

COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

1873-7234 (electronic)

Mécanique

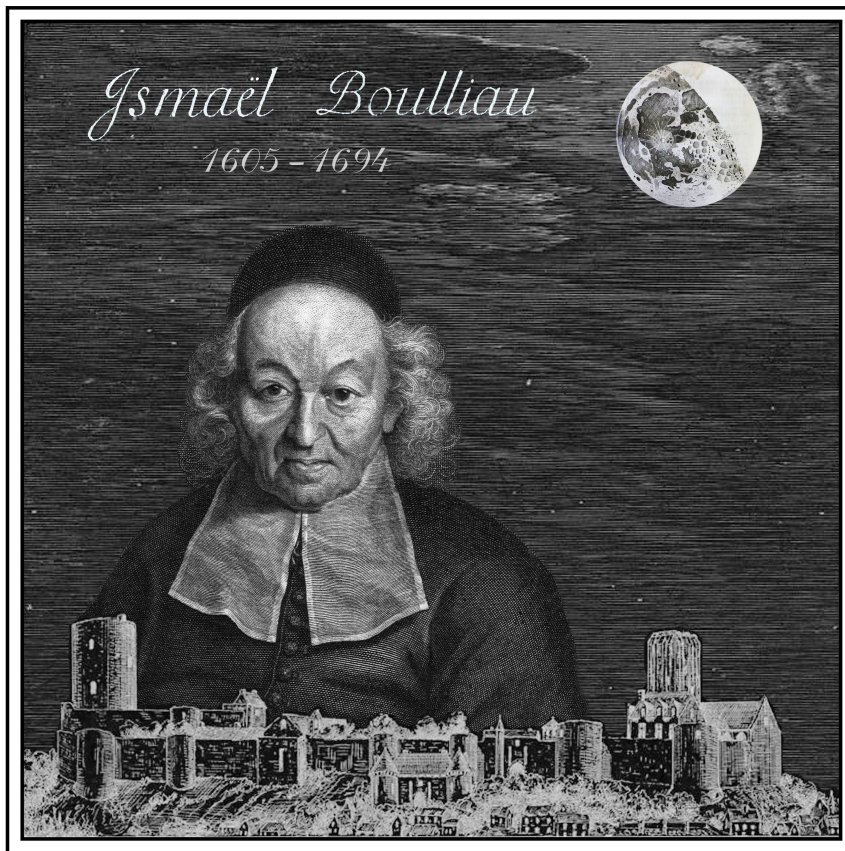


Illustration : Sylvie Donnemeyer

Volume 351, Special Issue S4, 2023

Special issue / Numéro thématique

Hommage à Ismaël Boulliau / *A tribute to Ismaël Boulliau*

Guest editor / Rédacteur en chef invité

Bruno Chanetz

Académie des sciences — Paris



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



Comptes Rendus

Mécanique

Objective of the journal

Comptes Rendus Mécanique is an internationally peer-reviewed electronic journal covering all areas of the discipline. It publishes original research articles, review articles, historical perspectives, pedagogical texts, and conference proceedings of unlimited length, in English or French. *Comptes Rendus Mécanique* is published according to a virtuous policy of diamond open access, free of charge for authors (no publication fees) as well as for readers (immediate and permanent open access).

Editorial director: Étienne Ghys

Editor-in-Chief: Jean-Baptiste Leblond

Editorial board: Olga Budenkova, Francisco Chinesta, Jean-Michel Coron, Luc Dormieux, Florian Gosselin, Nicolas Moës, Léo Morin, Guillaume Ribert, Géry de Saxcé, Emmanuel Villermaux

Editorial secretary : Adenise Lopes

About the journal

All journal's information, including the text of published articles, which is fully open access, is available from the journal website at <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/mecanique/>.

Author enquiries

For enquiries relating to the submission of articles, please visit this journal's homepage at <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/mecanique/>.

Contact

Académie des sciences

23, quai de Conti, 75006 Paris, France

Tel: (+33) (0)1 44 41 43 72

CR-Mecanique@academie-sciences.fr



The articles in this journal are published under the license
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>



Contents / Sommaire

Bruno Chanetz	
Préface en hommage à Ismaël Boulliau (1605–1694)	1-2
Sylvette Noyelle	
Loudun à l'époque d'Ismaël Boulliau : trois décennies qui ont changé la ville	3-10
Gérard Jubert	
La vie d'Ismaël Boulliau	11-17
Marie-Claire Coët	
L'œuvre scientifique d'Ismaël Boulliau	19-29
Conor Maguire	
Les traces d'Ismaël Boulliau dans la poussière de l'histoire	31-37
Denis Beaudouin	
L'avènement de la science météorologique du XVII ^e au XIX ^e siècle	39-47
Martin Peter	
Eiffel et la météorologie	49-56
Bruno Chanetz, Alain Broc, Philippe Jung	
Audouin Dollfus, astronome du XX ^e siècle	57-71
Manuel Rodrigues	
De la loi de la gravitation universelle à MICROSCOPE	73-79
Thierry Fusco	
Optique adaptative et télescopes géants	81-89
Pierre Léna	
Quelques réflexions pour conclure	91-93



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

Préface en hommage à Ismaël Boulliau (1605–1694)

Preface in homage to Ismaël Boulliau (1605–1694)

Bruno Chanetz^a

^a ONERA, BP 80100, 91123 Palaiseau Cedex, France

Courriel: chanetz@onera.fr

Published online: 15 September 2023, Issue date: 15 September 2023

« Après un voyage lunaire sur son télescope, il (le cartographe [1]) ne s'était pas contenté d'établir une carte géographique, mais avait généreusement distribué des royaumes et des provinces entières aux astronomes. La canicule venue, les nouveaux propriétaires pourraient trouver dans la rosée glacée de la Lune, produit de leurs terres, un rafraîchissement providentiel. Lui, Boulliau n'avait pas à se plaindre car il pouvait se vanter d'être l'heureux propriétaire d'un point blanc aussi grand que le duché de Milan. »

C'est ainsi qu'Ismaël Boulliau confiait à son correspondant [2] sa joie de voir son nom attribué à un cratère lunaire de 60 km de diamètre et 3 500 m de profondeur. Et de poursuivre, très fier de voir son nom cité parmi ceux de princes, de personnages illustres et de savants réputés : « *Jamais mon nom ne périra, non plus que ceux de Céphée, Andromède, Cassiopée, Persée, etc.* ». Cette dénomination, *Bullialdus*, officiellement adoptée par l'Union astronomique internationale en 1935, confère à Boulliau l'immortalité dont il rêvait. Selon son biographe H. Nelen « *Une rue à Loudun et un cratère sur la lune, voilà les seuls endroits qui rappellent aux hommes l'existence de l'astronome du XVII^e siècle, Ismaël Boulliau* ». Le portrait, conservé au musée des beaux-arts et d'archéologie de Besançon, que nous avons de lui, par Jacobus Van Schuppen, peintre baroque autrichien d'origine flamande, confirme, s'il en était besoin, la notoriété dont jouissait à son époque l'astronome Loudunais.

Loudun, petite cité aux confins de l'Anjou, de la Touraine et du Poitou, vit en effet arriver en ce monde Ismaël Boulliau et partir pour l'autre dans les flammes du bucher son curé Urbain Grandier, au terme d'un procès en sorcellerie, qui défraya la chronique. Si Urbain Grandier représente la légende noire de la ville, Ismaël Boulliau l'éclaire déjà des lumières de la science en ce XVII^e siècle et cette Europe intellectuelle qu'il parcourut avec l'avidité de la connaissance.

Aussi nous avons voulu retrouver l'image de cet astronome oublié, qui pressentit, par analogie avec la loi de propagation de la lumière, qu'elle pouvait être celle de la gravitation universelle. Sa passion pour l'astronomie l'amena aux mathématiques, ce qui est noble en tous les temps, elle le fit aussi verser dans l'astrologie, ce qui peut paraître anachronique avec le regard de notre époque, mais ne l'était pas de son temps. Ismaël Boulliau fut aussi un précurseur de la

météorologie. C'est à lui que l'on doit les premiers relevés de température à Paris. Mais surtout ce fut un inlassable épistolier et intermédiaire scientifique, auteur et destinataire d'une abondante correspondance qu'il entretenait avec tous les savants de son époque. Même si l'anonymat des comptes rendus ne permet pas d'en apporter la preuve formelle, on ne doute pas qu'il fût un familier des conférences du bureau d'adresse du fondateur de la presse, Théophraste Renaudot, également enfant de Loudun. Il fut membre de la *Royal Society*, mais ne fut jamais reçu à l'Académie des Sciences, ce qui fut la désolation de ces dernières années.

Comme cela arrive souvent aux hommes qui vivent trop longtemps, il était passé de mode. Signe de cette désaffection, à une époque où les lettres ne portaient pas l'adresse de leurs destinataires, on lui remettait difficilement ses courriers parce qu'on ignorait, désormais où il habitait.

Ce numéro spécial, dédié à la mémoire d'Ismaël Boulliau, présente, outre sa vie (*G. Jubert*) et son œuvre scientifique (*M.-C. Coët*), la ville — Loudun — (*S. Noyelle*) dans laquelle il naquit calviniste avant de devenir prêtre catholique et qu'il quitta dans un temps, où elle aborda son déclin, irrémédiablement meurtrie par les conséquences des guerres de religion. Son empreinte au cours du temps et l'évolution de la notoriété d'Ismaël Boulliau sont finement mesurées dans un article (*C. Maguire*) exploitant les innombrables ressources textuelles qu'offre Internet.

La suite de ce n° spécial s'éloigne d'Ismaël Boulliau, en présentant les avancées scientifiques au fil des siècles dans les nombreux domaines qu'il avait abordés :

- évocation de la météorologie au XVIII^e et XIX^e siècle (*D. Beaudouin*), et au crépuscule du XIX^e siècle, avec Gustave Eiffel (*M. Peter*), qui mit en place les fondements de la météorologie moderne, accédant en 1910 à la présidence de la société météorologique de France;
- mesure de la gravité terrestre au XXI^e siècle lors de la mission MICROSCOPE (*M. Rodriguez*);
- contribution de l'optique adaptative à l'amélioration spectaculaire des images des grands télescopes terrestres au XXI^e siècle (*T. Fusco*).

Enfin ce recueil s'achève par une synthèse bienveillante et toute en nuance sur Ismaël Boulliau (*P. Léna*), qui remet l'homme à sa juste place, pas au sommet bien sûr mais dans une position honorable parmi ceux qui ont contribué à la progression de la science à une époque, où l'obscurantisme était encore prégnant.

Nous avons aussi convoqué la figure de l'astronome Audouin Dollfus (*Chanetz et al.*), qui réalisa il y a plus de 60 ans une ascension aérostatique et scientifique, à une altitude toujours inégalée, pour observer Venus et la Lune. Ses travaux permirent de choisir le lieu d'alunissage de la mission Apollo XI en 1969. Combien d'astronomes n'eurent jamais osé rêver d'une telle expédition, à commencer par Ismaël Boulliau, pourtant si fier qu'un cratère lunaire portât son nom de son vivant ?

Bruno Chanetz
 Directeur de recherche à l'ONERA
 Président d'Alumni-ONERA
 Vice-président de la Société Historique du Pays de Loudunois
 France
 chanetz@onera.fr

Références

- [1] M. F. van Langren, qui le révèle à Boulliau dans une lettre du 3 juin 1645 (*d'après Henk J.M. Nellen, Ismaël Boulliau, astronome, épistolier, nouvelliste et intermédiaire scientifique* APA-Holland university Press, Amsterdam et Maarssen).
- [2] J. Dupuy, destinataire de cette lettre de Boulliau du 3 mars 1646 (*d'après Henk J. M. Nellen, ibid.*).



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

Loudun à l'époque d'Ismaël Boulliau : trois décennies qui ont changé la ville

Loudun in the time of Ismaël Boulliau : three decades that changed the town

Sylvette Noyelle^a

^a Professeur agrégé d'Histoire-Géographie honoraire, Société historique du Pays de Loudunois, France
Courriel : sncx2018@orange.fr

Résumé. Ismaël Boulliau a passé le premier tiers de sa vie à Loudun où il né, cinq ans avant l'assassinat d'Henri IV, à la fin de septembre 1605. Lorsqu'il part pour Paris, au début des années 1630, Louis XIII, secondé par Richelieu, règne en maître. Loudun a bien changé. Il a vu le jour dans une ville prospère et active, il quitte une cité meurtrie. Pendant ses années loudunaises, le jeune Ismaël Boulliau a été le témoin des transformations que cet article se propose de décrire.

Abstract. Ismaël Boulliau spent the first third of his life in Loudun, where he was born five years before the assassination of Henri IV at the end of September 1605. When he left for Paris in the early 1630s, Louis XIII, seconded by Richelieu, reigns supreme. Loudun has changed a lot. He was born in a prosperous and active city, he leaves a bruised city. During his years in Loudun, the young Ismaël Boulliau witnessed the transformations that this article sets out to describe.

Mots-clés. Loudun, Ismaël Boulliau, Astronomie, Richelieu, Urbain Grandier, Citadelle.

Keywords. Loudun, Ismaël Boulliau, Astronomy, Richelieu, Urbain Grandier, Citadel.

Note. Cet article s'appuie sur un précédent travail issu de nombreuses années de lectures et de recherches [1], complété pour la période qui nous intéresse par les ouvrages et articles mentionnés dans ses références.

Note. This article is based on a previous work based on many years of reading and research [1], supplemented for the period in question by the books and articles mentioned in the references.

Published online: 8 August 2023, Issue date: 15 September 2023

1. Loudun au début du XVII^e siècle

Ismaël Boulliau voit le jour dans une cité qui ressemble sans doute beaucoup à ce « *Loudun en 1550* », reconstitué en 1921 sur un bois gravé de Louis Charbonneau-Lassay.



FIGURE 1. La butte loudunaise à l'époque d'Ismaël Boulliau (Collection Marie-Hélène Dvořák). La reconstitution proposée par Louis Charbonneau-Lassay en 1921 fait apparaître une ville-forteresse, telle que l'a conçue Philippe Auguste, au début du XIII^e siècle, avec son enceinte de près de 2,500 km, bordée de douves, renforcée par des tours et des éperons et ouvertes par 4 portes principales. Autour du sommet de la colline, une seconde muraille, avec des murs de 2 m d'épaisseur et 20 tours, a repris le tracé d'une base gallo-romaine ou un peu plus tardive. Au XVII^e siècle, on l'appelle « Le Grand Château » [1]. Elle enferme « Le Petit Château » [1] : un puissant donjon philippin et son propre système de fortifications.

Il fait apparaître une ville fermée, ceinturée de murailles et dominée par sa forteresse, un tissu urbain serré qui dégringole sur les pentes de la butte, d'où émergent les clochers des nombreux édifices religieux.

L'enfant, puis le jeune homme, ont dû en arpenter les rues étroites et sinueuses, le long desquelles les constructions se sont implantées au gré de l'espace disponible, sans grand souci d'alignement, où piétons, cavaliers et charrettes côtoient chiens, chats, pigeons, lapins ou cochons. Des rues malpropres, avec des seuils irrégulièrement balayés, des tas de fumier devant les maisons et un ruisseau central censé évacuer eaux de pluies et eaux usées, dans lequel les habitants jettent les déjections les plus diverses.

Combien de Loudunais vivent dans cette cité qui déborde encore très peu de ses murailles ? Longtemps avancés les nombres de 14 000, 17 000, voire 20 000 habitants sont à oublier. En 1995, lors d'une conférence sur les protestants loudunais, le pasteur Vatinel avait surpris son auditoire avec 8 000 habitants, évaluation très proche de celles de deux historiens, Brigitte Maillard, entre 6 500 et 7 000 et Edwin Bezzina (cité par [2, 3]), entre 6 000 et 10 000.

Force est de constater l'incertitude de ces évaluations et l'importance des écarts, explicables par l'imprécision des modes de calculs et les écrêtages pratiqués par des épidémies récurrentes (les pestes). Seul nombre connu grâce aux comptes tenus par Étienne Rousseau, enquêteur au bailliage, 3 623 victimes en 1563, mais combien en 1597 ? Et combien encore en 1603, deux ans avant la naissance d'Ismaël Boulliau ?

Le bois gravé de Louis Charbonneau-Lassay nous a montré une ville-forteresse. Loudun est également un maillon actif de l'administration d'Ancien Régime, centre d'un bailliage, premier échelon de la justice royale, dont les appels relèvent sans intermédiaires du parlement de Paris, d'une prévôté chargée de la justice appliquée aux gens de guerre, aux voleurs et aux vagabonds, d'une élection qui assure la répartition des impôts entre les paroisses, d'un grenier à sel dévolu à la gabelle.



FIGURE 2. La chapelle de la commanderie des chevaliers de Saint-Jean-de Jérusalem, devenus chevaliers de Malte (Dessin de Louis Charbonneau-Lassay, 1925, Société Historique du Pays de Loudunais). Après la destruction d'un premier temple, et dans l'attente de la construction d'un second, elle accueille le culte protestant pendant tout le règne d'Henri IV.



FIGURE 3. Un décor et une affirmation de fidélité [4]. En 1614, alors que la révolte gronde dans une grande partie du royaume, le roi et sa mère sont accueillis à Porte-de-Mirebeau par un tableau représentant cette levrette avec la mention : « *En quelque estat que je puisse estre je suis la fidèle à mon maistre* ».

C'est aussi une ville protestante. En ce début du XVII^e siècle, les protestants représentent environ 40 % de la population mais ils sont majoritaires dans les élites [5]. Ismaël Boulliau, dont le père, procureur, appartient à cette minorité réformée, est vraisemblablement baptisé dans l'église Saint-Jean qui fait alors office de temple.

Loudun est enfin au cœur d'une campagne prospère favorable aux vignes et aux céréales (les « bleds »). À la fin du XVI^e siècle, écrit Paul Raveau, c'est en Loudunais que terres arables et vignes atteignent les plus fortes valeurs de tout le Poitou [6].

Cette richesse agricole, jointe à la présence d'une clientèle aisée (noblesse locale, nombreux juristes, etc.) a permis le développement d'un artisanat actif dont la réputation dépasse parfois les limites locales. En témoigne l'intérêt porté au travail des dentelières par Catherine de Médicis, lors de son passage à Loudun, en 1565, ou la commande de 24 000 rouleaux de parchemin passée en 1681 à trois parcheminiers loudunais par le bureau des Aides de Poitiers.

Loudun est donc une ville plus importante que sa population ne le laisse supposer. Objet de la sollicitude du pouvoir, elle reçoit la visite de nombreux souverains dont Louis XIII, à l'époque d'Ismaël Boulliau, accompagné de la reine-mère et en grande pompe en août 1614, plus discrètement, en août 1620.

Pendant la première partie de la vie d'Ismaël Boulliau, les protestants loudunais vivent une dernière période faste, mais ils ne le savent pas.

2. Le protestantisme en sursis

Depuis la fin du XVI^e siècle, plusieurs signaux ont pu alerter les plus perspicaces.

2.1. *De nombreux sujets d'inquiétude*

En 1593, quelques années avant la naissance d'Ismaël Boulliau, des propos injurieux et le réveil des querelles entre catholiques et protestants accueillent la nouvelle de la conversion très politique d'Henri IV. L'intervention conjuguée du pasteur et du gouverneur de la ville rétablit rapidement le calme [7].

En 1606, il a un an lorsque les Jésuites de Poitiers remplacent les Bénédictins de Tournus dans un très ancien prieuré situé à l'intérieur de la forteresse. La fermeté de Marcantoine Marreau de Boisguérin, gouverneur de la ville et du château, rassure. Jusqu'à la fin de son mandat, en 1617, il s'oppose à l'installation des soldats de la Contre-Réforme dans « sa » forteresse qu'il prétend, sans doute à tort à l'époque, être une place de sûreté protestante. Rien ne le fera céder, pas même les ordres royaux.

En 1610, l'assassinat d'Henri IV qui propulse au pouvoir un roi de neuf ans et une régente pro catholique favorable à un accord avec l'Espagne, provoque une véritable déflagration. Marie de Médicis confirme très vite l'Édit de Nantes mais l'affaiblissement du pouvoir et le réveil des oppositions, inhérents aux périodes de régence, inquiètent.

En 1613, le changement d'atmosphère touche directement les protestants de Loudun. La gestion du collège fondé grâce à un don de Gui Chauvet leur échappe après trois ans de batailles juridiques pour savoir si le donateur, né à Loudun, avocat au parlement de Paris, est mort catholique ou protestant. Le parlement de Paris tranche en faveur d'une mort catholique et refuse aux protestants une cession du nouvel établissement.

L'année suivante, les États généraux, par souci d'économie, demandent le démantèlement des forteresses intérieures, inutiles pour la défense du pays mais réparables de seigneurs rebelles, et dont les garnisons sont coûteuses à entretenir pour le trésor royal. Loudun pourrait se sentir directement menacée par cette proposition, mais elle figure au milieu de beaucoup d'autres et ne semble pas avoir provoqué l'inquiétude.

En 1617, le retrait du gouverneur Marcantoine Marreau de Boisguérin, homme à poigne, capable de concilier défense des intérêts protestants et fidélité sans faille au roi de France, laisse la place à Jean II d'Armagnac, fils d'un compagnon d'Henri IV et premier valet de chambre de Louis XIII. Les protestants viennent de perdre un de leur plus solide appui.

La même année, au cœur de l'été, une autre arrivée pourrait les inquiéter, celle de messire Urbain Grandier, nouveau curé de Saint-Pierre du Marché. Avec la nomination de ce brillant élève des Jésuites, la Contre-Réforme pourrait avoir marqué un point. Il n'en est rien, mais pour l'instant nul ne le sait.

À partir de cette année 1617, l'atmosphère ne va pas cesser de s'alourdir, mais, en attendant, les protestants loudunais ont encore quelques beaux jours devant eux.

2.2. *Les derniers beaux jours*

Vers 1609–1610, à la fin du règne d'Henri IV, la construction d'un nouveau temple s'achève à l'angle des rues de la Croix-Bruneau et Villecourt. Jusqu'à sa destruction, en 1685, Loudun conservera ce grand temple qui pouvait, dit-on, accueillir deux à trois mille personnes.

En 1613, après avoir été évincés de la gestion du collège des Chauvet, les protestants créent leur propre collège de la rue de l'Abreuvoir. Alors que son rival catholique végété, cet établissement acquiert rapidement une excellente réputation.



FIGURE 4. Les couvents de la Contre-Réforme.

En 1616, c'est Loudun qui accueille une importante conférence destinée à apaiser les tensions qui ont émaillé la minorité de Louis XIII. Les protestants vont discuter, sur un pied d'égalité, avec les représentants du roi et ceux des seigneurs catholiques. Gageons que le jeune Ismaël Boulliau de dix ans a pu voir défilé la fine fleur de la noblesse protestante, notamment Maximilien de Béthunes (Sully) et son gendre, le jeune chef politico-militaire, Henri de Rohan.

L'atmosphère n'est déjà plus la même en 1619 lorsque les réformés tiennent à Loudun une assemblée nationale, alors que le bruit court que le roi va intervenir militairement pour imposer le rétablissement du catholicisme en Béarn.

La contre-attaque catholique est en marche, marquée, sur le plan national, par l'élimination de la puissance politique et militaire des protestants. À Loudun, l'équilibre entre les deux confessions s'inverse, en faveur des catholiques.

2.3. La contre-attaque catholique à Loudun

La carte des établissements religieux de la ville reflète la vigueur de cette contre-attaque.

Dans les années 1620, elle est menée par les moines de la ville, très actifs et de plus en plus nombreux. Aux ordres anciens, se sont ajoutées quatre nouvelles congrégations, nées de la

Contre-Réforme. Les premiers couvents de religieuses s'installent dans la ville, dont les Ursulines chargées de l'éducation des jeunes catholiques. D'autres ordres féminins suivront.

Toute la ville résonne du bruit des processions avec les prières et les chants. Les sermons des Carmes, des Cordeliers et des redoutables prédicateurs que sont les Capucins du Père Joseph multiplient les conversions, soigneusement mises en avant.

Le nouveau gouverneur, Jean d'Armagnac, Théophraste Renaudot, Ismaël Boulliau lui-même, abandonnent le protestantisme. L'ennemi irréductible des Jésuites, Marcantoine Marreau de Boisguérin, sera enterré catholique en 1632 [8].

Un homme semble insensible à cette atmosphère de reconquête, le curé de Saint-Pierre-du-Marché, Urbain Grandier. Certains commencent à murmurer qu'il pourrait être un « *protestant couvert* » ...

Pendant ces années 1620, une autre menace pèse sur la ville, la destruction de sa forteresse.

3. La destruction de la forteresse

C'est une idée déjà ancienne qui fait son chemin et que les événements vont mettre à l'ordre du jour. Dans les années 1620, à l'échelle nationale, la reconquête catholique passe aussi par les armes.

3.1. *La contre-attaque par les armes*

L'élément déclencheur sera le rétablissement du catholicisme en Béarn, où il avait été interdit par Jeanne d'Albret (1528–1572), mère d'Henri IV et protestante intransigeante. Amorcé par Henri IV, affirmé par Louis XIII en 1617, ce rétablissement complet sera effectif en 1620, après une intervention qui conduit le roi et ses troupes jusqu'à Pau.

C'est le début d'un nouvel épisode de guerres de religion menée contre des chefs protestants de plus en plus arrogants,¹ comme Henri de Rohan qui s'est arrogé le privilège royal de battre monnaie sur ces terres. Entre 1621 et 1629, trois campagnes militaires touchent le Sud-Ouest (Languedoc, Saintonge, Aunis), fief des Rohan. Elles se terminent par la Paix de grâce d'Alès (1629), qui établit la séparation entre le politique et le religieux dont avaient rêvé Catherine de Médicis et Michel de L'Hôpital dans les années 1560. Dépouillés des droits politiques et militaires accordés par l'Édit de Nantes, les protestants conservent une liberté de culte, très encadrée.

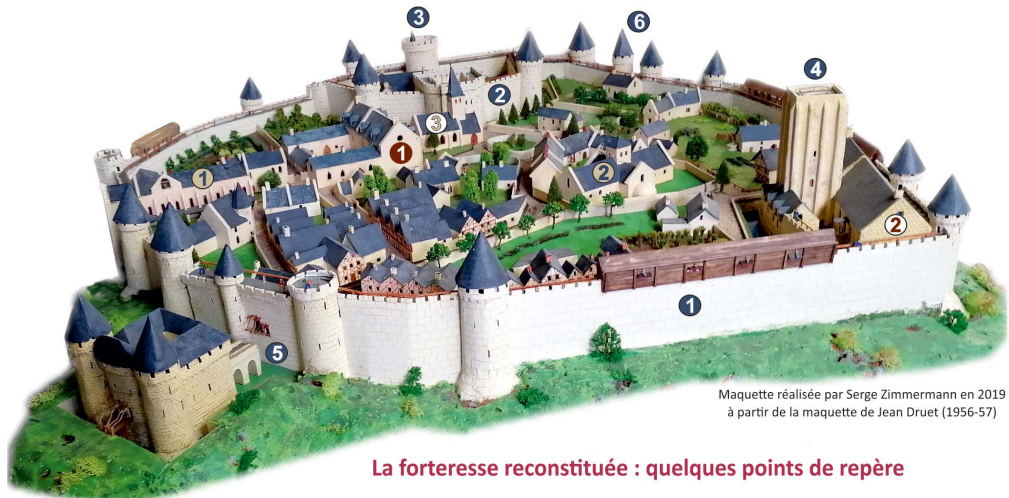
Ces événements nationaux ont de lourdes conséquences pour Loudun. Deux épisodes militaires vont en effet accélérer la décision de détruire la forteresse, le siège de Royan devant laquelle Louis XIII est bloqué pendant cinq jours en 1622 et le siège de La Rochelle qui immobilise l'armée royale entre 1627 et 1628.

3.2. *Loudun perd son grand et son petit Châteaux*

Envisagée en 1622, immédiatement après la fin du siège de Royan, la destruction du « Grand Château » qui ceinture la colline est décidée en 1629, après le siège de La Rochelle et réalisée au début de 1632, sous la direction de l'envoyé spécial du roi, Jean Martin de Laubardemont, qui vient de démanteler Royan.

Certains Loudunais sont soulagés en songeant aux dépenses nécessitées par l'entretien des murailles, d'autres sont déjà nostalgiques, aucun n'échappe au bruit des masses qui s'abattent sur les murs et à la poussière qui envahit la ville. Pourtant, contrairement au traitement réservé à Royan, la rebelle, la muraille qui ceinture la colline est abattue « proprement », en épargnant

¹Sous Louis XIII, les protestants se divisent entre loyalistes et rebelles.



La forteresse reconstituée : quelques points de repère

OUVRAGES MILITAIRES

- ① Enceinte du « Grand Château »
(En 1569, un premier démantèlement lui a fait perdre ses toits et ses créneaux)
- ② Enceinte du « Petit Château »
- ③ Donjon
- ④ Tour Carrée
- ⑤ Grand-Portail et son châtelet d'entrée
- ⑥ Poterne (entrée secondaire)

OUVRAGES CIVILS

- ① Hôtel de La Jaille
(palais des gouverneurs détruit avec le « Grand Château »)
- ② Palais des ducs d'Anjou
(détruit pour cause de ruine à la fin du XVI^e siècle)

ÉDIFICES RELIGIEUX

- ① Notre-Dame-du-Château
(Jésuites de Poitiers)
- ② Collégiale Saint-Léger-du-Château
- ③ Chapelle du donjon
(probablement déjà ruinée à l'époque d'Ismaël Boulliau)

Cette forteresse est essentiellement connue grâce aux fouilles de Joseph Moreau de La Ronde dont les résultats ont été utilisés par Louis Charbonneau-Lassay dans *Les Châteaux de Loudun d'après les fouilles archéologiques de M. Joseph Moreau de La Ronde, Loudun, 1915*

FIGURE 5. Maquette de la citadelle de Loudun.

la vénérable Tour Carrée des Plantagenets et quelques tours ou pans de murs indispensables à l'intérêt de la cité ou au soutien des habitations adjacentes. Loudun peut encore s'en enorgueillir aujourd'hui.

Les espaces libérés, avec tout ce qu'ils supportent, y compris les pierres, deviennent la propriété de deux serviteurs de Louis XIII, le gouverneur Jean d'Armagnac et le secrétaire du roi Michel Lucas, fils d'un mercier de Loudun.

Parce que Loudun est une ville fidèle et que son gouverneur, Jean d'Armagnac souhaite conserver sa fonction, Louis XIII hésite longtemps à se prononcer sur le sort du « Petit Château ». Une ultime bataille se déroule au Louvre où le gouverneur a l'oreille du roi. Elle se livre aussi à Loudun où Urbain Grandier, ami et obligé de Jean d'Armagnac, tente, sans grand succès, de mobiliser la population contre la destruction, à un moment où il aurait intérêt à se faire oublier.

L'imposant donjon philippin et son système de fortification ne disparaîtront qu'à la fin de 1633. Les pierres serviront à la réparation des tours du Bailliage et de La Ville, destinées à devenir prisons et à la reconstruction des couvents des Carmes et des Jésuites détruits en 1568 par un contingent de l'armée protestante.

Ismaël Boulliau laisse donc derrière lui une ville en plein désarroi.

4. Une ville en plein désarroi

Le sort semble s'acharner sur Loudun. En 1632, une nouvelle épidémie de peste décime la population. Elle commence au printemps, s'atténue un peu pendant l'été, reprend à l'automne, au moment où une nouvelle affaire éclate.

Au cours de cet automne 1632, le bruit circule qu'il se passe des choses bizarres derrière les murs du couvent des Ursulines de la rue du Pasquin (la rue du Bout-du-Monde, à l'époque). Quelques Ursulines, dont Jeanne des Anges, la mère supérieure, seraient la proie du démon. L'intervention des exorcistes qui, dès le 11 octobre, contraignent le diable à dénoncer son complice, Urbain Grandier, marque le début d'une terrible affaire qui conduira le curé de Saint-Pierre du Marché sur le bûcher et ternira durablement l'image de la ville.

Mais cette année-là, on retrouve Ismaël Boulliau à Paris. Pour lui une autre vie a déjà commencé.

Il a quitté une cité meurtrie, bien différente de la ville active où il est né vingt-sept ans plus tôt. Privée de ses châteaux, bientôt de son grenier à sel et son collègue protestant, elle amorce une longue période de déclin.

Conformément à la prédiction de son dernier gouverneur, Jean d'Armagnac, la fière citadelle de 1605 est devenue une simple bourgade [9].

Conflit d'intérêt

L'auteur n'a aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Références

- [1] S. Noyelle, S. Rohaut, *Histoire des rues de Loudun*, Société historique du pays de Loudunois, Loudun, 1999–2015 (13 brochures publiées).
- [2] B. Maillard, « Naissance d'une ville au XVII^e siècle, la création de Richelieu et ses conséquences », in *Vivre en Touraine au XVIII^e Siècle*, Presses universitaires de Rennes, Rennes, 2003.
- [3] E. Bezzina, *Étude sur les protestants loudunais*, Société historique du Pays de Loudunois, Loudun, 2013.
- [4] L. Charbonneau-Lassay, *Héraldique loudunaise*, Les Presses Sainte-Radegonde, La Roche-Rigault, 1996.
- [5] J. Marcadé, *Les protestants dans la Vienne*, Geste éditions, La Crèche, 2009.
- [6] P. Raveau, *L'Agriculture et les classes paysannes dans le haut Poitou au XVI^e siècle*, M. Rivière, Paris, 1926.
- [7] F.-J. D. de La Fond, *Essais sur l'histoire de la ville de Loudun, tome 1*, M.-V. Chevrier, Poitiers, 1778.
- [8] T. D. de Laplane, *Recherches sur l'histoire de Beuxes, tome 1*, Beuxes histoire et patrimoine, Beuxes, 2004.
- [9] A. Barbier, *Jean II d'Armagnac, gouverneur de Loudun, et Urbain Grandier*, Société des Antiquaires de l'Ouest, Poitiers, 1886.



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

La vie d'Ismaël Boulliau

The life of Ismaël Boulliau

Gérard Jubert^a

^a Archiviste honoraire aux Archives nationales, Ancien président de la société historique du pays de Loudunais, France

Résumé. Cet article conte la vie d'Ismaël Boulliau, astronome Français du XVII^e siècle.

Abstract. This article deals with the life of Ismaël Boulliau, french astronomer.

Mots-clés. Astronome, Loudun, Bibliothèque Mazarine, Bibliothèque de Thou, Cabinet Dupuy.

Keywords. Astronomer, Loudun, Mazarine library, de Thou's library, Dupuy's library.

Published online: 17 August 2023, Issue date: 15 September 2023



Portrait d'Ismaël Boulliau par Jacobus Van Schuppen au musée des beaux-arts et d'archéologie de Besançon

1. L'enfance et la jeunesse

Le 25 novembre 1694, mourait, en l'abbaye Saint-Victor de Paris, dans la quatre-vingt-dixième année de son âge, l'un des plus notables astronomes et mathématiciens du grand siècle. Il était né le 28 septembre 1605 à Loudun, ville capitale du pays du Loudunois, aux confins de l'Anjou, de la Touraine et du Poitou, dans une famille protestante. Son père dont il portait également le prénom était procureur au baillage et sa mère, issue d'une vieille famille du lieu, avait nom Suzanne Motet. Il eut trois frères, Jean, Jacques et Daniel et cinq s eurs Marthe, Catherine, Dorothe , Jeanne et Suzanne. Que sait-on de la petite enfance et de l'adolescence d'Ismaël Boulliau ? On sait seulement qu'il fit de bonnes études classiques à Loudun, bien pourvues de bonnes écoles et de bons maîtres et notamment d'un collège de protestants. Il lisait et écrivait couramment le grec et le latin et tous ses ouvrages publiés furent rédigés en cette dernière langue.

Doué, dès son plus jeune âge, d'un savoir et d'une instruction fort vastes et variés dans les disciplines précitées, Ismaël Boulliau semble, dès sa vingtième année, avoir centré ses recherches et ses travaux sur les mathématiques et sur l'astronomie. Son intérêt pour cette dernière lui fut apparemment inspiré par son père qui troquait volontiers le portefeuille du procureur contre la lunette de l'astronome et qui fit plusieurs observations — celles des comètes de 1607 et 1618 — que son illustre fils eut à cœur de publier plus tard, avec ses propres travaux.

Ayant quitté Loudun pour Paris en 1632, il ne fut, en aucune façon, m l  aux misérables intrigues de la sordide affaire de possession qui secoua Loudun dans les années 1633–1634 et qui se termina si tragiquement par la mise au b cher du son curé Urbain Grandier. Il n'en conserva pas moins — selon le témoignage de Gilles Ménage qui a pu apprécier ses belles et nobles qualités — une grande estime pour le supplicié [1]. Une belle lettre de Boulliau à son ami Gassendi en date du 7 septembre 1634, trois semaines après le supplice de Grandier, nous donne, en même temps la relation directe de l' v nement faite par un témoin oculaire en l'occurrence son frère Jean Boulliau, intendant des biens du marquis d'Escoubleau de Sourdis, marié catholiquement avec Jeanne Tabart, son contrat de mariage précisant la présence d'Urbain Grandier en tant que premier témoin. Ismaël Boulliau, après avoir rapport  à Gassendi le texte même de la relation qui lui avait été faite, par son frère, de cette triste journée du 18 août 1634, «   la lueur même des flammes qui dévorèrent le curé de Saint-Pierre-du-Marché », Boulliau conclut : « *Voilà l'histoire succincte de la mort de cet homme qui avait de grandes vertus mais accompagnées de grands vices, humains néanmoins et naturels à l'homme. Il était docte, bon prédicateur, bien disant, mais il avait un orgueil et une gloire si grande que ce vice lui avait fait pour ennemis la plupart de ses paroissiens et ses vertus lui ont accueilli l'envie de ceux qui ne peuvent paraître vertueux si les séculiers ne sont diffam s parmi le peuple. La rage de ses ennemis est si grande qu'ils n'ont eu de plaisir s'assouvissant de vengeance de le voir périr* ». Et Boulliau tirant la philosophie de ce drame, achève ainsi sa lettre : « *D'ailleurs, je d plores la condition en laquelle on veut mettre les chreti ns de les faire mourir sur la déposition des diables, doctrine impie, erronée, ex crationnable et abominable — notons au passage la richesse remarquable du vocabulaire — qui rend les chreti ns idolâtres, ruine la religion chrétienne dans ses fondements, ouvre la porte à la calomnie et fera, si Dieu, par sa providence, ne remédie à ce mal, que le diable se fera immoler par les hommes des victimes humaines, non plus sous le nom de Moloch, mais à la faveur d'un pacte diabolique et infernal [2]* ».

2. L'arrivée à Paris

Il quitta Loudun dans le cours de l'année 1632. Il n'avait alors que 27 ans, arrive à Paris. Il loge d'abord près du Louvre chez Charles d'Escoubleau, marquis de Sourdis, dont la famille avait des terres en Loudunois, la seigneurie de la Chapelle-Bellouin notamment. Dès son arrivée entre en rapport avec les savants qui s'y trouvent. D'abord, deux plus grands de ses confrères

dans le sacerdoce : Pierre Gassendi qui devait quitter Paris, dès le mois d'octobre 1632, et avec lequel Boulliau entretiendra une correspondance aussi nombreuse qu'instructive et l'illustre père Marin Mersenne. Il ne manqua pas d'assister aux conférences que son compatriote — et allié — Théophraste Renaudot avait organisées, dès le printemps de 1633, dans son bureau d'adresse de la rue de la Calandre, au cœur de la Cité, près du Palais de Justice de Philippe-Auguste et de Saint-Louis. On ne soulignera jamais assez l'importance de ces conférences pour la connaissance de la pensée moyenne de la société cultivée et du monde savant de cette époque [3].

Ces conférences se tinrent une fois par semaine jusqu'en 1642 et leurs comptes rendus furent heureusement publiés par le gazetier en recueils, de cent conférences chacun, dits centurie. Certes ces conférences restaient anonymes. C'était l'un des principes que Théophraste Renaudot avait fixés à ces réunions. Mais dès le 24 octobre 1633, l'un des deux sujets proposés porte sur le mouvement de la Terre et l'un des intervenants soutient que dans l'examen de cette question l'opinion de Copernic — *à savoir que la terre se meut à l'entour du soleil, lui demeurant immobile au centre du monde* — est la plus vraisemblable — *laquelle opinion, ajoute-t-il, était déjà celle d'Aristarque et de Philolaüs*. Quand on sait quelle importance Ismaël Boulliau attachait aux idées de ce pythagoricien qu'il reprit dans plusieurs de ses ouvrages, il n'est pas, semble-t-il, hasardeux d'avancer que notre savant prit certainement part à la conférence tenue ce jour-là ; comme il prit très vraisemblablement aussi à celle du 29 mai 1634 sur les comètes ou à celle du 19 mai 1636 sur l'arc-en-ciel ou même encore à celle du 27 avril 1637 sur la voie lactée ou à celle enfin du 2 avril 1640 sur le feu central.

Boulliau fut, au reste, en rapport avec Théophraste Renaudot, dès son arrivée à Paris. Une lettre de Gassendi, datée de Digne, le 1^{er} décembre 1632 adressée à son ami Luillier à Paris, est à cet égard, sans ambiguïté. Gassendi écrit : « *A propos, envoyez, s'il vous plait, quelqu'un de vos gens vers le sieur Renodot (sic) afin qu'il vous indique où loge M. Boulliau de Loudun parce qu'il est, ce me semble, son parent, afin de faire prier de vous aller trouver et quand il vous verra, priez-le, de ma part, d'envoyer M. Schickard* — un autre astronome de ses amis — *toutes les observations qu'il a de Mercure* [4] ».

C'est à cette même époque que Boulliau rencontre les savants bibliophiles, les frères Jacques et Pierre Dupuy, futurs gardes de la Bibliothèque du Roi et, pour l'heure, gestionnaires de la très belle et très riche bibliothèque de leur parent, le grand magistrat et historien Jacques-Auguste de Thou, comportant 8 000 volumes et 1 500 manuscrits, en même temps que promoteur d'un fameux cabinet de lecture, lieu de rencontre de prédilection du monde savant et érudit du temps.

3. L'Hôtel de Thou

Dès 1636, Ismaël Boulliau quitte le logement que lui avait accordé depuis 1632 le marquis de Sourdis, pour se rendre en l'Hôtel de Thou, rue des Poitevins où il restera jusqu'en 1652. Profitant de la très riche bibliothèque qui s'y trouve, il devient vite un collaborateur assidu et dévoué des frères Dupuy dans la gestion de leur fameux cabinet et quand ceux-ci, en 1645, seront nommés gardes de la Bibliothèque du Roi, c'est à Ismaël Boulliau qu'ils confièrent la bibliothèque de Thou, assistée par un certain Jacques de La Rivière. Cette période, on l'imagine aisément, fut pour notre savant une période bénie. Ayant tout naturellement le plus libre accès à tous les trésors de cette bibliothèque.

4. Ses voyages en Italie, au Levant

C'est durant son séjour au côté des frères Dupuy qu'Ismaël Boulliau décida d'entreprendre le voyage au Levant. Toujours par l'intermédiaire des frères Dupuy, il obtint un poste de prêtre à l'ambassade de France à Venise, dirigée par Nicolas Bretel, seigneur de Grémonville. Au bout

d'un séjour d'une année à Venise, son voyage au départ de cette ville ne put se réaliser à cause de la guerre gréco-turque à Candie (Chypre). Mais il eut une compensation de choix séjournant deux mois à Florence, auprès du grand-duc de Toscane Ferdinand de Médicis, côtoyant son frère le prince Léopold, l'un des hommes les plus savants de la péninsule et le mathématicien Toricelli qui lui donna le premier baromètre qu'il venait de créer. Le grand-duc lui offrit pour sa part deux longues-vues. Il entretiendra par la suite une importante correspondance avec le prince Léopold. De même il rencontre à Padoue un Français, le savant Gabriel Naudé, son prédécesseur à la bibliothèque Mazarin. Il partit ensuite de Livourne pour rejoindre Constantinople. En 1651, il visite les savants Allemands et Hollandais.

Ses lettres à son ami Jacques Dupuy, de 1645 à 1648, et en 1651, pendant ses voyages en Orient, en Allemagne et dans les Pays-Bas sont du plus grand intérêt. Celles qui sont datées de Venise contiennent de nombreux détails sur la politique intérieure et extérieure de la Sérénissime République. Celles qu'il écrit de Smyrne et de Constantinople n'offrent pas moins d'intérêt au point de vue de l'état du monde grec et musulman au XVII^e siècle. Une de ses lettres en particulier, écrite d'Amsterdam en 1651, doit être ici rappelée. Le tableau qu'il y donne de la prospérité et de la richesse du peuple hollandais comparé à celui de la France, ainsi que les judicieuses réflexions que lui suggèrent l'état politique, alors si troublé, de notre pays, sont assez remarquables : « *C'est en ce pays, écrit-il, où l'industrie de ces Messieurs les Bataves paraît le mieux, eux qui ont gagné sur la mer des pays entiers et ont fait des prairies si belles et si fertiles que, deux fois le jour, ils font leurs vendanges, j'entends de lait, jusque-là qu'il y a une telle vache qui rend par an deux tonnes de lait ou peu s'en faut. Et ce pays enseveli dans les eaux est habité de paysans, riches en assez bon nombre de trois et quatre tonnes d'or, dont les logis sont propres et ornés de tableaux et lambris avec grande quantité de porcelaines jusqu'à tel point que dans leurs cuisines plusieurs en ont en plus grand nombre que nos dames les plus curieuses dans leurs cabinets ... Je me représentais alors le déplorable état de nos paysans et de nos campagnes, qui surpassent de beaucoup en beauté et en bonté ce pays-ci, et certainement c'était avec un sentiment de regret de voir que par mauvais ménage nous gâtions un bon pays, pendant que par une sage conduite et bonne économie, les autres en ont bonifié un si mauvais qui ne porte pour tout fruit que de l'herbe* [5]. »

5. Le secrétaire d'ambassade

La disparition de son ami Pierre Dupuy, le 14 décembre 1651, va apporter quelques changements dans son existence. Il quitte alors où il résidait depuis 15 ans pour se rendre rue de la Harpe, près de Jacques Dupuy, frère du défunt, qu'il continue à aider dans la gestion de la bibliothèque de Thou et du célèbre cabinet jusqu'à la disparition de ce dernier, survenue le 17 novembre 1656. En 1657, le Président de Thou ayant été nommé ambassadeur auprès des Provinces-Unies, prit Boulliau comme secrétaire. A cette occasion, notre savant astronome adressa à Mazarin la lettre suivante, aussi habile que pratique, le 19 février 1657 : « *Le Roy, écrit-il, ayant fait l'honneur à M. Le président de Thou de le choisir pour son ambassadeur ordinaire vers les Estats généraux des Provinces-Unies et Votre Eminence ayant porté Sa Majesté à faire ce choix, M. de Thou m'a fait l'honneur de me recevoir pour luy servir de premier secrétaire dans son ambassade, et ce qui l'a principalement porté à lever les yeux sur moy, c'est qu'il a cru que Votre Eminence aurait pour agréable que je rendisse service au Roy dans l'employ que Sa Majesté luy procure; et je suis persuadé que Votre Eminence croira que m'estant attaché à ses intérêts, je servirai le Roy comme un bon et fidèle sujet est obligé de faire. Ainsi Monseigneur, je supplie très humblement Votre Eminence qu'elle ait la bonté de me procurer un favorable traitement dans cette occurrence et qu'il lui plaise de me faire donner les appointements que l'on a accoustumé de donner aux Secrétaires de l'Ambassade* [6] ». Comment pourrait-on mieux dire plus concrètement les choses? Le secrétariat

de l'ambassadeur dura exactement cinq mois, d'avril au mois d'août 1657. Pendant la durée de son séjour aux Pays-Bas, Boulliau rencontra Huygens qu'il avait déjà vu, quelques années plus tôt, à Paris et avec lequel il entretenait une correspondance suivie.

6. Le bibliothécaire de Mazarin

A son retour à Paris et vers la fin de l'année 1657, Boulliau devint le bibliothécaire de Mazarin, succédant en cette fonction à La Poterie, lui-même successeur de Naudé. Une belle lettre du Président de Thou adressée au cardinal-ministre, le 7 mars 1658, de La Haye — où il était en poste pour quatre années encore — nous révèle ce choix prestigieux en même temps qu'elle fait l'éloge de notre savant : « *Monseigneur, écrit de Thou à Mazarin, je me trouve bienheureux d'avoir élevé une personne dans ma maison que Votre Eminence ait jugé capable d'avoir la conduite et gouvernement de la plus nombreuse bibliothèque de l'Europe en toutes sortes de langues et de sciences et que M. Boulliau soit celui que Votre Eminence a honoré d'un choix si glorieux et avantageux et j'ose bien dire à Votre Eminence qu'il n'y a qu'elle seule qui eût été capable de lui faire quitter le recueil de livres qui est dans la maison de son très obéissant serviteur [7].* » Et l'ambassadeur termine sa lettre en se réjouissant « *de la belle pensée (de Mazarin) de faire bastir un collège public (celui des Quatre-Nations qui deviendra le Palais de l'Institut) pour y déposer cette fameuse bibliothèque (qui deviendra la Bibliothèque Mazarine)* ».

Parallèlement aux soins qu'il donnera à la bibliothèque de Mazarin, Boulliau continue de s'occuper de la bibliothèque de Thou. Il fera également à cette même époque (1660) un long voyage en Pologne. D'abord à la cour de Varsovie où il rencontra son ami et correspondant Pierre Des Noyers, secrétaire de la reine Marie-Louise de Gonzague, puis à Dantzig où il ira visiter Hevelius. L'impression qu'il fit à la cour de Varsovie fut, semble-t-il, des plus favorables, puisque la reine lui fera, plus tard, un présent considérable d'une valeur de 1 000 livres.

7. La rupture avec de Thou

Au printemps 1666, une tragique rupture se produit dans la vie de Boulliau, d'autant plus sensible que notre savant vient d'atteindre ses soixante ans. Il se brouille avec le Président de Thou, son protecteur et son ami depuis trente ans. Il semble que cette rupture eut son origine dans le rôle que Boulliau voulut tenir dans une affaire de famille opposant son protecteur à l'un de ses fils, Jacques-Auguste, abbé de Samer-aux-Bois.

8. Au collège de Laon

Après sa regrettable brouille avec le Président de Thou, Boulliau, muni d'une faible pension, se retire au collège de Laon à Paris, au pied de la montagne Sainte-Geneviève. Il y restera jusqu'en 1689. Dans ce contexte et cet environnement, non moins favorables, Ismaël Boulliau put continuer, tout à loisir, ses chères études astronomiques. Il est, à cette époque, reconnu comme le plus grand astronome et mathématicien du royaume. La société de Londres, plus reconnaissante de ses mérites que l'Académie royale de Paris, l'accueillit parmi ses membres, à titre étranger, au cours de l'été 1667. Notre savant venait alors de trouver une étoile nouvelle, Mira, dans la constellation de Cetus et faisait de nouvelles découvertes sur la nébuleuse *Andromède*.

Mais la charge des ans se faisait de plus en plus pesante et sa santé s'affaiblissait. Il souffrait de rhumatismes qui le clouaient au lit dans d'insupportables souffrances. Cependant ainsi qu'il l'écrivit à sa belle-sœur, en juillet 1683 : « *Pour peu que la constitution de l'air change, je ressens des douleurs beaucoup moindres ... Je sors quelques fois pour ne pas perdre l'usage de mes jambes et afin de voir le peu d'amis qui me restent [8]* ».

En septembre 1688, répondant à une lettre de son neveu, Urbain Boulliau, fils de son frère aîné, il lui avoue un « tremblement des mains » pour se faire pardonner une écriture que son correspondant et ami, Des Noyers qualifie de « *sy brouillée qu'il ne l'a pu deviner* ».

9. Sa mort à l'abbaye Saint-Victor aux Bois

Au printemps 1689, il quittait le collège de Laon pour l'abbaye Saint-Victor, à l'emplacement de laquelle s'élève aujourd'hui la faculté des Sciences près du quai Saint-Bernard, non loin du Jardin des Plantes et de la gare d'Austerlitz dont l'air, assez curieusement, était réputé très bon pour ses terribles rhumatismes, bien qu'en bordure de Seine. On lui donna un logement au second étage du premier corps de logis dans la cour d'entrée. Sa chambre près de laquelle se trouvait un cabinet contenant, ce qui ne saurait nous surprendre, plusieurs instruments d'astronomie, avait pour mobilier une petite table en bois de chêne posée sur son pied à colonne et couverte d'une toile; un fauteuil de commodité de pareil bois couvert de toile; un lit à hauts piliers en bois de hêtre garni de son rideau; et tout autour de la chambre, cinq pièces de tapisserie de Bergame [9]. C'est dans ce cadre qu'Ismaël Boulliau mourut, le 25 novembre 1694. Il avait eu 89 ans, le 28 septembre précédent.

10. Eloge post-mortem

L'éloge qui fut publié sur lui dans le *Journal des Savants* de 1695 mérite qu'on s'y arrête, en terminant, quelques instants. Il commence ainsi : « *Notre siècle tout fertile qu'il est en gens de lettres, en a peu produit qui ayent réuni autant de qualitez que M. Boulliau. La nature lui avait donné un corps robuste et propre au travail, un esprit vif, une mémoire heureuse, un jugement solide et un désir de réussir par le bon usage qu'il fit de ces avantages et par le soin qu'il prit à cultiver ses talents.* »

Son esprit de prêtre éclairé le portait à souhaiter une réforme catholique mais dans un esprit libéral, ni mystique comme celle prônée par les nouveaux spirituels, ni sévère comme celle louée par les jansénistes.

La réputation que ses nombreux et savants travaux lui avaient value ne diminua en rien sa modestie naturelle. A l'un de ses amis, qui au soir de sa vie, lui avait témoigné par une lettre la haute opinion qu'il avait de lui, il répondit simplement en ses termes : « *Si ce que j'ai fait est approuvé par les honnêtes gens, intelligents dans les matières que j'ai traitées, cela suffit, et cette approbation pure et simple, sans des éloges et des paroles de complaisance trop affectée, vaut plus que tous les panégyriques.* »

Conflit d'intérêt

L'auteur n'a aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Références

- [1] R. A. Hatch, *The Collection Boulliau — Biographical Introduction*, University of Wisconsin, Madison, 1978, p. XXVI, n°1.
- [2] P. Tamizey de Larroque, Document sur Urbain Grandier (Cabinet historique n°2).
- [3] S. Mazauric, « Thèse de doctorat ès-lettres (Philosophie) soutenue le 19 novembre 1994 à la Sorbonne », Thèse, éditée en 1997 par les éditions de la Sorbonne — série Philosophie — 3, université de Paris I — Panthéon Sorbonne, sous le titre Savoirs et philosophie à Paris dans la première moitié du XVII^e siècle. Les conférences du bureau d'adresse de Théophraste Renaudot (1633–1642).

- [4] P. Gassendi, *Lettres familières*, cf. HATCH, op. cit. p. XXVII, 30-31 pages.
- [5] H. Omont, « Trois lettres de Boulliau à Dupuy (1645–1651) », in *Archives historiques, artistiques et littéraires, tome II*, Charavay, Paris, 1890–1891, p. 137.
- [6] BNF, « Manuscrits Français Fr. 13027 », fol 243, cf. HATCH, op. cit., P. XLV.
- [7] A. Franklin, *Les anciennes bibliothèques de Paris, tome III*, Imprimerie impériale, Paris, 1857, 91 pages.
- [8] Arch. Nat., Min. centr., Et. C, I. 422, lettre jointe au partage du 21 mars 1695 (Annexe 1) cf Elzbieta ZILBERBOGEN-CHAPDELAINÉ, Le testament de Boulliau, pp. 25–26 (III^e Congrès des Sociétés savantes, Poitiers, 1986 — Sect. Sci. 1987, pp. 21–31.
- [9] Arch. Nat., Min. centr., ET. XIII, 226, inventaire du 29 décembre 1694; cf. ZILBERBOGEN-CHAPDELAINÉ, op. cit., pp. 28–29 et p. 31, n. 36–41.



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

Hommage à Ismaël Boulliau / *A tribute to Ismaël Boulliau*

L'œuvre scientifique d'Ismaël Boulliau

The scientific work of Ismaël Boulliau

Marie-Claire Coët^a

^a ONERA, Université Paris Saclay, F-92322 Châtillon, France

Courriel: marie-claire.coet@onera.fr

Résumé. Cet article présente l'œuvre scientifique de celui qui fut, à la fois et tour à tour, mathématicien, astronome, astrologue, météorologue, mais surtout un intermédiaire scientifique qui échangea une importante correspondance avec les plus grands savants et intellectuels de son temps. Il se base principalement sur la thèse du hollandais Henricus Johannes Maria Nellen traduite 14 ans plus tard en français, à l'occasion du 3^e centenaire de la disparition d'I. Boulliau.

Abstract. This article presents the scientific work of Ismaël Boulliau who was, at the same time and in turn, mathematician, astronomer, astrologer, meteorologist, but above all a scientific intermediary who exchanged an important correspondence with the greatest scholars and intellectuals of his time. It is mainly based on the thesis of the Dutch Henricus Johannes Maria Nellen translated 14 years later into French, on the occasion of the 3rd centenary of the death of Ismaël Boulliau.

Published online: 15 September 2023, Issue date: 15 September 2023

“Une rue à Loudun et un cratère sur la lune, voilà les seuls endroits qui rappellent aux hommes l'existence de l'astronome du XVII^e siècle, Ismaël Boulliau.”
(H. Nellen)

1. Introduction

Bien que son nom soit aujourd'hui seulement connu des Loudunais et des « Séléniens », Ismaël Boulliau eut au 17^e siècle une renommée, qui dépassait les frontières de sa ville natale pour s'étendre sur toute l'Europe, à tel point qu'un cratère — et non des moindres — lui fut dédié sur notre satellite naturel. Astronome, épistolier, novelliste et intermédiaire scientifique, Ismaël Boulliau fut, à travers ses passions scientifiques, en rapport avec les milieux du « libertinage érudit » de son siècle.

2. L'astrologie

Cette discipline était encore à l'époque couplée ou associée à l'astronomie. Néanmoins dans le milieu religieux et scientifique d'Ismaël Boulliau, l'astrologie valait parfois à ses adeptes des sourires apitoyés. Il faut donc l'imaginer « tirailé » entre la religion, l'astronomie et l'astrologie, qui deux à deux avaient des antagonistes, des rapports complexes, voire une certaine continuité, porosité ou complémentarité.

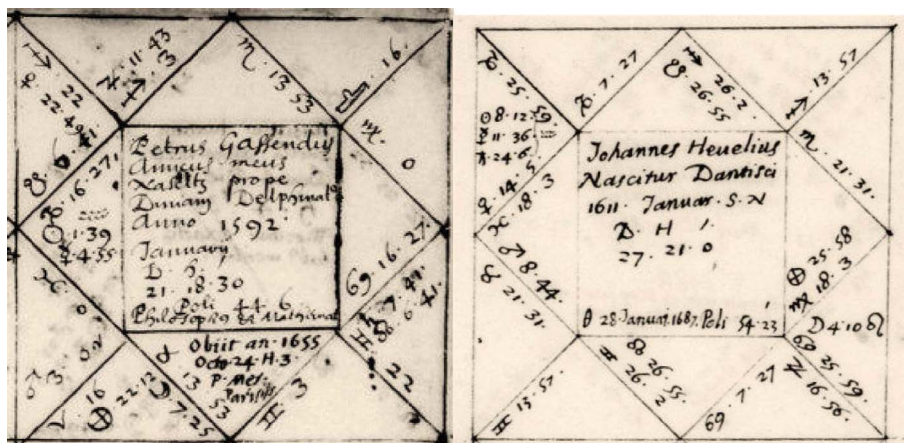
Son livre d'horoscope [1], qui compte 372 feuillets, montre qu'Ismaël Boulliau s'adonna très tôt à l'astrologie et y resta fidèle. Vers la fin de sa vie, il tenait encore à jour les horoscopes de certaines personnes, qu'ils avaient antérieurement tirés, en notant les principales vicissitudes de leurs vies. Ses commentaires constituent de véritables petites biographies.

Sa jeunesse et ses années d'études sont entourées d'un voile de mystère, car il ne reste que peu de lettres de cette époque, sa correspondance avec sa famille ayant disparu. Cependant les horoscopes qu'il tira des membres de sa famille renseignent quelque peu sur cette période. Mais les notes ne concordant pas toujours aux évènements laissent penser que ses rapports avec ses parents, restés à Loudun, étaient peu fréquents.

Ismaël Boulliau serait né le 27 septembre 1605 à 16h45, comme l'indique son horoscope. Plus tard, il prétendra être né le 28 septembre. Etant donné qu'il ne peut s'agir d'une erreur, on doit supposer que ce sont des calculs et des considérations astrologiques qui ont incité Ismaël Boulliau à opérer ce glissement de date. En effet, à mesure qu'il avançait en âge, Ismaël Boulliau était obsédé par la vieillesse et il gardait le souvenir d'une vie pleine de déceptions et de revers. Il ne fut jamais reçu à l'Académie des Sciences, ce qui fut une déconvenue majeure. Il peina également à obtenir une pension qui lui aurait permis de mener avec plus de facilité tous les travaux qu'il ambitionnait de réaliser. Ismaël Boulliau était persuadé que c'était parce qu'il était né sous une mauvaise étoile qu'il n'avait pu réaliser la brillante carrière scientifique qu'il estimait mériter et sans doute essayait-il de conjurer le sort en reculant sa date de naissance d'un jour. Il s'agirait dès lors d'un tour de passe-passe astrologique qui devait lui permettre d'annihiler l'action supposée néfaste d'une éclipse de Lune, qui avait commencé à la 16^e heure du 26 septembre. En postdatant sa naissance et en la fixant au 28 septembre, Ismaël Boulliau éloignait le moment de sa venue au monde de l'éclipse.

Ismaël Boulliau a tiré de nombreux horoscopes : d'amis, de connaissances ou de personnalités en vue, dont Gassendi et Hevelius.

Pierre Gassendi était un mathématicien, philosophe, théologien et astronome français, qui adhérait aux théories de Galilée, à qui il écrit le 20 juillet 1625 : « *Tout d'abord, ami Galilée, je voudrais que vous soyez bien convaincu du plaisir de l'âme avec lequel j'embrasse votre opinion en astronomie, sur le système de Copernic.* » [2] En astronomie, Gassendi s'est consacré à l'observation et à la description du mouvement des planètes, des éclipses solaires et à l'évolution des taches solaires. Une de ses observations les plus marquantes eut lieu le 7 novembre 1631 lors du transit de la planète Mercure devant le Soleil. Alors que l'on ne peut observer la planète à l'œil nu, il a l'idée de faire projeter son image sur une feuille de papier. Cela lui permet de se rendre compte de la petitesse de la planète.



Horoscope de Gassendi [p. 517, fol. 168v] - Horoscope de Hevelius [p. 274, fol. 298v].

Source : gallica.bnf.fr / BnF.

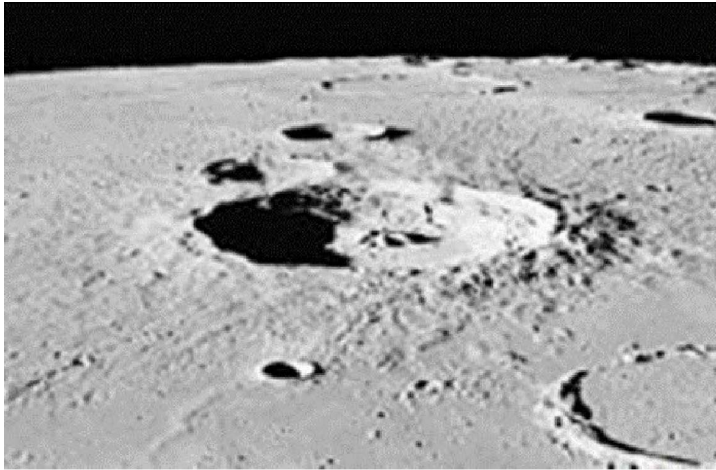
Hevelius est un astronome polonais, auteur d'une topographie de la Lune, découvreur de comètes et auteur d'un catalogue d'étoiles. Il construisit des instruments scientifiques et entretint une large correspondance avec les savants de l'époque, notamment avec Ismaël Boulliau de qui il était l'ami. Dans l'histoire de sa discipline, il se situe entre Galilée et Newton.

La pratique de l'astrologie valut parfois quelques déboires et déceptions à Ismaël Boulliau, telle cette mésaventure, reconstituée et contée par Nellen, à partir de la correspondance entre Ismaël Boulliau et Christian Huygens [3, p. 300-303]. La correspondance entre les deux savants rend compte de leurs bons offices constants et réciproques. Par exemple, Huygens procura à Boulliau une paire de lentilles qu'il avait lui-même taillées; Boulliau de son côté servit d'intermédiaire au profit de Huygens et se chargea notamment de la diffusion de ses ouvrages parmi les savants parisiens. Boulliau avait dit un jour à Huygens, avec une certaine « précaution oratoire » qu'il croyait que les prédictions astrologiques n'étaient pas tout à fait absurdes. Huygens se souvint de cette confiance lorsqu'une dame de grande condition lui demanda de faire son horoscope. Huygens donna donc la date de naissance de la personne - mais à la demande expresse de celle-ci, il cacha son identité afin que Boulliau pût procéder dans les règles de l'art sans être gêné dans ses prédictions par des égards à avoir pour elle. Il ajouta le lieu de naissance de l'inconnue ainsi que le méridien et la hauteur du pôle, indispensables aux finesses du métier. Il révéla toutefois en partie l'identité de sa cliente, pensant que cela aiderait Boulliau. En effet, sa cliente étant déjà mariée, il voulait absolument éviter que Boulliau prît par maladresse une date de mariage. Boulliau tire l'horoscope sans tarder à demander une rétribution : « *ce que je feray mériteroit bien quelque marque d'estime, comme serait quelques bijoux des Indes* », [3, p. 301] car la mystérieuse cliente n'était autre qu'Albertine Agnès d'Orange-Nassau (1634-1696), princesse régente de Friesland, Groningen et Drenthe. Mais l'analyse faite par Boulliau du caractère d'Albertine-Agnès ne correspondait pas à l'image qu'on se faisait généralement de la princesse, qui avait la réputation d'être douce comme une colombe et nullement querelleuse. Boulliau reconnut qu'il s'était peut-être fourvoyé, à moins qu'elle travestît sa véritable personnalité. Le coffre à bijoux d'Albertine-Agnès resta fermé. Sans doute s'était-elle refusée à admettre les choses désagréables révélées par l'horoscope de Boulliau ?

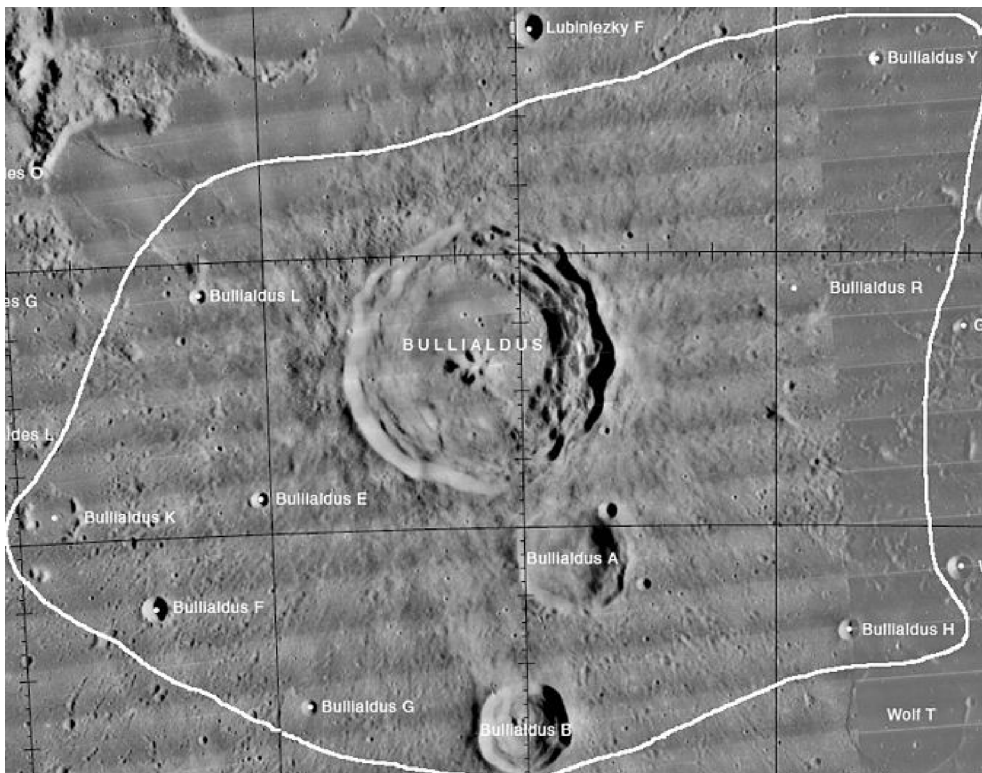
3. L'astronomie

C'est dans cette science que les talents d'Ismaël Boulliau s'exercèrent le mieux. Comme récompense de ses travaux, un cratère sur la Lune porta son nom de son vivant ce qui lui conférait une

légitime fierté. Ce nom fut officiellement adopté par l'Union astronomique internationale (UAI) en 1935. Les caractéristiques de ce cratère sont impressionnantes avec un diamètre de 60 km et une profondeur de 3 500 m. Une vue intéressante du cratère Bullialdus fut prise par la mission Apollo XVI.



Lunar and Planetary Institute, Apollo Image Atlas Mapping Camera Image Catalog, Apollo 16.

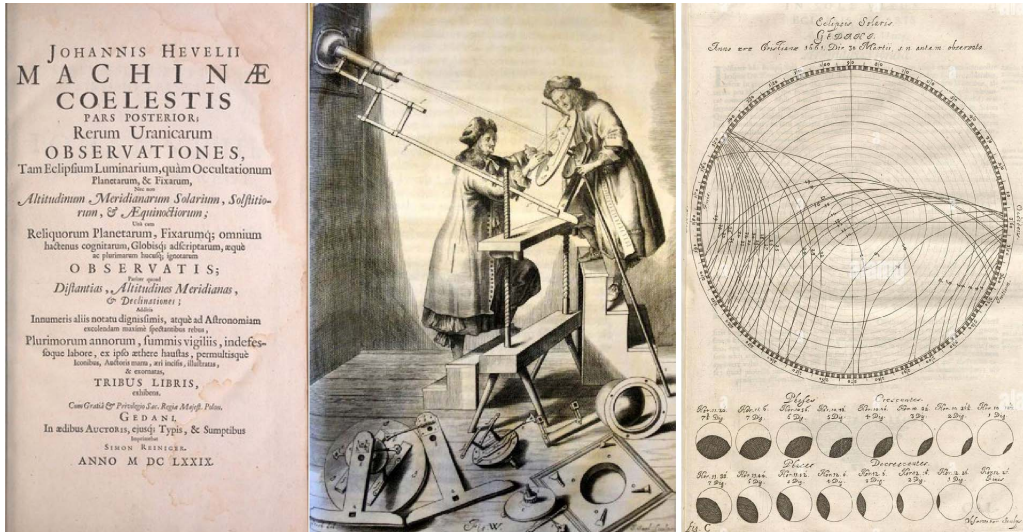


Bullialdus est un cratère d'impact situé sur la face visible de la lune dont l'observation fut rapportée pour la première fois en 1645 [4].

Les travaux scientifiques menés en astronomie par Ismaël Boulliau sont ici illustrés à travers quatre exemples.

3.1. L'observation de l'éclipse du soleil avec Hevelius le 30 mars 1661

En 1661, Boulliau visite Hevelius à Dantzic. Là, pendant plusieurs mois, il l'assiste dans ses observations. Amis proches pendant près de cinquante ans, Boulliau et Hevelius furent de fidèles correspondants et se dédièrent plusieurs publications.



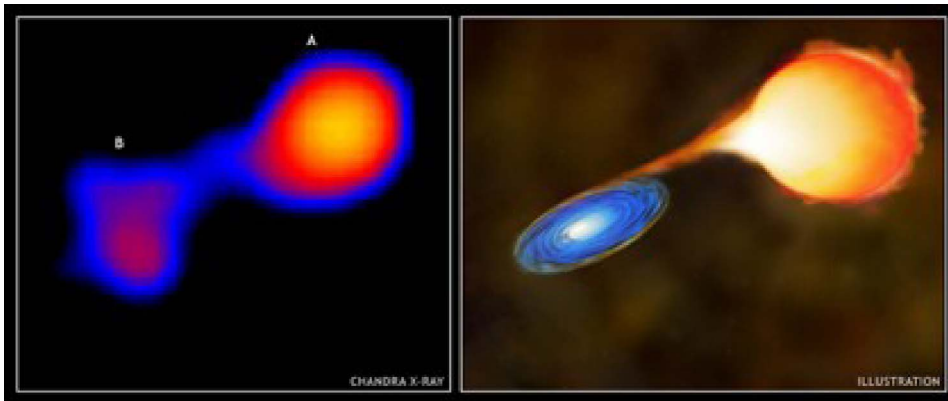
À g. : page de garde de [5], ouvrage en latin décrivant l'observatoire d'Hevelius. Au centre : gravure issue de cet ouvrage [5] montrant l'observation par Boulliau et Hevelius de l'éclipse solaire du 30 mars 1661. À d. : illustration des différentes phases de l'éclipse solaire du 30 mars 1661. Source : [6], Liber Secundus, Fig. T : Eclipsis Solaris, Gedani. Anno Christi 1659, Die 14 Novembris, Vesp. observata (n. p.). En ligne sur

<http://resolver.staatsbibliothek-berlin.de/SBB000162B800010297> CC-0.

Dans un ouvrage en latin d'Hevelius, intitulé *Machinae coelestis* [6], on trouve une gravure représentant Boulliau et Hevelius observant l'éclipse solaire du 30 mars 1661 et relevant ses différentes phases au moyen d'un l'hélioscope, instrument utilisé pour observer le soleil et les taches solaires. Les différentes phases de l'éclipse solaire du 30 mars 1661, relevées par Hevelius et Boulliau ont été dessinées dans l'ouvrage.

3.2. La détermination de la période de l'étoile Mira-Céti

Mira est une étoile dont la luminosité varie. Au XVII^e siècle, Mira-Ceti était connue des astronomes pour être une étoile merveilleuse, dont l'éclat pouvait changer de manière spectaculaire en 11 mois environ. C'est Ismaël Boulliau qui détermina sa période (333 jours). Située dans la constellation de la Baleine, cette étoile est composée de deux éléments : une géante rouge (MIRA) et une naine blanche (CETI).



Source : X-ray : NASA/CXC/SAO/M. Karovska et al. ; Illustration : CXC/M. Weiss

Des études de la NASA ont révélé que l'étoile perd de la matière, créant une queue de 13 années-lumière de longueur, qui se serait formée pendant ces 30 000 dernières années, à la manière d'une comète. On sait aujourd'hui que Mira, qui est beaucoup plus volumineuse que le Soleil, se gonfle et se dégonfle régulièrement. Cette étoile mourante voit se dilater et se contracter son enveloppe externe composée d'hélium et d'hydrogène, autour d'un cœur constitué de carbone et d'oxygène en fusion et c'est ce qui est à l'origine de ses variations d'éclat et non pas, comme le pensait Boulliau, la rotation de l'étoile sur elle-même qui nous montre tantôt une partie plus lumineuse ou tantôt une partie plus sombre.

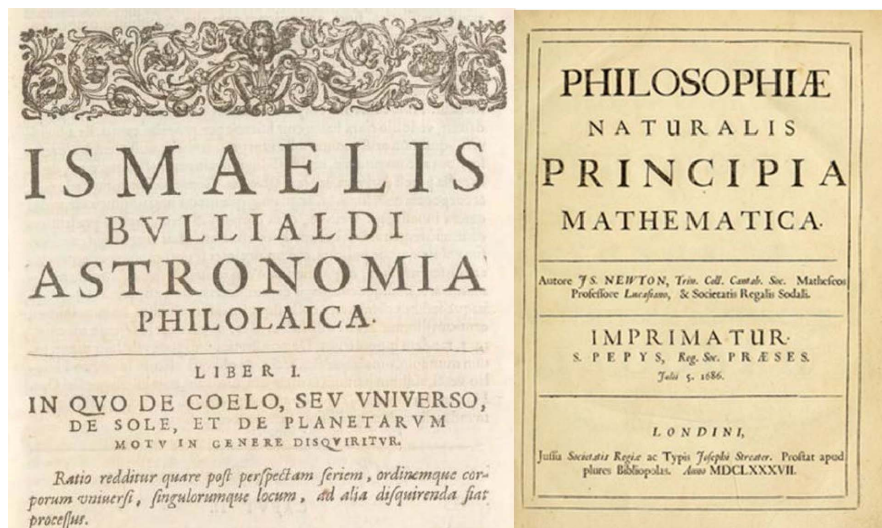
3.3. Son apport à la théorie de la gravitation

Ismaël Boulliau publie un traité d'astronomie en 1645 [7], dans lequel il indique que la force de gravitation doit suivre une loi en carré inverse des distances.

$$\|\vec{F}_1\| = \|\vec{F}_2\| = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Loi de la gravitation universelle qui stipule que la force qui attire les corps entre eux est proportionnelle au produit des deux masses et inversement proportionnelle au carré de la distance

Isaac Newton (1643–1727) publie, en 1687, son ouvrage fondamental, portant le titre *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (*Philosophiæ naturalis principia mathematica*) [8]. Il pose les fondations d'une nouvelle physique, expose son système du monde et démontre les lois de Kepler à partir de la loi d'attraction universelle des masses. Selon celle-ci, deux points massiques quelconques de l'univers s'attirent avec une force qui est inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare, et la force agit le long de la direction qui les joint. Cette loi fait depuis référence dans les domaines de la mécanique, de la mécanique céleste, de la géodésie et de la gravimétrie. Newton cite les travaux d'Ismaël Boulliau qui l'ont mis sur la voie de la loi en carré inverse des distances.



A g. : Page de garde de [7]. En ligne sur <http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-549>. CC-0. A d. : Page de garde de [8]. Source : gallica.bnf.fr / BnF, en ligne sur <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3363w>.

3.4. L'évection de la Lune

Le livre III d'*Astronomia Philolaica* est consacré à l'étude du mouvement de la Lune et son chapitre 6 à la seconde « perturbation » ou « inégalité » de celui-ci : l'évection, mot qu'Ismaël Boulliau a créé pour nommer ce phénomène et qui est encore employé de nos jours pour le désigner.

Le mouvement de la Terre autour du Soleil peut être considéré en première approximation comme képlérien, c'est-à-dire le mouvement d'un astre par rapport à un autre respectant les trois lois de Kepler.

- (1) Les planètes du système solaire décrivent des trajectoires elliptiques, dont le Soleil occupe l'un des foyers.
- (2) Des aires égales sont balayées dans des temps égaux.
- (3) $A^3/T^2 = \text{constante}$ (A étant le demi grand-axe de l'ellipse et T la période de révolution).

Le mouvement de la Lune, lui est plus complexe. Une première approximation du mouvement de la Lune est donnée par la résolution d'un problème dit « à trois corps » (Soleil, Terre et Lune). Dans ce problème le mouvement de la Lune est obtenu en tenant compte de l'attraction de la Terre et des perturbations induites par le soleil. La solution complète doit tenir compte de très nombreuses perturbations faisant que les éléments elliptiques décrivant l'orbite lunaire ne sont pas constants, mais varient avec le temps. La première perturbation est connue depuis Hipparque (~150 av. J.-C.) et répertoriée sous le nom d'équation du centre (écart entre le mouvement de la Lune et celui d'un mobile fictif qui décrirait l'orbite à vitesse constante).

C'est Ismaël Boulliau qui a créé le nom d'évection, employé depuis pour désigner la seconde perturbation du mouvement de la Lune, découverte par Ptolémée (milieu du II^e siècle). Si la théorie d'Ismaël Boulliau, ses calculs et ses explications du phénomène, ne se sont pas révélés totalement exacts, du moins la dénomination qu'il lui donna a traversé les siècles.

3.5. La météorologie

Utilisant le premier thermomètre introduit en France, c'est Boulliau qui a réalisé les premières mesures météorologiques faites à Paris. Pour cela, il utilise un instrument offert par le grand-duc de Toscane à la reine de Pologne. C'est en effet à Florence que fut inventé en 1654 le premier véritable thermomètre. Grâce à l'utilisation conjointe du thermomètre et du baromètre, inventé aussi à Florence, par Torricelli, il est dès lors possible d'étudier l'atmosphère. Aussi Ferdinand II de Médicis (1610–1670) mit en place le premier réseau d'observatoires, avec des stations instrumentées dans onze villes. Lors d'une mission effectuée en Italie par le physicien Burattini, attaché à la cour de la reine de Pologne, ce dernier rapporte à la reine un thermomètre, qu'elle offre aussitôt à Ismaël Boulliau. Pierre des Noyers, secrétaire de la reine, l'expédie alors à Paris, où il parvient deux mois plus tard, le 24 mai 1658.

Ad Thermometrum observationes anno 1658. Parisijs.		
Maii Thermometrum Florentiae fabricatum.		
Dies	grad	
¶ 25	mer. 25.	Sol. nubes. calor moderat. valde.
○ 26	Mane. 22 $\frac{1}{2}$	pluvia h. 8. a. m. nubes Sol. Vent. Orient.
∩ 27	25	pluvia tepida. Vent. austral.
∩ 28	21 $\frac{1}{2}$	pluvia subfrigida. Borras.
♀ 29	mer. 25	Serenum. Ventus occidentalis
	noctu. 21 $\frac{1}{2}$	
∩ 30	a. m. 22. p. m. 26	Sol. Serenum.
♀ 31	mer. 27	Sol. nubes. Austus calor. pluvia h. 9. p. m.

Une page du cahier de relevé de températures d'Ismaël Boulliau [9], cité par [10].

Comme en témoigne la première page de son cahier d'observations météorologiques, Ismaël Boulliau s'est mis à l'œuvre dès le 25 mai 1658, lendemain même du jour où le thermomètre lui fut livré. Ismaël Boulliau suit une démarche expérimentale d'observation et d'enregistrement. Durant deux années, il relève quotidiennement à son domicile parisien les températures de l'atmosphère. Au fil des 68 pages écrites en latin, Ismaël Boulliau note, jour après jour, ses observations, parfois complétées ou remplacées par des éléments d'actualités. Ainsi le 26 août 1660, jour de l'arrivée à Paris de Louis XIV et de la nouvelle reine Marie-Thérèse, Ismaël Boulliau omit d'effectuer ses relevés! En tout il fit 2 005 mesures de température, effectuées sur une période de 849 jours, du 25 mai 1658 au 19 septembre 1660, avec toutefois quelques jours sans observation et presque un mois sans mesure du 11 octobre 1659 au 8 novembre 1659. L'heure d'observation est variable selon les jours : prédominance le matin « mane » sans indication précise de l'heure, vraisemblablement peu après le lever du jour, à midi « mer », et à 11 heures du soir.

Quelques années après le médecin et botaniste Louis Morin de Saint-Victor, prend la suite d'Ismaël Boulliau. C'est ainsi que nous disposons à Paris de la plus longue série de mesures des températures. En reconstituant et en complétant les données manquantes, notamment à partir de mesures en Angleterre entre la fin des observations de Boulliau et le début de celles

de Morin, en corrigeant les effets de variabilité des heures de mesure, Daniel Rousseau a publié, en mai 2013, dans le n° 81 de la revue *La Météorologie*, un article fort intéressant, intitulé « *Les moyennes mensuelles de températures à Paris de 1658 à 1675. D'Ismaël Boulliau à Louis Morin* ». Ces nouvelles données thermométriques ont permis d'identifier et de préciser quantitativement la fluctuation, dénommée « fluctuation Colbert », laquelle avait déjà été mise en évidence par les dates très tardives des vendanges en Bourgogne. S'agissant des quatre années 1672 à 1675 : les vendanges y furent effectuées en date moyenne au 2 octobre, ce qui témoigne du manque de maturité du raisin dû au rafraîchissement, sensible dès 1672, très net en 1673, plus net encore en 1674, et terriblement évident en 1675 avec une vendange bourguignonne au 14 octobre. La marquise de Sévigné a commenté le phénomène dans des lettres de juin-juillet 1675 : « *Le rafraîchissement fut très sensible à Paris en juin, avec ensuite un réchauffement en juillet qui a sauvé les moissons* ». Dans une lettre à sa fille datée du vendredi 19 juillet 1675, elle écrit : « ... *J'ai été ... voir passer la procession de Sainte-Geneviève... Vous allez me demander pourquoi on a descendu cette châsse : c'était pour faire cesser la pluie, et pour demander le chaud...* ». En revanche en Provence et en Vaucluse, le rafraîchissement dure plus longtemps. Cette fraîcheur atteint aussi l'Espagne, où les vendanges à Valladolid se firent au 26 octobre [11].

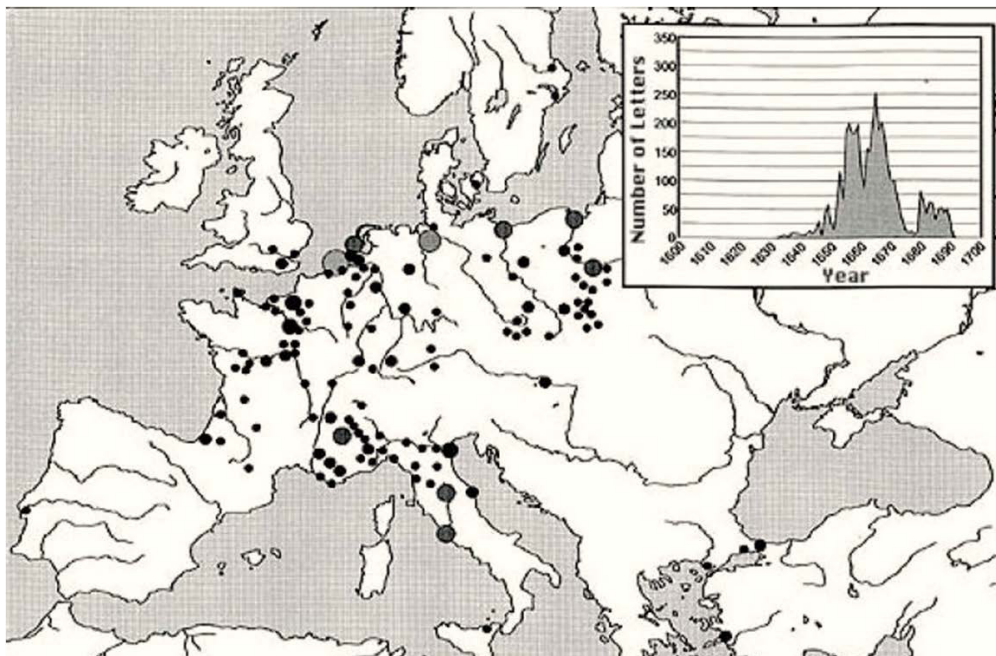
3.6. *Boulliau, savant et intermédiaire scientifique*

Ismaël Boulliau fut, le 7 avril 1667, l'un des premiers associés étrangers de la Royal Society, fondée sept ans auparavant, mais il ne fit pas partie de l'Académie royale des sciences, fondée par Colbert l'année précédente, en 1666.

Aux savoirs de Boulliau en astronomie étaient associées de grandes connaissances dans le domaine des mathématiques, notamment en géométrie et sur les coniques, compétences indispensables à la description et à la mise en équations des phénomènes célestes. Ses travaux, même s'ils ne furent pas toujours justes, sont néanmoins importants et font référence avant tout dans le domaine de l'histoire de l'astronomie, plutôt que dans la science astronomie elle-même. Parfois, il compliquait : ainsi, pour expliquer les trajectoires elliptiques des planètes du système solaire, Ismaël Boulliau imagina que ces dernières se déplaçaient, autour du soleil, à la surface d'un cône.

Si certains louèrent en lui un grand astronome, d'autres lui reprochèrent de faire rétrograder les sciences, car son grand tort fut de réfuter les trois lois fondamentales de Kepler, pourtant vérifiées un siècle plus tard par Isaac Newton avec sa découverte de la gravitation universelle. S'il ne reconnut pas l'importance et la justesse des lois de Kepler, il prit en revanche le parti de Galilée, condamné par la Sainte Inquisition et défendit le mouvement de la Terre, qui avait encore à son époque de nombreux adversaires, même parmi les astronomes.

En ce qui concerne la loi d'attraction des corps, Boulliau ne fut pas le premier à penser que l'action diminuait avec la distance comme l'inverse du carré. Pour Roger Bacon, savant et alchimiste anglais du 13^e siècle, considéré comme l'un des pères de la méthode scientifique, toutes les actions à distance se propagent en rayons rectilignes, comme la lumière. L'astronome allemand Johannes Kepler (1571–1630) reprit cette analogie. Or, on savait depuis Euclide que l'intensité lumineuse émise par une source varie en raison inverse du carré de la distance à la source. Selon cette analogie optique, la force émanant du Soleil et agissant sur les planètes devait donc suivre la même loi. Ismaël Boulliau (1605–1691) pousse lui jusqu'au bout l'analogie optique dans son ouvrage *Astronomia Philolaica*, paru en 1645 : il y soutient que la loi d'attraction est inversement proportionnelle au carré de la distance, sans toutefois pouvoir le démontrer. Et pour Boulliau, l'attraction est normale au rayon vecteur, tandis qu'en réalité et pour Newton, elle est centrale.



Le réseau des correspondants de Boulliau à travers les lettres qu'il a envoyées et reçues (tiré de [12]).

La carte ci-dessus visualise le réseau des correspondants d'Ismaël Boulliau. Cette cartographie a été dressée à partir des lettres qu'il a envoyées et reçues et dont la trace est connue. La courbe du haut quantifie le nombre d'échanges selon les années. Cette carte, établie en 1998 par l'historien américain Robert Hatch, donne une idée de l'abondance de sa correspondance et indique la localisation de ses correspondants en Europe. La correspondance manuscrite de Boulliau est conservée à la Bibliothèque nationale; elle compte 41 volumes, soit 22 000 pages! Parmi les correspondants et amis de Boulliau, on trouve en particulier Huygens, Hevelius, le prince Léopold de Médicis, Pierre Desnoyers, secrétaire de la reine de Pologne, et en France, Gassendi, Mersenne ainsi que le grand Pascal. Ayant participé au cabinet Dupuy, qui réunissait les grands esprits de l'époque — à l'instar de ce que sera plus tard l'Académie des Sciences — et ayant rencontré lors de ses voyages les plus grands savants, Boulliau a joué un rôle important pour la diffusion des idées, grâce à la correspondance qu'il échangeait.

Conflit d'intérêt

L'auteur n'a aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Références

- [1] I. Boulliau, *X Recueil d'horoscopes de différents personnages du XVII^e siècle*, Bibliothèque nationale de France, Département des Manuscrits, Français, 13028. En ligne sur <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b90612177>.
- [2] « Pierre Gassendi », (9 avril 2023), en ligne sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre_Gassendi (consulté le 25 juillet 2023).
- [3] H. J. K. Nellen, *Ismaël Boulliau (1605-1694), astronome, épistolier, nouvelliste et intermédiaire scientifique : ses rapports avec les milieux du libertinage érudit*, APA-Holland University Press, Amsterdam, 1994.
- [4] USGS Digital Atlas, « Bullialdus satellite craters », 1^{er} mai 2010. En ligne sur <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bullialdus-nomenclature.jpg> (consulté le 24 juillet 2023).

- [5] J. Hevelius, *Machinae coelestis pars posterior*, S. Reiniger : Gdansk, 1673.
- [6] J. Hevelius, *Machinae Coelestis pars posterior*, S. Reiniger : Gdansk, 1679.
- [7] I. Boulliau, *Astronomia Philolaïca*, Piget : Paris, 1645.
- [8] I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Jussu Societatis Regiae ac Typis Josephi Streater : Londres, 1687.
- [9] I. Boulliau, « Ad thermometrum observationes anno 1658 Parisiis, Thermometrum Florentiae fabricatum », bibliothèque de l'Observatoire de Paris (Paris, France), Ms. B5.12.
- [10] D. Camuffo, A. della Valle, F. Becherini, D. Rousseau, « The earliest temperature record in Paris, 1658–1660, by Ismaël Boulliau, and a comparison with the contemporary series of the Medici Network (1654–1670) in Florence », *Climatic Change* **162** (2020), p. 903-922.
- [11] J. Berthomeau, « Les fluctuations du climat de l'an Mil à nos jours au travers des dates de vendanges et la qualité du millésime : du Le Roy Ladurie », 10 novembre 2011, URL : <http://www.berthomeau.com/article-les-fluctuations-du-climat-de-l-an-mil-a-nos-jours-au-travers-des-dates-de-vendanges-et-la-qualite-d-87450251.html>.
- [12] D. Rousseau, « Les moyennes mensuelles de températures à Paris de 1658 à 1675. D'Ismaël Boulliau à Louis Morin », *La Météorologie* **81** (2013), p. 11-22.



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

Les traces d'Ismaël Boulliau dans la poussière de l'histoire

Ismaël Boulliau's traces in the dust of history

Conor Maguire^a

^a Société des Lettres, Sciences et Arts du Saumurois, France

URL : <http://salsas.sauzur.free.fr/accueil.htm>

Courriel : cm@chateauboulliau.fr

Résumé. Pour suivre les traces d'Ismaël Boulliau (dit aussi Bullialdus) dans la poussière de l'histoire, nous adoptons une approche quantitative basée sur l'analyse de toute la littérature abondante qui a été numérisée et qui est donc ouverte à l'application des techniques bibliométriques informatisées pour détecter des modèles et des tendances au fil du temps. Nous utilisons notamment la base de données Google Books qui contient des millions de livres numérisés, manuscrits, rapports, etc. en plusieurs langues. Nous appliquons le logiciel Google Ngram pour analyser le taux de référencement de l'œuvre de Boulliau dans la littérature, sous forme de séries chronologiques. Nous recherchons également Google Scholar qui est une base de données bibliographiques académiques et un moteur de recherche et qui est dans de nombreux cas la source la plus complète. Les résultats montrent clairement que Boulliau était un homme qui a échappé à la limite des vieux paradigmes de pensée et a influencé l'avancement de la science européenne longtemps après sa mort.

Abstract. In order to trace the footsteps of Ismaël Boulliau (also known as Bullialdus) in the dust of history, we adopt a quantitative approach based on an analysis of the extensive literature which has been digitized and which is therefore open to the application of computerized bibliometric techniques to detect patterns and trends over time. In particular, we use the Google Books database which contains millions of digitized books, manuscripts, reports, etc. in several languages. We apply the Google Ngram software to analyze the rate of referencing Boulliau's work in the literature, in timeseries form. We also search Google Scholar which is an academic bibliographic database and search engine and is in many cases the most comprehensive source. The results show clear evidence that Boulliau was a man who escaped the limitations of old paradigms of thought and influenced the advancement of European science long after his death.

Mots-clés. Ismaël Boulliau, Bullialdus, Gravité, Bibliométrie, Google Ngram.

Keywords. Ismaël Boulliau, Bullialdus, Gravity, Bibliometrics, Google Ngram.

Published online: 8 August 2023, Issue date: 15 September 2023

1. Introduction

L'histoire de la vie d'Ismaël Boulliau (1605–1694), autrement nommé Bullialdus, est à la fois fascinante et instructive. Il a vécu pendant ce que nous appelons maintenant la Révolution Scientifique et a survécu assez longtemps pour voir l'émergence des Lumières (*The Enlightenment*). L'histoire commence avec lui alors qu'il était un jeune garçon regardant le ciel nocturne de Loudun avec son père astronome amateur au début des années 1600. Ce garçon deviendra plus

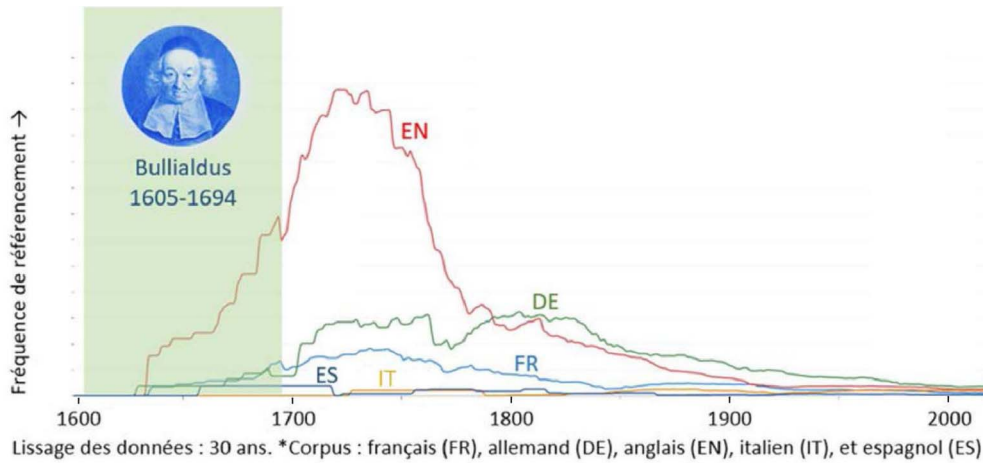


FIGURE 1. Fréquence d'utilisation du nom *Bullialdus* dans cinq corpus européens*, respectivement, 1600–2019.

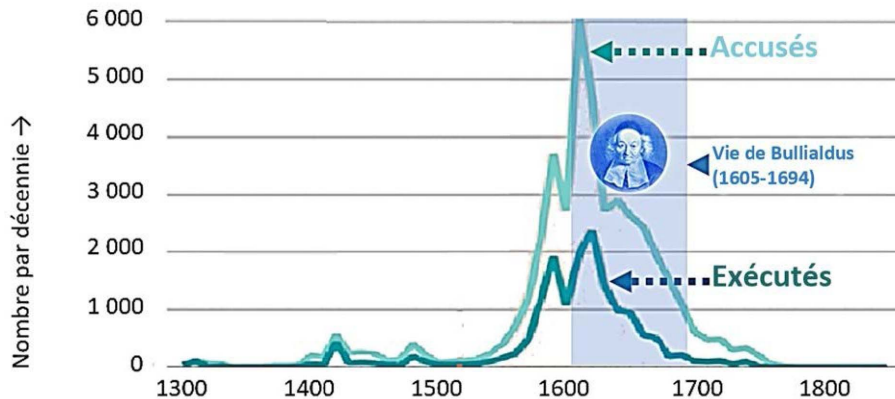
tard un célèbre astronome qui apportera d'importantes contributions au développement de la science en Europe. Dans le contexte du soutien de l'UNESCO [1] et de l'Académie des Sciences [2] au colloque d'aujourd'hui, l'histoire de sa vie est un excellent exemple de la valeur d'encourager les jeunes esprits à s'engager dans les sciences. Cela correspond à la reconnaissance contemporaine de l'importance d'impliquer les jeunes dans les sciences et, plus généralement, la vulgarisation scientifique.

Pour suivre les traces d'Ismaël Boulliau [3] dans la poussière de l'histoire nous adoptons une approche quantitative basée sur une analyse de cette littérature qui a été numérisée et est donc ouverte à l'application de techniques bibliométriques informatisées pour détecter des modèles et des tendances dans le temps. Accéder à ce Big Data numérisé équivaut en quelque sorte à étudier l'ADN de notre culture, scientifique ou non [4]. Nous utilisons notamment la base de données Google Books qui contient des millions de livres, rapports, etc. numérisés en plusieurs langues. Nous recherchons également Google Scholar qui est une base de données bibliographiques académiques et un moteur de recherche et qui est dans de nombreux cas la source la plus complète [5]. Dans cette analyse, nous nous concentrons sur les deux formes que nos recherches indiquent être les plus fréquemment référencées de son nom : Ismaël Boulliau et son nom latinisé Bullialdus.

Le graphique Google Ngram de la Figure 1 montre qu'au cours de sa vie, il a été le plus fortement référencé dans le corpus anglais, et cela a continué pendant plus d'un siècle après sa mort. Dans le corpus anglais, son taux de référencement culmine vers 1720–1730 et décline par la suite. Dans d'autres corpus européens, français, allemand, italien et espagnol, il a continué à être référencé bien après sa mort. Cela est particulièrement notable dans le cas du corpus allemand où il a continué à être référencé à un rythme relativement constant jusqu'en 1830 environ et ensuite a commencé à décliner : soit plus d'un siècle après sa mort.

2. L'interface de deux mondes — l'ancien et le nouveau

Bullialdus a été initié à l'astronomie en tant que jeune garçon, par son père. Cette éducation aura probablement influencé le développement de son intellect et son approche de la méthode scientifique émergente. Une grande partie de la longue vie de Bullialdus, qui est devenu le Père Ismaël Boulliau, a duré une partie de la période connue sous le nom de Révolution Scientifique — une



Basé sur « Witch Trials », par Peter Leeson et Jacob Russ, *Economic Journal*, août 2017.

FIGURE 2. Sorcellerie européenne, 1300–1850.

période fascinante dans le développement de la pensée européenne, une époque où la lumière du raisonnement scientifique émergeait et se croisait avec les idées et hypothèses religieuses traditionnelles sur l'univers et sur l'existence [6]. Bullialdus est profondément impliqué dans cette période qui pose les bases des Lumières (*The Enlightenment*) qui vont suivre vers la fin de la vie de Bullialdus. Néanmoins, Bullialdus occupait un monde où la superstition et la sorcellerie étaient encore très répandues parmi les populations d'Europe. L'ampleur du phénomène de la sorcellerie était extraordinaire [7, 8]. Ben-Yehuda (1980) écrit que « Depuis les premières décennies du 14^e siècle jusqu'en 1650, les Européens continentaux ont exécuté entre 200 000 et 500 000 sorcières » [9]. Johnsdon et Koyama (2014) écrivent qu'entre 1550 et 1700, il y a eu plus de 2000 procès de sorcières en France. La Figure 2 montre le nombre de personnes accusées ou exécutées pour sorcellerie en Europe de l'année 1300 à 1850 [10]. Ces chiffres étaient à un sommet à l'époque de la jeunesse de Bullialdus; cependant, il vivra assez longtemps pour voir un déclin drastique de cette pratique au moment de sa mort.

Dans cette ambiance générale, Bullialdus est exposé très directement à l'âge de 29 ans à l'enivrante « possession démoniaque de masse » qui accompagne l'exécution sur le bûcher du prêtre catholique Urbain Grandier à Loudun en 1634. Cela a dû profondément affecter Bullialdus puisqu'il aurait été, mais c'est loin d'être prouvé, vicaire de Grandier dans la paroisse Saint-Pierre du Marché à Loudun. Le notoire procès de sorcellerie, *l'Affaire des possédées de Loudun* [11], a eu lieu à une époque où Bullialdus, un jeune homme à l'intellect très actif, embrassait des domaines tels que l'astronomie et les mathématiques; de plus, il devint prêtre catholique et s'intéressa à la théologie et à la philologie, mais il continua aussi à faire confiance à l'astrologie. Il nous est difficile aujourd'hui d'imaginer les profondes contradictions et rationalisations qui ont dû occuper l'esprit curieux du jeune Boulliau. Même Isaac Newton a été décrit comme un « mystique rationnel et un philosophe » [12]. L'humanité n'est pas passée des ténèbres à la lumière de la science d'une manière soudaine; pendant plusieurs siècles, il y a eu chevauchement entre ces deux mondes. Clark (1999) a vu l'interface entre la science et le surnaturel reflétée dans la théorie de la sorcellerie anglaise qui n'a pas rejeté la sorcellerie mais souhaitait en fait l'étudier [13]. L'analyse du corpus français de la base de données Google Scholar¹ montre que la littérature est 8 fois plus susceptible de lier la ville de Loudun au nom de Boulliau plutôt qu'au nom de

¹L'index Google Scholar comprend la plupart des revues et livres universitaires en ligne évalués par des pairs, des documents de conférence, des thèses et des mémoires, des prépublications, des résumés, des rapports techniques et d'autres publications savantes, ainsi que des avis de tribunaux et des brevets.

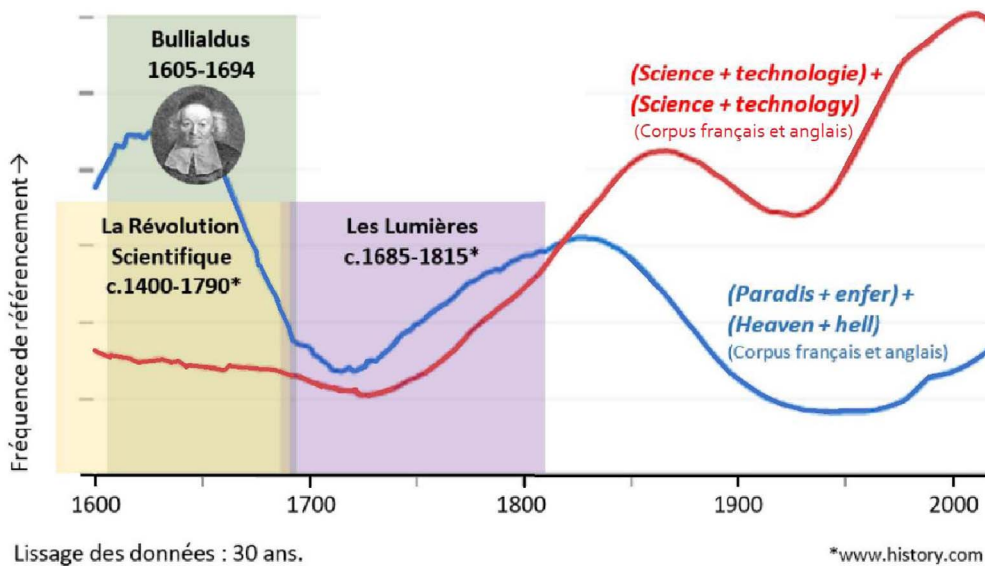


FIGURE 3. Fréquence de référencement de *science + technologie* et *paradis + enfer* dans les deux corpus, français et anglais (cumulativement), 1600–2019.

Bullialdus. En revanche, le nom Bullialdus est 7,8 fois plus susceptible d’être lié, plutôt que Boulliau, à un cratère lunaire.²

Le monde de la religion, ainsi que la sorcellerie et la superstition, était le milieu dans lequel Bullialdus a vécu sa vie. Néanmoins, la Figure 3 montre le déclin rapide de concepts tels que *le paradis* et *l’enfer* dans les corpus français et anglais du vivant de Bullialdus, au 17^e siècle. Une analyse plus approfondie montre que c’était le cas dans toute l’Europe. Du vivant de Bullialdus, les idées étaient en mouvement en Europe. Les philosophes et les scientifiques ont lutté avec des concepts qui couvraient l’univers mystique et observable (les techniques émergentes renforçaient leur capacité à effectuer des mesures sur le monde physique et à tester des hypothèses). Les Lumières ont émergé en grande partie vers la fin de la vie de Bullialdus, mais lui et d’autres avaient jeté les bases et, par conséquent, apporté des contributions vitales au développement de la société humaine.

3. L’astronomie et la gravité

Bullialdus deviendra un astronome si accompli qu’il sera reconnu par Johannes Kepler (1571–1630) et Galilée (1564–1642), comme « l’astronome le plus célèbre de sa génération », et Robert Hooke (1635–1703) l’appelait le « Bullialdus instruit et ingénieux » [14]. Même Isaac Newton, en référence à la loi du carré inverse de la gravité, écrit à Edmond Halley en 1682 [15] :

« Bullialdus a écrit que toute force respectant le Soleil comme son centre et dépendant de la matière doit être réciproquement dans un rapport dupliqué de la distance du centre ».

C’était la reconnaissance du pas de géant de la perspicacité intellectuelle de Bullialdus qui avait dévoilé la forme de l’une des quatre forces fondamentales de la nature, la gravité. Néanmoins, Bullialdus est largement désigné comme « le précurseur, et non l’inventeur, de la loi de la gravité

²Remarque : l’élément lunaire le « Cratère Bullialdus » a été nommé en son honneur.

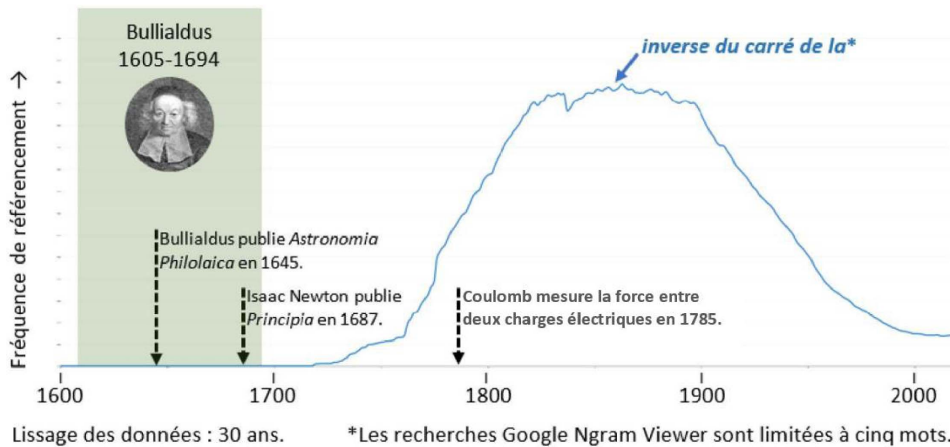
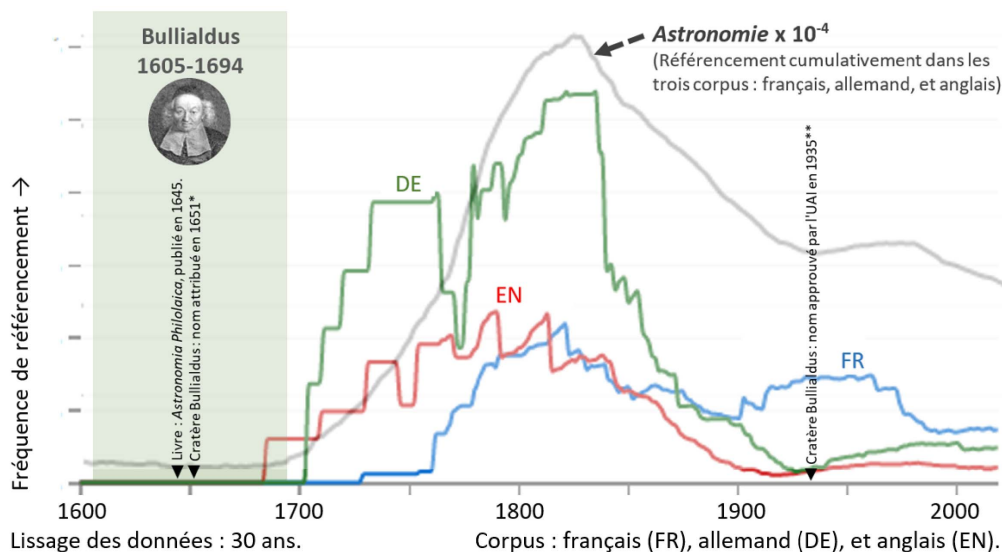


FIGURE 4. Fréquence de référencement d'*inverse du carré de la** dans le corpus français, 1600–2019.

en carré inverse» qu'Isaac Newton a ensuite formalisé et fait des observations [16]. Cependant, Newton (1643–1727) dans son célèbre ouvrage (trois livres) *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, publié en 1687, a rendu hommage à Bullialdus pour sa contribution à la théorie de la gravité [17]. Ce sera environ un siècle plus tard que Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806) présentera sa théorie de l'action à distance entre charges électriques [18], montrant que la force électrostatique aussi suivait la même forme que celle de la force gravitationnelle même si la force électrostatique est 10^{42} fois plus forte — un chiffre colossal ! Dans ce contexte, la contribution intellectuelle de Bullialdus a eu une importance énorme pour l'avancement de notre compréhension du monde physique. La Figure 4 montre la croissance de la référence dans la littérature à l'expression *inverse du carré de la* (*distance*, de manière implicite) au cours des siècles qui suivirent. Notre compréhension et notre exploitation des forces de gravité et d'électricité doivent beaucoup au saut intellectuel de Bullialdus.

Bullialdus a publié dans les domaines de l'astronomie et des mathématiques. Son ouvrage le plus célèbre est *Astronomia Philolaica*, publié en 1645 (dans lequel il inclut des observations faites par son père de 1605 à 1608 [19]). Le livre est considéré par certains historiens des sciences modernes comme le livre le plus important en astronomie entre Kepler et Newton (1643–1727) [20].

Bullialdus était parmi les premiers astronomes d'Europe, et en 1651, alors qu'il avait 46 ans, il fut honoré par Giovanni Battista Riccioli qui nomma un cratère lunaire le « Cratère Bullialdus » dans son opus *Almagestum novum* [21]. L'intérêt pour l'astronomie s'est accéléré rapidement au cours du siècle qui a suivi la mort de Bullialdus. Il a été l'un des premiers précurseurs. La croissance de l'intérêt européen pour l'astronomie est clairement mise en évidence dans la Figure 5 qui présente la fréquence cumulée de référencement du sujet de l'astronomie dans trois corpus européens, d'avant la naissance de Bullialdus à l'ère moderne (à noter pour des raisons de comparaison avec le référencement de livre de Bullialdus, le taux de référencement astronomie est divisé par 10^4). La Figure 5 montre également le taux de référencement du livre de Bullialdus *Astronomia Philolaica* dans trois corpus. Son livre a laissé ses traces dans la littérature et a continué à être référencé longtemps après sa mort pendant la période de montée rapide de l'astronomie; et ce n'est que 150 ans après sa mort que les références à ce livre ont commencé à décliner.



* Giovanni Battista Riccioli. 1651. *Almagestum novum*. Dans cette publication, un élément lunaire est nommé Bullialdus.

** Mary A. Blagg and K. Müller. 1935. *Named Lunar Formations*. Percy Lund, Humphries and Co. Ltd., London. Nom approuvé en 1935 par l'International Astronomical Union (IAU) Working Group for Planetary System Nomenclature (WGPSN). <https://planetarynames.wr.usgs.gov/Feature/917>

FIGURE 5. Fréquence de référencement du livre de Bullialdus, *Astronomia Philolaica*, dans le contexte du taux de référencement du mot *astronomie* dans les trois corpus français, allemand, et anglais, 1600–2019.

Parmi les réalisations les plus importantes de Bullialdus figurait son élaboration de la loi du carré inverse pour la force de gravité. Ce fut un bond intellectuel géant, qui fut explicitement reconnu par Isaac Newton (1642–1727).

Bullialdus, un prêtre catholique, astronome et mathématicien, qui a vécu des temps si turbulents, a été attiré par la méthode scientifique qui émergeait comme un outil pour aborder les grandes questions du monde physique. Notre analyse de la littérature numérisée montre clairement comment ses traces dans la poussière de l'histoire ont persisté longtemps après sa vie dans la littérature scientifique, et il faisait partie de ce groupe rare d'esprits qui ont échappé aux limitations des anciens paradigmes et ont ainsi apporté d'importantes contributions à l'illumination européenne.

4. Remarques finales

Le jeune garçon de Loudun, Ismaël Boulliau (plus tard Bullialdus), guidé par son père, a ensuite apporté d'importantes contributions à la pensée européenne. Parmi les réalisations les plus importantes de Bullialdus figurait son élaboration de la loi du carré inverse pour la force de gravité. Ce fut un bond intellectuel géant, qui fut explicitement reconnu par Isaac Newton (1642–1727). Un siècle plus tard, Coulomb découvrira que cette loi fondamentale du carré inverse s'applique également aux charges électriques.

En reconnaissance de son travail astronomique, le cratère lunaire Bullialdus a été nommé en son honneur. Respecté par de nombreux grands scientifiques de son temps, il a laissé sa marque dans la littérature scientifique française et dans divers corpus internationaux. Ces traces ont duré des siècles après sa mort.

Sa longue vie a traversé une période de tension entre la religion et la science, lorsque la sorcellerie était répandue, avec des procès de sorcières notoires se produisant dans de nombreux

pays. Pourtant, il a vécu à une époque fascinante qui comprenait une partie de la Révolution Scientifique et une partie de ce qui allait suivre, Les Lumières. Bullialdus était profondément impliqué dans le développement de la pensée à cette époque et faisait partie de ce groupe rare d'esprits qui ont échappé aux limitations des anciens paradigmes.

Conflit d'intérêt

L'auteur n'a aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Remerciement

Les suggestions de Bruno Chanetz de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) ont été très appréciées.

Références

- [1] UNESCO, *La Vulgarisation scientifique dans un monde qui change*, vol. 512, Editions Erès, Toulouse, 1988, https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000082308_fre.
- [2] L'Académie des sciences et Académie des technologies, *Science et technologie à l'école primaire : un enjeu décisif pour l'avenir des futurs citoyens*, 2020, Rapport de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies sur la pratique et la formation en science et technologie des professeurs de l'école primaire. Paris. Novembre.
- [3] G. Jubert, « Ismaël Boulliau, sa vie, son œuvre », in *Bulletin de la Société Historique du Loudunois, 31 mai 2000*, Société historique du pays de Loudunois (SHPL), Loudun, 2000, p. 10-28.
- [4] A. Erez, J.-B. Michel, *Uncharted : Big Data as a Lens on Human Culture*, Riverhead Books, New York, 2013.
- [5] A. Martín-Martín, M. Thelwall, E. Orduna-Malea, E. Delgado López-Cózar, « Google Scholar, Microsoft Academic, Scopus, Dimensions, Web of Science, and OpenCitations' COCI : a multidisciplinary comparison of coverage via citations », *Scientometrics* **126** (2021), n° 1, p. 871-906, Epub 2020 Sep. 21. PMID : 32981987 ; PMCID : PMC7505221.
- [6] T. Nickles, « Scientific revolutions », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (E. N. Zalta, éd.), Winter 2017 Edition, The Metaphysics Research Lab, Philosophy Department, Stanford University, Stanford, CA, ISSN 1095-5054. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/scientific-revolutions/>.
- [7] M. D. Bailey, *Magic and Superstition in Europe : A Concise History From Antiquity to the Present*, Rowman & Littlefield Pub., Lanham, 2007, ISBN-13 : 978-0-7425-3387-5, 288 pages.
- [8] B. P. Levack (éd.), *The Oxford Handbook of Witchcraft in Early Modern Europe and Colonial America*, Oxford University Press, Oxford, 2013, ISBN : 9780199578160.
- [9] N. Ben-Yehuda, « The European witch craze of the 14th to 17th centuries : a sociologist's perspective », *Am. J. Sociol.* **86** (1980), n° 1, p. 1-31, <http://www.jstor.org/stable/2778849>.
- [10] P. T. Leeson, J. W. Russ, « Witch trials », *Econ. J.* **128** (2018), n° 613, p. 2066-2105.
- [11] G. Murphy, *Les possédées de Loudun*, Geste éditions, La Crèche, 2003, 63 pages.
- [12] M. Gleiser, « Newton's life was one long search for God », 2022, Big Think 13.8, 2 février, bigthink.com/13-8/isaac-newton-search-god/.
- [13] S. Clark, *Thinking with Demons : The Idea of Witchcraft in Early Modern Europe*, Oxford University Press, Oxford, 1999.
- [14] O. Gal, R. Chen-Morris, « The archaeology of the inverse square law : (2) The use and non-use of mathematics », *Hist. Sci.* **44** (2006), n° 1, p. 49-67.
- [15] I. Bernard Cohen, G. E. Smith (éds.), *The Cambridge Companion to Newton*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002, 204 pages.
- [16] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology : Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, John Wiley & Sons, Etats-Unis, 1972, ISBN-13 : 978-0471925675.
- [17] G. Smith, « Newton's *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (E. N. Zalta, éd.) (Winter 2008 Edition), The Metaphysics Research Lab, Philosophy Department, Stanford University, Stanford, CA, ISSN 1095-5054. <https://plato.stanford.edu/archives/win2008/entries/newton-principia/>.
- [18] R. Williams, « June 1785 : Coulomb measures the electric force », *APS Phys.* **25** (2016), n° 6.
- [19] S. Taussig, A. Turner (éds.), *Mémoire de Gassendi : vies et célébrations écrites avant 1700*, Brepols, Turnhout, Belgique, 2008, 613 pages.
- [20] S. I. Newton, J. Edleston, R. Cope, in *Correspondence of Sir Isaac Newton and Professor Cotes*, 1st ed, Routledge, London, 1970.
- [21] G. B. Riccioli, in *Almagestum Novum, Astronomiam Veterem Novamque Complectens*, Ex typographia Haeredis Victorii Benatii, Bologne, 1651.



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

L'avènement de la science météorologique du XVII^e au XIX^e siècle

*The advent of meteorological science from the 17th to
the 19th century*

Denis Beaudouin^{†, a}

^a Conservateur du musée privée Charles Beaudouin, rue Lhomond dans le Ve
arrondissement de Paris

Courriel: chanetz@onera.fr

Résumé. Depuis l'antiquité, on observe et on décrit les phénomènes naturels, première étape de la connaissance, qui font souvent intervenir des forces supposées surnaturelles. C'est en Europe que se développe au XVII^e siècle une démarche scientifique devenue la météorologie au XIX^e siècle. Pour avoir une démarche scientifique, il faut des instruments et c'est à Florence en 1608 qu'est fabriqué le premier thermomètre. Cinquante ans plus tard, Ismaël Boulliau, le premier savant français à recevoir un thermomètre de Florence, suit une démarche d'observation et d'enregistrement. Cet article se propose de montrer le cheminement sur deux siècles pour parvenir à l'orée du XX^e siècle à une véritable météorologie scientifique.

Abstract. Since ancient times, natural phenomena have been observed and described, the first stage in the development of knowledge, often involving supposedly supernatural forces. It was in Europe in the 17th century that a scientific approach was developed, which became meteorology in the 19th century. A scientific approach required instruments, and it was in Florence in 1608 that the first thermometer was manufactured. Fifty years later, Ismaël Boulliau, the first French scientist to receive a thermometer from Florence, followed an approach based on observation and recording. This article sets out to show how, over the course of two centuries, a truly scientific meteorology emerged at the dawn of the twentieth century.

Note. Cet article est issu de la conférence faite par Denis Beaudouin le 8 octobre 2021 au colloque Alumni-ONERA d'Hendaye en l'honneur d'Antoine d'Abbadie. Il a été mis en forme par Bruno Chanetz à partir des notes rédigées par l'auteur pour accompagner ses visuels, l'auteur étant décédé quelques jours après sa conférence.

Note. This article is based on the lecture given by Denis Beaudouin on 8 October 2021 at the Alumni-ONERA symposium in Hendaye in honour of Antoine d'Abbadie. It has been edited by Bruno Chanetz from notes written by the author to accompany his visuals, the author having died a few days after his lecture.

Published online: 15 September 2023, Issue date: 15 September 2023

[†] Décédé.

1. Introduction : les prémices de la météorologie

Homo sapiens est dépendant de l'atmosphère aussi bien pour sa nourriture que pour se déplacer. Dans l'Iliade, les Grecs attendent le vent qui les portera vers Troie et les Dieux exigent le sacrifice d'Iphigénie pour que la flotte grecque puisse appareiller.

En effet depuis plusieurs millénaires s'était développée une intense navigation dans le bassin méditerranéen et l'Océan indien, grâce à un corpus de « savoirs » maritimes, une quasi-science non écrite développée par les marins mais souvent gardée secrète. En 100 avant J.-C., les Grecs Hippalos et Eudoxe apprennent des Arabes le mécanisme des moussons et commercent jusqu'en Inde et en Afrique orientale [1].

Au XVI^e siècle, on assiste aux débuts de l'instrumentation et à l'esquisse d'une observation en réseau. En 1637, Descartes publie en annexe du Discours de la Méthode trois essais dont « Les Météores », essais d'application des « préceptes de la raison et de recherche de la vérité » dans les sciences, reposant sur l'observation. Son objectif est de comprendre en contestant la démarche des scolastiques qui invoquaient des raisons magiques aux phénomènes observés. Mais la démarche de Descartes s'appuie uniquement sur le raisonnement en ayant recours seulement à l'observation visuelle.

2. Au XVII^e siècle : les premiers instruments et la notion de réseau d'observation

2.1. Le thermomètre

Pour véritablement comprendre les phénomènes il faut avant tout des instruments. C'est en 1608 qu'est inventé, à Florence, le premier thermomètre. En 1658, l'astronome Boulliau est le premier savant français à recevoir un thermomètre de Florence. Il suit une démarche d'observation et d'enregistrement en relevant quotidiennement à son domicile parisien les températures de l'atmosphère durant deux années. Quelques années après, le médecin Morin prend sa suite. Nous disposons ainsi à Paris de la plus longue série de mesure des températures.

2.2. Le baromètre

En 1643 c'est encore à Florence que naît le premier baromètre à mercure. Il est dû à Torricelli, à qui les fontainiers de la ville avaient soumis un problème, ne parvenant pas à pomper l'eau à plus de 10,3 m par aspiration.

En 1648, Pascal démontre la pesanteur de l'air par son expérience du Puy-de-Dôme à l'aide d'un baromètre au mercure, appelé à cette époque le vif-argent. Il conclut : « *il s'ensuivra nécessairement que la pesanteur et pression de l'air est la seule cause de cette suspension du vif-argent, et non pas l'horreur du vide, puisqu'il est bien certain qu'il y a beaucoup plus d'air qui pèse sur le pied de la montagne que non pas sur le sommet* ».

En 1650, Pascal organise une expérience de mesures simultanées à Clermont-Ferrand, Paris et Stockholm [2]. Par rapport à Descartes, Pascal a une approche très différente de la connaissance. Descartes développe un raisonnement sur des observations humaines, alors que Pascal démontre par l'expérience grâce à l'instrument et esquisse un réseau d'observation.

Ainsi, les trois fondements de ce qui deviendra la science météorologique sont esquissés dès cette époque :

- Le progrès instrumental et expérimental, mesurer puis enregistrer,
- Le progrès conceptuel et l'esquisse d'une théorie
- Le progrès d'un réseau d'observation pour cette science qui ne peut se développer en laboratoire, complété par une longue durée d'observation.

Mais il faudra attendre deux siècles pour que leur articulation devienne science.

2.3. *Les premiers réseaux d'observation*

La notion de réseau d'observations instrumentales fait une première apparition avec Pascal en 1650, puis à Florence en 1657, où est fondée l'Academia del Cimento, première société savante en Europe dont le but explicite est de vérifier les lois de la nature selon la méthode expérimentale initiée par Galilée. Sa devise est « *Provando e riprovando* ». Sous son impulsion, durant une dizaine d'années, 11 savants, dont 7 en Italie et 4 dans le reste de l'Europe, mesurent avec les mêmes instruments pression, température, humidité, direction du vent et état du ciel [2]. Apparaît aussi la notion de série longue d'observations.

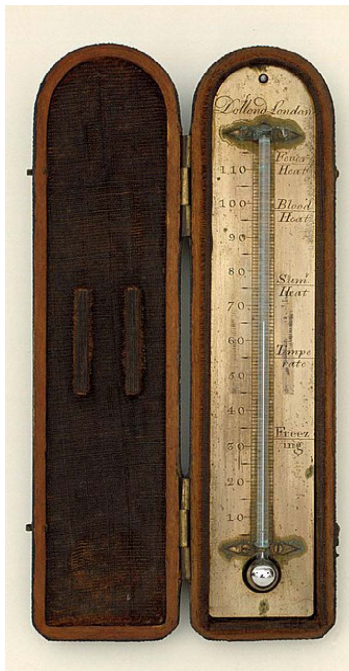
2.4. *Le premier enregistreur*

Presque simultanément le premier instrument enregistreur dont on trouve une mention précise est la « *Weather Clock* » imaginé par Christopher Wren, proposée à Londres en 1664 au constructeur Robert Hooke et réalisée quinze ans plus tard en 1679, appareil aujourd'hui disparu.

3. Au XVIII^e siècle : progrès de la mécanique et de l'instrumentation

3.1. *Le problème de l'unification des unités*

Avec la multiplication des relevés se pose assez rapidement la question de l'unification des unités de mesure des grandeurs observées. Si la hauteur du mercure peut être facilement mesurée et comparée, l'étalonnage du thermomètre ne fait pas l'unanimité.



Thermomètre du XVIII^e siècle selon Fahrenheit.

Dès 1720 Fahrenheit détermine son échelle, puis Réaumur établit la sienne en 1730 (de zéro à 80 degrés entre la glace et l'ébullition de l'eau) suivie de l'échelle centigrade de Celsius en 1742. De nombreux savants vont créer leurs échelles et il faudra plusieurs décennies avant que les deux premières soient généralement admises. C'est seulement au XIX^e siècle que l'échelle de Celsius sera retenue par de nombreux pays.

3.2. *Les progrès dans la précision et l'enregistrement*

Les progrès sont toutefois constants : vers 1775 on atteint la précision du $1/10^e$ de degré sur les thermomètres, et le constructeur d'instruments Fortin ajoute vers 1780 un vernier sur ses baromètres, qui deviennent transportables grâce à une cuve à mercure étanche.



Baromètre Fortin, et son vernier.

L'observation se généralise tout au long du siècle et l'on pense à enregistrer automatiquement les variations des différentes grandeurs de la météorologie. En Allemagne on conserve la trace d'un projet de barographe par Leupold, en 1726.

Mais c'est surtout l'anémomètre enregistreur de Pajot d'Ons-en-Bray qui mérite une description, puisqu'il est effectivement construit, décrit en détail, réellement utilisé et parfaitement conservé au Conservatoire des arts et métiers [3]. Louis Léon Pajot (1678–1754), comte d'Ons-en-Bray en Normandie, membre de l'Académie des Sciences, présente son anémomètre à l'illustre Assemblée en 1734. Il peut enregistrer durant trente heures, sur deux cylindres munis de bandes de papier, la force et la direction du vent, l'horloge inscrivant les quarts d'heure sur ces bandes. Ce magnifique appareil est le premier instrument enregistreur au monde ayant réellement fonctionné.



Anémomètre de Pajot d'Ons-en-Bray (1734). Capable d'enregistrer durant 30 heures force, direction et durée du vent.

À la fin du XVIII^e siècle on trouvait thermomètres et baromètres à la Cour et dans de nombreux logis, signe de richesse, de curiosité et de distinction. En 1780, Changeux imagine un barographe enregistreur. C'est en 1783 que le Genevois Horace de Saussure publie son « Essai sur l'hygrométrie », étude des phénomènes atmosphériques menée à l'aide de plusieurs instruments dont l'hygromètre à cheveux, appareil simple et assez fiable dont il est l'inventeur.

3.3. Les réseaux d'observation

Parallèlement, l'idée de réseau d'observation se confirme à la fin du XVIII^e siècle, dans plusieurs milieux. Dans son « Mémoire sur la construction du baromètre », publié avant 1779, Lavoisier rapporte que le chevalier Jean-Charles de Borda est sans doute le premier à avoir dégagé quelques lois météorologiques de l'observation en plusieurs lieux : « *Monsieur de Borda est le premier qui ait entrepris de rapprocher les observations météorologiques faites en même temps dans différents lieux (...) aux mêmes jours et aux mêmes heures, par des physiciens exacts, (à l'aide) de baromètres placés aux extrémités de la France, observations multipliées pendant quinze jours* ». Borda en déduit le déplacement d'ouest en est des dépressions par vent d'ouest : « *par un vent d'ouest, le baromètre variait d'abord à Brest, le lendemain à Paris, et deux jours après à Strasbourg (...) étant donné deux de ces éléments on pourrait souvent en déduire l'autre* ».

En 1790, écrivant un Mémoire paru dans les Annales de Chimie, Gaspard Monge apporte aussi une contribution en démontrant qu'il faut compléter les observations de température et de pression par celles de l'hygrométrie et de la direction des vents : c'est une première esquisse d'une théorie physique des phénomènes [4].

Il est même envisagé de créer un réseau européen et mondial d'observations avec des instruments exacts et comparables, mais la Révolution mettra un terme à ce projet, « *bien que le député Gilbert Romme, présentant à l'Assemblée Constituante le télégraphe de Chappe en 1793, fit remarquer qu'il ouvrirait la possibilité de prévoir les tempêtes et d'en donner avis aux ports ou aux cultivateurs* » [4].

Mais le télégraphe optique sera longtemps réservé à l'Armée et au Gouvernement. Il faudra attendre le développement du télégraphe électrique au milieu du XIX^e siècle pour que les observations météorologiques soient transmises rapidement et depuis de nombreux sites, permettant une prévision à plusieurs jours.

À Paris le médecin Vicq d'Azyr initie dès 1778 une enquête sur les maladies et les épidémies en relation avec les conditions météorologiques, mesurées avec des instruments identiques utilisés dans conditions analogues [4]. De nombreux médecins, de 50 à 200 correspondants en France, en Europe et même en Amérique et en Asie y participent de 1778 à 1794. Le curé de Montmorency Louis Cotte en est le secrétaire scientifique et collecte les tableaux mensuels reçus des correspondants : trois mesures par jour indiquant température, pression, état du ciel, précipitations, vent, humidité. Il est lui-même auteur de deux ouvrages sur la météorologie.

Il faut noter que dès ses débuts l'aérostation apporte une troisième dimension aux observations et mesures météorologiques. Dès 1783 le physicien Charles emporta un baromètre dans son ascension.

4. Au XIX^e siècle, des progrès permis par la mécanique et l'électricité

Au cours du XIX^e siècle, on peut distinguer deux périodes dans l'évolution des instruments scientifiques et de la météorologie, très bien décrites dans l'ouvrage de James Lequeux [5]. « Le Verrier, savant magnifique et détesté ». La première moitié du siècle voit une amélioration notable et générale de la qualité des instruments scientifiques par un progrès certain de la mécanique dans le contexte de la première révolution industrielle : progrès en usinage, en précision. Les

encouragements de l'Académie des sciences et d'Arago en particulier n'y sont pas étrangers. Ensuite c'est la fée électricité et la révolution du télégraphe électrique qui seront à l'origine des bonds technologiques observés durant la seconde moitié du siècle.

4.1. *La contribution de l'aérostation*

Au début du XIX^e siècle, les ascensions en ballon fournissent des opportunités de mesure intéressantes : « *En aout 1804 deux jeunes physiciens, Jean Baptiste Biot et Louis-Joseph Gay-Lussac s'envolent à plus de 4 000 m d'altitude. Ils sont délégués par Laplace qui s'intéresse au profil vertical de la température pour le calcul de la réfraction atmosphérique, et par Berthollet qui souhaite connaître la composition de l'atmosphère* » [6]. Dans leur nacelle, après avoir observé la boussole, les savants s'affairent à mesurer l'électricité dans l'air en tendant un fil métallique de 240 pieds (un peu moins de 80 m) isolé d'eux et relié à un électromètre qui indique une charge d'électricité croissant avec l'altitude. Ils notent aussi que « *l'hygromètre marchait constamment vers la sécheresse quand nous nous élevions et vers l'humidité au cours de la descente* ». À 4 000 m, Biot commence à se sentir mal. En septembre Gay-Lussac réalise une seconde ascension à 7 000 m, et constate que la composition de l'air est constante [7]. On verra que l'aérostation se développera dans la seconde partie du XIX^e siècle.

4.2. *La première vision de l'apport du numérique*

Pierre Morin, ingénieur des Ponts et Chaussées, écrit en 1829 quelques lignes prémonitoires : « *On pourrait arriver à des équations dont les coefficients numériques donneraient une approximation pour prédire avec détail les phénomènes atmosphériques plusieurs jours à l'avance, ou les saisons plusieurs années à l'avance* » ! Manquait à l'évidence à cette époque la transmission rapide des mesures et la capacité de calcul !

4.3. *Le baromètre de Vidie*

Un progrès notable dans l'instrumentation intervient avec le baromètre à capsule métallique, inventé par Vidie en 1844. La robustesse de sa capsule déformable le rend particulièrement bien adapté aux systèmes enregistreurs transportables.

4.4. *Les observations d'Antoine d'Abbadie en Abyssinie*

C'est aussi durant les années 1840 qu'Antoine d'Abbadie transmet à l'Académie des Sciences un grand nombre de communications dont un paquet cacheté « *sur l'état de l'atmosphère en Abyssinie (en décembre 1845)* » ; en 1852 il communique ses observations de 1843 sur les éclairs en Ethiopie, longueurs et durées comparées à ceux observés en France.

4.5. *Les avancées dues au télégraphe électrique*

On s'intéresse à la météorologie aux Etats-Unis dès le début du XIX^e siècle et on y utilise dès sa mise en service en 1845 le télégraphe électrique Morse pour transmettre les informations météorologiques. Fin 1849, 150 stations sont en service. L'Angleterre suit le même chemin et dès 1849 « *le Daily News fait paraître le bulletin météorologique de 30 stations* [8] ». Alors que depuis 1847 plusieurs pays ont créé des instituts météorologiques, la France est très en retard sur ces deux aspects puisque c'est seulement en 1852 qu'est fondée à Paris la Société météorologique de France par quelques passionnés de ce domaine, parmi lesquels on trouve Charles Sainte-Claire Deville, frère du chimiste inventeur du procédé de raffinage de l'aluminium, et Antoine d'Abbadie. Dès décembre 1852 sa première séance rassemble 150 savants dont 20 membres de l'Institut et de nombreux étrangers.

4.6. *Le Verrier à l'Observatoire de Paris*

Dès sa nomination à la Direction de l'Observatoire de Paris, U. Le Verrier « constate l'insuffisance de la météorologie en France, mais oublie la Société Météorologique de France... [8, p. 284] ». En matière de météorologie son programme d'observation, de transmissions et de publication en sept points est très complet, et la détermination de Le Verrier est encore renforcée par la catastrophe militaire devant Sébastopol : une tempête s'élève le 14 novembre 1854, au cours de laquelle sombrent 38 navires de la flotte alliée contre la Russie (France, Angleterre, Piémont, Turquie). Un certain nombre de voix s'élèvent pour affirmer que l'évènement aurait été prévisible si une liaison télégraphique avait pu être réalisée entre Paris, Vienne, et Munich, décrivant et prévenant le déplacement de cette profonde dépression. En février 1855, Le Verrier va soumettre à l'empereur Napoléon III un projet de vaste réseau météorologique, rendu possible par l'ouverture au public des lignes télégraphiques en 1851. Très rapidement ce réseau devient européen puis mondial. En 1865, les premières cartes météo européennes sont établies. En 1874, un code international pour transmettre les observations météorologiques est mis au point.

4.7. *Les premiers congrès météorologiques*

Un premier congrès à Vienne, en 1874, normalise les symboles météo, toujours usités. En 1879, le congrès météorologique de Rome décide le lancement de la première Année Polaire Internationale, qui se déroulera en 1882 et 1883, ainsi que la création de douze bases boréales et deux australes, installées par douze nations déjà investies dans ces régions [9].

4.8. *L'électricité au service des instruments de mesure*

Après 1860 l'emploi d'une nouvelle énergie, l'électricité, se substituant à une partie des fonctions mécaniques, apportera progressivement une grande rapidité de fonctionnement aux instruments, et des matériaux nouveaux comme l'aluminium modifieront leur conception. Les travaux des météorologues sont facilités dès les années 1875 par le développement des enregistreurs mécaniques, notamment ceux du constructeur Jules Richard ainsi que ceux de la Maison Breguet. En 1878, Jules Richard expose à Paris un baromètre enregistreur à noir de fumée qui lui vaut une médaille d'argent ; puis en 1882 un « baromètre enregistreur universel ». En 1889 il fournit les appareils météorologiques enregistreurs de la Tour Eiffel qui fonctionneront encore en 1935, puis l'entreprise décline tous les appareils d'enregistrement.

4.9. *L'Observatoire du Pic du Midi : une idée téméraire qui devient réalité!*

Si Le Verrier a su créer un réseau public d'observations météo, en s'appuyant notamment sur les écoles normales départementales, une initiative privée voit le jour en 1873, initiative due à quelques hommes passionnés de science et d'alpinisme parmi lesquels se trouve le général Charles de Nansouty (Ce paragraphe s'inspire largement du bel ouvrage d'Emmanuel Davoust, astronome, auteur de [10].) : la création d'un observatoire météorologique au Pic du Midi de Bigorre (2 876 m). Ce projet est soutenu par nombre de personnalités dont Le Verrier, Sir John Herschel, Charles Sainte-Claire Deville, fondateur de la Société Météorologique de France, particulièrement intéressé par la « météorologie dynamique » dont l'objet est à cette époque de relier les phénomènes au niveau du sol à ceux qui se produisent dans les hautes régions de l'atmosphère.

Une station provisoire est installée en 1873 au Col de Sencours, à 2 366 m ; c'est une sorte d'hôtellerie dont les annexes sont équipées d'instruments fournis par la Société météorologique de France. Thermomètres, baromètre Fortin, pluviomètre, actinomètre sont répartis dans des

abris type « Montsouris », protégés par un mur en pierre, mur destiné « à mettre les instruments à l'abri des atteintes des animaux malfaisants : chèvres, bergers, touristes... » dicit le général de Nansouty! Il y séjournera huit années durant lesquelles, assisté de quelques hommes, il transmettra les observations journalières à Paris. En 1877 est construite sous le sommet du Pic une cabane, à 2 800 m d'altitude, dans laquelle sont installés des instruments dont les mesures sont relevées quotidiennement à midi 43, harmonisation mondiale oblige! Cinq stations sont installées dans le piémont pyrénéen pour compléter la vision météo d'ensemble. En 1877 une liaison télégraphique est installée, puis connectée au réseau national, ainsi qu'une liaison téléphonique en 1878.

C'est en 1878 qu'Eleuthère Mascart succède à Le Verrier à l'observatoire de Paris. Il est très favorable aux travaux de Nansouty. Simultanément, la construction d'un observatoire au sommet du Pic débute en juillet 1878. L'emménagement aura lieu en octobre 1881; le Général de Nansouty y passe le premier hiver, il y dispose d'une ligne télégraphique prolongée jusqu'au sommet.

Le 7 août 1882, l'Observatoire du Pic du Midi est rattaché au budget de l'Instruction publique et reste principalement destiné aux observations météorologiques et physiques. Il devient un Observatoire national rattaché au réseau d'observatoires et de stations dépendant du Bureau central météorologique dirigé par E. Mascart.

Ce même mois d'août 1882, Antoine d'Abbadie passe trois jours au Pic pour y faire des mesures d'inclinaison et de déclinaison magnétiques. Il sera suivi par nombre de savants dont Paul Bert, le physicien Marcel Brillouin, l'astronome Jules Janssen, le botaniste Gaston Bonnier, le physicien finlandais Lemstrom pour des expériences sur la foudre.

Au cours de la décennie suivante se poursuivront des observations de routine, et simultanément les astronomes vont faire évoluer cet observatoire vers leur discipline grâce à l'installation d'instruments d'optique.

4.10. *La météorologie vise toujours plus haut*

Les premiers ballon-sondes équipés d'enregistreurs mécaniques sont lancés par Gustave Hermite en 1892, puis L. Teisserenc de Bort découvre qu'à partir de 10 km d'altitude la température cesse de décroître : ainsi est découverte la stratosphère. Ensuite, en 1896 à Trappes, il utilise des cerfs-volants équipés d'instruments. En 1905, Millochau mesure le rayonnement solaire au sommet du Mont Blanc et l'irradiance du soleil avec son Pyrhéliomètre, faisant une erreur inférieure à 2 %!



Pyrhéliomètre Féry-Millochau (Charles Beaudouin constructeur).

5. Conclusion : l'avènement d'une science mondiale au XX^e siècle

La Première Guerre mondiale induira d'importants progrès en engins volants équipés d'instruments. Un pas décisif est franchi en 1929 lorsque Pierre Idrac et Robert Bureau équipent un ballon d'un émetteur radio : c'est la radiosonde.

Et la météorologie deviendra une science mondiale avec la révolution numérique des années 60. En effet, le XX^e siècle verra la réunion performante et internationale des « trois progrès » de la météorologie, perceptibles dès le XVII^e siècle :

- observation, mesure et enregistrement,
- équations et logiciels de calcul, et développement théoriques,
- réseau mondial connecté.

L'avènement des satellites météorologiques, et le développement des simulations numériques des volets du système climatique, seront des outils déterminants au service de cette transformation.

Conflit d'intérêt

L'auteur n'a aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Références

- [1] C. D. Conner, *Histoire Populaire des Sciences*, L'Echappée, Points Sciences, Paris, 2011, 260 pages.
- [2] J.-P. Javelle, *D'après*, Météo-France, 2011.
- [3] Voir l'article de Bruno Jacomy in *La Revue, Musée des Arts et Métiers*, no 30 juin 2000, pp. 39 et suivantes, ainsi que U. Zelbstein in *Studies in the history of scientific instruments* et l'ouvrage de Jean-Dominique Augarde sur Pajot d'Ons en Bray, Cleveland Museum of Arts, 2003.
- [4] J. Lequeux, *Borda et Lavoisier Précurseurs de la Météorologie Moderne*, Persée, 2011, 902 pages.
- [5] J. Lequeux, *Le Verrier : Savant Magnifique et Détesté*, EDP Sciences, Paris, 2009.
- [6] J. Bruno, *La Revue no 30*, CNAM, 2000, 11 pages.
- [7] A. Fierrot, *Histoire de la Météorologie*, Denoël, Paris, 1991.
- [8] J. Lequeux, *Le Verrier : Savant Magnifique et Détesté*, EDP Sciences, Paris, 2010.
- [9] S. Höler, *Histoire des sciences et des savoirs*, Ouvrage Collectif, tome 2, Seuil, Paris, 2015, 176 pages.
- [10] E. Davoust, *L'Observatoire du Pic du Midi*, CNRS Editions, Paris, 2002.



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

Eiffel et la météorologie

Eiffel and meteorology

Martin Peter^a

^a Aérodynamique Eiffel, 67 rue Boileau, 75016 Paris, France
Courriel: martin.peter@sfr.fr

Résumé. Le vent a toujours été pour Gustave Eiffel une préoccupation majeure par ses effets sur les constructions métalliques de grande dimension qu'il réalisait. « Le vent, mon ennemi », disait-il. Eiffel exprime à travers ses discours sa volonté de mettre la science au service de la technique. La météorologie doit aider l'aviateur, le paysan ou le marin. C'est pour les hommes que Gustave travaille. Il préconise ainsi de simplifier les pratiques pour que les résultats soient accessibles à tous. Ainsi la météorologie doit donner des informations exploitables immédiatement.

Abstract. The wind has always been a major concern for Gustave Eiffel due to its effects on the large metal constructions he made. "The wind, my enemy", he said. Eiffel expresses through his speeches his desire to put science at the service of technology. Meteorology must help the aviator, the peasant or the sailor. It is for men that Gustave works. He therefore recommends simplifying practices so that the results are accessible to all. So the meteorology must give usable information immediately.

Mots-clés. Eiffel, Météorologie, Anémomètre pendulaire, Héliographe photographique, Société météorologique de France.

Keywords. Eiffel, Meteorology, Pendular anemometer, Photographic heliograph, French meteorological society.

Note. Cet article s'appuie entièrement sur l'ouvrage de Martin Peter et Jean-Pierre Cuisinier, *La Bataille du Vent*, Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) : Paris, 2007.

Note. This article is based entirely on the book by Martin Peter and Jean-Pierre Cuisinier, *La Bataille du Vent*, Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) : Paris, 2007.

Published online: 17 August 2023, Issue date: 15 September 2023

1. Les motivations d'Eiffel

Avant tout, il n'est pas vain de s'interroger sur les raisons qui ont amené Gustave Eiffel, le magicien du fer, à s'intéresser à la science de la météorologie jusqu'à en devenir un éminent spécialiste! C'est sans doute en premier lieu parce que le vent a toujours été pour lui une préoccupation majeure par ses effets sur les constructions métalliques de grande dimension qu'il réalisait. « *Le vent, mon ennemi* », disait-il.

Il venait d'autre part de quitter la direction de sa société de constructions métalliques de Levallois à la suite, notamment de ses déboires lors de la construction du Canal de Panama et sa soif de savoir l'incitait à s'intéresser à cette science encore balbutiante. Il avait 60 ans.

Il estimait enfin que la Tour qui porte son nom, objet de certaines critiques à l'époque, pouvait servir de support pour le développement de sciences et de techniques comme la météorologie. C'est ainsi que pendant 20 ans, Eiffel va se consacrer avec la rigueur et l'opiniâtreté qu'on lui connaît à l'étude du vent et des phénomènes météorologiques tout en menant de front ses activités dans l'aérodynamique.

Eiffel exprime à travers ses discours sa volonté de mettre la science au service de la technique. La météorologie doit aider l'aviateur, le paysan ou le marin. C'est pour les hommes que Gustave travaille. Il préconise ainsi de simplifier les pratiques pour que les résultats soient accessibles à tous. Ainsi la météorologie doit donner des informations exploitables immédiatement.

2. Construction de 5 stations météorologiques

Cinq stations météo vont d'abord être construites, l'une sur la Tour et quatre autres dans des propriétés familiales.

2.1. *La station de la Tour*

Dès 1889, année de l'inauguration de la Tour, Gustave Eiffel, aidé par son ami Emile Mascart, directeur du Bureau Central de la Météorologie, fait installer à son sommet à 334 m d'altitude, un observatoire météorologique. La plate-forme ne mesurait pas plus de 1,60 m de diamètre. Cette installation permettait de recueillir des informations sur la température, la pression atmosphérique, la pluviosité, la vitesse et la direction du vent. Ces informations étaient transmises électriquement par un câble qui courait le long de la structure de la Tour puis, passant par les égouts de la ville allait jusqu'au Bureau Central de la météorologie situé dans un immeuble voisin...

2.2. *La station de Sèvres*

C'est dans son château des Bruyères à Sèvres qu'Eiffel installa en 1891 un second observatoire pilote qui va lui permettre d'étalonner ses équipements de mesure.

Il va remettre en cause « l'abri français » qui protège les instruments, lui préférant « l'abri anglais » qu'il va adapter et qu'on appellera « l'abri de Sèvres ».

Eiffel publia en 1901 un ouvrage ayant pour titre « Dix années d'observations météorologiques à Sèvres ».

2.3. *Les stations de Beaulieu-sur-Mer, Vacquey et Ploumanach*

Puis vint l'installation de trois autres stations d'observation, l'une à Beaulieu-sur-Mer en 1901 où Eiffel possédait une propriété, une autre près de Bordeaux en 1902 sur le domaine de Vacquey qui appartenait à son fils Edouard; et en 1905 une troisième, en Bretagne dans le hameau de Ploumanach où vivait son fils Albert. Cette dernière était installée dans sa maison qui s'appelait « Ker Awell », la maison du vent. Un nom prédestiné!

Ce petit réseau construit sur les terres familiales va lui permettre de faire progresser cette science encore balbutiante, qu'est la prévision du temps.

Pour 1902 et les trois années suivantes, il fit éditer une « Etude comparée des stations météorologiques de Beaulieu, Sèvres et Vacquey ».

Il va également publier l'étude comparée des paramètres météorologiques recueillis dans ses stations sous forme de courbes et de graphiques, ce qui va le conduire à étendre cette étude comparative aux 24 stations du Bureau Central réparties sur le territoire français. Les relevés

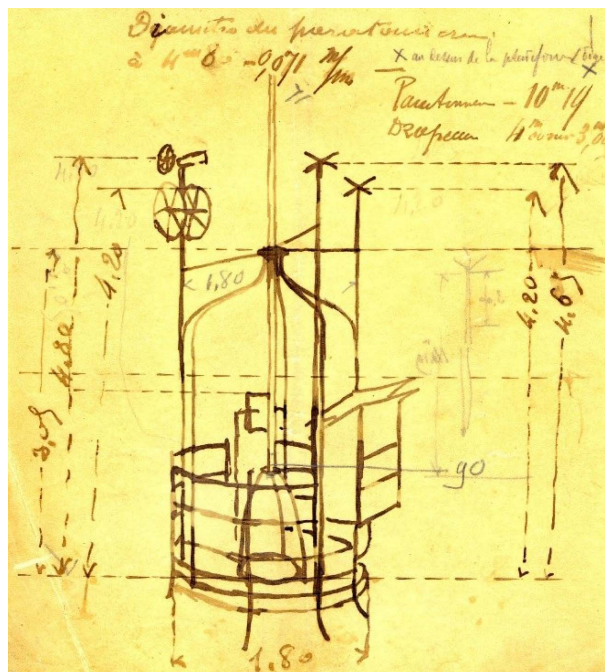


FIGURE 1. Croquis établi par Eiffel pour l'agencement de la station météorologique de la Tour. Source : Archives Eiffel, conservées à la soufflerie Aérodynamique Eiffel, 67 rue Boileau, 75016 Paris.

météo étaient consignés dans des atlas qu'Eiffel publiera pendant 7 ans. Il va en interrompre ensuite la publication car elle s'est révélée trop lourde à gérer. Ces atlas, très appréciés des météorologistes entreront en 1914 dans les archives du ministère de l'Agriculture, conscient de l'intérêt de ces précieuses informations.

3. Les principaux résultats d'Eiffel

3.1. *Invention de l'anémomètre pendulaire*

Gustave Eiffel invente aussi un anémomètre pendulaire à doubles plaques oscillantes. L'une, légère, pour les vents faibles; l'autre pour les vents forts. Ces plaques sont portées par une Girouette qui les oriente face à la brise. L'appareil mesure la pression maximale du vent entre deux observations. Pour Eiffel, c'est la pression du vent qu'il importe le plus de connaître, soit en raison des services que l'on peut en attendre, soit à cause des dangers que les hommes doivent à tout prix éviter pour sauvegarder des vies et pérenniser leurs bâtiments. Eiffel a également déterminé que plus encore que la vitesse, c'est la direction du vent qui est essentielle car c'est elle qui détermine l'évolution du temps.

3.2. *Invention de l'héliographe photographique*

A l'époque, même les météorologues avaient tendance à observer de manière subjective l'état du ciel selon sa nébulosité. On parlait de ciel couvert, nuageux... Eiffel préconise la mesure de

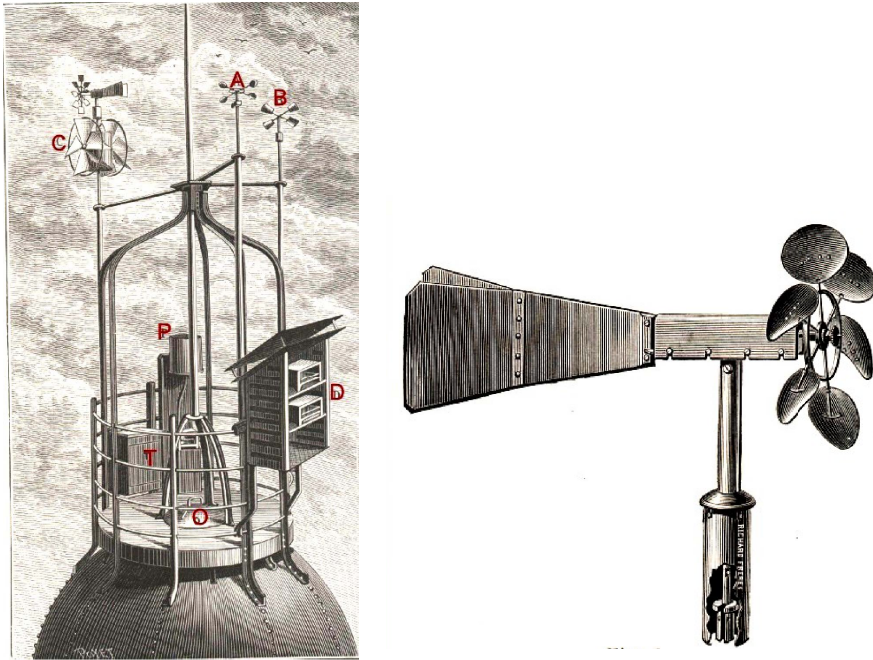


FIGURE 2. L'observatoire au sommet de la tour — détail l'anémomètre girouette Richard (installé en C). Source : Archives Eiffel (Aérodynamique Eiffel).

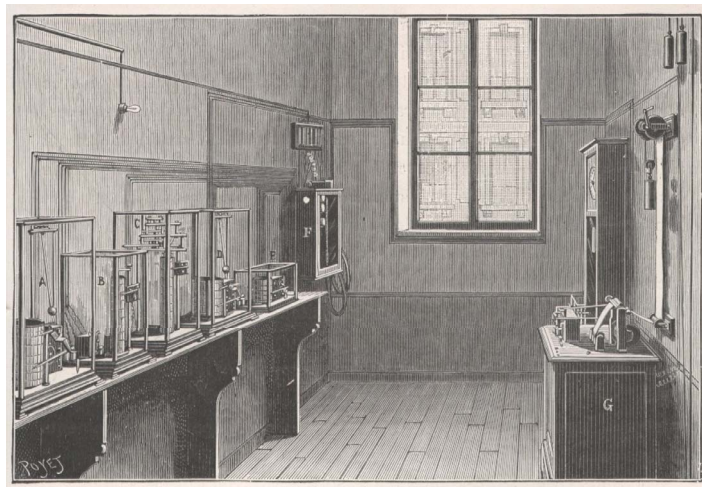


FIGURE 3. Salle des enregistrements à la tour Eiffel. Source : Archives Eiffel (Aérodynamique Eiffel).

l'insolation qui est « l'inverse » de la nébulosité et du temps d'insolation. Il utilise pour cela des héliographes dont il a d'ailleurs breveté un modèle très performant.

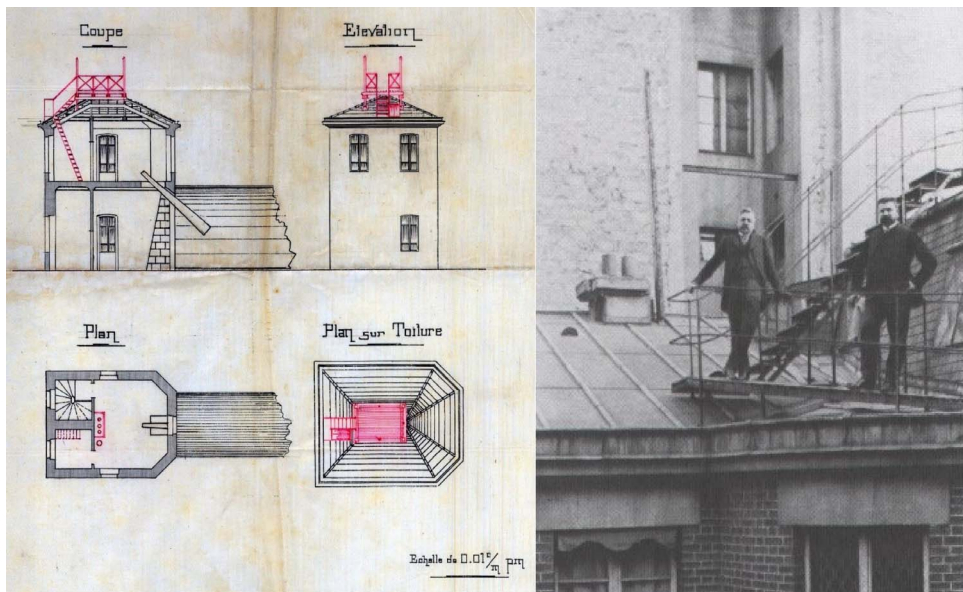


FIGURE 4. Plan de l'observatoire de Sèvres. Eiffel et un collaborateur aux Bruyères. Source : Archives Eiffel (Aérodynamique Eiffel).

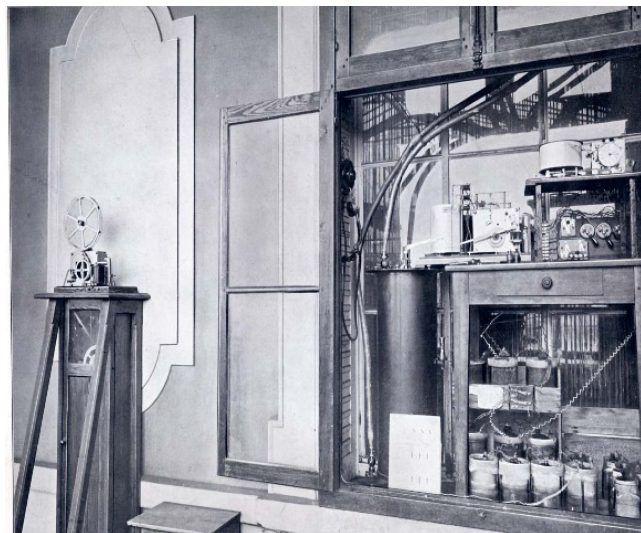


FIGURE 5. Local des enregistreurs de Sèvres. Source : Archives Eiffel (Aérodynamique Eiffel).

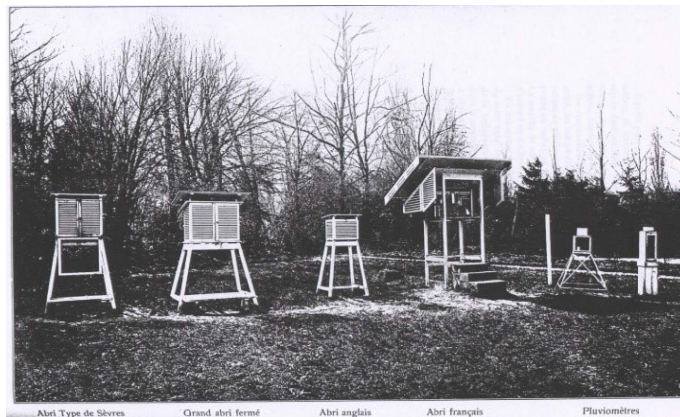


FIGURE 6. Abris et pluviomètres dans le parc de Sèvres. Source : Archives Eiffel (Aérodynamique Eiffel).



FIGURE 7. Villa Eiffel à Beaulieu-sur-Mer (photo Delcampe International SRL).

3.3. *Importance de l'enregistrement*

Observer et mesurer ne suffisent pas. Les observations personnelles sont toujours sujettes à erreur. Elles échappent au contrôle objectif. Eiffel préconise l'emploi quasi systématique des enregistreurs. Conserver les données recueillies est indispensable aussi bien pour la température que pour les autres phénomènes météorologiques. On peut en tirer des courbes d'évolution et des tracés qui donnent des indications précieuses pour anticiper les phénomènes.

3.4. *Mesure de l'humidité de l'air*

Eiffel a distingué l'humidité absolue de l'humidité relative. La première mesure le poids de la vapeur d'eau en grammes contenue dans un m³ d'air, la seconde étant le rapport entre l'humidité

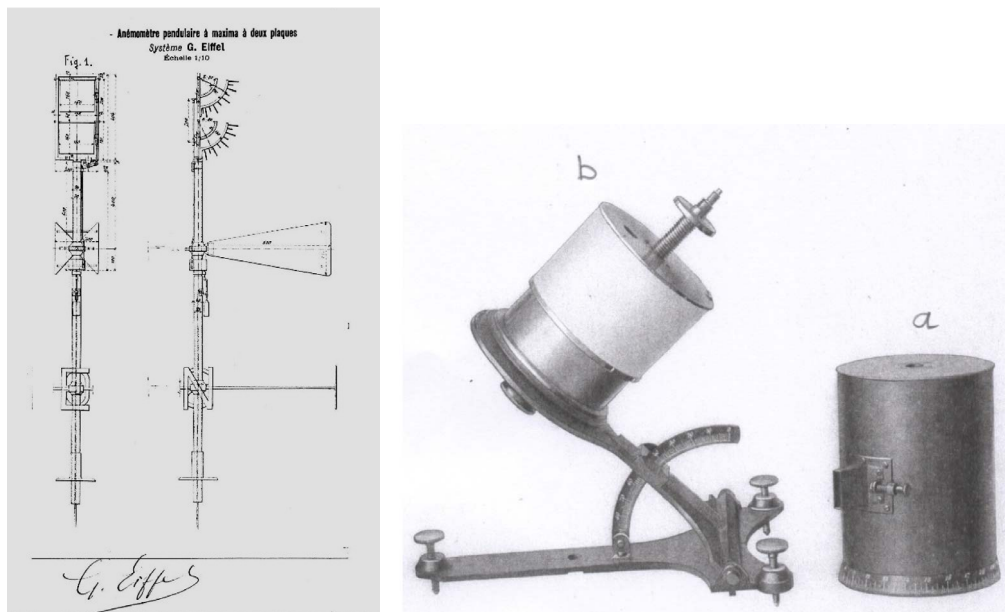


FIGURE 8. Anémomètre pendulaire. Héliographe photographique. Source : Archives Eiffel (Aérodynamique Eiffel).

absolue et l'humidité contenue dans un m^3 d'air saturé. Il en a conclu que l'humidité varie comme la température mais indépendamment du vent.

3.5. Mesures de température

Eiffel comparait les minima et maxima quotidiens représentés par des graphiques superposables. Les valeurs moyennes mensuelles ou saisonnières faisaient l'objet de tableaux qu'il appelait « expression de la température ».

4. Eiffel, président de la Société Météorologique de France

Eiffel tira la conclusion de ses expériences l'importance de la variation des phénomènes traduite en courbes et graphiques et non pas les seules mesures ponctuelles. C'est ce constat qu'il a appliqué à la prévision du temps, laquelle est le fondement même de la science météorologique.

Les progrès qu' Eiffel avait permis de réaliser en météorologie furent reconnus par ses pairs au point qu'en 1910, il est nommé Président de la Société Météorologique de France. D'autres distinctions étrangères l'ont également honoré pour ses travaux en météorologie, reconnus et appréciés à travers le monde.

Pour illustrer la pensée de Gustave Eiffel, voici ce qu'il écrivait en 1905 : « *Je n'ai qu'un but, c'est de permettre à toutes les bonnes volontés de se produire dans le domaine de la météorologie. La notation patiente des phénomènes météorologiques, l'étude toujours plus attentive de leurs relations et de leurs causes nous permettront sans doute de nous rapprocher de plus en plus du but auquel doivent tendre tous nos efforts : la connaissance du temps qu'il fera.* »

5. Conclusion

On peut dire que l'ingénieur de la Tour et des nombreuses constructions qui avaient fait sa renommée laissa aux techniques météorologiques des bases qui continuèrent à exister. Eiffel a notamment préconisé :

- la généralisation de l'utilisation d'enregistreurs
- la suppression des observations à l'estime
- l'emploi de l'année météorologique du 1/12 au 30/11 de l'année suivante (correspondant aux saisons) plutôt que l'année civile du 1/01 au 31/12
- l'adoption de l'heure locale, le soleil étant le moteur des phénomènes météorologiques
- l'utilisation de vitesses en km/h au lieu des m/s.

Le perfectionnement des systèmes de relevé et d'acquisition des données permit de constituer au fil des années une documentation précieuse. Ces documents, largement diffusés dans les milieux scientifiques, incitent Eiffel à donner une nouvelle ampleur à ces observations. C'est alors qu'en 1906, il décide de faire paraître son premier Atlas Météorologique. Dans cet ouvrage, il donne les graphiques des valeurs quotidiennes, mensuelles, saisonnières et annuelles des éléments météorologiques indispensables dans vingt-quatre régions de France, de Dunkerque à Alger.

On peut affirmer que l'œuvre de Eiffel en météorologie n'aura pas été vaine. Ses méthodes ont été appréciées par un grand nombre de spécialistes, tel M. Barbé, ingénieur en chef de la météorologie qui écrivait en 1925 : « *Dans cette voie de l'utilisation pratique de la météorologie, Eiffel a été le précurseur le plus actif et le mieux avisé; la forte impulsion qu'il a donnée dans ce sens au cours de son intervention énergique mais trop courte a contribué pour une large part aux heureux débuts constatés à ce jour.* »

Et M. Barbé d'ajouter : « *C'est un laurier de plus qui vient s'ajouter à ceux déjà nombreux que l'homme éminent avait su conquérir pendant sa longue existence toute entière consacrée au travail, opiniâtrement et sans défaillance, animée par la forte volonté de réaliser les grandes œuvres auxquelles le nom d'Eiffel restera perpétuellement attaché.* »

Conflit d'intérêt

L'auteur n'a aucun conflit d'intérêt à déclarer.



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

Audouin Dollfus, astronome du XX^e siècle

Audouin Dollfus, 20th century astronomer

Bruno Chanetz^{* a}, Alain Broc^b et Philippe Jung^c

^a ONERA, Université Paris Saclay, F-91123 Palaiseau, France

^b ONERA, Université Paris Saclay, F-92322 Châtillon, France

^c French Aeronautical and Astronautical Society (3AF), France

Courriels : Bruno.Chanetz@onera.fr (B. Chanetz), alainbroc@gmail.com (A. Broc), philippe.jung10@gmail.com (P. Jung)

Résumé. L'astrophysicien canadien Hubert Reeves (avril 2011) considère Audouin Dollfus comme un des plus grands astronomes français contemporains. Il a notamment découvert Janus, satellite de Saturne, déterminé la composition du sol de Mars, détecté un résidu atmosphérique sur Mercure et contribué à choisir le terrain d'alunissage de la mission Apollo 11, qui permit à Neil Armstrong de poser le premier pied de l'homme sur la Lune. Ce fut également un aéroplane de haute volée puisqu'il détient toujours le record du monde du plus haut vol habité avec un ballon muni d'un télescope astronomique.

Abstract. Canadian astrophysicist Hubert Reeves (April 2011) considers Audouin Dollfus to be one of the greatest contemporary French astronomers. In particular, he discovered Saturn's satellite Janus, determined the composition of the soil on Mars, detected atmospheric residue on Mercury and helped choose the landing site for the Apollo 11 mission, which enabled Neil Armstrong to set foot on the Moon for the first time. He was also a high-flying aeronaut, as he still holds the world record for the highest manned flight in a balloon equipped with an astronomical telescope.

Mots-clés. Astronomie, Lune, Mars, Espace, Ballons.

Keywords. Astronomy, Moon, Mars, Space, Balloons.

Published online: 17 August 2023, Issue date: 15 September 2023

1. Sa formation et le début de sa carrière

1.1. *La famille Dollfus*

Audouin Dollfus est né le 12 novembre 1924, d'une famille alsacienne, dont six de ses membres furent maires de Mulhouse. Il est le fils de Charles Dollfus, actif pilote de ballon libre [1], qui obtint son brevet civil en 1913 et son brevet militaire n° 333 le 15 novembre 1918. Ce dernier servit à Rochefort comme directeur de l'école des ballons libres. Arrivé de Saint-Cyr et commençant ses vols le 11 novembre 1917, jusqu'en 1918, il y accomplit également, bien que non pilote de dirigeable, 244 h de vol à bord de ceux-ci en 81 ascensions.

* Auteur correspondant.



FIGURE 1. Audouin Dollfus lors de l'envol historique de 1959.

Passionné par les débuts de l'aviation et possédant une collection unique d'objets idoines, Charles Dollfus est logiquement chargé par le général Hirschauer, créateur le 23 novembre 1921 du Conservatoire de l'Aéronautique à Chalais-Meudon, de s'occuper de l'aspect histoire et des collections de celui-ci. Il en est nommé conservateur en 1927, jusqu'en 1958, alors que le Conservatoire devient en 1936 le Musée de l'Air puis le Musée de l'Air et de l'Espace au Bourget. Premier français à réaliser un aller et retour sur l'Atlantique à bord du dirigeable *Graf Zeppelin* en 1932 [2], il publie la même année, avec Henri Bouché, une magnifique « Histoire de l'Aéronautique » (Edition L'Illustration), véritable référence, avec réédition en 1938. Lorsque pour les besoins d'un film anglais l'historique Montgolfière du 21 novembre 1783 de Pilâtre de Rozier est reconstituée en 1937, c'est lui qui la pilote avec G. Cormier. En 1932 il donne à son fils son baptême de l'air, en ballon. Audouin Dollfus confiera à Jean Tensi [3] lors d'une interview réalisée en 2010, quatre mois et demi avant sa mort : « *Mon père était un homme d'exception, un homme d'une grande culture* ». Charles Dollfus était un arrière-petit-fils de Marie Mieg et de Daniel Dollfus, lequel présida à la création de la firme textile Dollfus-Mieg Compagnie, bien connue des couturières sous la marque mythique DMC.

Audouin Dollfus (voir Figure 1) doit sa passion pour l'aérostation à son père. Il devient pilote dès qu'il a l'âge requis, juste après la Seconde Guerre mondiale. Sa fascination pour l'astronomie lui est venue lors de vacances dans la maison de ses grands-parents à Lyons-la-Forêt : « *J'ai vécu dans cette atmosphère familiale et grand-familiale très culturelle. Il y avait des bibliothèques d'une richesse extraordinaire, très éclectiques d'ailleurs. Un jour à l'âge de 8 ans, un peu par hasard, j'ai tiré de la bibliothèque de mes grands-parents un livre qui m'a attiré parce qu'il était bien décoré et qui s'appelait « Le Ciel » d'Amédée Guillemin. J'ai été stupéfait. Je n'ai pas pu le lire. Il y avait des illustrations, des hors-texte en couleur* » [3]. Ce sera le début d'une passion qui ne le quittera plus : « *A 14 ans, j'ai eu ma première lunette (astronomique). Je l'ai trouvée là aussi dans les vieux tiroirs de la propriété de campagne de mes grands-parents, en fouillant. Il y avait de tout, c'est l'illustration de la culture comme on l'avait autrefois* ». L'observation de Mars le 14 juillet 1941 avec l'astronome amateur Jean Dragesco [4] le confirme dans la voie scientifique.

1.2. *Le vol en ballon de Charles et Audouin Dollfus à 7 000 m d'altitude en 1954*

Ayant obtenu en 1946 un doctorat en mathématiques à la faculté des Sciences de l'Université de Paris, Audouin Dollfus entre la même année à l'Observatoire de Paris-Meudon, alors dirigé par

le grand astronome Bernard Lyot. Inventeur du célèbre coronographe, ce dernier avait mis au point une technique d'analyse des surfaces planétaires en étudiant la polarisation de la lumière réfléchie par ces corps.

Son baptême de l'air lui a aussi inoculé le virus du ballon : il obtient ses brevets de pilote de ballon et de montgolfière en 1947 [5]. Le 3 mai 1953 il bat à bord d'un ballon Zodiac les records de distance (208,6 km) et de durée (4 h) dans la catégorie A-3, puis dans la catégorie A-2 celui d'altitude avec 3 405 m à bord d'un autre Zodiac le 1^{er} mai 1955.

On sait que nous sommes protégés des diverses radiations cosmiques et des météorites par notre atmosphère, mais avec l'inconvénient de l'existence d'un trou de souris dans le spectre électromagnétique de l'infra-rouge à l'ultra-violet : le visible qui nous parvient sur Terre ne s'étend en effet que de 0,1 à 10 μm (au-delà, les ondes radio centimétriques passent aussi). Audouin Dollfus est naturellement conduit à imaginer emporter un télescope à bord de la nacelle d'un ballon.

Cette grande première a lieu le 30 mai 1954. L'objectif est d'analyser la composition du sol martien, et notamment tenter d'apporter une réponse à la sempiternelle question de la présence ou non d'eau — depuis l'annonce en 1877 par l'Italien Schiaparelli de « canaux », en fait une mauvaise traduction de *canali*. Il s'envole en ballon de Villacoublay avec son père, emportant un télescope dans la nacelle et s'élevant jusqu'à 6 400 mètres d'altitude. Il réussit ainsi la première observation astronomique depuis un ballon, mais ne parvient pas à déceler la présence d'eau sur Mars. Pour obtenir de meilleurs résultats, il faut atteindre la stratosphère, soit plus de 11 000 m. Le professeur Auguste Piccard et son coéquipier, Paul Kipfer, sont les premiers, le 27 mai 1931, à avoir pénétré dans la stratosphère, atteignant une altitude de 15 781 m, pour étudier l'atmosphère et le rayonnement cosmique, à bord de la première nacelle pressurisée.

Il faut donc réaliser un gros ballon, très léger et fragile, difficile à fabriquer et à mettre en œuvre. Les puissants moyens de l'US Air Force lui avaient certes permis à partir de mai 1955 de réaliser des ascensions à plus de 18 000 m avec des ballons *Moby Dick Hi* de type *Skyhook*, ce qui est totalement inenvisageable en France.

2. L'ascension en ballon d'Audouin Dollfus à 14 000 m d'altitude en 1959

2.1. Un exploit sportif

Il se trouve qu'une innovation majeure avait été apportée en juillet 1937 par le professeur américain Jean Piccard, frère d'Auguste, avec le *Pleiades* employant une grappe de quelques 98 ballonnets pour monter à 3 000 m, puis descendre en coupant les fils au couteau ou en tirant au pistolet sur les ballons ! [6].

En 1957, Audouin Dollfus s'inspirant du vol de Jean Piccard, conçoit un dispositif similaire destiné à emporter un télescope dans les airs avec un expérimentateur à bord. La capsule de survie est constituée d'une sphère de moins de 1,8 m de diamètre en aluminium de 1,2 mm d'épaisseur, recouverte de 20 mm de polystyrène. Le professeur Louis Leprince-Ringuet donne son appui pour cette réalisation. La structure portant le télescope est réalisée en tubes de duralumin, pour lesquels le professeur Auguste Piccard apporte son aide. Un télescope de type Cassegrain de 500 mm de diamètre est fixé au-dessus de la capsule. La masse totale de la cabine est ainsi de 105 kg.

Comme sustentateur, Audouin Dollfus choisit d'utiliser de multiples petits ballons en polyuréthane gonflés à l'hydrogène, chacun créant une poussée verticale de 100 N. Les essais de gonflement des enveloppes sont effectués dans le Hangar Y de Meudon. Pour réussir l'ascension, 105 ballons BéríteX de 2,7 m de diamètre sont donc assemblés par groupe de trois, constituant une immense grappe, qui se déploie sur 450 m de haut le long d'un câble central, muni de charges



FIGURE 2. Départ du vol d'Audouin Dollfus à Villacoublay le 22 avril 1959.

de poudre destinées à larguer progressivement les ballons pour ralentir l'ascension, permettre de stabiliser l'engin à la hauteur choisie pour l'expérience, et enfin effectuer une prudente redescende. Procédé ingénieux mais ô combien dangereux pour l'aéronaute !

Puis c'est le grand jour, le 22 avril 1959 (voir Figures 2 à 5), Denis Rakotoarijimy [7], alors jeune chercheur à l'Observatoire de Meudon témoigne : « A Villacoublay, nous avons alors gonflé successivement les 105 ballons de la grappe destinée à entrainer la nacelle dans les airs. La nacelle où Dollfus allait séjourner pendant toute la durée du vol, était une petite sphère de 180 cm de diamètre comprenant 7 hublots et une ouverture de seulement 46 cm de diamètre permettant son entrée à l'intérieur. C'était une drôle d'impression que de voir tous ces ballons alignés maintenus temporairement par des contrepoids avant d'être assemblés le long d'un câble de 450 m. A 20h10, l'aéronef s'envola. Le vol de Dollfus dura 5 heures avant de retomber en pleine nuit dans un champ. »

La vie à l'intérieur de la nacelle est précisément connue grâce au livre de bord tenu par Audouin Dollfus [8] depuis l'instant où il monte dans cette capsule sphérique à 20h et déclenche le largage à 20h05. La montée s'effectue à la vitesse de 9 km/h. A 20h30, il est à 3 000 m d'altitude. A 20h36, il atteint 4 200 m, applique le masque à oxygène. A 20h50 il atteint 6 000 m. La pression atmosphérique a diminué de moitié par rapport à celle du sol. Il doit fermer le trou d'homme. Le couvercle est appliqué et adhère aussitôt par dépression. La cabine est alors pressurisée par adjonction d'oxygène pur, ce qui modifie la composition de l'air de la cabine qui contient deux fois moins d'azote que l'air normal, d'où une sensation de bien-être pour l'occupant. A 21h10, Audouin Dollfus savoure un thé chaud à 7 000 m en admirant Versailles. A 21h25, un mouvement de descente s'amorce, quelques ballons ayant dû éclater. Audouin Dollfus s'allège en larguant un bac de 50 kg d'huile servant de lest. Manœuvre réussie, l'ascension reprend mais plus lentement. A 9 000 m d'altitude il teste l'observation de Vénus. A 22h10, il atteint 11 000 m, franchit la tropopause qui limite l'atmosphère ordinaire. Il est dès lors dans la stratosphère, but de ce voyage. A 22h20, il constate que dix ballons ont éclaté. A 22h30, la montée devenant plus lente, il vidange le second bac d'huile. La montée reprend et la capsule se stabilise à 13 720 m d'altitude. A cette



FIGURE 3. Le gonflage des ballons à Villacoublay.

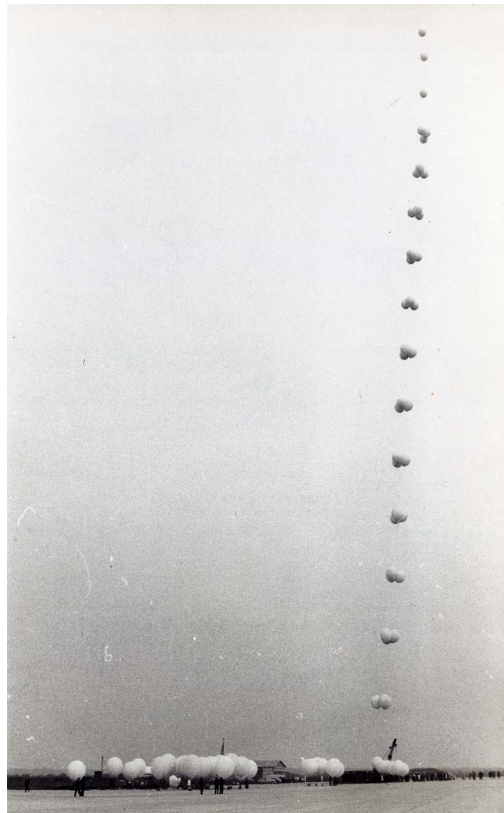


FIGURE 4. Le départ avec des ballons en vol et des ballons encore au sol.

altitude, la pression atmosphérique est sept fois moindre que celle du sol. Il effectue alors les mesures sur la Lune. A 23h45, grâce au radar de Brétigny qui a pris le relai de celui de Trappes pour localiser le ballon, il sait qu'il est localisé à 35 km au sud sud-est de Montargis et qu'il se déplace à 60 km/h en direction du Massif central.

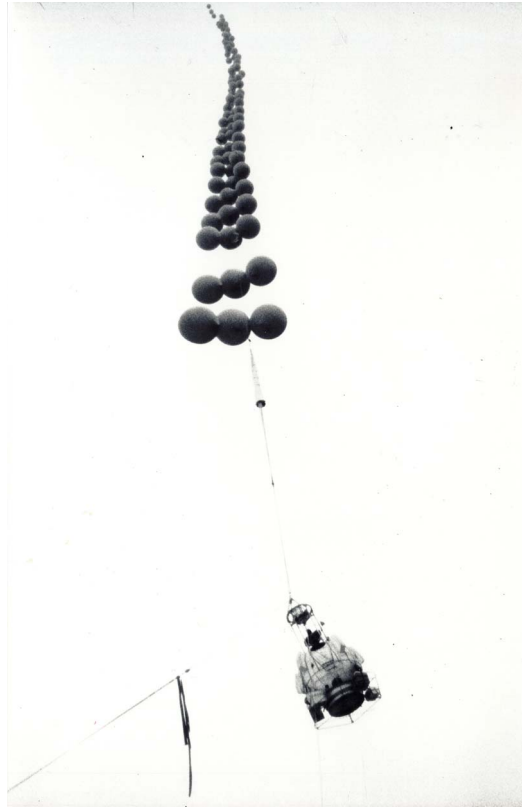


FIGURE 5. La nacelle en vol.

Son programme d'observation étant atteint, il songe à redescendre, active le dispositif de mise à feu, qui doit larguer des ballons dans le haut de la grappe par groupe de six. La mise à feu qui devait se faire au moyen d'une liaison radioélectrique depuis la cabine se révèle inopérante. Pas de bruit d'explosion. Il reste très serein, et appelle Trappes à 23h45 : « *J'ai tort car une réponse au sol à peine audible traduit une inutile émotion. J'ai tout le temps d'attendre, une descente spontanée est assurée. La consommation électrique est minime et l'oxygène abondant. J'ai devant moi encore la moitié de la France avant la mer.* » La manœuvre d'éclatement finit par réussir et la descente à une vitesse de 9 km/h s'amorce.

A 0h15 le 23 avril, à une altitude de 11 000 m, de nouveau la grappe est entraînée par un courant rapide à 120 km/h et ce jusqu'à 10 000 m. A 0h50, la capsule se trouve à 5 000 m. La pression intérieure étant devenue égale à la pression extérieure, le couvercle du trou d'homme s'abaisse de lui-même. A 1h00, la capsule n'est plus qu'à 3 000 m. A 1h15, Audouin Dollfus sort du harnais pour passer la tête dehors et inspecter rapidement la nature du sol qui monte vers la nacelle. Grâce au guiderope — corde qui traîne au sol pour stabiliser un aérostat — quand il ressent la corde toucher terre, il sait que la nacelle n'est plus qu'à 70 m du sol et qu'il faut se préparer à l'atterrissage. Aussi dès que la capsule racle le sol en se renversant, il actionne les éclateurs qui libèrent les ballons subsistants. Un grand calme succède aux violentes explosions. Se dégageant du harnais, Audouin Dollfus se retrouve dans l'herbe humide, ressentant presque aussitôt un corps chaud et visqueux appliqué contre sa poitrine. Après un bref instant de frayeur, actionnant sa lampe torche, Audouin Dollfus éclaire le museau d'une vache ! Se glissant ensuite sous des barbelés, il aboutit à un chemin et gagne le plus proche village, éclairé mais bien sûr désert à

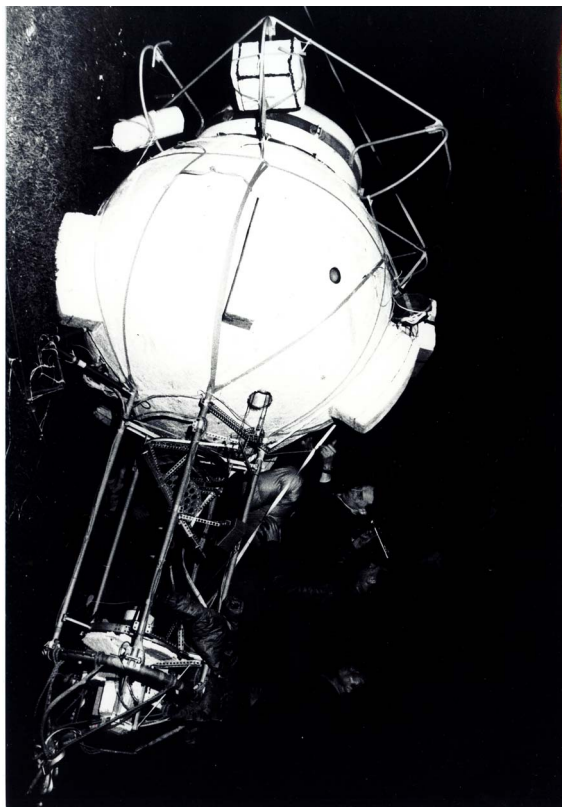


FIGURE 6. Arrivée de nuit de la nacelle dans le département de la Nièvre.

2 heures du matin. Reçu par la gendarmerie, il apprend qu'il est à Prémercy dans la Nièvre (voir Figure 6). Après cette nuit intense, il regagne son bureau de Meudon au petit matin, ainsi que le raconte Denis Rakotoarijimy [9] : « *Nous l'avons revu dès le lendemain matin à l'Observatoire, pressé de dépouiller ses observations qui allaient permettre de déduire par la suite la présence d'eau sur Mars.* »

Au niveau scientifique, la mission de 1959 était un succès. Au niveau sportif ce fut un exploit aéronautique ! Aussi en 2005, la Fédération Aéronautique Internationale (FAI) a nommé Audouin Dollfus *high flyer* aux côtés de Neil Armstrong et d'autres personnalités du monde de l'air et de l'espace ayant accompli un acte sans précédent [8]. Quand Jean Tensi lui demanda s'il avait eu peur durant son voyage aérien de 1959, il répondit : « *Ce n'est pas par vantardise. On n'a pas le temps d'avoir peur ! On est pris par tout ça. On est dans le feu de l'action. On n'a pas le temps ! Je ne me suis pas posé le problème* » [3].

Pierre Léna se souvient : « *L'admiration de ses jeunes collègues de l'Observatoire de Paris ne lui fut pas mesurée, même si sa courageuse technique ne permettait pas d'envisager une exploration détaillée de l'atmosphère de Mars avec des télescopes plus maniable ! Un récit courut alors à l'Observatoire, sans doute raconté par l'astronaute lui-même pour éclaircir les éclatements impromptus de ses ballons : lors du passage de l'aéronef non loin d'un puissant émetteur de radiodiffusion (sans doute Sainte-Assise), la fréquence de l'émetteur, accordée par coïncidence sur celle du déclenchement, provoqua les éclatements ...* » [10].

2.2. *Des retombées scientifiques importantes : la recherche de l'eau par des observations en altitude*

Par ses observations en ballon à très haute altitude, Audouin Dollfus est considéré comme le précurseur de l'astronomie spatiale. En 1948 il étudiait la planète Mars aux Observatoires du Pic du Midi et de Meudon. Les connaissances de l'environnement de la planète à sa surface commençaient à se préciser. Audouin Dollfus avait ainsi pu, par analyse polarimétrique depuis le Pic du Midi, préciser la nature du sol de Mars (poudre riche en fer très oxydée). La densité de l'atmosphère se précisait, ainsi que sa température.

La variation saisonnière de taches à la surface de la planète faisait penser à une action biologique. La planète était-elle viable pour accueillir la vie? Mais pour que la vie puisse se développer, même à un niveau microscopique, il faut la présence d'eau. La spectroscopie (étude des spectres des rayonnements électromagnétiques émis ou absorbés par une substance) était le seul moyen de déceler l'eau dans l'atmosphère de Mars. Or, l'atmosphère terrestre contient une quantité non négligeable de vapeur d'eau, et les bandes d'absorption observées depuis le sol ne permettaient donc pas de conclure quant à la présence d'eau dans l'atmosphère de Mars. Le seul moyen d'échapper à cela restait de monter en altitude au-dessus des couches humides de l'atmosphère afin que l'absorption ne soit due qu'à la vapeur d'eau martienne. D'où l'idée d'Audouin Dollfus, astronome et aéronaute, de transporter un télescope dans la haute atmosphère, en ballon.

Une première ascension eut donc lieu dans la nuit du 29 au 30 mai 1954, jusqu'à 6 400 m d'altitude, dans une nacelle en osier. Audouin Dollfus, l'astronome, fut accompagné de son père Charles, autre très grand aéronaute, pour piloter le ballon. Par une température de -40° et équipés de masques à oxygène, les deux aventuriers effectuent les mesures à l'aide du télescope fixé sur la nacelle, pendant un vol qui dura 7 h.

« Le vol fut magistral; toute l'affaire a duré sept heures. Avec mon père, la collaboration était totale. Le pilote assurait la conduite du vol, l'astronome s'occupait du télescope. L'altitude de 7 000 m en pleine nuit est une grande chose; c'est peut-être une de mes ascensions qui m'a le plus impressionné à la fois par son ampleur et par sa sécurité » [7].

Ces premières mesures à haute altitude n'ont pas permis de révéler la présence d'eau dans l'atmosphère de Mars. Ce qui ne voulait pas dire qu'il n'y en avait pas, mais que certainement sa quantité devait être très faible (il conclut que la teneur en eau de l'atmosphère martienne ne doit pas dépasser le centième de la nôtre), et que l'instrument utilisé lors de ce vol n'était pas assez sensible pour la détecter.

« J'ai donc décidé de continuer les expériences. Il fallait repousser les limites, et ce dans deux directions. Nous comprenions qu'il fallait un télescope capable de déceler un signal spectral encore plus faible, et aussi qu'il fallait monter encore plus haut dans l'atmosphère à l'aide d'un aérostat plus puissant ».

C'est ce qu'il fait lors de son vol du 22 avril 1959 décrit précédemment. Ce jour-là les observations sont consacrées à Vénus et la Lune, car la planète Mars n'est pas placée favorablement dans le ciel pour les observations. Cependant, ces observations lui permettent d'expérimenter et d'étalonner l'instrument final (basé sur le principe du filtre polarisant de Lyot [11], très monochromatique et très lumineux) éclairé par un télescope de 50 cm de diamètre et réglé pour isoler la forte bande à $1,4 \mu\text{m}$ de la vapeur d'eau. Elles lui permettent également de recueillir une donnée importante, la teneur en eau de la haute atmosphère terrestre, ainsi que l'intensité de la bande d'absorption spectrale de Vénus dégagée des effets de la vapeur d'eau terrestre [6].

Le résultat a également montré que l'instrument pourrait être utilisé en haute montagne, si les conditions sont favorables. En janvier 1963, le télescope est alors séparé de la nacelle, et transporté à la station de montagne du Jungfraujoch en Suisse à 3 700 m d'altitude. En effet,

un anticyclone s'est installé sur l'Europe, et une dépression sur la Finlande. En résultent un fort vent du nord, un air très sec et une température de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. La bande spectrale de l'eau n'est ainsi plus saturée par la vapeur d'eau de l'atmosphère terrestre, et laisse ainsi la possibilité à la vapeur d'eau d'une planète d'en accroître l'intensité.

Il écrit dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences en 1963 : « *Ces circonstances permettent de chercher la vapeur d'eau dans les atmosphères planétaires par simple comparaison photométrique des bandes telluriques entre l'astre et la lumière de comparaison données par le Soleil, la Lune ou certaines étoiles* » [12].

Il utilise, entre autres, la Lune comme étalon. Elle se situe, lors de ses observations, au voisinage immédiat de Mars et de Vénus.

Audouin Dollfus écrit également dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences en 1965 : « *L'appareil fut ensuite utilisé en haute montagne et permit pour la première fois, à la faveur des nuits exceptionnellement sèches rencontrées au Jungfrauoch en janvier 1963, de déceler la vapeur d'eau sur Vénus et sur Mars* » et « *Fait capital, de l'avis des biologistes, la quantité d'eau décelée est jugée suffisante pour autoriser le développement d'une forme de vie dans les conditions martiennes* » [13].

3. La suite de la carrière d'Audouin Dollfus

3.1. Sa contribution à la conquête de la Lune et de Mars

Le 4 octobre 1957 était intervenu le coup de tonnerre de *Sputnik 1*, les Soviétiques en orbite, le mouvement perpétuel réalisé, mais aussi le début de la course à l'espace, qui allait profondément modifier le cours de l'humanité.

Dès le 17 août 1958 l'US Air Force échoue avec *Pioneer 0* dans la première de trois tentatives de satellisation d'un orbiteur lunaire, avant que l'US Army ne tente un survol le 6 décembre avec *Pioneer III*. L'URSS, après trois échecs secrets, est la première à atteindre la deuxième vitesse cosmique et donc quitter la Terre, *Luna 1* ratant cependant l'impact sur la Lune le 4 janvier 1959.

Alors que les Etats-Unis multiplient les avancées, récupérant notamment pour la première fois un satellite, *Discoverer XIII* le 11 août 1960, après de nombreux échecs l'URSS lance le premier homme dans l'espace, Youri Gagarine le 12 avril 1961. Six semaines plus tard, John Fitzgerald Kennedy lance le 25 mai le programme le plus incroyable de l'histoire, *Apollo*, un homme sur la Lune avant la fin de la décennie.

Or s'il faut beaucoup pour passer de la première vitesse cosmique de satellisation (8 km/s) à la deuxième de libération de l'attraction terrestre (11 km/s), un petit supplément suffit pour aller plus loin. C'est donc aussi le début de la plus extraordinaire retombée scientifique de l'astronautique, une exploration *in-situ* de notre système solaire, une révolution sans précédent depuis l'invention de la lunette.

Le 14 décembre 1962, pour la première fois une sonde spatiale survole une planète, notre sœur jumelle, la mystérieuse Vénus entourée d'une épaisse couche nuageuse impénétrable : en fait un véritable enfer avec une température de $237\text{ }^{\circ}\text{C}$ en altitude, impliquant de probables températures d'environ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ et pression d'environ 100 atmosphères au sol ! Au point que certains pensent que *Mariner II* a été endommagée par son voyage de six mois dans l'inconnu milieu intersidéral, avant confirmation par *Mariner V*.

Devant l'ampleur de la tâche, une coopération internationale est une évidence, d'autant plus qu'elle avait commencé de longue date entre scientifiques : *International Geophysical Year* (IGY) (du 1er juillet 1956 au 31 décembre 1958), (*Committee On Space Research* (COSPAR) créé en 1958 à Paris. Là où précisément avait eu lieu dès 1950 le premier Congrès International d'Astronautique annuel, créé par le Français Alexandre Ananoff, à la Sorbonne, et qui déboucha sur la création lors du 2^e Congrès à Londres de l'*International Astronautical Federation* (IAF), basée à Paris.

Or Audouin Dollfus est bien connu au niveau international. Depuis la disparition prématurée de son mentor Bernard Lyot en 1952, il est le spécialiste mondial de l'analyse de la lumière polarisée réfléchiée : à partir d'observations au Pic du Midi. Dès le 8 février 1948, il découvre ainsi la présence d'eau et d'oxyde de fer sur Mars, résultat considérable qu'il présente lors de la soutenance de sa thèse en 1955, reproduction d'un échantillon compris [7]. Il montre ce dernier peu après aux Etats-Unis. Certaines sources mentionnent une controverse avec le célèbre astronome Gérard Kuiper, alors à l'Université de Chicago — dont le nom a été donné à la ceinture de corps célestes au-delà de Pluton dans le système solaire que la sonde *New Horizons/Pluto Kuiper Express* explore depuis 2019 — selon lequel le sol martien serait constitué de roches ignées brunâtres à grains fins, ce qui se révélera faux [14]. Kuiper connaissait d'ailleurs Lyot, et reçut la Médaille Janssen de la SAF en 1947.

Puis en 1956, Audouin Dollfus annonce, le premier, que le sol lunaire est un basalte pulvérisé en fine poussière. Là encore, il réalise un échantillon afin de corréliser ses mesures (voir Figure 7). Ainsi peut-il énoncer, dix ans avant le premier alunissage, que la Lune a un sol adéquat : sol porteur, meuble et granulaire, pas de fracassement sur un socle en granite, pas d'enfoncement dans une couche molle !

Dans ces conditions, Theodor von Karman, créateur le 16 août 1960 de l'*International Academy of Astronautics* (IAA) et son directeur, couplée à l'IAF, toutes deux basées à Paris, écrit à Audouin Dollfus le 29 décembre 1961 pour l'informer de son élection à l'Académie, en sa Section 1 (Basic Sciences). Inconnu du grand public, le congrès annuel IAF/IAA est pourtant unique par sa concentration de chefs d'agences spatiales, décideurs et experts du monde entier, tels à l'époque Robert Esnault-Pelterie, Hermann Oberth, Wernher Von Braun, William Pickering (*Jet Propulsion Laboratory JPL*), ...

Après la sélection le 11 juillet 1962 de la technique du Lunar Orbital Rendez-vous (LOR) pour le programme *Apollo*, et l'attribution du contrat correspondant pour le *Lunar Excursion Module* (rebaptisé *Lunar Module LM* dès 1966) à Grumman le 7 novembre suivant, il est temps de se préoccuper de la nature supposée du sol lunaire. La NASA crée donc en septembre 1962 un *Joint Working Group*, dirigé par Eugene M Shoemaker, de l'US *Geological Survey Astrogeology Branch*.

C'est le 28 mai 1964 que le programme lunaire habité entre en scène, avec la mise en orbite par une *Saturn I d'Apollo 1*, une maquette du *Command and Service Module CSM*. Le 31 juillet 1964 la première de trois sondes *Ranger* du célèbre JPL s'écrase sur la Lune après avoir transmis jusqu'à la dernière seconde 4 316 photos centimétriques de la surface, dont trois des six objectifs sont français (Angénieux). Puis le 2 juin 1966 la première de cinq sondes Hughes *Surveyor* réalise le tout premier alunissage en douceur, confirmant bien la présence d'une fine couche de poussière. Enfin, le 14 août 1966 la première de cinq sondes Boeing *Lunar Orbiter* débute la procédure de sélection des futurs sites d'alunissage *Apollo*.

A cette fin, suite à la recommandation de *Bellcom* société d'ingénierie système créée en 1962 par AT&T à la demande de la NASA, pour vérifier différents aspects du programme *Apollo*, George Mueller, directeur des vols habités de la NASA, avait créé en juillet 1965 un *Apollo Site Selection Board ASSB* [15]. Dirigé par le général de l'US Air Force Samuel Phillips, directeur du programme *Apollo*, il comprenait des membres de l'*Office of Space Science & Applications* (Oran Nicks et Lee Scherer), des trois centres de vols habités (John Claybourne du *Kennedy Space Center KSC*, William Stoney du *Manned Spacecraft Center MSC*, Ernst Stuhlinger du *Marshall Space Flight Center MSFC*), du *Langley Research Center* (Israel Taback, Lunar Orbiter) et du *Surveyor/Lunar Orbiter Utilization Committee* (Everett Christensen, Edgar Cortright, Lee Stoney). Sa première réunion a lieu le 16 mars 1966. D'autres spécialistes sont naturellement consultés, tels Harold Urey, et à l'international Audouin Dollfus.

Egalement grand vulgarisateur, Audouin Dollfus raconte qu'il se promène dans les congrès scientifiques avec un petit tube contenant de la poudre lunaire, certifiée conforme par le polari-

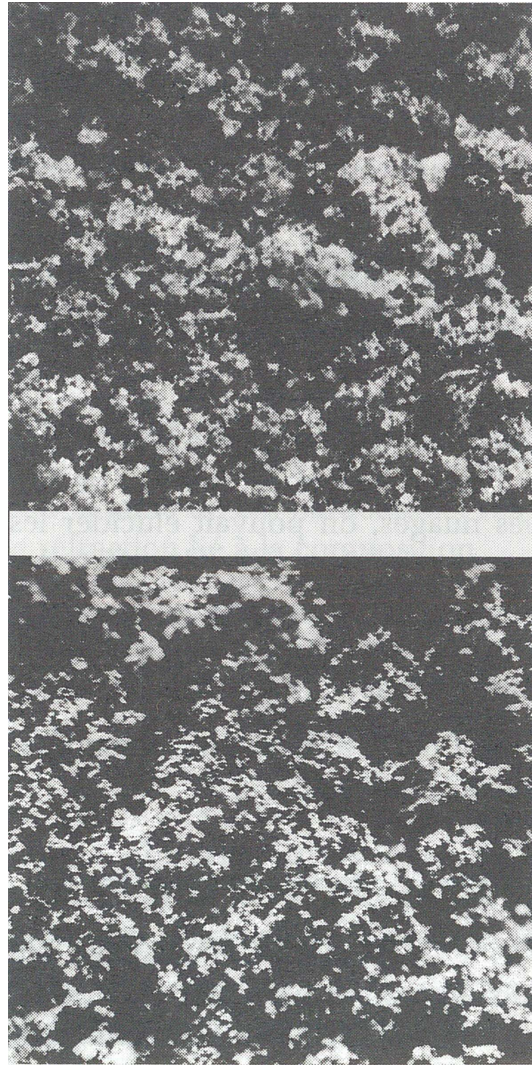


FIGURE 7. Prédiction polarimétrique de 1956 (en haut) et échantillon Apollo 11 de 1969 (en bas) [7].

mètre ! Et de rajouter que cela n'a pas échappé aux ingénieurs chargés d'étudier les atterrisseurs lunaires. En l'occurrence non seulement les pieds du *Surveyor* et du *Lunar Module*, mais aussi les bottes des astronautes.

Après les remarquables réussites des alunissages d'Apollo 11 et 12 les 20 juillet et 19 novembre 1969, ce sont respectivement 22 kg et 34 kg d'échantillons lunaires qui sont rapportés, pour analyse dans le monde. Audouin Dollfus en est naturellement un des *Principal Investigators* (PI) jusqu'en 1995 (voir Figure 8). Non moins de 142 PI's se réunissent lors de la première *Lunar Science Conference* annuelle du 5 au 8 janvier 1970 à Houston, où il est l'une des vedettes, exhibant le témoin planimétrique et ses échantillons Apollo : il est impossible de les distinguer, même à la loupe ! Seuls microscope et microsonde permettent de les différencier (voir Figure 7).

Après que les Soviétiques ont à leur tour rapporté en automatique 326 g de sol lunaire avec les *Luna 16* (24 septembre 1970), 20 (25 février 1972) et 24 (23 août 1976), Audouin Dollfus



FIGURE 8. Diplôme NASA du 19 mars 1979 [Ariane Dollfus].

est bien sûr destinataire d'échantillons. D'autant plus qu'il y a depuis l'escadrille commune Normandie-Niemen de la guerre une forte amitié franco-soviétique, amplifiée au même moment par l'exceptionnelle première coopération spatiale Est/Ouest de l'histoire le 10 novembre 1970 avec *Luna 17* et le tout premier astromobile, *Lunokhod 1*, équipé d'un réflecteur laser cannois.

La polarimétrie est bien entendu applicable à tout le système solaire. En fait, dès 1955 il avait donc identifié que le sol de Mars était constitué de petits fragments d'oxyde de fer fortement hydratés déposés en une couche très lisse. Ce que confirmeront 21 ans plus tard les atterrisseurs *Viking* les 20 juillet et 3 septembre 1976.

Afin de préparer la conjonction inférieure de Mars en 1971, il constitue un groupe polarimétrie international de nationalités belge, britannique, française, grecque, japonaise et américaine. C'est le japonais Shiro Ebisawa qui le 11 juillet détecte une tache jaune qu'Audouin Dollfus identifie immédiatement comme une tempête, telle qu'il en avait déjà observée une dès 1956. Quatre mois plus tard le premier orbiteur martien, *Mariner 9*, se satellise le 13 novembre avec plein succès. C'est en fait la plus grosse tempête jamais observée, et la NASA est stupéfaite (selon les propres mots du modeste Audouin Dollfus) de découvrir alors les travaux d'Audouin Dollfus.

Une visite en 1966 à l'Observatoire d'Abastumani en Géorgie, où il discute avec Leonid Ksanfomaliti, jeune ingénieur très au fait de cette technique, va être lourde de conséquences. Quelques années plus tard, s'apprêtant à s'endormir à l'issue d'une journée de travail scientifique en URSS, il est appelé à son hôtel par Ksanfomaliti, qui désire le voir de suite ! Ce dernier lui explique alors qu'il fait à présent partie du nouvel Institut de Recherche Spatiale IKI (*Institut Kosmicheskoy Isledovaniy*) de Moscou, et que la présence d'un polarimètre à bord d'une sonde orbitale martienne serait très liée au succès de la mission. Vu la réussite des deux *Lunokhod*, l'affaire est promptement menée, le polarimètre réalisé en coopération en URSS avec plusieurs voyages à Moscou, puis envoyé à Meudon pour étalonnage avant réexpédition à l'Est, où deux exemplaires de série sont fabriqués. C'est seulement à la mise en orbite de *Mars 5* le 12 février 1974 qu'Audouin Dollfus a confirmation de la présence des deux polarimètres VPM-73 à bord.

Ainsi, dix ans avant le premier alunissage, c'est un français, Audouin Dollfus, qui prédit dès

1956 avec une étonnante précision la nature du sol de la Lune, telle que vérifiée par les sondes *Surveyor* et *Luna*, et les quelque 8 t des LM *Apollo*.

Spécialiste mondial de la polarimétrie, inventé par son mentor français Bernard Lyot, il identifie dès 1955 eau et oxyde de fer pour le sol de Mars 21 ans avant les *Viking*, et en 1956 les tempêtes martiennes 15 ans avant *Mariner 9*!

3.2. *Autres apports d'Audouin Dollfus à l'astronomie*

Audouin Dollfus a travaillé dès 1946 à l'Observatoire de Meudon, et il observe très vite au Pic du Midi où il met au point des techniques nouvelles de polarisation de la lumière et de spectroscopie afin d'étudier la nature des sols et atmosphères planétaires. Il fut l'élève de Bernard Lyot, inventeur du coronographe.

3.2.1. *Le soleil*

Grâce au coronographe, et à de nouveaux développements qui ont permis d'en élargir les possibilités, Audouin Dollfus effectue de nombreuses observations au Pic du Midi en 1960, lui permettant de déterminer avec précision la structure thermique de la couronne solaire. De jeunes chercheurs s'associent à ces recherches, dont Jean-Louis Leroy qui deviendra Directeur scientifique du Pic du Midi et Eric Maurice qui deviendra le responsable de l'un des grands télescopes de l'Observatoire européen austral, au Chili. Audouin Dollfus poursuit l'étude de la couronne solaire en associant les ballons au télescope. Entre 1960 et 1973, d'abord seul puis en collaboration avec le CNES, une série de vols (« non habités ») jusqu'à 32 000 m d'altitude ont pu être réalisés et ont ainsi permis d'obtenir les premières photographies des grands jets de la couronne solaire, grâce à l'utilisation du coronographe à occultation externe développé par Audouin Dollfus, mais également développé aux Etats-Unis, technique plus tard utilisée dans de nombreux satellites d'observation solaire.

Déjà en 1957, le 1^{er} avril, Audouin Dollfus avait étudié le Soleil, et avait pris, à bord d'un ballon à 6 000 m d'altitude, la première photographie astronomique du Soleil au télescope réalisée en dehors de la surface terrestre. Les éléments granulaires à la surface du soleil étaient observés : des cellules d'un diamètre inférieur à 1 500 km. L'uniformité d'aspect ainsi observé décidait pour la convection (et non la turbulence) dans les phénomènes se déroulant sous la surface. La finesse des clichés a pu être obtenue grâce à l'observation en altitude, loin du sol, permettant de s'affranchir de la turbulence atmosphérique. De nos jours, l'observation depuis l'espace grâce aux satellites, ou l'optique adaptative pour les observations au sol, permettent de s'affranchir de ces effets.

3.2.2. « *Janus* », le dixième satellite de Saturne

Les anneaux de Saturne présentent un certain nombre de divisions. Par exemple, la division de Cassini sépare l'anneau A externe, de l'anneau B interne et plus large. Les observations à la lunette du Pic du Midi montrent qu'il existe bien d'autres divisions.

La structure des anneaux est gouvernée par les interactions gravitationnelles entre les petits blocs de glace dont ils sont formés, et la planète Saturne et ses satellites. Audouin Dollfus a observé, dans les anneaux de Saturne, de nombreuses bandes sombres et fines (les divisions). Il essaye alors d'expliquer leur présence grâce aux interactions gravitationnelles et aux perturbations créées par les satellites connus de Saturne. Mais la théorie ne colle pas aux observations. Une explication de cet écart : la présence d'un nouveau satellite non encore observé, proche du bord extérieur de l'anneau A.

Il profite alors, en 1966, d'une configuration de la Terre qui la place exactement dans le plan des anneaux de Saturne. Ils deviennent alors quasiment invisibles. Grâce à un instrument qu'il

met au point et basé sur le principe de la coronarographie, Audouin Dollfus peut ainsi observer l'environnement des anneaux en occultant la forte luminosité de Saturne. Un petit point apparaît sur les clichés, qui se déplace d'un cliché à l'autre et situé à l'endroit prédit. Il vient de découvrir le dixième satellite de Saturne, « Janus ». Les précédents satellites avaient été découverts par Christiaan Huygens (*Titan* — 1655), Jean-Dominique Cassini (*Japet* — 1671, *Rhea* — 1672, *Téthys et Dioné* — 1684), William Herschel (*Mimas et Encelade* — 1789), William Bond (*Hyperion* — 1849), William Pickering (*Phoébé* — 1898).

3.2.3. L'anneau E de Saturne

En 1966, des clichés américains mettent en évidence un filin de lumière qui se prolonge au-delà de la limite des anneaux, indiquant la possible présence de matière. Audouin Dollfus décide d'aller plus loin et utilise l'instrument qu'il a mis au point et qui lui a permis de découvrir le satellite « Janus ». Il réussit alors à observer, dans le télescope du Pic du Midi le 1^{er} novembre 1979 le nouvel anneau, qui se dénommera « anneau E ». Ses observations ont été confirmées entre autres par les sondes spatiales *Voyager*.

3.2.4. La polarimétrie

Audouin Dollfus la décrit ainsi : « *Il s'agit en effet de quelque chose de très curieux. Quand la lumière éclaire un objet, elle subit tout un ensemble de réflexions, de diffusions, de réfractions, d'absorptions, avant d'être renvoyée au loin. Elle garde alors les traces de ce traitement. On trouve en elle un réarrangement des vibrations : il s'agit de la polarisation. On peut analyser cette polarisation. Chaque surface polarise la lumière à sa manière, ce qui permet de reconstituer, à distance, l'état de la surface éclairée* » [16].

Il en fait sa spécialité pour l'étude des planètes, et l'a utilisé pour analyser avec un télescope la polarisation de la lumière à la surface des planètes afin d'en déduire l'aspect du sol comme s'il avait un microscope. L'idée vient de son maître Bernard Lyot, précurseur de la polarimétrie astronomique qui forme Audouin Dollfus à cette technique prometteuse dès 1946.

Grâce à cette technique, il était possible, à distance, d'analyser les planètes, leurs sols, leurs nuages, leur atmosphère.

Les travaux se sont poursuivis avec l'étude du sol de Mercure, des nuages de Vénus, les anneaux de Saturne mais aussi des comètes, permettant de caractériser les poussières cométaires.

Quant à la planète Mars, il décrit : « *...la planète Mars est un astre très vivant. Outre l'identification de son sol, de son givre et de ses nuages, on pouvait élucider les caprices de son atmosphère, suivre les effets des saisons, les changements dans les configurations observées. Nous devons donc monter une surveillance polarimétrique* » [16]. L'analyse polarimétrique a ainsi permis de caractériser la surface mais également ses nuages.

4. Conclusion

Nous concluons en rappelant que ses travaux valurent à Audouin Dollfus d'être membre de la New York Academy of Sciences du Board of Trustees de l'International Academy of Astronautics et du Conseil d'Administration de l'Aéro-Club de France. L'astéroïde 2451 fut baptisé de son nom. Il reçut en 1972 le Prix International d'Astronautique Galabert, en 1988 le Grand Prix de l'Académie des Sciences, en 1991 le Diplôme Tissandier remis par la Fédération Aéronautique Internationale et en 1993 la Médaille d'or Janssen remise par la Société Astronomique de France. Enfin en 2009, il fut reçu chevalier dans l'ordre de la Légion d'honneur par l'astronaute et ministre Claudie Haigneré.

Conflit d'intérêt

Les auteurs n'ont aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement Ariane Dollfus, fille d'Audouin Dollfus pour la fourniture des photos illustrant ce texte.

Références

- [1] R. Feuilloy, *Les dirigeables de la Marine française (1915–1937)*, ARDHAN, Paris, 2008.
- [2] L. Robineau, ANAE, *Les Français du ciel*, Le Cherche Midi, Paris, 2005.
- [3] J. Tensi, « Audouin Dollfus, l'homme qui voulait s'approcher des étoiles », 2011, interview du 17 mai 2010, film Université de Poitiers, ACEBD et 3AF.
- [4] J. C. Falque, « DOLLFUS AUDOUIN (1924–2010) », Encyclopædia Universalis [en ligne]. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/audouin-dollfus/>.
- [5] Bibliographical note (International Academy of Astronautics, 31 mai 1998).
- [6] J. Piccard, « Egg shell landing » (Time 16 août 1937).
- [7] A. Dollfus, *50 ans d'Astronomie - Comprendre l'Univers!*, EDP Sciences, Les Ulis, 1998.
- [8] H. Gérard, « L'exploit du 22 avril 1959 », <https://www.hydroretro.net/etudegh/lexploitdu22avril1959.pdf>.
- [9] D. Rakotoarijimy, E. Kaftan, site de l'Observatoire de Paris, <https://www.obspm.fr/22-avril-1959-l-ascension-en-ballon-d-audouin-dollfus.html>.
- [10] P. Léna, communication privée.
- [11] B. Lyot, « Le filtre monochromatique polarisant et ses applications en physique solaire », *Annales d'Astrophysique* 7 (1944), p. 31.
- [12] « Mesure de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère de la planète Mars par simple comparaison photométrique des bandes telluriques », note d'Audouin Dollfus présentée par André Allemand le 1er avril 1963, t. 256, C. R. Acad. Sci., Paris, 1963.
- [13] « Analyse des mesures de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère de la planète Mars » note d'Audouin Dollfus présentée par Jean Coulomb, 18 août 1965, t. 261, C. R. Acad. Sci., Paris, 1965.
- [14] <https://www.astrofiles.net/astronomie-audouin-dollfus>.
- [15] W. David Compton, *Where no man has gone before — A history of Apollo Lunar Exploration Missions*, NASA Special Publication-4214, NASA, Etats-Unis, 1989.
- [16] A. Dollfus, *Les autres Mondes*, Belin, Paris, 2008.



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

De la loi de la gravitation universelle à MICROSCOPE

From the universal law of gravitation to MICROSCOPE

Manuel Rodrigues[®] ^a

^a Science Co-Investigator of MICROSCOPE, Head of research unit in ONERA, France

Courriel: manuel.rodrigues@onera.fr

Résumé. Depuis Galilée, l'universalité de la chute libre des corps questionne les physiciens : la chute s'effectue dans le vide indépendamment de la masse et de la composition. Avec la théorie de la relativité générale, Einstein révolutionne la compréhension de la gravitation. Le principe d'Équivalence est alors posé par Einstein comme principe fondateur de la relativité générale avec pour première conséquence : l'universalité de la chute libre. Ce principe testé de plus en plus précisément depuis Galilée vient de franchir une nouvelle étape grâce à la mission spatiale MICROSCOPE qui a amélioré la précision du test de deux ordres de grandeur à $2,7 \times 10^{-15}$.

Abstract. Since Galileo, the universality of the free fall of bodies has questioned physicists: the fall in the vacuum is independent of mass and composition. With the theory of general relativity, Einstein revolutionized the understanding of gravitation. The principle of Equivalence is then posed by Einstein as the founding principle of general relativity with the first consequence: the universality of free fall. This principle, tested more and more accurately since Galileo, has just taken a new step thanks to the MICROSCOPE space mission, which has improved the precision of the test by two orders of magnitude to 2.7×10^{-15} .

Mots-clés. Gravitation, Principe d'équivalence, Accéléromètre, Relativité générale, Compensation de traînée, Senseur inertielle.

Keywords. Gravitation, Equivalence principle, Accelerometer, General relativity, Drag-free, Inertial sensing.

Note. Cet article fait suite au colloque organisé par l'Académie des sciences et Alumni-ONERA le 9 octobre 2020 à Hendaye, en hommage à Antoine d'Abbadie. Il reprend et complète une publication antérieure, en partie reproduite ici avec l'autorisation de l'association Alumni-ONERA [1].

Note. This article follows up on the symposium organised by the Académie des Sciences and Alumni-ONERA on 9 October 2020 in Hendaye, in tribute to Antoine d'Abbadie. It takes up and completes an earlier publication, partly reproduced here with the permission of the Alumni-ONERA association [1].

Published online: 8 August 2023, Issue date: 15 September 2023

1. Un peu d'histoire

En 1638, Galilée décrit la première loi mathématique de la chute libre des corps dans son *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* posant ainsi les fondements d'une

physique décrite par les mathématiques. Il observe alors que les corps chutent indépendamment de leur masse ou de leur composition.

En 1687, Newton publie son ouvrage *Philosophiæ naturalis principia mathematica* dans lequel il décrit les lois de gravitation universelle. C'est une théorie qui explique avec précision le mouvement des planètes du système solaire, des satellites, des objets lancés depuis le sol terrestre ou des pommes qui tombent. Avec précision? Presque, car une énigme va demeurer au sujet de Mercure et ce jusqu'au début du XX^e siècle.

En effet, le périhélie (le point de l'orbite le plus éloigné du soleil) de Mercure se décale à chaque révolution de 5599 arcsec (1,5553 degré). Hors la loi de Newton prévoit un décalage de 5554 arcsec. Cette avance du périhélie de Mercure est longtemps restée insoluble jusqu'à ce qu'Einstein ne propose en 1915 une description de l'univers totalement révolutionnaire et contre intuitive [2] : la loi de gravitation n'est qu'une manifestation de la structure géométrique de l'espace et du temps qui se déforme d'autant plus que l'on s'approche d'objets massiques. C'est le cas de Mercure à proximité du Soleil qui voit sa trajectoire infléchie par la courbure de l'espace-temps imposée par notre astre. Avec sa nouvelle théorie de la gravitation, une généralisation de la relativité restreinte, Einstein calcule que le périhélie devrait avoir un décalage de $5599,7 \pm 0,04$ arcsec par révolution, parfaitement en accord avec les observations. Une autre observation vient confirmer cette nouvelle théorie : sur l'île du Prince, au large de la Guinée, en 1919, Eddington confirme par l'expérience que la trajectoire des rayons lumineux d'étoiles lointaines est déviée par le Soleil comme le prédit la théorie de la Relativité Générale.

2. Le principe d'équivalence et la gravitation

C'est le départ d'un bouleversement retentissant dans le domaine de la physique. Cette théorie développée par Einstein prend racine dans un fait divers : la chute d'un ouvrier chutant d'un échafaudage avec ses outils. Einstein imagina alors par la pensée une expérience de physique dans un ascenseur en chute libre et prit conscience que la gravité « s'annule » par le mouvement accéléré. Il posa alors comme principe, l'équivalence entre mouvement accéléré et gravité : en d'autres termes l'universalité de la chute libre des corps, ou l'équivalence de la masse gravitationnelle et de la masse inertielle. Ce principe bien qu'observé depuis Galilée n'a jamais été expliqué, Einstein l'utilisa alors comme pierre fondatrice de sa théorie. Il sera testé par Bessel en 1830, puis par Eötvös en 1886 et par Dicke en 1963. Avec une précision de plus en plus grande, le test du principe d'équivalence (PE) passe un cap à partir des années 90 avec deux méthodes : (1) l'analyse de la trajectoire de la Lune par tir laser depuis la Terre dans son mouvement avec la Terre autour du Soleil : (2) l'utilisation d'un pendule de torsion dont on va analyser son angle ou ses oscillations en fonction du champ de gravité du Soleil ou de la Terre. En 2012, ces deux expériences approchent une sensibilité proche de 2×10^{-13} [3,4]. En 2018, l'amélioration des analyses de la trajectoire de la Lune permet d'atteindre 5×10^{-14} [5], et [6].

Cette course à la précision est motivée par la recherche du Graal en physique : la théorie unificatrice de toutes les interactions. En effet cette unification bute sur un paradoxe apparent : le modèle standard réunissant toutes les forces fondamentales (électromagnétique, forte et faible) semble incompatible avec la gravitation. Les tentatives de modification du modèle standard ou de la relativité générale pour élaborer une théorie unifiée conduisent à la violation du PE. Dans les années 2000, Damour évalue possible une violation à 10^{-14} avec un certain paramétrage de la théorie des cordes [7], une valeur encore bien en dessous de ce qui est détecté par les expériences de pendule de torsion ou tir laser Terre-Lune. Mais les niveaux de violation sont dans la plupart des autres théories bien en deçà. Cela démontre l'intérêt d'une expérience qui apporte un gain significatif de performance.

3. La mission MICROSCOPE

C'est dans ce contexte qu'en 1999, l'Observatoire de la Côte d'Azur et l'ONERA propose au CNES la mission MICROSCOPE : test du PE à bord d'un microsatellite de la filière MYRIADE [8]. Le satellite est lancé en avril 2016 et passivé en octobre 2018 pour amorcer sa longue désorbition qui devrait durer 25 ans. Le satellite comprend un seul instrument : un double accéléromètre différentiel, développé par l'ONERA expert mondial dans le domaine de la mesure précise de l'accélération dans l'espace.

Cette mission est le fruit d'une coopération internationale sous maîtrise d'œuvre du CNES qui a également fourni le lancement et assuré la gestion du segment sol. L'ESA a fourni les propulseurs, le DLR a financé le développement des masses d'épreuves des accéléromètres par le PTB et les travaux de l'équipe du laboratoire de microgravité ZARM à Brème où l'instrument a été testé en chute libre. L'ONERA en collaboration avec l'OCA a développé le centre de mission scientifique et les outils de traitement des données.

L'instrument est constitué de deux paires d'accéléromètres électrostatiques concentriques. Grâce à la compensation de traînée du satellite et au contrôle fin de l'attitude du satellite, la trajectoire de MICROSCOPE suit une « géodésique », c'est-à-dire qu'il est en chute libre permanente. L'expérience consiste à comparer les accélérations de deux masses tests concentriques dans leur mouvement de « chute libre ». On établit alors le paramètre d'Eötvös pour les masses 1 et 2 :

$$\delta(1,2) = \frac{a1 - a2}{\frac{1}{2}(a1 + a2)} = \frac{\frac{mg1}{m1} - \frac{mg2}{m2}}{\frac{1}{2}\left(\frac{mg1}{m1} + \frac{mg2}{m2}\right)}$$

représentant la différence d'accélération relative des deux masses ou la différence relative des ratios entre masse « grave » et masse « inerte » pour les deux masses.

La première paire d'accéléromètres comporte deux masses de matériaux identiques : un alliage de platine avec 10 % de rhodium ; c'est l'accéléromètre de référence, SUREF, pour lequel la différence d'accélération attendue est nulle (le paramètre d'Eötvös est nul). La seconde paire comporte deux masses de matériaux différents : alliage de platine pour la masse interne et alliage de titane (TA6V) pour la masse externe ; c'est l'accéléromètre, SUEP, avec lequel on souhaite vérifier le principe d'équivalence.

Les accéléromètres sont cylindriques et l'axe du cylindre est l'axe privilégié de mesure. Dans son mouvement orbital, le vecteur champ de gravité est projeté sur cet axe avec un taux de modulation égale à la fréquence orbitale pour un pointage inertiel du satellite. Lorsque le satellite est en rotation autour de l'axe normal à l'orbite, le taux de modulation augmente autorisant une fréquence plus élevée pour la mesure de l'accélération, dans une gamme de fréquence plus favorable à la performance de l'accéléromètre. Le satellite MICROSCOPE orbite en moyenne à 710 km d'altitude où l'intensité de gravité est de 7,9 m/s (Figure 1).

L'objectif de performance de la mission est de réaliser un test du PE avec une sensibilité de 10^{-15} , soit mesurer une différence d'accélération de $7,9 \times 10^{-15}$ m/s². De manière imagée, le ratio de 10^{-15} correspond à la variation de poids d'un supertanker de 500 000 tonnes quand une mouche drosophile de 0,5 mg se pose dessus.

4. Les résultats de la mission MICROSCOPE

Des premiers résultats sont publiés en décembre 2017 dans la prestigieuse revue *Physical Review Letters* et montrent déjà une amélioration de précision d'un ordre de grandeur du test principe d'équivalence : alors toujours valide à un niveau de $1,9 \times 10^{-14}$ [9]. Ces résultats reposaient sur le traitement de seulement une semaine de donnée (soit 7 % des données aujourd'hui disponibles).

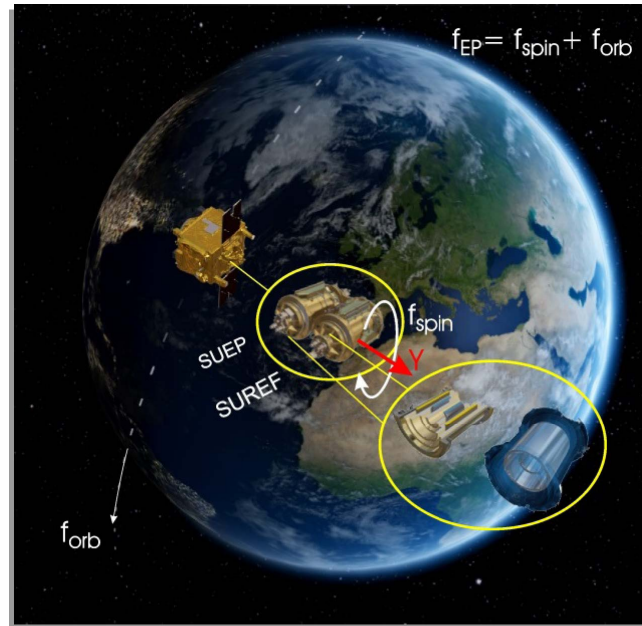


FIGURE 1. Visuel du satellite MICROSCOPE en orbite autour de la Terre avec un schéma des deux paires d'accéléromètres SUEP et SUREF. © CNES/Virtual-IT 2017+ Onera 2017.

Depuis la désorbite du satellite en octobre 2018, les équipes scientifiques ont concentré leur effort sur le traitement de l'ensemble des données du SUEP et du SUREF. Le satellite a voyagé sur près de 13 193 orbites dont 2500 orbites¹ entièrement dédiées à la science : 1600 orbites pour le SUEP et 800 orbites pour le SUREF. Pour améliorer encore la précision du test par rapport à la publication de 2017, il a été nécessaire de relever plusieurs défis.

Le premier défi a consisté à combiner les résultats de ces 2500 orbites répartis sur les deux paires d'accéléromètres et sur les 2 ans sous forme de segments de 20 à 120 orbites non contigus. La réduction des erreurs statistiques par l'accumulation de données est une technique couramment utilisée en métrologie. Dans le cas présent, le signal recherché est à une fréquence bien précise et en phase avec le signal de gravité terrestre. Donc, réaliser une moyenne du signal sur un nombre de période entière réduit par \sqrt{T} la contribution du bruit stochastique, T étant la durée totale de l'échantillon. Pour des échantillons fragmentés sur les deux ans sous formes de segments de 20 à 120 orbites, il faut utiliser le signal de gravité comme signal de référence pour réaliser l'équivalent d'une démodulation synchrone. Le signal de gravité varie à la fréquence orbitale modulo la fréquence de rotation du satellite ($f_{EP} = f_{orb} + f_{spin}$) et est numériquement reconstitué à partir d'un modèle établi lors des missions spatiales CHAMP, GRACE, GOCE et GRACE-FO, de la restitution de l'orbite par GPS (7 m de résolution sur la position du satellite est suffisant) et de la restitution d'attitude du satellite (obtenu par traitement des données du senseur d'étoile au micro-radian). Le traitement des segments non contigus a alors la même performance que s'ils étaient mis bout à bout.

Le second défi a consisté à évaluer les erreurs systématiques, à savoir les signaux perturbateurs qui pourraient être à la même fréquence f_{EP} que le signal de gravité et imiterait ainsi un signal de violation du PE. Les perturbations thermiques issues de l'albédo terrestre ont une signature comparable à la gravité terrestre puisqu'issue de la même source. Plus de 600 orbites, soit presque

¹Une orbite ~5949 secondes et 120 orbites ~8,26 jours.

un quart de la durée allouée à la science, ont été dédiées à la caractérisation de la sensibilité thermique de l'instrument d'une part et à la validation du modèle thermique du satellite d'autre part. Avec cette caractérisation précise en orbite, il a été possible de démontrer que les variations au cœur de l'instrument étaient inférieures à $0,1 \mu\text{K}$ à f_{EP} , valeurs bien inférieures aux premières estimations faites dans le PRL 2017. L'erreur systématique induite a pu alors être réduite d'un facteur 7.

Enfin le dernier défi a consisté à faire face aux craquements du satellite. Ces craquements sont dus aux variations thermoélastiques de la couverture thermique du satellite qui génère des micro-accélérations sous forme de pics brefs et inférieurs à la seconde. Ces micro-accélérations se répètent régulièrement en fonction de l'éclairement du Soleil et de la Terre sur les différentes faces du satellite créant des effets d'ombre et de lumière et donc de variations locales de température. Compte tenu du mouvement orbital du satellite, des occurrences de pics à la fréquence f_{EP} persistent. Même si en théorie, dans la mesure différentielle cette accélération aurait dû disparaître, dans la pratique, les défauts instrumentaux non étalonnables en vol projettent une partie de cette perturbation dans la mesure différentielle. Ce défi était d'autant plus difficile que le bruit haute fréquence de l'accéléromètre masquait en partie ces pics sur l'axe sensible qui était également l'axe où l'occurrence de pics était la plus faible. Un processus de détections des pics sur tous les axes de mesure de l'accéléromètre a été mis en œuvre sur tous les axes après filtrage de la donnée pour détecter un maximum d'occurrence d'évènements. Ensuite, ces données perturbées ont été supprimées et un traitement temporel appelé MECM (*Modified-Expectation-Conditional-Maximization*) a été développé et appliqué. MECM est une méthode de moindre carré évolué qui maximise la vraisemblance des données disponibles grâce à l'estimation du bruit des données manquantes et optimisation du bruit total. C'est une méthode itérative qui est également étudiée dans le projet de détection des ondes gravitationnelles LISA. Afin de valider ce processus, des signaux fictifs de différentes amplitudes ont été injectés dans toutes les données brutes avant traitement et retrouvées avec une précision de 0,1 % même pour les plus faibles.

Une fois ces défis relevés, les résultats finaux de la mission ont été validés et soumis dans les revues *Physical Review Letters* et *Classical Quantum Gravity* [10, 11]. Les résultats du traitement pour le SUEP donnent une différence relative entre masse grave et inertielle pour le Titane et le Platine de $[1,5 \pm 2,3(\text{stat}) \pm 1,5(\text{sys})] \times 10^{-15}$ à 1σ , c'est-à-dire que le signal à f_{EP} (et donc la violation du principe d'équivalence) a une probabilité de 68 % d'être inférieur à $2,7 \times 10^{-15}$ en incluant toutes les barres d'erreurs statistiques et systématiques.

Le SUREF a fourni une vérification de l'expérience en démontrant que le signal nul à f_{EP} attendu était bien évalué à $[0,0 \pm 1,1(\text{stat}) \pm 2,3(\text{sys})] \times 10^{-15}$ à 1σ .

5. Conclusion

La notion d'universalité de la chute libre remonte probablement à l'antiquité et s'est effectivement formalisée avec Galilée. Depuis, ce test qui traduit le principe d'équivalence n'a cessé d'être amélioré. Le 20^e siècle a apporté de nouvelles techniques et moyens métrologiques (tir laser Terre-Lune, balance de torsion...) qui ont amené la précision du test à des niveaux de quelques 10^{-13} au début des années 2000 (Figure 2).

L'expérience spatiale MICROSCOPE marque un saut dans la précision du test en l'amenant à 10^{-15} et conforte une nouvelle fois la théorie de la relativité générale d'Einstein élaboré il y a un siècle. Les théories alternatives ou les extensions de la relativité générale s'en trouvent plus contraintes aujourd'hui et le champ des possibles réduit. Il y a un consensus pour dire que la relativité générale est incomplète et que l'identification d'une violation du principe d'équivalence serait déterminante pour établir la présence d'une nouvelle interaction.

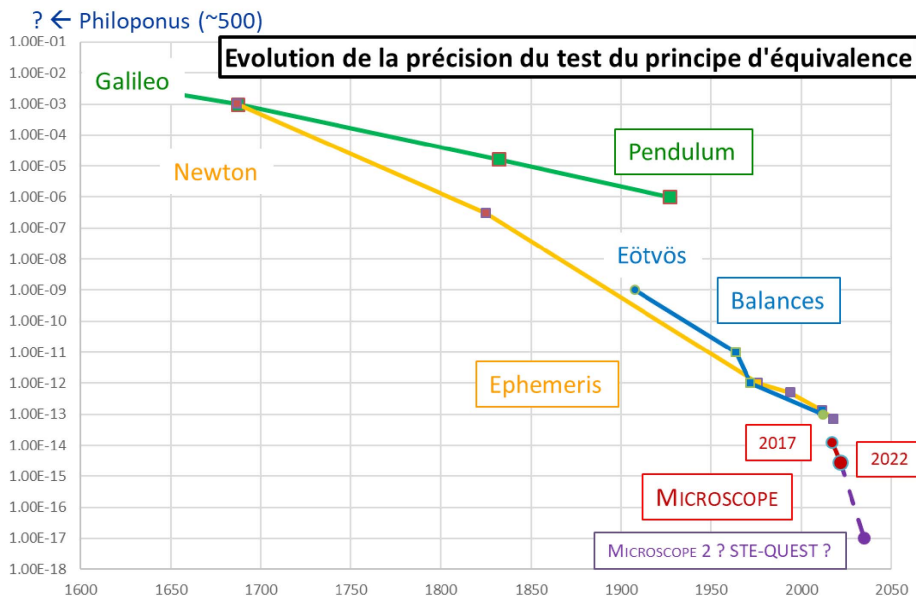


FIGURE 2. Graphique d'évolution de la précision du test du principe d'équivalence jusqu'à MICROSCOPE et perspective au-delà avec MICROSCOPE2 et STE-QUEST.

En cela les projets futurs visant 100 fois mieux que MICROSCOPE (Microscope2 et STE-QUEST) sont à même de fournir un autre saut de précision à l'horizon 2040.

Acronymes

MICROSCOPE : Micro Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Équivalence

CNES : Centre National d'Études Spatiales

OCA : Observatoire de la Côte d'Azur

ESA : Agence Spatial Européenne

DLR : Agence aérospatiale allemande

PTB : agence nationale de métrologie (Allemagne)

BIPM : Bureau International des Poids et Mesures

ZARM : Centre des technologies spatiales appliquées et de microgravité (Brème, Allemagne).

Conflit d'intérêt

L'auteur n'a aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Références

- [1] M. Rodrigues, « De la loi de la gravitation universelle à MICROSCOPE », *Trajectoire(s)* **1** (2022), p. 30-31.
- [2] A. Einstein, « Die grundlage der allgemeinen relativitätstheorie », *Ann. Phys. (Berlin)* **49** (1916), p. 252, English translation in A. Engel and E. Schucking, *The Collected Papers of Albert Einstein* (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1989), Vol. 6, doc. 30.
- [3] T. A. Wagner, S. Schlamminger, J. H. Gundlach, E. G. Adelberger, « Torsion-balance tests of the weak equivalence principle », *Class. Quantum Gravity* **29** (2012), article no. 184002.

- [4] J. G. Williams, S. G. Turyshev, D. H. Boggs, « Lunar laser ranging tests of the equivalence principle », *Class. Quantum Gravity* **29** (2012), article no. 184004.
- [5] V. Viswanathan, A. Fienga, O. Minazzoli, L. Bernus, J. Laskar, M. Gastineau, « The new lunar ephemeris INPOP17a and its application to fundamental physics », *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **476** (2018), n° 2, p. 1877-1888.
- [6] F. Hofmann, L. Biskupek, J. Müller, « Contributions to reference systems from Lunar Laser Ranging using the IfE analysis model », *J. Geod.* **92** (2018), n° 9, p. 975-987.
- [7] T. Damour, F. Piazza, G. Veneziano, « Runaway dilaton and equivalence principle violations », *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002), article no. 081601.
- [8] P. Touboul, M. Rodrigues, G. Métris, B. Taty, « MICROSCOPE, testing the equivalence principle in space », *C. R. Acad. Sci. Paris Ser. IV* **2** (2001), p. 1271-1286.
- [9] P. Touboul *et al.*, « MICROSCOPE mission : first results of a space test of the equivalence principle », *Phys. Rev. Lett.* **119** (2017), article no. 231101.
- [10] P. Touboul *et al.*, « Result of the MICROSCOPE weak equivalence principle test », *Class. Quantum Gravity* **39** (2022), article no. 204009.
- [11] P. Touboul *et al.*, « MICROSCOPE mission : final results of the test of the equivalence principle », *Phys. Rev. Lett.* **129** (2022), article no. 121102.



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

Optique adaptative et télescopes géants

Adaptive optics and extremely large telescopes

Thierry Fusco^{® a}

^a Département d'Optique et Techniques Associées, ONERA, Université Paris-Saclay, France

Courriel: thierry.fusco@onera.fr

Résumé. L'optique adaptative, installée sur tous les très grands télescopes astronomiques, permet de s'affranchir des limitations imposées par les perturbations de la turbulence atmosphérique. Cet article présente l'état de l'art du domaine pour les applications astronomiques et comment l'optique adaptative a révolutionné l'observation astronomique depuis le sol ces vingt dernières années en relevant d'innombrables défis scientifiques et techniques. Nous présentons enfin comment le concept va être appliqué, à l'horizon 2030 sur les futurs télescopes géants afin de répondre à certaines des questions les plus fondamentales de l'astronomie concernant la naissance de l'univers ou l'existence de la vie hors du système solaire.

Abstract. Adaptive optics (AO), now installed on all the astronomical ground-based telescopes, make it possible to overcome the angular resolution limitations imposed by atmospheric turbulence. This article presents the state-of-the-art in the field of astronomical applications, and shows how adaptive optics has revolutionized ground-based astronomical observation over the last twenty years, overcoming countless scientific and technical challenges. Finally, we present how the concept will be applied, by 2030, on future giant telescopes to answer some of astronomy's most fundamental questions concerning the birth of the universe or the existence of life outside the solar system.

Mots-clés. Astronomie, Télescope, Turbulence, Optique adaptative, Analyse de surface d'onde.

Keywords. Astronomy, Telescope, Turbulence, Adaptive optics, Wave-front sensing.

Published online: 8 August 2023, *Issue date*: 15 September 2023

1. Les télescopes astronomiques : une course au gigantisme depuis plus de 4 siècles

Depuis les premières observations de Galilée en 1609 avec la toute première lunette astronomique de quelques centimètres de diamètre, conçue par l'opticien néerlandais Hans Lippershey, la taille des instruments d'observation (lunettes utilisant des lentilles puis télescopes utilisant des miroirs) n'a cessé de croître pour atteindre aujourd'hui des diamètres de l'ordre de 10 mètres avec en projet, à l'horizon 2030, des télescopes géants atteignant des diamètres proches de 40 m. Les plus grands télescopes optiques d'aujourd'hui, construits vers le milieu des années 1990 font entre huit et dix mètres de diamètre. Avec les télescopes géants du futur, les ELTs (pour *Extremely Large Telescopes*), le diamètre va augmenter d'un facteur trois à quatre en moins de 25 ans.

Cette croissance importante (quasi logarithmique en fonction du temps) a deux principaux buts : augmenter le flux total collecté, réduisant par là même le bruit de photons qui représente la

limite fondamentale de toute observation et améliorer la résolution angulaire sur l'objet observé. Si le premier objectif est atteint (le nombre de photons collectés augmente avec le carré du diamètre du télescope), il n'en est, hélas, pas de même pour la résolution angulaire. En effet, la présence de l'atmosphère terrestre limite de manière importante cette résolution. Cette dernière ne dépasse jamais la résolution théorique d'un télescope de quelques dizaines de centimètres aux longueurs d'onde optique et ce, quel que soit le diamètre considéré [1]. L'onde optique émise par l'objet d'intérêt est perturbée par les fluctuations d'indice de réfraction de l'air dans l'atmosphère. Ces perturbations entraînent un élargissement de la tache image au foyer du télescope ce qui introduit, *in fine*, une perte sensible de performance. Ainsi la résolution obtenue, dépendant de la longueur d'onde d'observation, peut être plusieurs dizaines de fois inférieures à la résolution théorique attendue et constitue une limitation fondamentale à l'observation astronomique au sol.

2. L'optique adaptative, une révolution pour l'astronomie

En 1953, Horace Babcock [2] propose une technique, appelée Optique Adaptative (OA), pour compenser partiellement cet effet en temps réel. Tout d'abord réservée au domaine militaire (en particulier pour la focalisation de faisceau Laser), il aura fallu attendre plus de 35 ans pour que cette idée soit mise en pratique en astronomie, sous l'impulsion de Pierre Léna à l'Observatoire de Paris et Gérard Rousset à l'ONERA sur le télescope de 1,52 m de l'Observatoire de Haute Provence puis sur celui de 3,6 m de l'*European Southern Observatory* (ESO) à la Silla (Chili) [3].

Aujourd'hui, tous les grands télescopes au monde, de la classe des 8–10 m de diamètre, sont équipés d'OA. Dans ces systèmes temps réels, qui fonctionnent en boucle fermée à l'aide d'une étoile appelée « étoile guide », l'onde réfléchie sur le miroir déformable est envoyée à un analyseur de surface d'onde (ASO). Les aberrations résiduelles mesurées par l'ASO sont utilisées pour contrôler le miroir déformable placé généralement dans un plan pupillaire. L'OA est, sans aucun doute, LA solution pour l'observation astronomique à haute résolution depuis le sol et demeure un complément indispensable aux observatoires spatiaux (Hubble, *James Webb Space Telescope* ou JWST, etc.). Tous les nouveaux projets de télescopes incluent désormais l'OA dès les tout premiers stades de leur conception, certains comme le futur *European-Extremely Large Telescope* (ELT) de 39 m de diamètre de ESO intègrent l'OA dans le télescope lui-même en amont des instruments scientifiques.

Ainsi, depuis plus de trente ans, l'OA trouve dans l'astronomie depuis le sol aux longueurs d'onde visibles et infrarouges un domaine applicatif idéal, avec des retombées astronomiques et astrophysiques importantes, comme les mesures ultra-précises d'orbites d'étoiles proches pour étudier les caractéristiques physiques du trou noir central de notre Galaxie (prix Nobel de physique 2020¹) ou encore la détection directe et la caractérisation spectrale de planètes extrasolaires.² Une revue de l'Optique Adaptative pour l'Astronomie pourra être trouvée dans [4].

3. SPHERE-SAXO, le système d'OA pour l'astronomie le plus performant au monde

Après le succès de NAOS [5], la première OA généraliste du VLT (*Very Large Telescope*), qui a permis une première démocratisation du concept pour l'astronomie avec, à son actif, un rôle clé dans des découvertes majeures comme la toute première image d'une planète extrasolaire ou encore la mesure précise de la masse du trou noir centrale de notre Galaxie, la seconde

¹<https://www.defense.gouv.fr/english/actualites/articles/un-instrument-d-optique-concu-par-l-onera-au-coeur-des-observations-d-un-des-laureats-du-prix-nobel-de-physique-2020>.

²<https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/laureats-du-grand-prix-scientifique-de-la-fondation-charles-defforey>.

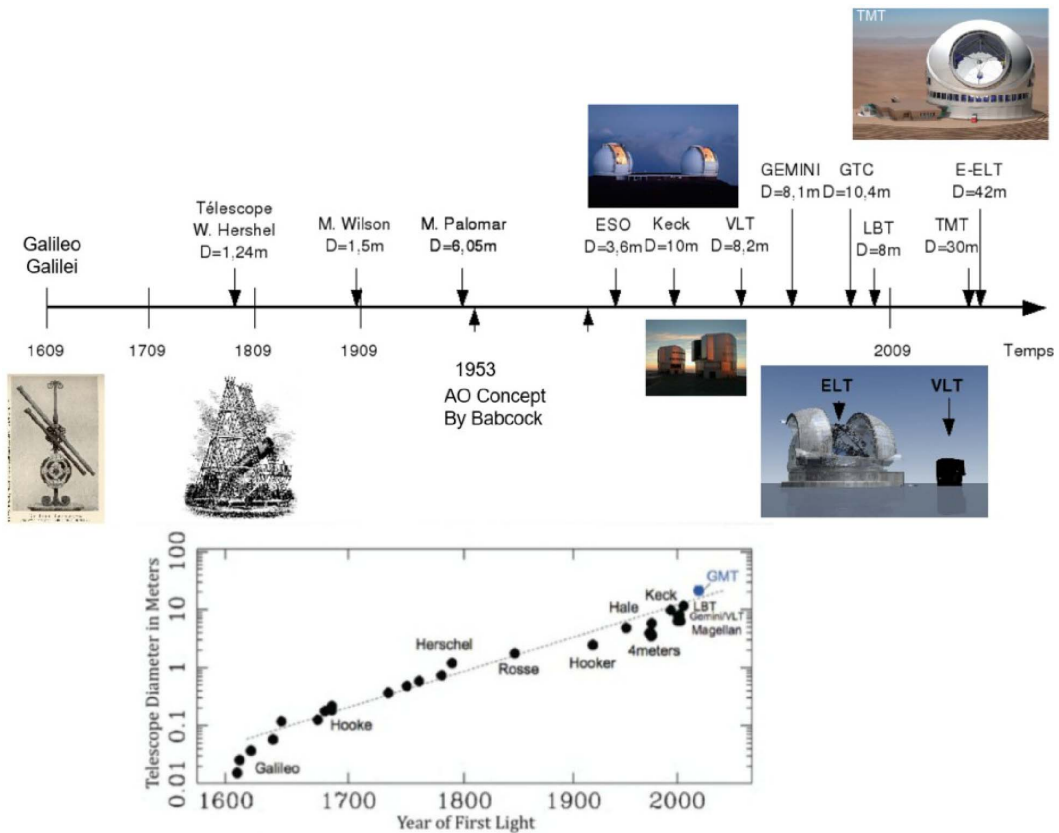


FIGURE 1. Evolution du diamètre des télescopes depuis les premières observations de Galilée.

génération d'instruments assistés par OA a eu pour ambition de repousser les limites de qualités des images et de leur contraste. Ainsi le 4 mai 2014, après plus de 10 ans de développements menés conjointement entre les laboratoires CNRS (observatoire de Grenoble, Marseille et Paris), l'ONERA et des partenaires européens, allemands (Max Planck Institute), italiens (INAF), suisses (ETH Zurich) et coordonnés par l'ESO, l'instrument SPHERE (*Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch*) pour le VLT a vu le jour. Dédié à la recherche et la caractérisation de planètes extrasolaires SPHERE [6] et son système d'OA (dit extrême) SAXO [7, 8] intègre alors les innovations conceptuelles et technologiques les plus avancées dans le domaine (voir Figures 1 à 3). Avec sa correction quasi parfaite des effets de la turbulence permettant d'atteindre la limite de diffraction d'un télescope de 8 m jusqu'aux longueurs d'onde visibles (soit moins de 20 millisecondes d'arc équivalent à 90 nanoradians), SPHERE-SAXO est alors sans nul doute le système d'OA le plus performant au monde. Avec ce type de système, il est possible de détecter un objet (idéalement une planète) très faible, proche d'une étoile brillante (typiquement un rapport de flux d'un million pour une séparation angulaire de l'ordre de quelques dixièmes de seconde d'arc). A titre de comparaison cela revient à observer un phare à Marseille depuis Paris et chercher à distinguer une bougie située à quelques dizaines de centimètres de ce phare.

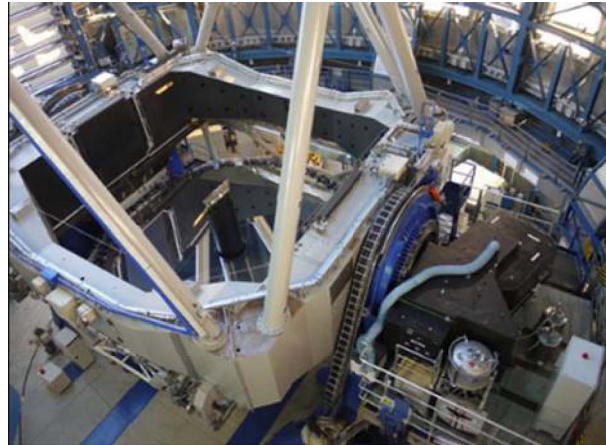


FIGURE 2. L'instrument SPHERE installé au foyer Nasmyth du VLT.

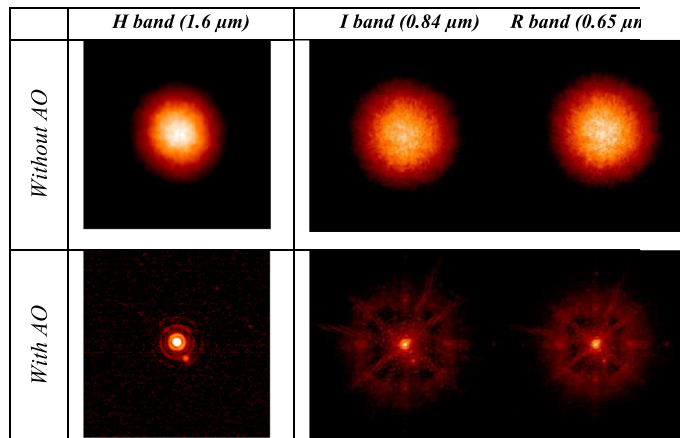


FIGURE 3. Les performances de SPHERE obtenues sur le ciel du proche IR (bande H) au visible (bande R). La limite de diffraction du télescope est atteinte dans tous les cas.

Les ingrédients clés pour permettre un tel exploit sont :

- L'analyse du front d'onde : les approches d'analyse de front d'onde conventionnelles, telles que mises en œuvre sur NAOS, par exemple, ne fonctionnent pas assez bien pour répondre aux exigences SPHERE en termes de précision et de sensibilité ultimes. Il a donc fallu proposer des modifications de différents concepts (notamment du Shack-Hartmann) afin d'améliorer les performances ultimes et de gagner l'ordre de grandeur nécessaire pour atteindre les spécifications imposées par l'imagerie à haute dynamique [9].
- Le contrôle : prise en compte et correction des vibrations du télescope [10].
- La calibration du système : pré-compensation des aberrations non vues par le système AO, entre autres) [11].

Depuis son ouverture à la communauté en 2015, SPHERE a permis une production scientifique d'ampleur avec plus de 200 publications dans des revues prestigieuses (Nature, A&A, MNRAS etc.).

L'expérience unique de SPHERE-SAXO a permis d'identifier les nouveaux défis et les nouvelles voies de développement pour les futurs instruments d'imagerie et de caractérisation des planètes extrasolaires. En particulier, elle a permis de lancer de nouvelles recherches concernant l'analyse de surfaces d'onde pour développer de nouveaux dispositifs ultrasensibles (domaine de très faible nombre de photons) et ultra précis (précision nanométrique) [12].³

Pousser les recherches dans les domaines de l'OA, combiner des concepts optiques innovants avec des techniques de détection et de contrôle de plus en plus sophistiquées, le tout étant lié et optimisé avec les approches les plus avancées d'intelligence artificielle et d'apprentissage machine profond nous permettra de gagner les 5 ordres de grandeur nécessaires à la détection d'exo-terres à l'horizon 2035 (avec la 2^{ème} génération d'instruments ELT, voir ci-dessous).

4. Les nouveaux télescopes géants : nouveaux défis, nouvelles solutions

La prochaine décennie verra l'avènement des télescopes géants. Avec un diamètre pouvant aller jusqu'à 39 m pour le télescope européen (ELT),⁴ ces télescopes [13, 14], ayant une surface collectrice près de 13 fois supérieure⁵ à la génération actuelle, vont révolutionner l'astronomie au sol. L'Europe a acquis ses galons en construisant les meilleurs télescopes optiques du moment : les quatre télescopes de huit mètres de diamètre du VLT installé dans le désert d'Atacama au Chili. Elle pourrait maintenir sa position de leader grâce à l'ELT, actuellement en construction à quelques dizaines de kilomètres seulement du VLT. Ce dernier près de deux fois plus grand en surface que les projets concurrents américains, devrait observer ses premiers photons avant la fin de la décennie. Ce projet est porté par l'ESO qui opère le VLT pour la communauté des astronomes de ses seize états membres. L'ELT permettra des progrès considérables et décisifs sur de nombreuses questions astrophysiques touchant aux origines de la vie, des planètes, des étoiles, des galaxies et de l'Univers dans son ensemble, en permettant d'investiguer en détail les atmosphères des planètes extrasolaires, de détecter d'éventuelles petites planètes rocheuses comparables à la Terre, de caractériser les premières galaxies aux confins de l'Univers et de comprendre comment ces galaxies ont évolué chimiquement et dynamiquement jusqu'à former celles que nous connaissons aujourd'hui... Mais l'ELT s'attaquera également à des questions de physique fondamentale comme la vitesse d'éloignement des galaxies les unes par rapport aux autres, la potentielle variation des constantes de la physique au cours des âges cosmiques, les lois de la physique autour du trou noir de notre galaxie et des trous noirs super massifs présents dans de nombreuses galaxies...

La diversité des thèmes astrophysiques et des besoins d'observation associés fait de l'OA un élément indispensable qui se situe maintenant au cœur même de ces télescopes (voir Figure 4). Au-delà de la correction de la turbulence atmosphérique elle-même, le nouveau défi à relever sera la capacité à gérer les défauts introduits par le télescope lui-même. Le dôme, d'une hauteur de 74 m, aura une base circulaire au sol de 89 m de diamètre, soit une surface équivalente à celle d'un terrain de foot, pour une masse totale de 5 000 tonnes, le tout rempli de structures qui généreront leur propre turbulence locale. Le miroir primaire sera composé 798 segments hexagonaux de 1,4 m de diamètre qu'il faudra positionner les uns par rapport aux autres avec des précisions sub-micrométriques. L'ELT intègre un miroir secondaire convexe de plus de 6 m de diamètre et un miroir déformable de 4,2 m de diamètre composé de près de 5 000 actionneurs fonctionnant à plus d'un kilohertz. La combinaison de la taille titanesque des optiques et des besoins extrêmes en termes de précision (nanométrique) fait de l'optique adaptative pour les ELT

³Voir <https://anr-wolf.com/>.

⁴Ses concurrents américains GMT et TMT faisant respectivement 24 et 30 m de diamètre.

⁵L'ELT collectera 100 millions de fois plus de lumière qu'un œil humain et 256 fois plus que le télescope spatial Hubble et 35 fois celle du JWST.

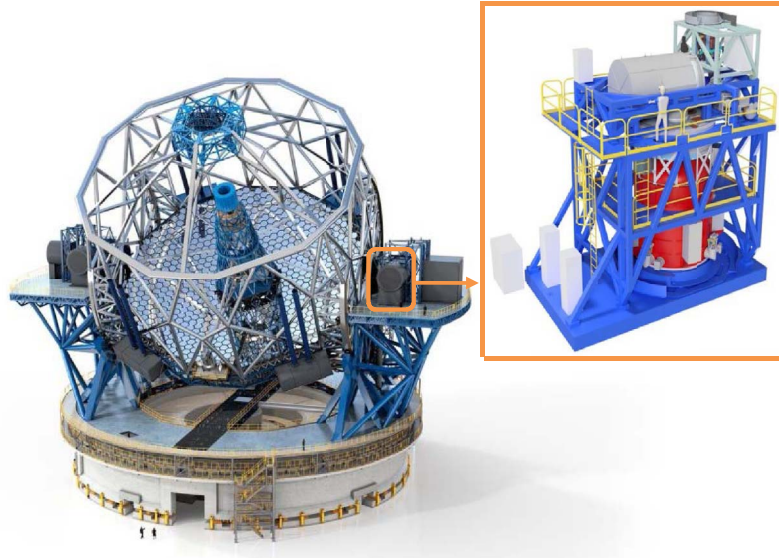


FIGURE 4. (Gauche) l'ELT : un Dôme de 74 m de haut, une base de 89 m de diamètre, 5 000 tonnes, un miroir primaire de 39 m de diamètre composé de 798 segments hexagonaux de 1.4 m positionnés avec une précision sub-micrométrique. (Droite) L'instrument HARMONI $10 \times 5 \times 8 \text{ m}^3$, 35 tonnes. Spectro-Imageur de première lumière de l'ELT. Instrument à haute résolution spatiale et spectrale. Il intègre 2 systèmes d'OA (dont un tomographique Laser fonctionnant avec 6 étoiles artificielles) et un imageur hyper-spectral fonctionnant dans le visible et dans l'Infra-Rouge (de 0.45 à $2.2 \mu\text{m}$) qui allie résolution spatiale (jusqu'à des pixels de 4 millisecondes d'arc⁶) et spectrale (avec une résolution pouvant évoluer entre 3 000 et 20 000 selon les besoins).

un défi scientifique, technologique et instrumental immense. Les problématiques conceptuelles combinées aux contraintes d'ingénierie sont aujourd'hui le quotidien des chercheurs, ingénieurs et techniciens qui travaillent à la conception et la réalisation des futurs instruments d'Optique Adaptative de l'ELT.

Déjà source de limitation de la qualité d'image pour des télescopes de 8 m de diamètre, les effets perturbateurs de la turbulence atmosphérique sont accrus sur l'ELT en étalant la lumière sur une tache focale plusieurs dizaines de fois plus large que la limite de diffraction d'un télescope de 39 m. Ainsi le télescope lui-même va être rendu « adaptatif » grâce à un miroir déformable de 2,4 m situé dans son train optique. Ce miroir sera contrôlé par des données provenant du télescope lui-même mais aussi des instruments scientifiques qui seront tous de systèmes de mesures de la surface d'onde pour contrôler ce miroir déformable à une cadence de plusieurs centaines de hertz. Pour certains instruments des correcteurs spécifiques seront mis en place pour améliorer encore leurs performances finales en fonction de leurs besoins scientifiques (imagerie haut contraste, correction sur un grand champ...). L'objectif final étant d'atteindre la limite ultime de la diffraction pour un télescope de 39 m de diamètre, à savoir 4 millisecondes d'arc (mas) dans le visible (700 nm) et 12 mas dans l'infrarouge (2 200 nm).

⁶4 millisecondes d'arc correspondent à 20 nano-radians ou encore à la taille angulaire d'une pièce de 1euro située à Marseille et observée depuis Paris.

Quelles que soient leurs caractéristiques, ces systèmes auront des contraintes et des problématiques communes, la première étant leur limitation en termes de couverture de ciel, c'est-à-dire du nombre de sources observables. En effet, la lumière provenant de l'objet d'étude étant généralement trop faible pour permettre une mesure de front d'onde pertinente, on utilise une étoile brillante voisine, quand celle-ci existe, ou plus souvent plusieurs étoiles guides artificielles, créées par laser, afin de mesurer la distorsion atmosphérique.

L'ELT utilisera pleinement cette technique en bénéficiant d'au moins six lasers créant une constellation d'étoiles nécessaire à une correction efficace sur un grand champ de vue.

De nombreux prototypes sont déjà en cours de développement en laboratoire ou dans l'industrie afin de prouver la faisabilité technologique des composants clés des systèmes d'optique adaptative requis pour l'ELT, notamment :

- un laser continu Raman fibré émettant à 589 nm une puissance d'au moins 50 W ;
- un miroir déformable de plus de 2,50 m inclus dans le train optique du télescope. Avec plus de 5 000 points d'actionnements permettant des déformations supérieures à 50 μm à une fréquence de plus de 1 kHz ;
- des mini ou micro-miroirs déformables (de quelques dizaines de centimètres) mais comportant jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'actionneurs et fonctionnant à plusieurs milliers de Hertz ;
- de grandes matrices de détecteurs (jusqu'à 1 mégapixel) très rapides (de plusieurs centaines à de hertz) et à très faible bruit (moins de quelques électrons de bruit de lecture) pour le visible et le proche infrarouge ;
- des calculateurs temps réel ultrarapides, capables d'absorber le flot d'information nécessaire au contrôle des miroirs déformables.

La combinaison de l'ensemble de ces briques de base permettra à l'ELT de disposer de différents concepts d'optiques adaptatives s'adaptant aux divers instruments scientifiques et donc aux différents besoins astrophysiques.

On pourra ainsi, avec le même télescope, obtenir une gamme de résolution allant de quelques dixièmes de seconde d'arc sur des champs de 100 min d'arc carrés au centième de seconde d'arc pour des champs de quelques secondes d'arc carrés et le tout pour près de 100 % du ciel. Enfin, la correction par optique adaptative sera, dans certains cas, poussée à l'extrême (uniquement sur quelques étoiles très brillantes) afin de permettre la détection directe de planètes extrasolaires susceptibles d'abriter d'autres formes de vie.

Pour ce faire, l'ELT européen sera équipé dès sa mise en service (d'ici la fin de la décennie) d'instruments dits de « première génération ». Ces derniers sont au nombre de trois (MICAADO [14], HARMONI [15] et METIS [16]). Ils couvrent une large partie de l'espace des paramètres observationnels à la fois en termes de longueurs d'onde (du visible à l'infrarouge lointain), de résolution spectrale (jusqu'à plus de 10 000) et de champ de vue accessible. Ils seront rejoints dès le début de la prochaine décennie par deux instruments dits de « deuxième génération » (MOSAIC et ANDES) apportant leurs compléments en termes de capacités opérationnelles (en particulier en ce qui concerne le champ accessible pour MOSAIC et la précision spectroscopique pour ANDES). L'ensemble de ces instruments seront équipés de systèmes d'OA plus ou moins complexes (allant d'une OA classique à des OA tomographiques assistées par Laser, aussi appelé LTAO) pour bénéficier pleinement des capacités uniques de l'ELT :

- HARMONI combinera un système d'OA classique fonctionnant sur objets brillants (magnitude plus faible que 12/13 typiquement) et un système de LTAO [17] utilisant le miroir adaptatif de l'ELT (M4), 6 LGS (équi-réparties sur un cercle d'un peu plus d'une minute d'arc de diamètre) et une seule NGS avec une magnitude limite de 18–19 en H pour la

mesure du tilt atmosphérique et la correction des aberrations induites par les limitations de la LGS (voir [5]).

- MICADO combinera un système d'OA classique fonctionnant sur objets brillants très similaires à celui d'HARMONI (magnitude plus faible que 12/13 typiquement) et le système de MCAO MORFEO [18] utilisant 1 miroir déformable supplémentaire conjugué optiquement à environ 12 km d'altitude en complément du miroir adaptatif de l'ELT (M4), 6 LGS (équi-réparties sur un cercle de 1,5 min d'arc de diamètre) et 3 étoiles naturelles avec une magnitude limite de 18 en bande H et disponibles dans un champ de vue de près de 2,7 min d'arc de diamètre.
- METIS lui utilisera un système d'AO classique dont la particularité sera d'utiliser les photons infra-rouges (jusqu'à la bande K) pour effectuer la mesure de surface d'onde [19].

Le lecteur désireux d'en savoir plus sur l'ELT et son instrumentation est invité à lire le numéro spécial (volume 182) du journal de l'ESO « Messenger » qui résume les principales caractéristiques du télescope et de ses instruments [19].

Enfin, après quelques années d'opérations afin de bien comprendre et maîtriser la complexité du télescope et de son environnement, le dernier instrument prévu pour l'ELT sera son « Planet Finder » (PCS pour Planetary Camera and Spectrograph). Il sera installé d'ici la fin des années 2030. Cet instrument, associé à son optique adaptative extrême, sera pour l'ELT ce que SPHERE a été pour le VLT. Il permettra d'imager et de caractériser des planètes extra-solaires bien plus proches de leur étoile et bien moins massives que son prédécesseur et de tendre ainsi vers un des graals de l'astronomie moderne : l'observation directe, la collecte et l'exploitation spectroscopique de photons provenant d'exoplanètes telluriques situées dans la zone habitable de leur système planétaire et donc susceptibles d'abriter de la vie (voir [19], pages 38 à 43).

5. Quelques perspectives

Le domaine de l'OA pour l'astronomie est extrêmement actif. Ainsi, les sujets abordés depuis 20 ans, loin d'être clos, regorgent au contraire de pistes à explorer, de systèmes à imaginer et à construire, de concepts à étudier, d'expériences à conduire, d'algorithmes à proposer. Il est par nature impossible de dresser une liste exhaustive de ces activités futures, mais nous pouvons mettre en évidence certains axes majeurs qui sont, et seront dans les années à venir, les piliers des recherches à mener.

Le premier de ces axes est sans aucun doute le développement du futur télescope géant européen (ou ELT). L'instrumentation associée à ce télescope présente un nombre incalculable de défis. L'OA est au cœur de cette entreprise tant en ce qui concerne le télescope lui-même que son instrumentation avec pour objectif une première lumière pour le télescope en 2026 et la toute première image d'une planète tellurique à l'horizon 2035.

Le deuxième axe majeur repose sur le développement de nouveaux concepts pour encore améliorer les performances d'instrument de type SPHERE et préparer la prochaine génération des instruments « planet finder » sur le VLT ou l'ELT. Pour cela nous développons à l'Observatoire de Haute Provence, sur le télescope qui a vu naître l'OA pour l'astronomie, un moyen unique de validation et de test en conditions opérationnelles de concepts innovants pour l'OA. Ce moyen commun ONERA et LAM, appelé PAPHYRUS,⁷ a été installé le 7 juin 2022 sur le télescope et a produit ses tout premiers résultats quelques jours après. L'expérience unique acquise sur SPHERE pendant les 10 ans de développement de l'instrument combinée à ce moyen de test unique sera essentielle pour imaginer des concepts innovants et de nouveaux composants afin de gagner 2 à 3 ordres de grandeur en termes de contraste et de détectivité sur le système.

⁷Voir https://www.onera.fr/sites/default/files/communiqués/pdf/2022-10/CP-ONERA-CNRS-Papyrus-vf_0.pdf.

Enfin, il est important de mentionner des sujets de recherche non liés à l'astronomie mais qui se nourrissent des recherches et développements menés pour les télescopes géants. Il s'agit notamment de l'AO pour l'ophtalmologie, les télécommunications optiques, l'observation de satellites en orbite basse, l'imagerie endo-atmosphérique et la mise en forme de faisceaux laser (imagerie ou focalisation du faisceau laser). Ces activités regroupent des enjeux liés à la mesure et à la précompensation du volume de turbulence (pour corriger les effets de l'anisoplanétisme mais aussi de la scintillation), sur les problèmes d'analyse et de contrôle du front d'onde mais aussi sur le traitement des données qui sont en forte synergie avec les activités menées dans le contexte astronomique.

Conflit d'intérêt

L'auteur n'a aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Références

- [1] D. Fried, « Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures », *J. Opt. Soc. Am.* **56** (1966), p. 1372-1379.
- [2] H. W. Babcock, « The possibility of compensating astronomical seeing », *Pub. Astron. Soc. Pacific* **65** (1953), p. 229-236.
- [3] G. Rousset, J.-C. Fontanella, P. Kern, P. Gigan, F. Rigaut, P. Léna *et al.*, « First diffraction-limited astronomical images with adaptive optics », *Astron. Astrophys.* **230** (1990), p. 29-32.
- [4] G. Rousset, T. Fusco, « Optique adaptative : correction des effets de la turbulence atmosphérique sur les images astronomiques », *C. R. Phys.* **23** (2022), p. 1-52.
- [5] G. Rousset *et al.*, « NAOS, the first AO system of the VLT: on sky performance », in *Adaptive Optical System Technology II* (P. L. Wizinowich, D. Bonaccini, éd.), Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., vol. 4839, SPIE, Bellingham, WA, 2002, p. 140-149.
- [6] J.-L. Beuzit *et al.*, « SPHERE: the exoplanet imager for the very large telescope », *Astron. Astrophys.* **631** (2019), article no. A155.
- [7] T. Fusco *et al.*, « High-order adaptive optics requirements for direct detection of extrasolar planets: application to the SPHERE instrument », *Opt. Express* **14** (2006), n° 17, p. 7515-7534.
- [8] T. Fusco, J.-F. Sauvage, C. Petit, K. Dohlen, A. Costille, D. Mouillet, J.-L. Beuzit, « SPHERE-SAXO : optique adaptative extrême pour la détection de planètes extrasolaires », *Photoniques* **75** (2015), p. 34-37.
- [9] T. Fusco, C. Petit, G. Rousset, J.-M. Conan, J.-L. Beuzit, « Closed-loop experimental validation of the spatially filtered Shack-Hartmann concept », *Opt. Lett.* **30** (2005), n° 11, p. 1255-1257.
- [10] C. Petit, J.-M. Conan, C. Kulcsár, H.-F. Raynaud, T. Fusco, « First laboratory validation of vibration filtering with LQG control law for adaptive optics », *Opt. Express* **16** (2008), n° 1, p. 87-97.
- [11] J.-F. Sauvage, T. Fusco, G. Rousset, C. Petit, « Calibration and precompensation of noncommon path aberrations for extreme adaptive optics », *J. Opt. Soc. Am. A* **24** (2007), n° 8, p. 2334-2346.
- [12] O. Fauvarque, B. Neichel, T. Fusco, J.-F. Sauvage, O. Girault, « General formalism for Fourier-based wave front sensing: application to the pyramid wave front sensors », *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* **3** (2017), n° 1, article no. 019001.
- [13] R. Gilmozzi, J. Spyromilio, « The European extremely large telescope (E-ELT) », *The Messenger* **127** (2007), p. 11-19.
- [14] R. Davis *et al.*, « MICADO: first light imager for the E-ELT », in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI* (C. J. Evans, L. Simard, H. Takami, éd.), vol. 9908, SPIE, Edinburgh, UK, 2016.
- [15] B. Neichel, T. Fusco, J. F. Sauvage *et al.*, « The adaptive optics modes for HARMONI: from classical to laser assisted tomographic AO », in *Proceedings Adaptive Optics Systems V* (E. Marchetti, L. M. Close, J.-P. Véran, éd.), vol. 9909, SPIE, Edinburgh, UK.
- [16] B. Brandl *et al.*, « Status of the mid-infrared E-ELT imager and spectrograph METIS », in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, SPIE, 2016.
- [17] E. Diolati *et al.*, « MAORY: adaptive optics module for the E-ELT », in *Adaptive Optics Systems V* (E. Marchetti, L. M. Close, J.-P. Véran, éd.), vol. 9909, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2016.
- [18] T. Bertam *et al.*, « Single conjugate adaptive optics for METIS », in *Adaptive Optics Systems VI* (L. M. Close, L. Schreiber, D. Schmidt, éd.), vol. 10703, SPIE, Austin, USA, 2018.
- [19] M. Lyubenova, G. A. J. Hussain (éd.), *Instrumentation for ESO Extremely Large Telescope*, vol. 182, European Southern Observatory, ESO, Garching bei Munchen, Germany, 2021, <https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.182-mar21/messenger-no182-38-43.pdf>.



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

Quelques réflexions pour conclure

A few concluding thoughts

Pierre Léna

Courriel: pierre.lena@obspm.fr

Published online: 15 September 2023, Issue date: 15 September 2023

Mesdames, Messieurs, chers collègues et amis,

Bien des chercheurs d'aujourd'hui, bien de nos concitoyens ignorent ce que fut, lors des siècles précédents, le terreau de ce que personne n'appelait encore la recherche scientifique. L'initiative que vous développez, cher Bruno Chanetz, est précieuse, puisque vous choisissez des lieux de notre terroir où des hommes ont marqué leur époque, mais sont bien souvent demeurés ignorés par la grande Histoire. Vous l'aviez fait en 2019 autour d'Abraham de Moivre à Saumur, puis l'année dernière autour d'Antoine d'Abbadie en son château d'Hendaye. Vous aviez souhaité associer doublement l'Académie des sciences à vos entreprises : en lui proposant de parrainer ces événements ; en publiant un numéro spécial des Comptes-rendus à chacune de ces occasions. En prononçant cette modeste conclusion à une fort belle journée, j'exprime au nom du Bureau de l'Académie notre reconnaissance envers votre action, puisque parrainage et publication marquent également cette troisième rencontre. D'autres lieux, d'autres belles personnalités suggéreront la poursuite de ce qui devient une série à vocation historique, scientifique et pédagogique, une série dont la qualité justifiera, j'en suis certain, le maintien de ce lien avec l'Académie des sciences. De surcroît, la revue des Comptes-rendus, dans sa nouvelle formule comprenant des numéros spéciaux, qu'il s'agisse de Physique ou de Mécanique, attache une importance particulière à la mise en résonance de thèmes qui sont au carrefour de la science et de l'histoire, dans une présentation pédagogique utilisable par les professeurs de lycée.

Aujourd'hui, vous avez choisi la figure d'Ismaël Boulliau, qui naquit à Loudun en 1605 et disparut en 1694. Sa longue vie couvre donc exactement le XVII^e siècle, ce siècle de grands changements, depuis l'impact de la Renaissance en France jusqu'à la création de l'Académie des sciences en 1666 et de l'Observatoire de Paris en 1667.

Entendant les exposés de Gérard Jubert et de Marie-Claire Coët, on ne peut échapper à la question : cet homme du Siècle de Louis XIV fut-il un savant méconnu ? Nous avons découvert les noms de ses correspondants fameux, tels Galilée, Gassendi, Hévélius, Pascal, Fabri de Peiresc, Huygens, nous avons appris qu'Isaac Newton l'avait cité en 1687 dans ses *Principia*. C'est alors qu'il nous faut échapper à un vedettariat qui ferait du lent progrès scientifique l'apanage de héros solitaires. Boulliau a fait partie de ce grand mouvement de curiosité et de rationalité qui couvrit peu à peu l'Europe, se déployant sur un formidable héritage grec puis arabe, créant un tissu d'observateurs et d'expérimentateurs qui ne cessaient de confronter leurs résultats et hypothèses

dans ce premier réseau scientifique de la modernité. Il en fut ainsi pour la météorologie, puisqu'il fut à l'origine d'une station à Paris en 1658.

En observateur, il approcha des questions fondamentales pour l'époque, lors du premier transit jamais observé de la planète Mercure devant le Soleil, le 7 novembre 1631 avec Pierre Gassendi à Paris. Prédits par Johannes Kepler dès 1627, ces transits de Vénus en 1629 puis de Mercure en 1631 fournirent les premières mesures des dimensions du système solaire. Observant dans la constellation de la Baleine l'étoile Mira, connue depuis l'Antiquité pour ses variations périodiques d'éclat, il en détermina la période avec précision et formula deux hypothèses sur leur cause : soit un compagnon en orbite dont le transit obscurcirait partiellement l'étoile, soit l'occurrence de taches sur Mira. Ces deux idées feront leur chemin trois siècles plus tard, la première fournissant aujourd'hui une méthode féconde pour la détection des exoplanètes, la seconde s'appliquant à l'étoile Betelgeuse, obscurcie en 2019 par un immense nuage de poussières.

Il se saisit de la grande question qui agitait alors le monde scientifique, après la publication du principe d'inertie de Galilée et des trois lois de Kepler, auxquelles étrangement il refuse d'adhérer. Les invisibles sphères de cristal portant les planètes étant abandonnées, la représentation cinématique des mouvements planétaires étant mathématisée par ces lois, une question majeure demeurait, celle de la dynamique, c'est-à-dire des forces susceptibles de provoquer ces mouvements, forces nécessaires puisque les trajectoires s'écartaient d'une ligne droite parcourue à vitesse uniforme. L'action à distance à travers le vide répugnait depuis l'Antiquité, il fallut Newton pour la faire admettre en 1684, non sans considérations théologiques [1]. En proposant une loi d'attraction en inverse carré de la distance, Boulliau s'inspirait de la lumière, dont l'éclairement dépend d'une telle loi de distance à la source. Cette analogie - méthode fréquente pour guider la découverte - ne valait pas raison, il y fallait un outillage mathématique dont il ne disposait pas et sa spéculation sur l'orientation de la force, normale au rayon vecteur et non selon celui-ci, était incorrecte. Il est sans doute excessif d'affirmer qu'il mit « Newton sur la voie » de la gravitation universelle, publiée en 1687, mais le crédit explicite que lui rend ce dernier, pourtant avare de reconnaissances à des tiers, n'est pas sans témoigner, ici encore, que le prêtre loudunais visait au cœur des questions de l'époque, comme le reconnut en 1667 son élection en tant qu'un des premiers correspondants étrangers de la Royal Society.

Il s'attaqua au mouvement de la Lune, dont la complexité sous l'effet de deux actions gravitationnelles (Terre, Soleil) défiait la construction d'éphémérides précises [2]. Ptolémée, se basant sur les travaux d'Hipparque, avait décrit la seconde anomalie du mouvement de la Lune, due à l'action de la Terre et alors peu précisément mesurée. Ce fut Boulliau qui la décrivit précisément sur la base des propres observations et la nomma *éviction*, un terme adopté depuis cette époque.

Sans prolonger cette évocation d'une belle figure, il me reste à mettre en garde contre une tentation trop répandue de nos jours, celle de dissocier dans la pensée de ces « chercheurs de vérité » d'autrefois, tel Boulliau, d'une part ce qui serait rationnel et scientifique, donc respectable à nos yeux, de l'autre ce qui serait fait d'obscurantisme, de révélation ou de superstition, ainsi de l'astrologie, ou même de la théologie, donc à rejeter. Sans développer davantage ce point où le regard critique de l'historien demeure essentiel, je note qu'il demeure actuel, comme peuvent en témoigner le rejet de l'atomisme par Marcelin-Berthelot, ou celui, initial au moins, de la cosmologie de Georges Lemaître par Albert Einstein : génies ou non, nous demeurons tous peu ou prou prisonniers de nos anciens paradigmes et représentations profondes du monde. Ismaël Boulliau, pas plus que Johannes Kepler son contemporain, n'ont échappé à cette tension [3]. Merci donc à Conor Maguire, Sylvette Noyelle et Thérèse Dereix de Laplane de nous avoir justement replacé l'homme en son temps.

Trois siècles plus tard, nous avons redécouvert l'ingénieur Gustave Eiffel, si soucieux de dynamique des fluides et de météorologie, et l'astronome Audouin Dollfus qui fut si longtemps mon collègue à Meudon et m'honora d'une discrète amitié; enfin Manuel Rodriguez et Thierry Fusco nous emportèrent, l'un vers une mesure spatiale de la gravitation universelle, le second vers le futur télescope européen et cet immense travail collectif autour de la lumière, qui en 2027 en fera un instrument unique, quelque part dans le désert chilien d'Atacama. Deux aventures contemporaines et fascinantes, dont ni Boulliau, ni Newton¹ n'auraient osé rêver.

Merci donc au Sénateur Bruno Belin et au Maire de la bonne ville de Loudun, Joël Dazas, merci à l'ONERA et à ses Alumni. Cher Bruno Chanetz, ce n'est qu'un au revoir.

Références

- [1] G. Minois, « L'Eglise et la science : Histoire d'un malentendu. Tome II : De Galilée à Jean-Paul II », Fayard, 1991, p. 92-97.
- [2] M. C. Gutzwiller, « Moon-Earth-Sun : The oldest three-body problem », *Rev. Mod. Phys.* **70** (1998), n° 2, p. 589-639.
- [3] G. Simon, *Kepler astronome, astrologue*, Gallimard, 1979.
- [4] I. Newton, *Opticks : or, A treatise of the reflections, refractions, inflexions and colours of light*, printed for Sam. Smith, and Benj. Walford, London, 1704.

¹C'est pourtant Isaac Newton qui écrit : *Car l'air au travers duquel nous observons les étoiles est en perpétuelle agitation... des télescopes de grande longueur peuvent rendre les Objets plus brillants et plus étendus que ne le peuvent des instruments courts, mais il est impossible de les réaliser en faisant disparaître la confusion des Rayons qui est provoquée par les Agitations de l'Atmosphère. Le seul Remède est de rechercher l'air le plus serein et tranquille, tel que celui qui pourrait être trouvé sur les sommets des Montagnes les plus élevées au-dessus des Nuages les plus importants.* Dans [4].

Comptes Rendus

Mécanique

Objet de la revue

Les *Comptes Rendus Mécanique* sont une revue électronique évaluée par les pairs de niveau international, qui couvre l'ensemble des domaines de la discipline. Ils publient des articles originaux de recherche, des articles de revue, des mises en perspective historiques, des textes à visée pédagogique ou encore des actes de colloque, sans limite de longueur, en anglais ou en français. Les *Comptes Rendus Mécanique* sont diffusés selon une politique vertueuse de libre accès diamant, gratuit pour les auteurs (pas de frais de publication) comme pour les lecteurs (libre accès immédiat et pérenne).

Directeur de la publication : Étienne Ghys

Rédacteur en chef : Jean-Baptiste Leblond

Comité éditorial : Olga Budenkova, Francisco Chinesta, Jean-Michel Coron, Luc Dormieux, Florian Gosselin, Nicolas Moës, Léo Morin, Guillaume Ribert, Géry de Saxcé, Emmanuel Villermaux

Secrétaire éditoriale : Adenise Lopes

À propos de la revue

Toutes les informations concernant la revue, y compris le texte des articles publiés qui est en accès libre intégral, figurent sur le site <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/mecanique/>.

Informations à l'attention des auteurs

Pour toute question relative à la soumission des articles, les auteurs peuvent consulter le site <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/mecanique/>.

Contact

Académie des sciences

23, quai de Conti, 75006 Paris, France

Tél. : (+33) (0)1 44 41 43 72

CR-Mecanique@academie-sciences.fr



Les articles de cette revue sont mis à disposition sous la licence
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>

COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

Mécanique

Volume 351, n° S4, 2023

Special issue / Numéro thématique

Hommage à Ismaël Boulliau / *A tribute to Ismaël Boulliau*

Guest editor / Rédacteur en chef invité

Bruno Chanetz (ONERA, BP 80100, 91123 Palaiseau Cedex, France)

Cover illustration / Illustration de couverture

Sylvie Donmoyer, Portrait d'Ismaël Boulliau (2023), œuvre originale reproduite avec l'autorisation de l'artiste.

Bruno Chanetz

Préface en hommage à Ismaël Boulliau (1605–1694) 1-2

Sylvette Noyelle

Loudun à l'époque d'Ismaël Boulliau : trois décennies qui ont changé la ville 3-10

Gérard Jubert

La vie d'Ismaël Boulliau 11-17

Marie-Claire Coët

L'œuvre scientifique d'Ismaël Boulliau 19-29

Conor Maguire

Les traces d'Ismaël Boulliau dans la poussière de l'histoire 31-37

Denis Beaudouin

L'avènement de la science météorologique du XVII^e au XIX^e siècle 39-47

Martin Peter

Eiffel et la météorologie 49-56

Bruno Chanetz, Alain Broc, Philippe Jung

Audouin Dollfus, astronome du XX^e siècle 57-71

Manuel Rodrigues

De la loi de la gravitation universelle à MICROSCOPE 73-79

Thierry Fusco

Optique adaptative et télescopes géants 81-89

Pierre Léna

Quelques réflexions pour conclure 91-93

