continuous push was not required to sustain motion - that a planet would continue to move in a circular path as a form of inertial motion. He was also interested in local motion on Earth, and derived laws that characterised motion under constant acceleration.*

*(Newton was later to show in the Principia that*

Cependant la théorie "magnétique" devenait plus sophistiquée : quelques physiciens étaient prêts à postuler des forces attractives entre le Soleil et les planètes, forces qui n'étaient pas réellement magnétiques mais agissaient de la même façon à distance. Robert Hooke (1635 - 1702), par exemple, était disposé à accepter le principe d'inertie de Descartes (une expression que nous appelons la première loi de Newton pour le mouvement) et à dire que la force attractive du Soleil impose une trajectoire orbitale autre que celle correspondant au principe d'inertie. Il suggéra même que cette force varie comme l'inverse du carré de la distance. Ce fut particulièrement bénéfique que Hooke et Newton, bien que physiciens rivaux, soient amenés à discuter de telles questions par correspondance.

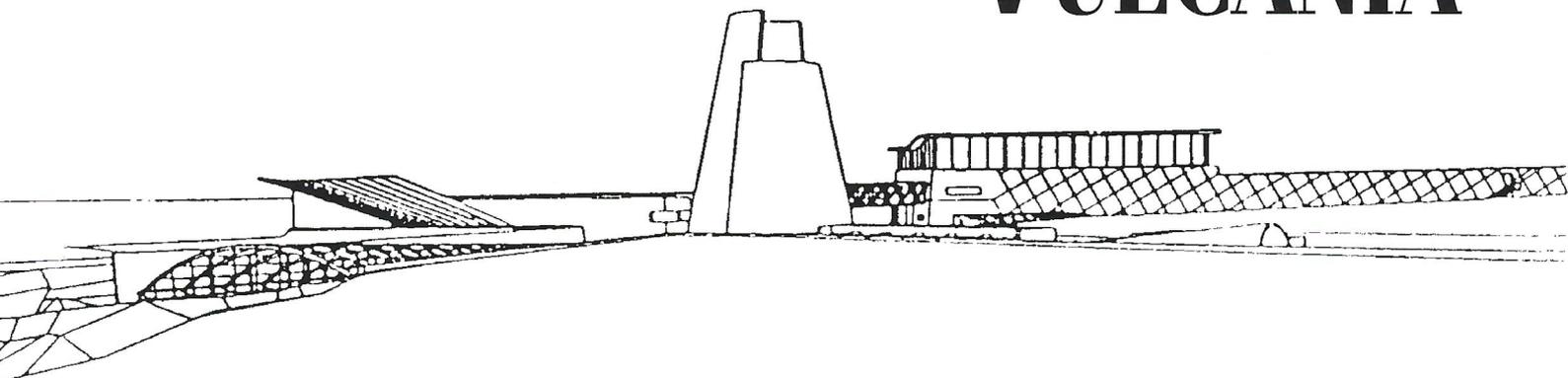
## CONTEXT FOR PRINCIPIA IN THE 17 TH CENTURY

*these laws and Kepler's laws could be derived from the same dynamical principles.) For Galileo, in the local situation, the inertial component of projectile motion could be treated as horizontal and rectilinear, even though a larger view would reveal it as a circle concentric with the Earth.*

*In the mechanics of Rene Descartes (1596-1650), on the contrary, Galileo's special case, namely the local approximation to rectilinear inertia, was taken as typical and universal. Descartes held that any body moving in a curved path experienced an outward or "centrifugal" tendency, which had to be overcome to maintain the path and form an orbit. He also presented an alternative account of planetary motion, based not on magnetism but on mechanism. For Descartes, the physical world was a great machine; bodies did not influence each other at a distance, but on contact, and the restraining force causing orbital motion in planets was the continual action of other bodies in the great whirlpool or "vortex" of the solar system.*

*Meanwhile, the "magnetic" theory had become more sophisticated. Some natural philosophers were prepared to postulate attractive forces between the Sun and the planets, forces which were not actually magnetic, but similarly acted at a distance. Robert Hooke (1635-1702), for example, was willing to accept Descartes' principle of rectilinear inertia (an expression of what we call Newton's first law of motion), and to say that the attractive force of the Sun pulls a planet from its inertial path and holds it in an orbit. He even suggested that this force varies as the inverse-square of the distance. It was particularly fortunate that Hooke and Newton, though rivals in natural philosophy, came to discuss such questions in correspondence.*

# L'A.D.A.S.T.A. visite le chantier de VULCANIA



*Au début de l'hiver 1999, l'A.D.A.S.T.A. prenait contact avec le Conseil Régional d'Auvergne dans le but d'organiser une visite du chantier de Vulcania, le futur Parc Européen du Volcanisme. C'est ainsi que le 15 décembre à 14H00, par un temps de vent et de neige, un groupe d'une cinquantaine de personnes se rassemblaient à l'entrée du site. Après avoir coiffé le casque réglementaire, les visiteurs se dirigèrent vers un bâtiment provisoire où leur fut faite une présentation documentée du projet dont la réalisation doit s'achever en 2001. Puis en dépit du froid rigoureux à cette altitude (950 m), le groupe se rendit sur le chantier et put observer le début des constructions. Nos lecteurs trouveront ci-dessous une description du projet Vulcania rédigée à partir des documents du Conseil Régional distribués sur le chantier.*

## HISTORIQUE

En 1990 le Conseil Régional d'Auvergne faisait l'acquisition d'un terrain de 57 hectares qui avait servi aux activités militaires pendant 30 ans. Puis en 1992 il décidait d'y réaliser un grand parc de loisirs scientifiques consacré à la volcanologie. En deux ans le terrain avait été nettoyé et reboisé de façon à retrouver son aspect naturel.

Un projet de construction était choisi en 1994, le permis de construire accordé en 1997. La même année le chantier de Vulcania démarrait.

## LE SITE

Vulcania se trouve sur la commune de Saint-Ours-les-Roches, à une dizaine de kilomètres de Clermont-Ferrand sur la route de Limoges, en plein cœur de la chaîne des Puys, près du col des Goules. Cette situation exceptionnelle justifie les études poussées concernant la limitation de la pollution et la préservation de l'environnement. En particulier le fonctionnement de Vulcania sera accompagné d'un réseau d'assainissement des eaux usées qui seront collectées et envoyées vers une station d'épuration sise à Saint-Ours-les-Roches.

## LA CONSTRUCTION

Les maîtres d'œuvre qui ont été retenus sont :

Les architectes Hans HOLLEIN et Philippe TIXIER, le scénographe Rainer VERBIZH chargé de la scénographie intérieure, et le paysagiste Gilles CLEMENT.

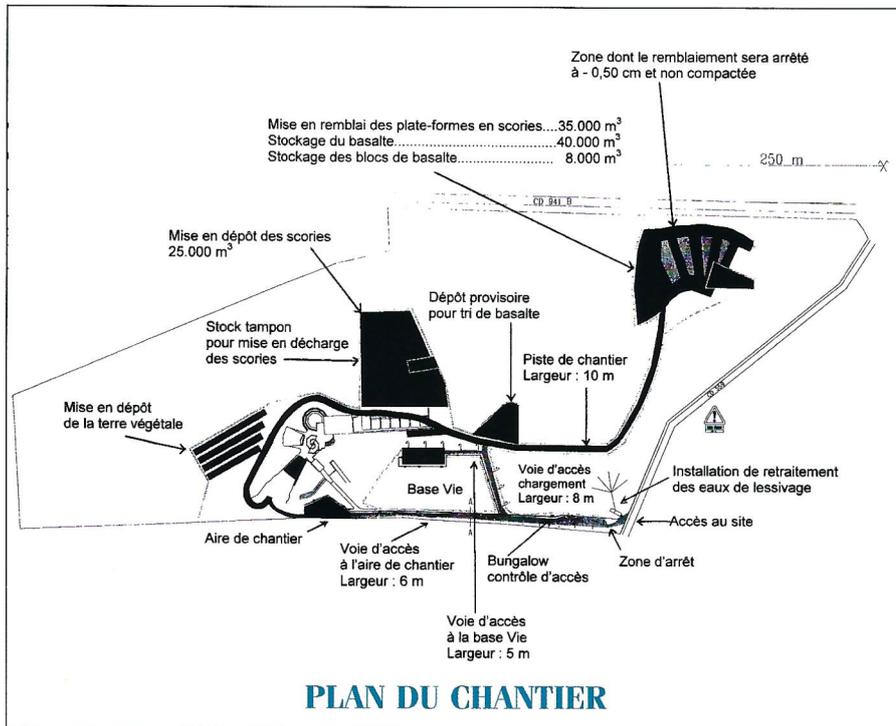
La construction sera aux trois quarts enterrée et s'intégrera parfaitement au site. L'emploi de matériaux naturels, pour la plupart d'origine volcanique, renforce l'harmonie entre bâtiments et paysage.

## ASPECTS TECHNIQUES

Le projet exige une véritable architecture souterraine en trois dimensions : horizontale, verticale et diagonale. Cette disposition a conduit à réaliser une excavation dont la profondeur varie de 8 à 22 mètres, par rapport au terrain existant et à 37 mètres dans le cratère.

La structure du sous-sol se présente sous forme de couches alternées de terre, de scories et de basaltes. Au sortir de l'excavation une partie des déblais peut être réemployée :

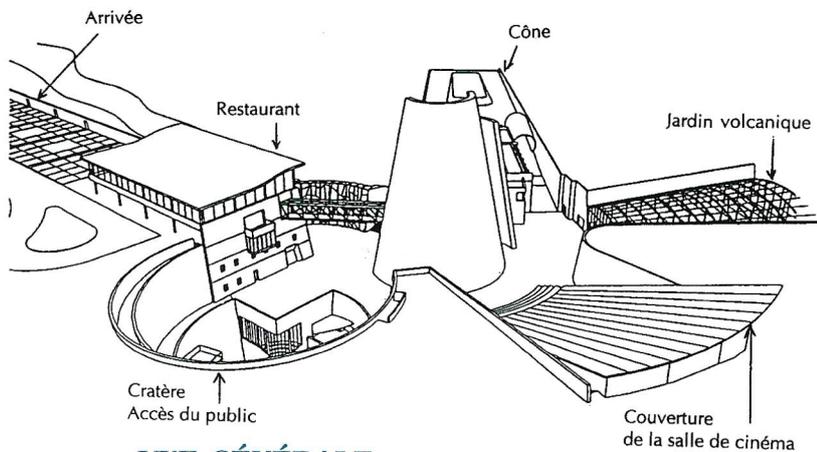
- la terre végétale utilisée pour les aménagements paysagers,
- les scories destinées entre autres à constituer l'assise du futur parking



Vue du béton spécifique.

●●●●●  
**LE PARC EUROPÉEN DU VOLCANISME**

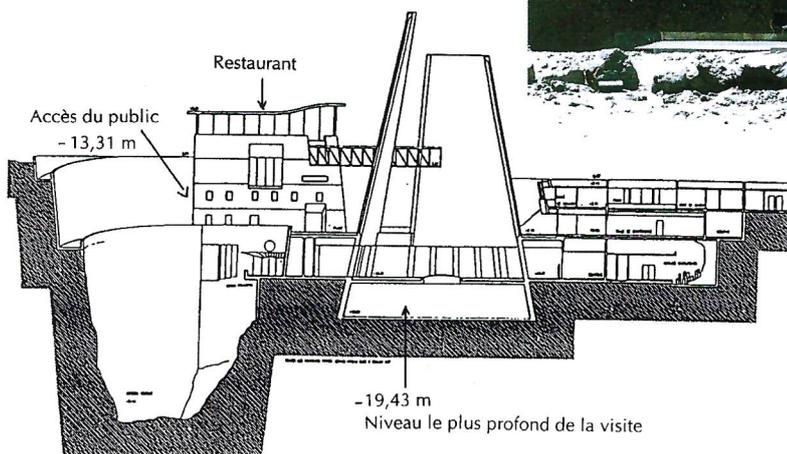
C'est à un véritable voyage de découvertes qu'est convié le visiteur durant toute une journée. Avant d'arriver à la structure elle-même, il devra parcourir une promenade de 300 mètres. L'arrivée se fera par le " mur cyclopéen " constitué de bombes volcaniques de grande taille. Puis on descendra sous terre par le cratère creusé jusqu'à -35 mètres. Des profondeurs s'échapperont fumerolles et grondements. A -13,31 mètres le public passera dans une succession de salles et de galeries où on admirera les images saisissantes des phénomènes



• Le basalte dont une grande partie est concassée pour entrer dans la composition du béton du gros œuvre. En effet, pour donner aux quelques parties bétonnées extérieures un aspect rugueux et naturel, un béton spécifique incluant un agglomérat de basalte a été mis au point, ce qui est une exclusivité technique de Vulcania.



La route d'arrivée.



volcaniques, éruptions, coulées de lave, solfatares ou les paysages de cendres et orgues basaltiques. Un autre espace sera consacré au volcan lui-même : sa naissance, sa vie, son caractère, ses activités.

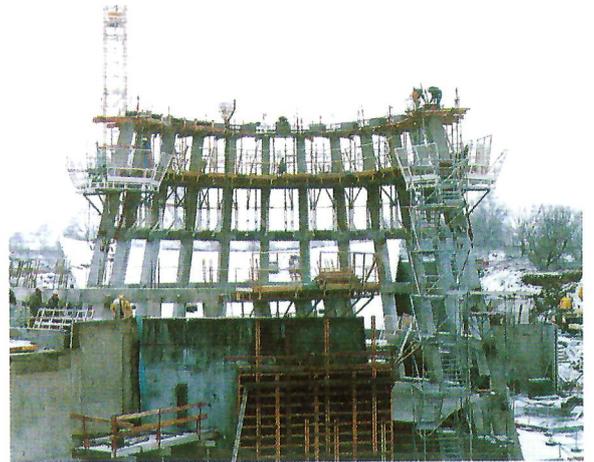
Enfin pour atteindre le niveau accessible le plus profond -19,43 mètres le public empruntera une rampe où sont

reconstituées les nuées ardentes, et parviendra sous le grand cône ouvert sur le ciel.  
Ce dernier espace évoque la relation de l'homme avec les volcans, et le travail des volcanologues.

**NIVEAU LE PLUS LARGE DE LA VISITE**



La base du cône.



D'autres espaces s'offriront aux visiteurs : aires de pique-nique, restaurant, librairie et boutique de souvenirs, centre de documentation.  
Bien que les travaux dans leur état actuel d'avancement ne donnent encore qu'une faible idée du futur ensemble, les adhérents A.D.A.S.T.A. qui ont participé à la visite du chantier le 22 novembre, en sont partis émerveillés et bien décidés à être les premiers touristes de la saison 2001. Vulcania veut apporter un message scientifique en présentant une synthèse des connaissances actuelles sur la structure de la terre, sur les phénomènes volcaniques et leur impact sur la vie des hommes.

Jocelyne Allée



Les Visiteurs

