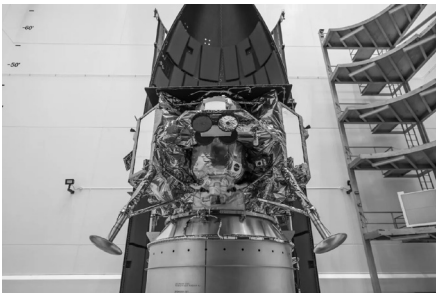


# Ciel et Terre

*Bulletin de la Société Royale belge d'Astronomie,  
de Météorologie et de Physique du Globe*

ISSN 0009-6709

Volume 140, n°1 Janvier - Février 2024

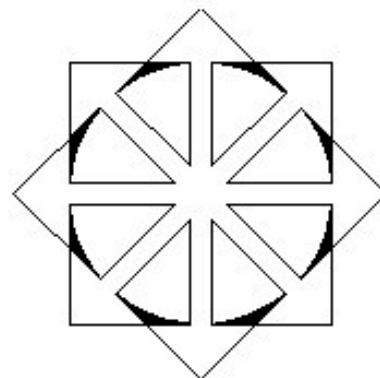


*Mise en place de l'atterrisseur lunaire de la mission Peregrine 1 à l'intérieur de l'ogive du cône réservé à la charge utile dans le nouveau lanceur Vulcan de la firme United Launch Alliance le 21 novembre 2023. La mission Peregrine 1, lancée au début janvier 2024, emportait cet atterrisseur parmi d'autres charges commerciales du programme NASA/CLPS vers la Lune en vue d'étudier l'exosphère lunaire, les propriétés thermiques et l'abondance en hydrogène du régolithe lunaire, les champs magnétiques ainsi que l'environnement radiatif de la surface de la Lune. Cette mission historiquement importante à plus d'un point de vue peut être considérée comme une réussite partielle compte tenu des enjeux qu'elle sous-tendait. (Crédits : United Launch Alliance)*

## Sommaire

- 2 Miscellanées astronomiques 2023 (1) :  
L'enseignement des sciences aux jeunes filles au XIX<sup>e</sup> siècle - Les terres rares sous la loupe - Extraction et purification de terres rares en Occident - Un feuillet du catalogue d'Hipparque retrouvé sur un palimpseste - Les geysers d'Encelade  
*Guy Stevins*
- 19 Un premier bilan climatologique de l'année 2023  
*A.H. / R.D.*
- 22 C'était dans *Ciel et Terre* il y a 95 ans...  
*Anne Haubrechts*
- 24 Le coin des observateurs  
*R. Dejaille*

Publié  
avec le soutien financier du  
**Fonds de diffusion scientifique**  
et du  
**Fonds Lucie Dekeyzer**



### Note relative au « Droit d'auteur »

*Ce bulletin de la SRBA ainsi que toute version électronique quelle qu'en soit le format protégé ou non éventuellement mis sur le site officiel de la Société sont strictement réservés à l'usage privé de ses membres et NE peuvent être reproduits ou diffusés sans autorisation préalable du Directeur de publication.*

## MISCELLANÉES ASTRONOMIQUES 2023 (1)

Guy Stevens, Ir

*L'enseignement des sciences aux jeunes filles au XIX<sup>e</sup> siècle - Les terres rares sous la loupe - Extraction et purification de terres rares en Occident - Un feuillet du catalogue d'Hipparque retrouvé sur un palimpseste - Les geysers d'Encelade*  
(Traduction assistée par [www.DeepL.com/translator](http://www.DeepL.com/translator))

### L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES AUX JEUNES FILLES AU XIX<sup>E</sup> SIÈCLE

*Contrairement à de nombreux stéréotypes, les lois de la physique étaient autrefois considérées comme un élément fondamental de l'éducation des jeunes filles.*

*D'après l'article « Physics is for Girls » de Physics Today, 75(08), 30, 2022, signé par Joanna Behrman, historienne au Centre d'Histoire de la physique à l'Institut américain de physique de College Park au Maryland.*

#### Introduction

L'histoire est parfois inattendue. Un regard sur le passé peut rapidement renverser une idée que l'on pourrait penser avoir toujours été vraie. Par exemple, bien que la communauté des physiciens soit aujourd'hui confrontée à l'idée que la physique est une discipline pour les garçons et non pour les filles, ce stéréotype n'est vieux que d'une centaine d'années. Il fut un temps où la physique, la philosophie naturelle, comme on l'appelait jusqu'à la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, était une matière réservée aux filles.

Les États-Unis ont une longue histoire d'enseignement scientifique pour les femmes, par le biais d'académies, de séminaires et de collèges féminins. Bien que l'enseignement des sciences au XIX<sup>e</sup> siècle ait été plus facilement accessible aux classes moyennes et supérieures blanches, il était accessible aux catholiques comme aux protestants et même à certaines femmes noires et indigènes de l'élite [Tolley K., Hist. Educ. Q., 36, 1996]. Les historiennes Kim Tolley, Margaret Nash et

Jessica Linker, entre autres, ont montré qu'une partie importante de l'éducation des jeunes filles et des femmes était la philosophie naturelle : l'étude scientifique des choses physiques, y compris leur composition, leur comportement et leur contexte. En fait, comme l'a montré Tolley, la philosophie naturelle était considérée

comme une partie plus importante de l'éducation d'une fille que de celle d'un garçon. Les filles étaient plus nombreuses que les garçons à suivre cette discipline à l'école, et de nombreux textes de vulgarisation scientifique et éducative influents ont été écrits par des femmes.



Figure 1 : La leçon de philosophie naturelle.

Une mère coupe une orange en deux pour illustrer le concept des hémisphères à ses enfants. (D'après Swift M.A., *First Lessons on Natural Philosophy, for Children, Part First*, Brown & Gross, p. 11, 1884. Crédit : Bibliothèque et Archives Niels Bohr)

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, cependant, la notion actuelle de physique comme matière réservée aux garçons s'est imposée. Alors pourquoi les choses étaient-elles différentes. Qu'est-ce qui a changé ?

## La science et Dieu

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, les écoles secondaires féminines, appelées indifféremment académies ou séminaires, accueillait des élèves du début de l'adolescence au début de la vingtaine. Vers 1800, elles proposaient généralement des cours d'anglais, d'arithmétique et de géographie. Mais la géographie ne se limite pas aux noms des pays et de leurs capitales.

Un cours sur ce sujet pouvait inclure une discussion sur les minéraux, la pression atmosphérique, le Système solaire et d'autres aspects des sciences physiques. Dans les années 1820 et 1830, les programmes d'études scientifiques se développent encore davantage. Le *Hartford Female Seminary* dans le Connecticut, à son ouverture en 1823, proposait la géographie, la philosophie naturelle, la chimie, l'arithmétique, l'algèbre et la géométrie [Tolley K., *The Science Education of American Girls : A Historical Perspective*, Routledge, 2003]. Comme Nash l'a découvert dans une étude portant sur près de cent académies, le nombre de celles qui proposaient des cours d'algèbre est passé de seulement 19% dans les années 1820 à 67 % dans les années 1830. En outre, dans les années 1830, 72 % des académies proposaient des cours de botanique, 77 % des cours de chimie et 68 % des cours d'astronomie [Nash M., *Women's Education in the United States, 1780–1840*, Palgrave Macmillan, 2005]. Les sciences étaient bien intégrées dans l'éducation des

femmes aux niveaux primaire et secondaire.

Aucune science n'est plus étudiée dans les écoles pour filles que la philosophie naturelle. L'enquête de Nash a montré que dans les années 1820 et 1830, 84 % des académies proposaient des cours de philosophie naturelle. En outre, Tolley a étudié les écoles de Caroline du Nord, de Virginie et de certains États du Nord et elle a constaté que la philosophie naturelle était la matière scientifique la plus largement proposée dans les écoles de filles - plus couramment enseignée que l'astronomie, la chimie, la botanique, la minéralogie ou l'histoire naturelle. Et les filles l'apprenaient bien : comme l'a révélé Tolley en comparant les examens de 19 écoles de Boston en 1845, non seulement les étudiantes passaient les examens de philosophie naturelle en plus grand nombre que les étudiants, mais elles obtenaient également de meilleurs résultats que les garçons.

La philosophie naturelle, à la base, était l'étude des lois de la nature sur Terre et dans l'univers. Un cours sur le sujet aurait inclus des leçons sur la mécanique, les machines (comme le montre la Figure 2), la lumière, la chaleur, l'astronomie rudimentaire, et

bien d'autres choses encore. Mais l'enseignement de la philosophie naturelle du début des années 1800 différait à bien des égards de l'enseignement de la physique d'aujourd'hui. Par exemple, bien que les instructeurs puissent effectuer des démonstrations scientifiques - en dépit de leurs budgets plus modestes, de nombreuses académies féminines avaient investi dans du matériel expérimental - les élèves n'auraient pas participé eux-mêmes aux travaux de laboratoire [Warner D.J., *Isis*, 69, 1978]. L'enseignement en laboratoire ne s'est pas développé aux États-Unis avant la fin du XIX<sup>e</sup> siècle [Kremer R., in



Figure 2 : Expérience en famille. Un père actionne une pompe à air devant sa famille dans le salon. D'autres appareils de philosophie naturelle sont disposés sur des étagères à l'arrière-plan. Les salons étaient souvent le lieu de démonstrations scientifiques, de discussions et d'éducation de la petite enfance. (Frontispice de : Parker R. G., *First Lessons in Natural Philosophy*. Conçues pour enseigner les éléments de la science. Abridged from the *Compendium of School Philosophy*, Barnes A.S. & Co, 1848. Crédit :: collection Joanna Behrman.)

Learning by Doing : Experiments and Instruments in the History of Science Teaching, Heering P., Wittje R., eds., Franz Steiner, 2011].

En outre, l'enseignement de la philosophie naturelle dans les écoles primaires et secondaires était essentiellement conceptuel. Bien que les diagrammes de la Figure 3 puissent sembler familiers à un étudiant en physique d'aujourd'hui, les calculs numériques auraient été absents. L'intégration des mathématiques dans l'enseignement de la physique s'est développée au cours du XIX<sup>e</sup> siècle et, comme pour l'enseignement en laboratoire, s'est imposée initialement et plus rapidement au niveau collégial.

Mais la plus grande différence réside peut-être dans le rôle de la religion : La philosophie naturelle présentait le monde physique comme une preuve de la merveille et de l'étendue de la création de Dieu. Le lien entre la philosophie naturelle et la religion faisait partie d'un mouvement plus large de théologie naturelle, qui a gagné en popularité au Royaume-Uni au début des années 1700 et dont les partisans soutenaient que les mécanismes ou la conception de la nature attestaient de la présence d'un créateur. La théologie naturelle était populaire dans les colonies américaines et aux États-Unis tout au long du XVIII<sup>e</sup> siècle ; par exemple, le célèbre théologien Jonathan Edwards complétait son étude biblique et sa prière par l'étude du monde naturel. Et pendant le deuxième grand réveil, de 1795 à 1837, qui a vu le renouveau de nombreuses confessions protestantes aux États-Unis et un regain général de ferveur pour la religion, les adeptes ont également encouragé l'étude du monde naturel [Tolley K., *The Science Education of American Girls: A Historical Perspective*, Routledge, 2003].

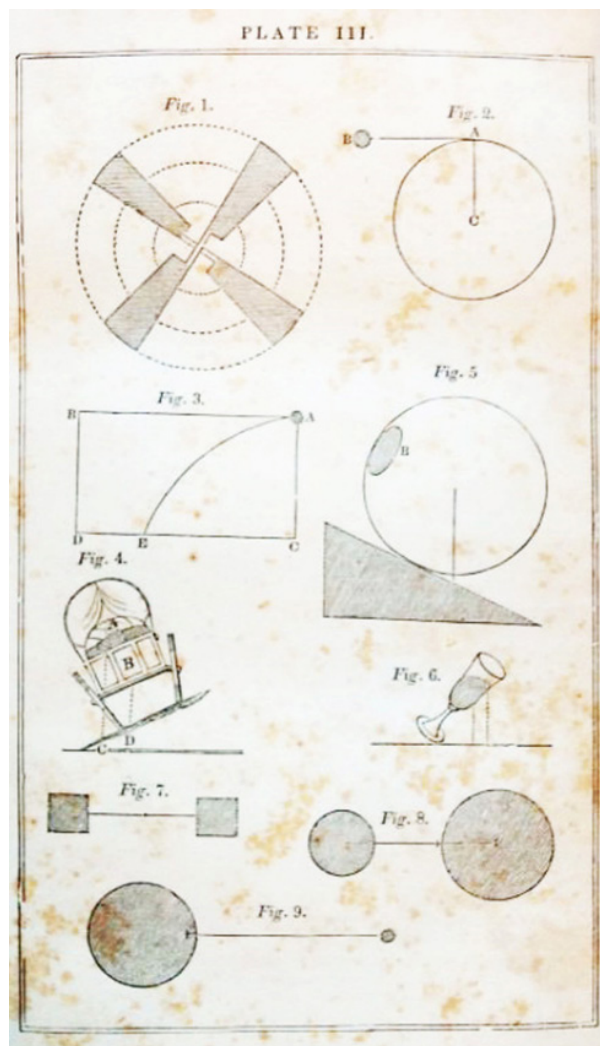


Figure 3 : Quelques applications de la mécanique.

*Bien que l'instruction soit essentiellement qualitative, le livre de philosophie naturelle de Jane Marcet contenait de nombreux diagrammes reconnaissables par les étudiants et les professeurs de physique d'aujourd'hui. Les figures présentées ici proviennent du chapitre sur les mouvements composés et la détermination du centre de masse d'un objet. (D'après Marcet J.H., *Conversations sur la philosophie naturelle dans lesquelles les éléments de cette science sont familièrement expliqués*, Lippincott, Grambo & Co, 1852, planche 3. Crédit : Bibliothèque et Archives Niels Bohr)*

Linker a fait valoir que la philosophie naturelle était perçue comme renforçant la force intellectuelle et morale et comme un rempart contre l'irrégion et la superstition [Linker J.C., "The fruits of their labor: Women's scientific practice in early America, 1750-1860," PhD dissertation, U. Connecticut, 2017]. C'est en partie grâce à cette dimension

morale et religieuse que la philosophie naturelle a été étroitement associée à l'éducation des filles. Par exemple, en 1834, John Ludlow, ecclésiastique et théologien, a déclaré lors de l'ouverture d'une nouvelle académie féminine à Albany : « *L'analyse de la science et de la religion révélée aboutira en fin de compte au même point. Ce point, si l'on peut parler de point, est le Dieu invisible. Il est à la base des deux. Par conséquent, que l'on étudie la science ou la révélation, on ne fait que parcourir différentes pages du même grand livre, que le Créateur a étalé devant ses créatures intelligentes* ».

### Une éducation utile

Un coup d'œil sur le matériel pédagogique de l'époque montre comment la philosophie naturelle était enseignée et pourquoi elle était un sujet si important dans la scolarité des filles. Parmi les ouvrages courageusement utilisés, citons

*Conversations sur la philosophie naturelle*, dans lesquelles les éléments de cette science sont familièrement expliqués par Jane Marcet (1826), *First Lessons in Natural Philosophy, Designed to Teach the Elements of the Science* de Richard Parker (1848) et *Juvenile Philosophy : or, Philosophy in Familiar Conversations, Designed*

*to Teach Young Children to Think* (1851), ainsi que *First Lessons on Natural Philosophy, for Children* de Mary Swift, 1839. Swift, qui fut la deuxième directrice du *Litchfield Female Seminary* dans le Connecticut, a écrit deux abécédaires de philosophie naturelle construits comme des dialogues sous forme de questions-réponses entre les enfants et leurs parents. L'Encart 1 montre comment Swift a intégré des leçons morales et religieuses dans la discussion scientifique : un discours sur les prismes, la nature de la lumière et les arcs-en-ciel passe sans transition à l'histoire biblique de Noé. Bien que les livres de Swift et de Parker aient été écrits pour des enfants plus jeunes, Swift aurait certainement intégré les mêmes valeurs morales dans ses leçons destinées aux élèves de l'enseignement secondaire. La structure des livres destinés aux

jeunes enfants pourrait également imiter les styles d'éducation religieuse en utilisant un format de catéchisme : un dialogue oral sous forme de questions et de réponses dans lequel l'élève mémorise les réponses. Pour les élèves plus âgés, les livres de Marcet prennent la forme d'une conversation entre Mme B., sophistiquée et bien informée, et deux jeunes femmes prénommées Emily et Caroline.

Bien que Marcet ait destiné ses livres à un public général, ils ont été fréquemment utilisés comme manuels dans les écoles secondaires, et leur style conversationnel a été imité plus tard par des auteurs de manuels tels que Mary Townsend et Elizabeth Cary Agassiz [Tolley K., *The Science Education of American Girls : A Historical Perspective*, Routledge, 2003]. Les leçons de

philosophie naturelle n'étaient pas réservées aux étudiantes - les livres de Swift, Marcet et Parker s'adressaient tous aux garçons et aux filles. Mais leurs implications sociales diffèrent selon le sexe de l'élève, comme l'illustre la Figure 4. Dans les collèges masculins, où le programme classique est le signe d'une éducation de classe supérieure, la science est perçue comme étant de nature professionnelle ou de classe inférieure. Dans les académies féminines, en revanche, l'enseignement des sciences était plus souvent la marque d'une éducation de classe supérieure. Une même matière était utilisée à des fins différentes par les étudiants et les étudiantes. Par exemple, selon un instructeur de la *Litchfield Academy*, qui à l'époque était mixte, l'astronomie était enseignée aux élèves de sexe masculin pour leur permettre d'acqu-

## Encart 1

## L'arc-en-ciel

Un père montre un arc-en-ciel à ses enfants réunis. L'arc-en-ciel, comme beaucoup d'autres phénomènes naturels, était utilisé pour établir un lien direct avec la foi dans le divin. Le texte d'accompagnement se lit en partie comme suit :



Image extraite de Swift M.A., *First Lessons on Natural Philosophy, for Children, Part First*, Brown & Gross, p.43, 1884. (Crédit : Bibliothèque et Archives Niels Bohr)

*Avez-vous déjà vu un arc-en-ciel lorsqu'il pleut, à moins que le Soleil ne brille ?*

Je ne le vois pas.

*Alors quelles sont les deux choses nécessaires à la formation d'un arc-en-ciel ?*

Un soleil radieux et une averse.

*Pourquoi l'arc-en-ciel est-il si beau ?*

Il a de belles couleurs vives, une arche splendide, et quand nous le voyons, nous nous souvenons de la promesse que Dieu a faite à Noé, qu'il ne noierait plus le monde.

*Pourquoi l'arc-en-ciel vous fait-il penser à cette promesse ?*

Parce que Dieu a dit que l'arc dans la nuée devait être un signe qu'il ne noierait plus jamais le monde.

*Alors, quand nous voyons l'arc-en-ciel, n'est-ce pas comme si Dieu renouvelait cette promesse ?*

C'est le cas, et chaque fois que nous regardons l'arc-en-ciel dans le nuage, nous devrions être très heureux et reconnaissants envers notre Père céleste pour sa bonté à notre égard.

rir des compétences pratiques en matière de navigation. Pour les étudiantes, le même contenu était utilisé pour montrer « *les merveilles de l'univers de Dieu* ». Pour bien comprendre cette période, il faut toutefois rejeter le préjugé moderne selon lequel les élèves de sexe masculin ont reçu une éducation scientifique utile et les élèves de sexe féminin une éducation éphémère.

Les leçons peuvent être considérées comme utiles non seulement pour leurs applications à des travaux pratiques ou professionnels (ou dans la vie quotidienne, comme le montre le cadre 2), mais aussi pour des raisons culturelles ou idéologiques. Des auteurs de manuels tels que Marcet et Almira Phelps ont justifié l'enseignement de la chimie aux femmes et aux jeunes filles, par exemple, parce qu'elle avait une utilité à la fois domestique et religieuse : cuisiner, nettoyer et apprécier la création de Dieu. Ce raisonnement soutenait une édu-

cation scientifique qui dépassait de loin le minimum nécessaire aux seuls besoins domestiques ou religieux [Lindee M.S., *Isis*, 82, 1991].

Même les matières dites ornementales, telles que la couture, la danse et le dessin, étaient souvent étroitement liées aux matières académiques [McMahon L., *J. Early Repub.*, 29, 2009]. Pensez à l'importance de l'illustration en botanique, surtout à l'époque où la photographie n'existait pas encore. Autre exemple, la géographie était souvent enseignée par la broderie de cartes. La géographie était présentée comme encourageant la discipline mentale des femmes et des filles, et c'était aussi un moyen pratique d'inculquer le nationalisme en décrivant l'expansion réussie du jeune pays [Tyner J.A., *Stitching the World: Embroidered Maps and Women's Geographical Education*, Ashgate, 2015]. L'enseignement de la philosophie naturelle était justifié par toutes les connais-

sances qu'il permettait d'acquérir sur l'univers : les dimensions religieuses et éthiques ainsi que les aspects pratiques.

### Epouses, mères, enseignantes

Les femmes jouent un rôle particulier dans le maintien et la transmission des valeurs, car elles sont responsables de l'éducation de la petite enfance. Avant même de fréquenter l'école primaire, les enfants reçoivent souvent leur première éducation à la maison par leur mère ou une parente. Pour beaucoup d'élèves pauvres, c'était peut-être la seule éducation qu'ils recevaient, surtout avant le développement désordonné des écoles « communes » - que nous appellerions aujourd'hui « publiques » [Kohlstedt S.G., *Isis*, 81, 1990].

Après 1820, les changements socio-économiques spectaculaires survenus aux États-Unis ont renforcé la nécessité d'une éducation morale. L'expansion vers l'ouest, l'augmentation du suffrage et la migration vers les villes remettaient en question la solidité des systèmes traditionnels d'ordre social [Halttunen K., *Confidence Men and Painted Women: A Study of Middle Class Culture in America, 1830-1870*, Yale U. Press, 1982]. L'éducation, tant au sein de la famille que dans le cadre du système d'écoles formelles en pleine expansion, contribuait à inculquer des normes sociales et à préparer les enfants à la perspective de plus en plus probable de s'éloigner de la communauté où ils étaient nés. Comme de plus en plus d'hommes chefs de famille travaillaient loin de chez eux, les mères jouaient un rôle encore plus important en tant qu'éducatrices intellectuelles et morales. La préférence croissante pour les institutrices reflète l'idée que la mère est le plus grand exemple et la plus grande influence morale.



Figure 4 : Le sexisme dans les illustrations.

*L'éducation à la philosophie naturelle avait des significations différentes pour les garçons et les filles. Rollo, le personnage principal fictif est aidé par sa mère et sa sœur, qui sont bien informées. Mais Rollo applique ce qu'il a appris, comme l'utilisation de coins et d'autres machines simples, à des applications industrielles telles qu'elles sont modélisées par son père et ses ouvriers. (D'après Abbott J., *Rollo's Experiments*, Hogan & Thompson, 1841, p. 61. Crédit : Bibliothèque et Archives Niels Bohr)*

L'historienne Linda Kerber a inventé le terme de « *maternité républicaine* » pour expliquer les sentiments de l'époque. La mère républicaine idéale était une femme qui intégrait les valeurs politiques et domestiques dans le but de soutenir la jeune république. Elle inculque des valeurs à ses enfants, maintient son mari dans le droit chemin et joue ainsi un rôle dans la croissance du jeune Etat. En fait, la figure de la mère républicaine a été utilisée par les réformateurs pour justifier l'expansion de l'éducation des femmes dans les décennies qui ont suivi l'indépendance des États-Unis. Les croyances des Lumières et la nécessité pratique de certains types de connaissances ont également contribué de manière significative à l'augmentation des possibilités d'éducation des femmes aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles [Nash M.A., *J. Early Repub.*, 17, 1997]. Mais la notion de maternité républicaine s'appliquait spécifiquement aux femmes blanches et ne plaidait que pour l'éducation des femmes blanches.

Il n'est donc pas surprenant que les séminaires pour femmes blanches, y compris ceux des États du Nord, aient largement empêché les femmes noires d'y accéder, malgré des décennies d'activisme de la part des défenseurs des droits des Noirs, hommes et femmes.

Il y avait toutefois une exception : le *Young Ladies Domestic Seminary* de Clinton, dans l'État de New York, un séminaire dirigé par un abolitionniste blanc et l'un des premiers séminaires pour femmes à intégration raciale dans le Nord. Les femmes noires qui fréquentaient des séminaires privés allaient généralement dans des établissements mixtes dirigés par des abolitionnistes blancs, comme *l'Oberlin Collegiate*

*Institute* (devenu *Oberlin College*) dans l'Ohio [Baumgartner K., *In Pursuit of Knowledge : Black Women and Educational Activism in Antebellum America*, NYU Press, 2019].

Il n'existait que quelques séminaires pour femmes noires ; la plupart des écoles gérées par des Afro-Américains étaient mixtes en raison d'une croyance en l'éducation commune ou d'un pragmatisme en matière de coûts. L'un des rares séminaires destinés aux femmes et aux jeunes filles noires était l'école de Sarah Douglass à Philadelphie, qui mettait fortement l'accent sur l'enseignement des sciences. Le séminaire de Douglass a finalement été absorbé par l'*Institute for Colored Youth* dans les années 1850, où Edward Bouchet, le premier Afro-Américain à obtenir un doctorat en physique, allait également enseigner [Linker J.C., "The fruits of their labor : Women's scientific practice in early America, 1750-1860," PhD dissertation, U. Connecticut, 2017 ; Rusert B., *Fugitive Science : Empiricism and Freedom in Early African American Culture*, NYU Press, 2017].

Même si l'idéal de la maternité républicaine ne correspond pas exactement aux femmes et aux enfants Afro-américains, l'historienne Kabria Baumgartner a montré que l'éducation au caractère pour la citoyenneté était également une partie importante de l'éducation afro-américaine au début du XIX<sup>e</sup> siècle. En particulier, de nombreuses Afro-Américaines défendaient une idéologie de la domesticité chrétienne, dans laquelle les femmes étaient considérées comme particulièrement qualifiées pour assurer une autorité morale et éducative à partir de leur domaine domestique. Bien que des femmes blanches défenseurs de l'éduca-

tion, comme Catherine Beecher, aient soutenu la même idéologie, chez les Afro-Américaines, la domesticité chrétienne pouvait être un outil d'autonomisation pour l'amélioration de la communauté [Baumgartner K., *In Pursuit of Knowledge : Black Women and Educational Activism in Antebellum America*, NYU Press, 2019].

## Les temps changent

Le rôle des femmes en tant que premières éducatrices des enfants a continué à justifier l'enseignement de la physique aux filles jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Dans un discours prononcé en 1887 devant l'Association américaine pour l'avancement de la science, le physicien William Anthony déclarait :

« *Non seulement les garçons mais aussi les filles devraient recevoir une formation [en sciences physiques] afin que les grandes vérités de la nature deviennent l'héritage des générations futures et soient enseignées à l'enfant dès son plus jeune âge . . . Je pense à un petit garçon de cinq ans que j'ai rencontré cet été, dont le père possède un moulin et des machines en fonctionnement, et dont la mère est l'une de ces rares femmes douées d'une perspicacité naturelle pour les lois physiques. C'est en partie grâce à sa présence au moulin, mais surtout grâce à l'enseignement de sa mère, que ce garçon a appris . . .* » [Anthony W. A., *Proceedings of the American Association for the Advancement of Science, Thirty-Sixth Meeting, Held at New York, August, 1887*, Salem Press, 1888].

Mais le changement se préparait. À l'aube du XX<sup>e</sup> siècle, plus de la moitié des étudiants en physique de l'enseignement secondaire étaient des femmes, mais en 1950, elles n'étaient plus qu'entre

20 et 30 %. Dans le cadre d'une évolution du paysage industriel et de l'enseignement supérieur, de nombreuses écoles ont cessé d'exiger des cours de physique pour l'obtention du diplôme, et la physique a commencé à être perçue de plus en plus comme une matière masculinisée [Otero V.K., Meltzer D.E., Phys. Teach., 54, 2016].

De nombreuses raisons expliquent ce changement, notamment l'évolution des normes culturelles au sens large et la professionnalisation de la science, mais certaines ont des racines directes dans les écoles secondaires et les établissements d'enseignement supérieur. Tout d'abord, au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, de plus en plus d'établissements d'enseignement supérieur ont ouvert leurs portes aux femmes et celles-ci ont été plus nombreuses à poursuivre des études postsecondaires. La marque d'une éducation universitaire prestigieuse étant un programme d'études classiques, les établissements d'enseignement supérieur pour femmes ont de plus en plus adopté des

exigences en la matière pour renforcer leur statut, et les écoles secondaires ont ajouté des cours de lettres classiques pour suivre la tendance. Certaines écoles ont même encouragé les filles à abandonner les cours de sciences au profit de l'étude du latin ou du grec. Ainsi, alors que les cours de sciences étaient dominés par les garçons, les sciences humaines connaissaient la tendance inverse. La primauté des études classiques dans l'enseignement supérieur s'est estompée depuis, mais l'effet de son importance passée se fait encore sentir [Tolley K., The Science Education of American Girls: A Historical Perspective, Routledge, 2003].

Deuxièmement, au début du XX<sup>e</sup> siècle, les gouvernements des États ont adopté des mesures en faveur de l'éducation, de sorte que les enfants de la classe ouvrière ont été plus nombreux que jamais à fréquenter l'école secondaire. De nombreux États et écoles ont alors restructuré leurs programmes pour les adapter aux élèves de la classe ouvrière qui, vraisemblablement, n'iraient

jamais à l'université et n'auraient jamais besoin de connaissances ésotériques. Les étudiantes ont été orientées vers des cours de dactylographie et d'économie domestique, au détriment de matières moins immédiatement utiles, comme la physique.

Le processus d'adaptation de l'enseignement aux besoins des élèves a également été façonné par le débat plus large et toujours d'actualité sur les différences entre les sexes. Les éducateurs et les administrateurs scolaires craignaient que les étudiantes ne soient masculinisées par l'étude des sciences - qui étaient alors totalement dissociées de la religion et des sentiments ; la physique était désormais de la physique, et non plus de la philosophie naturelle. Ils pensaient que si les filles devaient recevoir une éducation scientifique, il valait mieux que ce soit dans le domaine de l'économie domestique. Certaines femmes scientifiques utilisent même la science domestique comme stratégie de carrière. Au niveau collégial et au-delà, l'économie domestique était souvent un moyen

## Encart 2

## L'utilité du sel

Une jeune fille répand du sel en arrière-plan tandis qu'un garçon glisse sur le sol gelé. Le dialogue questions-réponses qui l'accompagne aborde les liens pratiques entre les connaissances philosophiques naturelles et la vie quotidienne :

*Que nous arriverait-il s'il n'y avait pas de frottements ?*

Nous ne pourrions pas faire un pas avant de commencer à glisser très vite, et nous ne pourrions pas nous arrêter facilement.

*Comment les gens augmentent-ils le frottement lorsque le sol est couvert de glace ?*

Ils y jettent du sel, du sable, des cendres ou quelque chose de rugueux.



Image extraite de Swift M.A., *First Lessons on Natural Philosophy, for Children, Part Second*, William J. Hamersley, 1867, p.83. (Crédit : collection Joanna Gehrman)



pour les femmes de travailler dans les sciences sur des sujets d'étude convenablement féminins. Au niveau secondaire, cependant, les cours d'économie domestique visaient en grande partie à préparer les filles - en particulier les filles de la classe ouvrière et les

Afro-Américaines - à leur future carrière présumée d'employées de maison, d'épouses et de mères, et non de scientifiques.

L'encouragement relatif des filles à étudier les sciences aux Etats-Unis a ouvert la voie à de fortes

communautés de femmes scientifiques dans les nombreux collèges féminins du pays. Toutefois, cela ne veut pas dire que les physiciennes américaines n'étaient pas confrontées à de nombreux obstacles.

## LES TERRES RARES SOUS LA LOUPE

*La configuration électronique de leurs atomes explique pourquoi les terres rares sont des ingrédients clés dans des dizaines de produits technologiques, dont les lasers, les tubes à ondes progressives, les aimants permanents, les disques durs d'ordinateurs et les téléphones cellulaires.*

### Propriétés exceptionnelles des terres rares

En tant que classe, les terres rares comprennent les 15 métaux blancs argentés, allant du lanthane au lutécium dans la sixième période du tableau périodique ( $Z = 57$  à  $71$ ), voir la figure 5, ainsi que les métaux de transition scandium ( $Sc : Z = 21$ ) et yttrium ( $Y : Z = 39$ ), où  $Z$  est le nombre atomique de l'élément. En dépit de leur nom, la plupart des terres rares ne sont pas vraiment rares ; il y a presque autant d'atomes de néodyme que d'atomes de nickel dans la croûte terrestre, par exemple.

Malheureusement, bien que les terres rares soient présentes en de nombreux endroits, elles ne le sont qu'en faibles concentrations dans des gisements de minerais et de charbon, ce qui rend leur extraction et leur séparation/purification relativement coûteuses.

En dépit de cette répartition hétérogène, les terres rares exercent une influence considérable sur

notre vie quotidienne dans les produits courants qui en sont faits, notamment les moteurs électriques, les haut-parleurs, les disques durs et les lasers. Les matériaux qui sont exploités pour leurs propriétés électriques, magnétiques ou optiques sont souvent constitués de quelques types d'atomes distincts. En raison de la simplicité de leur composition, leurs propriétés peuvent être déduites, au moins partiellement, de l'emplacement des atomes qui les composent dans le tableau périodique. Ce survol rapide explore l'influence de la structure électronique des terres rares sur leurs propriétés et leurs applications.

### Contraction des lanthanides

La liaison chimique entre atomes est principalement due aux coquilles électroniques extérieures ( $5d$  et  $6s$ ), à leur remplissage et à leur étendue spatiale qui sont similaires pour toute la série des terres rares. Ce qui varie d'un élément à l'autre, c'est le nombre

d'électrons dans la coquille intérieure  $f$ . Comme les électronégativités des atomes sont presque identiques, un composé qui contient une terre rare donnée peut facilement incorporer une autre terre rare en remplacement.

En effet, le rayon atomique des terres rares varie linéairement en fonction du numéro atomique  $Z$ . Cette propriété est connue sous le nom de *contraction des lanthanides* (voir Figure 1).

Le remplacement d'une terre rare par une autre produit dans le matériau une *pression chimique* sur les éléments environnants. Cette pression est soit positive soit négative, selon que le rayon de l'élément substitué est plus petit ou plus grand que celui de l'élément d'origine. Elle permet aux chercheurs de régler avec précision les propriétés d'un composé, même complexe. Un exemple concret : la phase magnétique des composés d'oxyde de titane ( $R TiO_3$ , où  $R$  est une terre rare) peut être réglée allant de l'antiferromagnétisme (pour  $R$  allant du lanthane

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

Figure 1 : La 6<sup>e</sup> période du tableau de Mendeleïev, intercalation des lanthanides.

La lanthane 57, Ce césium 58, Pr praséodyme 59, Nd néodyme 60, Pm prométhium 61, Sm samarium 62, Eu europium 63, Gd gadolinium 64, Tb terbium 65, Dy dysprosium 66, Ho hofnium 67, Er erbium 68, Tm thulium 69, Yb ytterbium 70 et Lu lutécium 71.

au gadolinium) jusqu'au ferromagnétisme (pour  $R$  étant compris entre l'holmium et le lutécium ou bien de l'yttrium).

Les électrons d'une terre rare occupent des coquilles  $4f^n 5d^1 6s^2$  ou  $4f^{(n+1)} 5d^0 6s^2$ . Les électrons de la coquille d'énergie  $4f$  sont plus localisés dans l'espace que les électrons  $5d$  ou  $6s$ , parce qu'ils sont plus près du noyau. Par conséquent, le moment cinétique orbital  $L$  des électrons  $4f$  imite celui d'un atome libre. Une telle valeur du moment cinétique  $L$  est inhabituelle dans les matériaux où l'environnement cristallin est souvent fortement ressenti par les électrons extérieurs.

En revanche, les orbitales  $d$  font réellement l'expérience de cet environnement cristallin, et leur  $L$  est en moyenne égal à zéro. De plus, la plus grande étendue spatiale des orbitales  $d$  externes dans les ions de métaux de transition donne lieu à une plus grande variabilité de leurs rayons atomiques et donc à un moindre contrôle du matériau en cas de substitution par rapport aux terres rares.

La grandeur de  $L$  a des implications importantes sur la façon dont le spin  $S$ , (moment angulaire intrinsèque) d'un électron se combine avec son mouvement orbital. L'intensité de ce couplage spin-orbite est proportionnelle à  $Z^4$ , elle est donc particulièrement importante dans les éléments lourds (pour  $Z > 56$ ) des terres rares. Lorsque le couplage spin-orbite est fort,  $S$  et  $L$  ne sont plus indépendants et le moment angulaire total  $J = L + S$  devient un bon nombre quantique. La Figure 2 représente la valeur de  $J$ ,  $L$  et  $S$  en fonction de  $Z$ . En outre, les moments magnétiques importants de certaines terres rares et leur anisotropie, rendent les matériaux fortement magnétiques.

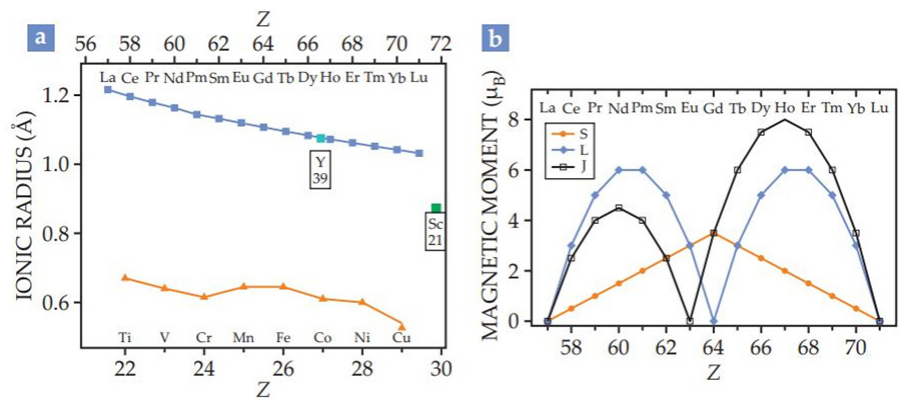


Figure 2 : Cycles de contraction et de spin des lanthanides. (a) Les rayons ioniques des ions  $R^{3+}$  des terres rares et des ions  $M^{3+}$  des métaux de transition sont représentés en fonction du numéro atomique  $Z$ . Comparées aux orbitales  $d$  des métaux de transition, les orbitales  $f$  des terres rares n'ont qu'un effet faible et indirect sur la liaison. (b) Les effets du spin  $S$ , du moment angulaire orbital  $L$  et du moment total  $J$  sur le moment magnétique des ions de terres rares sont représentés en fonction de  $Z$ . La structure à double pic est une conséquence des règles de Hund pour le remplissage de l'enveloppe atomique.

### Applications des terres rares

Les propriétés des terres rares : contraction des lanthanides, similarité de leurs structures électroniques externes et couplage spin-orbite font qu'elles sont exploitées dans une variété d'applications. Leur domaine d'utilisation est illustré en encart. La présente étude se concentre sur trois d'entre elles : le cristal de grenat d'yttrium-aluminium (YAG) utilisé dans une large gamme de lasers ainsi que les matériaux ferromagnétiques à base de néodyme (Nd) pour aimants permanents dans les moteurs électriques et ceux à base de samarium (Sm) pour les tubes à ondes progressives (TWT) utilisés pour les communications spatiales. Enfin, l'encart énumère le vaste domaine d'utilisation des terres rares.

### Cristal YAG pour lasers

Le grenat d'yttrium-aluminium YAG (*Yttrium Aluminium Grenat*) est un cristal dur, durable et transparent largement utilisé dans les lasers en raison de son gain élevé. La transition laser de ce matériau se produit entre deux niveaux

d'énergie d'un ion néodyme  $Nd^{3+}$  dans un laser Nd : YAG. Lorsque le cristal YAG est dopé avec les deux éléments erbium  $Er^{3+}$  et holmium  $Ho^{3+}$ , l'effet laser est encore plus efficace en raison du transfert d'énergie plus favorable entre ces ions.

Le fluorure de lithium (Li)/yttrium (Y) est un autre cristal hôte populaire pour les lasers. En raison de leur structure électronique externe identique et de leur taille ionique similaire, l'euprimum Eu, le thulium Tm et l'ytterbium Yb remplacent aisément  $Y^{3+}$  dans le matériau. D'autres terres rares remplissent des fonctions importantes dans d'autres systèmes laser. Par exemple, les lasers à dioxyde de carbone produisent de la lumière IR à partir de transitions entre les niveaux de vibration moléculaires.

En fonctionnement à haute puissance, une partie du  $CO_2$  se transforme en CO, ce qui provoque souvent la défaillance du laser. L'oxyde de lanthane/strontium/cobalt est un oxyde de terre rare qui, lorsqu'il est utilisé comme électrode dans le laser, sert de catalyseur en favorisant la reconver-

sion du CO en CO<sub>2</sub>, prolongeant considérablement la durée de vie du laser. Sans lanthane, le catalyseur est instable.

### Éléments ferromagnétiques à base de néodyme Nd...

Les applications magnétiques bénéficient du fort couplage spin-orbite des terres rares. Les interactions entre les moments magnétiques des électrons dans les orbitales *4f* et *3d* partiellement remplies produisent un ferromagnétisme particulièrement puissant. La caractéristique la plus impressionnante des aimants est leur champ coercitif extrêmement important qui mesure leur capacité à résister à la démagnétisation. Dans les aimants ferromagnétiques à base de terres rares, ce champ est d'un ordre de grandeur supérieur à celui des aimants permanents traditionnels tels que

le fer. Il résulte des anisotropies magnétiques induites par le couplage spin-orbite dans les terres rares.

Les aimants permanents à base de terres rares et de métaux de transition les plus répandus sont le samarium-cobalt (Sm-Co), le néodyme-fer-bore (NdFeB), le terbium-fer (Tb-Fe) et le gadolinium-cobalt (Gd-Co). Le Nd, le Sm, le Tb et le Gd ont des moments parmi les plus élevés de toutes les terres rares (voir figure 4b). Et leurs alliages offrent des avantages tels qu'une température de Curie et un champ coercitif élevés. Ils remplacent couramment les aimants permanents traditionnels et se retrouvent souvent dans les éoliennes, les moteurs de voitures électriques, les enregistreurs de données et les actionneurs de bobines vocales.

Un décalage de liaison dans un

composé complexe peut provoquer une distorsion structurelle. Par exemple, dans les pérovskites orthorhombiques  $RMO_3$  (*R* pour terre rare et *M* pour métal), l'énergie cinétique des électrons est proportionnelle à l'écart de l'angle de liaison *M-O-M* par rapport à 180°. Une terre rare dans la série de Lu<sup>3+</sup> à La<sup>3+</sup> élargit la déviation de 145° à 165° dans  $RNiO_3$ . Par conséquent, la conductivité de la pérovskite peut passer de celle d'un métal à celle d'un isolant. Pendant cette transition de phase, l'intensité des interactions électroniques peut être réglée dans une large gamme. En effet, le  $RNiO_3$  est un système classique pour l'étude des interactions électroniques dans les solides.

Des propriétés exotiques se manifestent au passage des interactions fortes aux interactions faibles : par exemple une magnétorésis-

#### Encart 1 Les nombreuses applications des terres rares

##### AIMANTS : Nd, Pr, Sm, Tb, Dy

Moteurs et générateurs, microphones et haut-parleurs, disques durs, applications de défense : lasers, filtres radar, réfrigération magnétique.

##### ALLIAGES METALLIQUES : La, Ce, Pr, Nd, Y

Batteries, superalliages, acier, alliages aluminium-manganèse.

##### VERRES et CERAMIQUES : Ce, La, Pr, Nd, Gd, Er, Ho

Moyens de polissage, verres anti-infrarouge, verres thermiques, colorants, capteurs, piles à combustible, matériaux réfractaires, supraconducteurs.

##### PROCESSUS CHIMIQUES et CATALYSEURS : La, Ce, Pr, Nd

Raffinage du pétrole, catalyseurs automobiles, additifs de diesel, traitement des eaux.

##### ECLAIRAGE : Eu, Y, Tb, Nd, Er, Gd, Ce, Pr

Lasers, LED, écrans plats, lampes fluorescentes, capteurs optiques, analyses en rayons X, fibres optiques.

##### AUTRES

Pigments, engrais, traceurs médicaux, nucléaires.

tance colossale dans les oxydes de manganèse ou encore une supraconductivité à haute température dans les oxydes de cuivre. Et dans ces oxydes, la contraction des lanthanides sert de bouton de réglage fin de leurs états électroniques.

Aux températures ordinaires, les aimants NdFeB, découverts en 1984, ont des propriétés magnétiques bien meilleures que celles du  $\text{SmCo}_5$  ou du  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , décrits ci-dessous. Leur plage de température utile est comprise entre  $-138\text{ }^\circ\text{C}$  et  $150\text{ }^\circ\text{C}$ . Par conséquent, les aimants NdFeB sont le seul choix possible pour les applications à température modérée telles que les moteurs de voitures électriques ou les appareils IRM.

### ... et à base de samarium Sm pour les télécommunications spatiales

Les tubes à ondes progressives (TWT pour *Travelling Wave Tube*) constituent l'épine dorsale du système mondial de communications spatiales. Ils utilisent les éléments ferromagnétiques à base de samarium.

La plupart des TWT sont constitués d'un empilement d'anneaux magnétiques en samarium-cobalt ( $\text{SmCo}_5$  ou  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ), chacun étant magnétisé à l'opposé de son voisin. Par exemple un empilement de 25 cm de long comprenant 16 anneaux de 4 cm de diamètre. Les tubes peuvent amplifier et émettre des ondes millimétriques dans une gamme de fréquences de 300 Mhz à 50 Ghz, avec des bandes passantes allant jusqu'à deux octaves, des gains de puissance de 40 à 70 dB et des puissances de sortie de quelques watts à plusieurs mégawatts.

Grâce à la découverte et au développement des aimants  $\text{SmCo}_5$  et

$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  à la fin des années 1960, les satellites de communication en orbite basse ou en orbite géosynchrone comptent environ 20 à 50 de ces tubes TWT et fournissent de nombreux services essentiels, permettant au monde entier d'accéder aux communications spatiales.

En 1966, Karl Strnat et Gary Hoffer déclaraient avoir trouvé des propriétés magnétiques prometteuses dans le composé yttrium-cobalt  $\text{YCo}_5$ . L'année suivante, ils annonçaient la découverte d'une nouvelle famille de matériaux pour aimants permanents à base de cobalt [Strnat K. et al, *J. Appl. Phys.*, 38, 1967]. Les chercheurs ont remplacé l'Y par d'autres terres rares et déterminé que le  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  possédait les propriétés magnétiques les plus impressionnantes et constituait le choix optimal pour les applications pratiques.

Les aimants  $\text{SmCo}_5$  et  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  sont supérieurs aux aimants en platine-cobalt qu'ils ont remplacés en termes de propriétés magnétiques, de coût, de taille et de poids. À l'heure actuelle, ils restent les seuls choix possibles pour de nombreuses applications, notamment celles qui nécessitent des températures de fonctionnement très basses ou très élevées. Leurs utilisations comprennent les gyroscopes pour les lanceurs spatiaux, les moteurs sans balais à couple élevé pour les outils électriques dentaires et médicaux, les radars d'avion et les lecteurs de disques d'ordinateur. Ils sont appropriés pour fonctionner à des températures allant du zéro absolu ( $-273\text{ }^\circ\text{C}$ ) à  $300\text{ }^\circ\text{C}$  pour le  $\text{SmCo}_5$  et à  $350\text{ }^\circ\text{C}$  pour le  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ .

Fait important, le champ magnétique que produisent les aimants SmCo est parallèle à l'axe  $c$  de leur cellule unitaire hexagonale et ne

bascule jamais vers le plan basal facile, quelle que soit la température. Ce phénomène, connu sous le nom d'anisotropie magnéto-cristalline, offre aux concepteurs d'applications une grande flexibilité dans la forme des aimants.

Comme à basse température, les propriétés magnétiques des aimants  $\text{SmCo}_5$  et  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  sont bien meilleures que celles des aimants NdFeB décrits ci-avant, elles constituent le seul choix pour la plupart des applications spatiales, comme les TWT. Ainsi, les deux technologies d'aimants SmCo et NdFeB sont appelées à coexister car leurs domaines d'application ne se chevauchent pas.

(Références : Coey J. M. D., *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge U. Press, 2009, *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, vols. 1-43, Elsevier (1978–2013), Voncken J. H. L., *The Rare Earth Elements : An Introduction*, Springer, 2016, Jha A. R., *Rare Earth Materials : Properties and Applications*, CRC Press, 2016.)

(D'après un article de *Physics Today* 73, 1, 66, 2020 par Jianshi Zhou, professeur d'ingénierie mécanique à l'université du Texas à Austin et Gregory A. Fiete, professeur de physique à l'université Nord-Ouest à Boston, Massachusetts et un courrier paru dans *Physics Today* 74, 11, 12, 2021 de Melvin C. Ohmer de Sevierville, Tennessee.)

## EXTRACTION ET PURIFICATION DE TERRES RARES EN OCCIDENT

### Une pénurie annoncée

Sous l'effet de la forte augmentation prévue de la demande de véhicules électriques, d'éoliennes et d'autres applications nécessitant des aimants permanents, la consommation de nombreux éléments de terres rares devrait dépasser l'offre mondiale d'ici dix ans.

Selon l'Agence internationale de l'énergie, le marché mondial des véhicules électriques pourrait connaître une croissance annuelle étonnante de 36 % au cours de la prochaine décennie si les nations respectent les engagements pris dans le cadre de l'accord de Paris sur le climat de 2015. L'Union européenne, le Royaume-Uni et la Californie ont annoncé l'interdiction de la vente de nouveaux véhicules à combustion interne, qui prendra effet en 2035. La plupart des moteurs électriques nécessaires à cette nouvelle motorisation utilisent des aimants permanents. L'Union européenne prévoit de multiplier par cinq le nombre de turbines offshore d'ici 2030, pour atteindre un total de

60 gigawatts (GW), alors que les turbines à entraînement direct nécessitent environ une tonne d'aimant par mégawatt (MW).

Les aimants néodyme-fer-bore (NdFeB) sont les plus performants, les plus compacts et les plus légers disponibles dans le commerce. Ils sont également présents dans d'autres petits composants tels que les vitres électriques, les interrupteurs et les actionneurs, les disques durs, les haut-parleurs et les vibreurs de téléphones portables et dans bien d'autres applications. Ils sont fabriqués suivant deux procédés différents : le premier est le frittage à haute température suivi du moulage sous pression, le second est l'agglomération des poudres suivi de la fixation dans un liant tel que l'époxy ou un thermoplastique. Les aimants frittés sont capables de champs beaucoup plus puissants, tandis que les aimants agglomérés peuvent être moulés par injection, par compression, extrudés ou même être imprimés en 3D dans des formes plus complexes.

Les aimants frittés sont de loin les plus utilisés : on estime que 160 000 tonnes ont été vendues dans le monde en 2020, l'année dernière, alors que la consommation d'aimants agglomérés était de 12 000 tonnes. A noter que ces aimants contiennent souvent un mélange néodyme/praséodyme (Nd/Pr), car ces deux éléments sont présents ensemble dans le minerai et sont difficiles à séparer.

En 2020, la montée en flèche des prix des terres rares a reflété les tensions croissantes entre la Chine et l'Occident. Le prix du néodyme a bondi de 75 % entre janvier et décembre, et celui du mélange Nd/Pr de 5 %. Le terbium, utilisé avec le dysprosium en petites quantités pour empêcher la désaimantation aux températures élevées, a plus que doublé de prix au cours de la même période.

La part de la Chine dans l'exploitation minière des terres rares dans le monde a diminué ces dernières années, mais elle fabrique toujours environ 90 % du métal

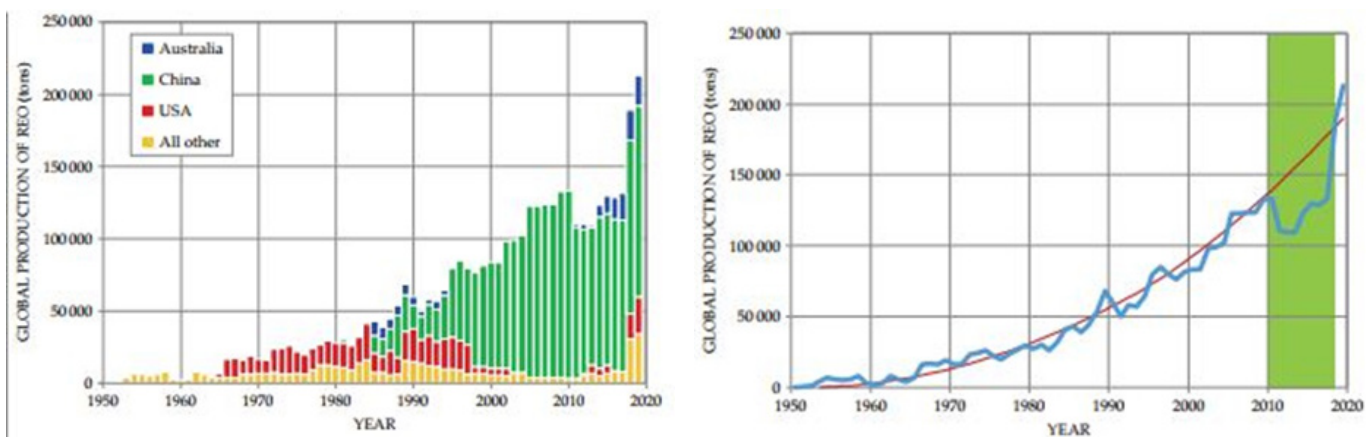


Figure 1 : Production mondiale d'oxydes de terres rares.

(gauche) Production globale : La ligne de tendance continue est ajustée aux données réelles irrégulières jusqu'en 2010 et extrapolée au-delà. La chute de la production dans la bande ombrée indique la baisse de la demande après une flambée des prix de 2011.

(droite) Sources des minerais. (Crédits : d'après King A., *Critical Materials*, Elsevier, 2020, sur la base des données des USGS Mineral Commodity Summaries)

et des aimants NdFeB. Le Japon produit presque tout le reste.

La Chine reste essentiellement la seule source mondiale de dysprosium et de terbium, qui sont extraits d'argiles dans le sud du pays. Les fabricants d'aimants sont parvenus à réduire les quantités de ces deux éléments sans sacrifier les performances. Entretemps, les ingénieurs cherchent à concevoir des moteurs qui permettraient de réduire les besoins en ces deux éléments.

Au fur et à mesure que l'offre se resserre, l'utilisation du NdFeB se limitera probablement aux applications à haute valeur ajoutée telles que la propulsion des véhicules électriques. C'est ce qui s'est passé lors de la flambée des prix de 2011, lorsque les constructeurs automobiles ont remplacé d'autres types d'aimants dans de nombreuses applications telles que les essuie-glaces et les vitres électriques, où les hautes performances et la compacité ne sont pas si importantes.

Certaines études ont montré que le cérium et le lanthane, tous deux abondants, peuvent suppléer une partie des besoins en mélange Nd/Pr dans certaines applications.

Il existe aussi un énorme potentiel, pratiquement inexploité, de recyclage du métal des aimants. Moins de 1 % du NdFeB contenus dans les composants qui ont atteint leur fin de vie utile est réutilisé aux États-Unis. On prévoit que 90 000 tonnes par an d'aimants NdFeB pourront être recyclés dans le monde d'ici 2030. Mais la croissance de la demande restera supérieure à la quantité de matériaux récupérés.

### Situation en Amérique du Nord

En juillet 2017, les agences fé-

dérales ont reçu l'ordre de prendre des mesures non spécifiées pour réduire la dépendance des États-Unis à l'égard des sources étrangères de terres rares et d'autres « minéraux critiques » dont la rareté va de l'aluminium aux métaux du groupe du platine.

Le Département de l'énergie (DoE) a annoncé récemment qu'il aiderait à financer des projets allant dans ce sens. Il dispose d'environ 40 milliards de dollars inutilisés destinés au développement d'énergies propres et à la fabrication de véhicules électriques. C'est un revirement total, car par le passé, en 2012, le DoE avait rejeté une demande de la mine de *Mountain Pass*, sous prétexte que l'extraction/purification de minerai de terres rares était bien trop en amont des produits finis pour être éligible à ces fonds.

La mine de *Mountain Pass*, exploitée par la société *MP Materials*, présente l'une des plus fortes concentrations (8 %) de minerai de terre rare au monde. Mais toute sa production est expédiée en Chine pour y être traitée. Une usine est prévue en 2023 pour séparer sur place les terres rares légères, principalement le néodyme et le praséodyme. Il s'agirait de la première installation de séparation en Occident. Elle bénéficie d'une subvention du Département de la Défense (DoD). Mais le minerai disponible est relativement pauvre en terres rares lourdes, de petites quantités pourraient suffire pour les besoins de la défense.



Figure 2 : Vue éclatée d'un moteur de véhicule électrique à aimants permanents.

Les aimants permanents contenant des terres rares sont intégrés dans le rotor.

Une deuxième subvention a été accordée pour la séparation des éléments plus lourds, principalement le dysprosium et le terbium. Une autre source potentielle est la région de *Bear Lodge*, sur les terres du Service Forestier du Wyoming.

La société *Urban Mining*, basée au Texas, est actuellement le seul fabricant américain de NdFeB fritté et sa production représente environ 20 % de la demande mondiale de 20 milliards de dollars pour ces aimants. Cette société a mis au point un aimant NdFeB qui utilise 40 % de dysprosium en moins que l'aimant conventionnel et offre des performances thermiques supérieures. Elle a reçu récemment une subvention du DoD pour le recyclage des aimants NdFeB mis au rebut.

L'entreprise *Lynas*, basée en Malaisie, est le seul autre grand producteur de terres rares en dehors de la Chine et traite actuellement des minerais d'origine australienne et fournit une grande partie de la matière première en terres rares au Japon. Elle a reçu dernièrement une subvention du DoD pour implanter au Texas une usine de séparation d'éléments lourds.

Le Canada a aussi plusieurs perspectives d'exploitation de terres

rares. Il s'agit notamment de la mine de *Kwyjibo*, au Québec, appartenant au gouvernement provincial, de la mine *Foxtrot*, au Labrador et du gisement *Ashram*.

En outre, le gisement de terres rares lourdes *Bokan-Dotson Ridge* près de Ketchikan, en Alaska, suscite l'intérêt de la société *Ucore Rare Metals*, en Nouvelle-Écosse, qui prévoit de construire une usine de séparation. Bien que les perspectives soient prometteuses, elle manque actuellement des centaines de millions de dollars nécessaires pour arriver jusqu'à la production.

### L'alternative de la monazite

La demande croissante et les prix élevés prolongés pourraient

stimuler l'extraction des terres rares à partir de la *monazite*, un composant des sables minéraux. Le gouvernement provincial du Saskatchewan a accordé récemment une subvention pour la construction d'une installation de production de 500 tonnes par an d'oxydes individuels à partir de la monazite lorsqu'elle commencera à fonctionner en 2023.

La société *Medallion Resources*, à Vancouver, en Colombie-Britannique, termine une étude de faisabilité technique et économique d'une usine de traitement de la monazite qui produirait 3 500 tonnes de terres rares par an, dont 500 tonnes de Nd/Pr. La société *Energy Fuels*, la plus grande société minière d'uranium américaine, va acquérir des sables de monazite provenant de la

mine de *Chemours Co* en Géorgie et prétend pouvoir récupérer suffisamment de terres rares mixtes pour répondre à 10 % de la demande américaine lorsqu'elle commencera à les traiter.

Parmi les autres pays disposant d'abondants gisements de monazite, citons l'Australie, l'Inde, l'Indonésie, Madagascar et les Philippines. La société minière australienne *Iluka Resources*, spécialisée dans les sables minéraux, a engagé près de 30 millions de dollars pour améliorer ses opérations de traitement de la monazite.

(D'après une note de technologie de *Physics Today*, 74(02), 20, 2021 par David Kramer.)

## UN FEUILLET DU CATALOGUE D'HIPPARQUE RETROUVÉ SUR UN PALIMPSESTE

Lors de l'examen, au XIX<sup>e</sup> siècle, de documents manuscrits médiévaux sur parchemin dans la bibliothèque du monastère Sainte-Catherine dans le Sinaï en Égypte, deux linguistes écossais ont trouvé une dizaine de feuillets abimés issus d'une traduction en ancien syriaque d'un document d'origine grecque appelé « *L'échelle du Paradis* », comprenant une règle de vie d'ascèse pour les moines.

Comme bien des documents de cette époque, le parchemin utilisé par les copistes est un « *palimpseste* », c'est-à-dire la récupération, par lavage et/ou grattage, d'un parchemin plus ancien. En effet, le parchemin est fabriqué à partir de peaux animales, de mouton ou de chèvre. C'était un produit très onéreux, un seul animal ne donnant au final qu'une surface utile d'un peu plus d'un formant A3 actuel, c'est-à-dire pas plus que huit feuillets recto-verso.

Une partie de ce manuscrit est actuellement la propriété du *Musée de la Bible* de Washington. Il a été rassemblé à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle par acquisitions sur le marché libre des antiquités égyptiennes. Depuis une vingtaine d'années, aux États-Unis, une équipe de

chercheurs de la bibliothèque « *Early Manuscripts Electronic Library* » s'est spécialisée dans la photographie multispectrale de ces documents récupérés, afin de constituer une base de données avec pour objectif final d'en décoder les textes sous-jacents. L'analyse de ce

document a été confiée à Peter Williams, directeur du Centre d'études bibliques *Tyndale House* à Cambridge, Royaume-Uni, qui a profité des longs mois de confinement en 2021, pour se pencher attentivement sur les pages photographiées (voir Figure 1).

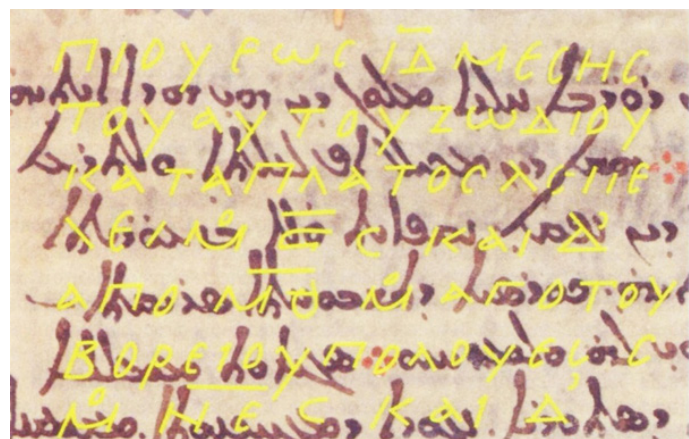


Figure 1 : Feuillet 53 v du palimpseste.

Le texte principal (noir) est écrit en syriaque, mais l'image multispectrale permet de reconstituer le texte sous-jacent (clair) en grec ancien. Au début de la dernière ligne, on peut décrypter les signes signifiant « degré 55 ».

On y découvre au feuillet 53 v, au début de la dernière ligne, le groupe pour lequel le chercheur a d'abord identifié la partie surlignée comme étant le nombre 55 écrit en grec, le surlignage étant utilisé pour marquer la partie numérique ( $\varepsilon$ , cinquième lettre et  $\nu$ , quatorzième pour 50). Il a alors supposé que le symbole précédent était une forme d'abréviation du mot degré (en grec :  $\mu\omicron\iota\rho\alpha$ ) par les deux premières lettres superposées. Cette inscription le conduisit alors à soupçonner un texte scientifique en grec, dont le fragment présent pourrait être un extrait d'une liste numérique, par exemple un catalogue d'étoiles.

La suite de la recherche s'appuie sur un autre document ancien du VIII<sup>e</sup> siècle, issu d'un monastère du nord du royaume Franc,

une mauvaise traduction latine d'un texte appelé « *Les phénomènes d'Aratos de Soles* » dans lequel figure un commentaire astronomique obscur car mal traduit ainsi que les coordonnées des étoiles de trois constellations bien identifiées : la *Grande Ourse*, la *Petite Ourse* et le *Dragon*.

La confrontation des deux textes a permis aux chercheurs de confirmer que ces deux fragments provenaient bien d'un même document, le catalogue d'étoiles du II<sup>e</sup> siècle av. J.-C. du célèbre Hipparque de Nicée. Ce catalogue est perdu de nos jours, mais son original était encore disponible quatre siècles plus tard, au temps de Ptolémée, qui en a fait mention dans son œuvre astronomique célèbre « *La grande Synthèse* », aussi connue

sous son titre arabe « *Almageste* ». A ce jour, les coordonnées d'une quinzaine d'étoiles du catalogue ont été retrouvées, dont celles de l'étoile  $\alpha$  de la *Petite Ourse* en 129 av. J.-C.. Les recherches se poursuivent activement pour identifier d'autres pages de ce texte ainsi que d'autres palimpsestes déjà répertoriés qui pourraient révéler d'autres pages de ce catalogue d'Hipparque.

Cette découverte illustre aussi l'intérêt de l'imagerie multispectrale pour ce type de recherche et ouvre de nouvelles perspectives sur l'histoire de l'astronomie. De belles découvertes verront sans doute encore le jour !

(D'après *Pour la Science*, 543, 01, 72, 2023)

## LES GEYSERS D'ENCELADE

*Aux confins gelés du Système solaire, Encelade, l'une des satellites naturels de Saturne, présente une riche activité géologique alimentée par de l'eau liquide.*

### Description du phénomène

L'une des découvertes les plus passionnantes de ces dernières décennies dans le domaine des sciences planétaires est l'éruption d'eau d'Encelade, un petit satellite naturel de Saturne recouvert de glace. Des particules de glace et de la vapeur sont éjectées. Une partie de la glace retombe à la surface sous forme de neige, faisant d'Encelade l'un des objets les plus réfléchissants de notre Système solaire. Les petites particules de glace n'alimentent pas seulement l'anneau E de Saturne, mais avec la vapeur, elles offrent également une fenêtre sur la structure et la dynamique de l'intérieur d'Encelade, y compris son noyau rocheux, un océan d'eau liquide potentiellement habitable, et les fissures par lesquelles l'eau jaillit.

Les sources des éruptions sont un ensemble de fissures situées au voisinage du pôle sud d'Encelade. Les propriétés des matériaux éruptifs ont été caractérisées par toute une série d'instruments à bord de la sonde *Cassini* qui a exploré Saturne et ses satellites naturels entre 2004 et 2017. Ces instruments comprenaient des spectromètres UV, visibles et IR, des spectromètres de masse et un analyseur de particules. L'ensemble de leurs mesures a révélé que le gaz est principalement constitué de vapeur d'eau et de quelques pour-cent d'autres composés volatils. Le flux de masse total varie dans le temps, avec en moyenne quelques dizaines de kilogrammes de particules de glace par seconde et un flux de gaz d'un ordre de grandeur supérieur. Nous abordons ci-après certains aspects physiques du dé-

roulement des éruptions.

Bien que les chercheurs se soient d'abord demandé si l'eau des geysers provenait d'une eau liquide ou de la décomposition de glaces contenant du gaz dans la croûte de glace, la présence de sels dans les grains de glace et de nanoparticules de silice indique une source provenant d'un océan en contact avec un noyau rocheux.

La présence d'un océan global sous la croûte d'Encelade est confirmée par des mesures de gravité et de forme, ainsi que par l'amplitude des oscillations de marée de la croûte. Les geysers semblent donc provenir d'un océan interne, représenté sur la figure 1, l'eau traversant la croûte par des fissures situées près du pôle Sud.



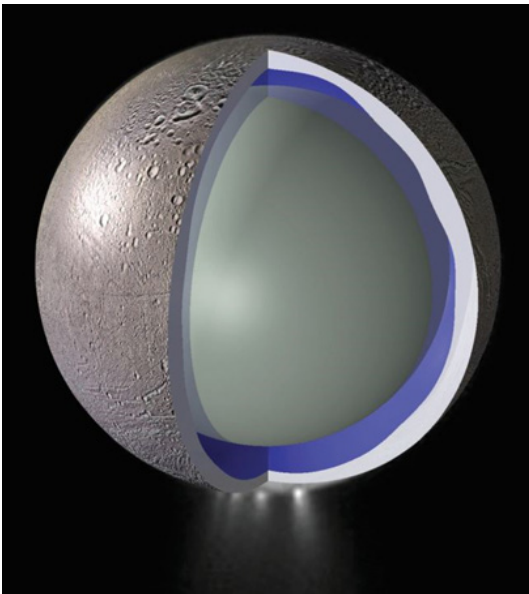


Figure 1 : Coupe transversale d'Encelade. Outre les cratères qui marquent sa surface glacée, Encelade contient des plaines lisses et des fissures, des crêtes et des fentes. Son intérieur est composé d'une croûte de glace, dont l'épaisseur est d'environ 20 km en moyenne, mais qui s'amincit au pôle Sud, comme l'ont montré les mesures de gravité. Sous cette coquille se trouve un océan recouvrant un intérieur rocheux. (Crédits : Doug Hemingway)

La présence d'éruptions d'eau actives sur un petit corps (250 km de rayon) dans le Système solaire externe froid soulève plusieurs questions : Comment ce corps est-il suffisamment chaud pour abriter un océan liquide ? Comment se forment les fissures qui permettent les éruptions ? Pourquoi l'eau ne gèle-t-elle pas dans les fissures ? Pourquoi les fissures ne se trouvent-elles qu'au pôle Sud ? Ces questions restent des sujets de recherche ouverts. Néanmoins, nous privilégions certaines explications intuitives pouvant être privilégiées.

Encelade tourne deux fois autour de Saturne pendant une seule orbite de Dioné, un autre satellite de la planète. La résonance orbitale force Encelade à se placer sur une orbite elliptique, ce qui entraîne une déformation cyclique due aux marées. La chaleur dissipée par cette déformation main-

tient l'intérieur suffisamment chaud pour maintenir un océan. La même dissipation des marées à l'intérieur de fissures remplies d'eau peut contribuer à empêcher l'eau de geler.

La présence de l'océan lui-même peut être à l'origine de la formation de ces fissures en raison de la rétroaction entre l'orbite d'Encelade et la dissipation de la chaleur par les marées. Lorsque la dissipation diminue, la coque de glace s'épaissit. L'augmentation du volume d'eau liquide qui gèle à la base de la coquille de glace comprime l'océan et étire la coquille. Si les contraintes dues à l'étire-

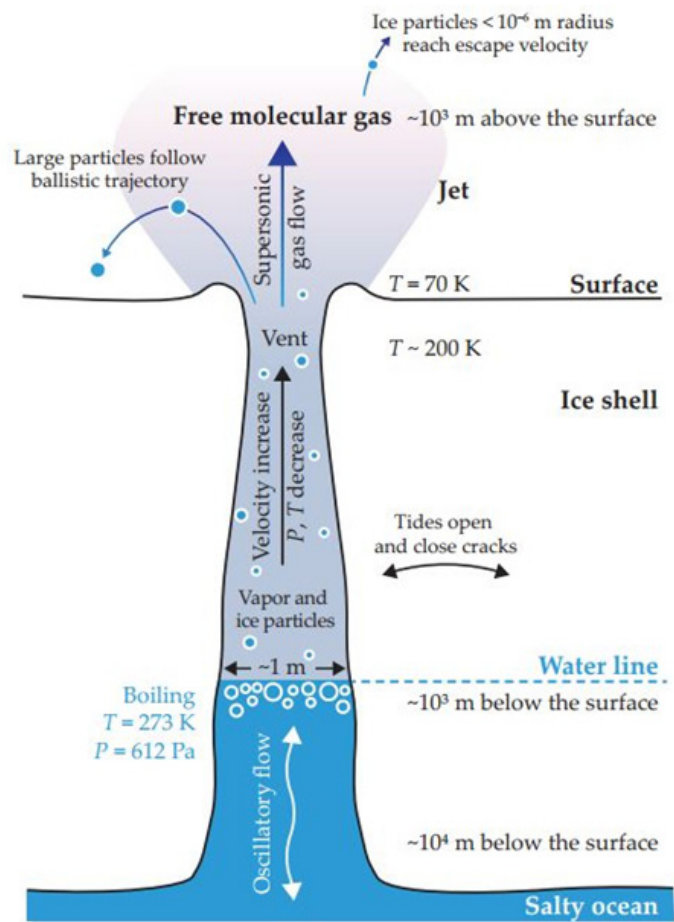


Figure 2 : Dynamique de la coquille.

Ce schéma (non à l'échelle) illustre certains des principaux processus qui se produisent à l'intérieur de la croûte de glace et de ses fissures. Les geysers sont supposés provenir de l'eau d'un océan situé sous la croûte, bien que toute source d'eau liquide, telle qu'un réservoir de fonte dans la croûte, devrait produire une dynamique similaire. Lorsque les forces de marée d'Encelade ouvrent et ferment une fissure, l'eau s'écoule dans la fissure (et s'en éloigne). La vitesse de la vapeur ascendante et des particules de glace augmente dans la fissure à mesure que la pression et la température baissent. Au-dessus de la fissure, elles atteignent une vitesse supersonique.

ment deviennent suffisamment importantes, une fissure peut se former.

Sur Encelade, la gravité est faible et les pressions restent suffisamment basses dans toute la coquille de glace pour que des fissures pénètrent l'ensemble de la coquille. Les fissures se forment au pôle Sud, là où la couche de glace est la plus fine et où la combinaison du réchauffement dû à la déformation de la couche de glace par

les marées et à la circulation océanique est la plus élevée.

### Mécanismes d'éjection de l'eau

Les processus qui régissent l'éjection de l'eau varient en fonction de la profondeur et de l'altitude (voir Figure 2). Dans les fissures, l'eau remonte sur environ 90 % de la distance entre la base de la coquille de glace et la surface, en raison de la différence de densité entre l'eau liquide et l'eau solide. La ligne de flottaison se situe au point triple de l'eau, où coexistent les phases liquide, solide et vapeur. Immédiatement au-dessus de la ligne de flottaison, l'ébullition par décompression produit un flux de vapeur qui entraîne les gouttelettes liquides. Ces gouttelettes gèlent, formant éventuellement les particules de glace salée échantillonnées par la sonde *Cassini*.

En première approximation, le flux de gaz et de glace dans les fissures peut être considéré comme proche de l'adiabatique - ce qui signifie que l'énergie n'est transférée à l'environnement que sous forme de travail - si deux conditions sont remplies. Premièrement, l'écoulement doit être suffisamment rapide pour que l'échange de chaleur avec les parois de la fissure puisse être négligé. Deuxièmement, les particules éjectées et le gaz doivent rester en équilibre thermodynamique, et la vapeur, le liquide et les solides doivent tous se déplacer à la même vitesse.

Au fur et à mesure que le flux monte, il se décompresse et se refroidit. La vapeur d'eau se condense sur les particules de glace et « nucléarise » de nouvelles particules, créant un mélange de particules et de gaz. La vitesse de l'écoulement au niveau de l'évent ou « cratère » est probablement limitée par la vitesse du son du

mélange biphasé, car le gradient de pression devient infini lorsque la vitesse se rapproche de celle du son.

La contre-pression exercée par le mélange se déplaçant à travers la fissure et l'évent limite le taux de vaporisation et le flux de masse total des éruptions. Au-dessus de la surface d'Encelade, le mélange en éruption forme un geyser qui s'étend dans l'espace à des vitesses qui deviennent supersoniques. Avec l'expansion continue, le libre parcours moyen des molécules de gaz devient trop important pour permettre une nouvelle condensation. Au fur et à mesure que le panache se dilue, il devient optiquement mince et ne se dilate plus avec une entropie constante, la chaleur rayonnant vers l'espace.

Dans la fissure et juste au-dessus de l'évent, les plus petites particules de glace peuvent être accélérées par l'expansion du gaz et atteindre des vitesses de fuite ; les particules plus grosses avec des vitesses plus faibles, suivent des trajectoires balistiques et retombent à la surface d'Encelade.

Les physiciens sont moins sûrs de ce qui se passe à l'intérieur du corps, notamment de la possibilité de générer de l'eau liquide dans la croûte de glace et, par conséquent, de la nécessité pour les geysers de provenir de l'océan. Il est particulièrement important de connaître la composition de l'océan et des gaz et particules éjectés pour évaluer l'habitabilité de l'océan intérieur et interpréter d'éventuelles bio-signatures. Des questions restent également en suspens concernant la géométrie des éruptions et des fissures, leur longévité, la façon dont elles sont modulées par les marées et la raison pour laquelle elles se trouvent au pôle sud.

La mission *Encelade Orbilander* proposée, qui collecterait des matériaux frais du panache depuis l'orbite et enverrait un atterrisseur pour recueillir des échantillons de la surface, est l'une des deux grandes missions prioritaires de l'étude décennale sur les sciences planétaires et l'astrobiologie pour la période 2023-2032 aux États-Unis. Une nouvelle génération d'instruments sera mieux à même de sonder les processus géochimiques et physiques qui alimentent les éruptions, d'évaluer l'habitabilité de l'océan et de rechercher des preuves de vie passée ou présente dans les matériaux éruptifs.

(Manga Michael & Rudolph Max, « *Enceladus erupts* », *Physics Today* 76, 01 p.62, 2023.)

(Sources additionnelles : Porco C.C. & al., "Cassini observes the active south pole of Enceladus," *Science* 311, 1393, 2006 ; Schenk P.M. & al., eds., *Enceladus and the Icy Moons of Saturn*, U. Arizona Press, 2018 ; Nakajima M., Ingersoll A.P., "Controlled boiling on Enceladus. 1. Model of the vapor-driven jets," *Icarus* 272, 309, 2016 ; Kite E.S., Rubin A.M., "Sustained eruptions on Enceladus explained by turbulent dissipation in tiger stripes," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 113, 3972, 2016 ; Hemingway D.J., Rudolph M.L., Manga M., "Cascading parallel fractures on Enceladus," *Nat. Astron.* 4, 234, 2020.)

# UN PREMIER BILAN CLIMATOLOGIQUE DE L'ANNÉE 2023

*Note préliminaire : Les valeurs normales pour les paramètres repris dans ce texte sont les moyennes pour la période 1991-2020 (la période de référence de 30 ans pour le climat actuel). Sauf mention contraire, les records sont valables pour la période à partir de 1991.*

## Généralités

Plusieurs records ont été battus l'année dernière. Certains ne s'appliquent qu'à la période de référence actuelle (1991-2020), mais des records absolus ont également été battus (la période dépend du paramètre).

Selon l'Organisation météorologique mondiale, 2023 est l'année la plus chaude à l'échelle planétaire (observations à partir des années 1860). À Uccle, 2023 est la troisième année la plus chaude depuis le début des observations en 1833.

## Aperçu des paramètres clés

### **La troisième température moyenne annuelle la plus élevée à Uccle**

En 2023, la température moyenne à Uccle a été de 12,1 °C (norm. : 11,0 °C). Avec cette valeur - la troisième fois au-dessus de 12 °C - l'année dernière se positionne en troisième position des années les plus chaudes, juste derrière les années record de 2020 et 2022 (12,2 °C) (mesures depuis 1833). Les années 2014 et 2018 (toutes deux avec 11,9 °C) complètent le top 5.

A l'exception des mois d'avril,

juillet et août, les températures moyennes mensuelles ont été supérieures à leur valeur normale respective. En juin et en septembre, de nouveaux records mensuels absolus pour ce paramètre ont été atteints (mesures à partir de 1833).

La température minimale moyenne annuelle a établi un nouveau record absolu (mesures de 1892) : 8,6 °C (norm. : 7,3 °C). Le précédent record datait de 2014 (8,5 °C). Ce n'est qu'en avril que la température minimale moyenne mensuelle a été inférieure à sa valeur normale. En juin, un nouveau record absolu a été atteint et en septembre, le record absolu a été égalé (mesures depuis 1892).

La température maximale moyenne annuelle a été de 15,8 °C (norm. : 14,7 °C), ce qui la place en quatrième position (mesures depuis 1892). Ce n'est qu'aux mois de mars, avril, juillet et août que ce paramètre mensuel a été inférieur à la normale respective. En juin et en septembre, un nouveau record mensuel absolu a été atteint à chaque fois pour ce paramètre (mesures depuis 1892).

Quelques faits notables concernant les températures à Uccle :

- Pour la période de référence actuelle, c'est la cinquième fois qu'il n'a pu être enregistré un seul jour d'hiver (la dernière fois, c'était en 2022). Pour l'ensemble de la période (à partir de 1892), c'est seulement la 13<sup>ème</sup> fois.

- Le premier jour de l'année a d'emblée été propice à un record de température. Le 1er janvier, pour la première fois depuis le début des observations en 1892, il a été enregistré une température maximale d'au moins 15 °C au cours d'un mois de janvier : 15,2 °C. Le précédent record datait de 2007 et 2016 et restait juste en dessous de ce seuil (14,9 °C).

- Le mois d'avril n'a compté aucun jour de printemps [max >= 20 °C] à Uccle (norm. : 4,7 jours). La dernière fois, c'était en 2016. Pour la période de référence actuelle, il s'agit seulement du quatrième mois d'avril sans aucun jour de printemps, alors que cela s'est déjà produit 40 fois depuis le début des observations en 1892.

- À noter : en mai, la température à Uccle a varié entre 4,1 °C le 3 mai et 25,3 °C le 4 mai, correspondant à une différence de 21,2 °C en seulement 34 heures.

- Juin 2023 a été le mois de juin le plus chaud depuis le début des observations (mesures depuis 1833), avec pour la première fois une température moyenne supérieure à 20 °C (20,3 °C). Les records mensuels de températures moyennes minimales et maximales sont également tombés (mesures depuis 1892). Pour la première fois depuis 1892, les températures ne sont pas descendues en dessous de 10 °C au cours d'un

mois de juin. Avec 29 jours de printemps [max >= 20 °C], le record absolu de juin 2003 a été égalé et avec 17 jours d'été [max >= 25 °C], un nouveau record a été atteint.

- À Uccle, la température minimale la plus basse de l'été a été enregistrée le 7 août. Avec une valeur de 10,1 °C (norm. : 6,8 °C), il s'agit de la température minimale absolue la plus élevée depuis le début des observations en 1892 et c'est également la première fois que la température n'est pas descendue en dessous de 10 °C durant l'été (précédent record : 9,3 °C en 2021).
- La nuit la plus chaude de 2023 a été la nuit du 18 au 19 août. La température nocturne a atteint 23,0 °C à Uccle. Il s'agit également de l'une des nuits les plus chaudes depuis le début des observations en 1892.
- Avec une température moyenne de 18,8 °C, le mois de septembre 2023 est le plus chaud depuis le début des observations (mesures depuis 1833). Le précédent record, pour la période de référence actuelle, remontait à 2006 (18,4 °C). Le précédent record absolu de la température maximale moyenne (23,4 °C en 2006) a également été battu (nouveau record : 24,0 °C) (mesures depuis 1892). Grâce à la vague de chaleur la plus tardive (du 4 au 11 septembre) jamais enregistrée (également la première dans un mois de septembre), un record de 6 jours de chaleur [max >= 30°C] a été atteint. Le précédent record de 2 jours (en 2020, 1949, 1919, 1911 et 1906) a ainsi été battu.
- L'année dernière, il n'a pas fait plus froid que -4,1 °C à

Uccle (norm. : -7,9 °C). Il s'agit de la troisième valeur la plus élevée pour la période de référence actuelle. Le record reste à -2,4 °C (en 2020) et elle était aussi légèrement plus élevée en 2015 (-3,1 °C).

- Sur l'ensemble du territoire, la température la plus basse de l'année a été enregistrée à Neidingen (Saint Vith). Le 9 février, la température y est descendue jusqu'à atteindre -10,8 °C. La température maximale la plus élevée de l'année a été enregistrée à Westmalle (Malle). Le 8 juillet, la température de 34,4 °C y fut alors atteinte.

#### ***Quatrième année la plus humide pour Uccle***

En 2023, un total de 1011,4 mm de précipitations est tombé à Uccle (norm. : 837,1 mm) et cette quantité annuelle est tombée en 207 jours (norm. : 189,8 jours). Avec cette quantité de précipitations, l'année 2023 occupe la quatrième place après 2001 (1088,5 mm), 2002 (1077,8 mm) et 2021 (1038,8 mm). Sur l'ensemble des observations d'Uccle (depuis 1833), l'année 2023 ne fait pas partie du top 10.

À Uccle, le total journalier le plus élevé a été enregistré le 1<sup>er</sup> septembre et a atteint 26,0 mm.

De plus, l'année 2023 a enregistré la deuxième plus longue période de sécheresse depuis le début des observations en 1892 à Uccle. Aucune précipitation n'y est tombée entre le 16 mai et le 16 juin. La plus longue période de sécheresse (36 jours) a eu lieu en 2007.

Sur l'ensemble de notre territoire, les cumuls annuels varient entre 864,8 mm à Néchin (Estaimpuis) et 1742,9 mm à Sugny (Vresse-sur-Semois).

À Uccle, il n'a été enregistré que cinq jours de chutes de neige : 2 jours en janvier, 2 jours en mars et 1 jour en décembre. La neige n'est restée au sol que durant trois de ces jours. La plus grande épaisseur de neige au sol a été mesurée le 8 mars (maximum de 3,5 cm).

Sur le reste de notre territoire, les précipitations constituées partiellement ou entièrement de neige sont tombées pendant 31 jours l'hiver dernier. Au Mont-Rigi (Waimes), il y a eu de la neige du 2 au 20 décembre et du 15 janvier au 2 février. C'est également là qu'a été mesurée la plus grande épaisseur de neige de notre pays : 29 cm le 20 janvier. Autres épaisseurs de neige notables : le 21 janvier, il y avait 18 cm de neige à Stembert (Verviers) et 25 cm de neige à Stavelot.

Au printemps, les précipitations constituées partiellement ou entièrement de neige sont tombées pendant 14 jours, dont 13 jours en mars et 1 jour en avril. L'épaisseur maximale a été mesurée au Mont-Rigi (Waimes) et était de 28 cm le 8 mars.

La première neige d'après période estivale est tombée dans les Hautes Fagnes le 15 octobre. Cependant, rien n'était resté au sol ce jour-là.

En novembre et décembre, des précipitations composées partiellement ou entièrement de neige sont tombées sur notre pays pendant 15 jours. Localement, cela a créé une couverture neigeuse du 24 novembre jusqu'au 9 décembre. L'épaisseur maximale a été mesurée au Mont-Rigi (Waimes) et était de 18 cm le 30 novembre.

L'année 2023, il a été enregistré 97 jours d'orages dans notre pays (norm. : 93,3 jours).

## ***Une année un peu plus ensoleillée que la moyenne***

Au total, le soleil a brillé 1610 h 19 m (norm. : 1603 h 40 m) à Uccle l'année dernière. Cependant, seuls 4 mois ont été plus ensoleillés que leur moyenne respective : février, mai, juin et septembre. Durant tous les autres mois, le soleil y a brillé moins que leur moyenne respective.

Juin a été le mois le plus ensoleillé depuis le début des observations en 1887. La durée d'ensoleillement y a été de 307 h 50 m à Uccle (norm. : 199 h 16 m). Le précédent record datait de 1976 (avec 302 h 17 m). Plus en détail, la première décade (1-10 juin) a été particulièrement ensoleillée. Le soleil y a brillé 126 h 19 m (norm. : 64 h 10 m). Il s'agit d'un nouveau record absolu pour cette décade. Le précédent record de 104 h 15 m datait de 1997 (mesures de 1887). À titre de comparaison, au cours de cette première décade de juin 2023, le soleil y a brillé encore plus que pendant tout le mois de juin 1987 (qui correspond au mois de juin le plus sombre depuis le début des observations en 1887 avec 95 h 29 m).

## ***Une vitesse moyenne annuelle du vent légèrement plus élevée***

La vitesse moyenne annuelle du vent à Uccle a été de 3,6 m/s (norm. : 3,5 m/s).

Le 2 novembre seulement, il a été enregistré des rafales de vent maximales d'au moins 100 km/h (28 m/s) dans au moins un point de mesure du réseau anémométrique de notre pays. Ces vitesses ont également pu être atteintes localement lors d'orages.

## **Quelques autres faits marquants**

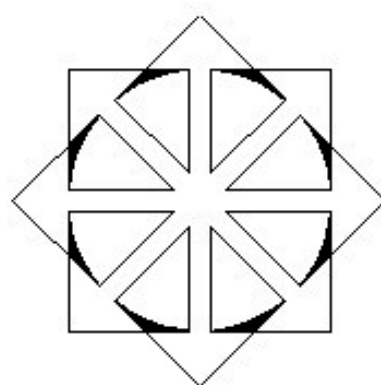
- Il a été enregistré deux vagues de chaleur l'année dernière. Une première en juin (8-17 juin) et une seconde en septembre (4-11 septembre). Cette dernière vague de chaleur était particulièrement remarquable : il s'agissait de la première vague de chaleur en automne (mesures depuis 1892).
- Le plus grand total journalier de précipitations dans notre pays a été mesurée le 25 août. Ce jour-là, il est tombé 75,7 mm de précipitations à Lauw (Tongres).
- Le 21 avril, BELLS (Belgian Lightning Location System) a détecté une décharge de 343 kiloampères à Middelkerke. Une décharge d'un tel ampérage ne se produit que rarement sur notre territoire.
- Une tornade a traversé Menuchenet (Bouillon) le 22 juin. Elle a causé des dégâts très localisés dans une forêt avec plusieurs arbres cassés et/ou déracinés.
- En novembre, le sud de la province de Flandre occidentale a été particulièrement touché. À la station de Beerst (Diksmuide), pas moins de 274,8 mm de précipitations sont tombés en novembre (norm. : 97,4 mm). Il s'agit du plus grand total mensuel d'après les données enregistrées à cet endroit. Dans la commune de Diksmuide, les données sur les précipitations sont disponibles à partir du mois de septembre 1951. Les précipitations de novembre constituent pour cette station le plus grand total mensuel pour un mois de novembre

depuis 1951 (précédent record : 198,3 mm en 1991) et même le plus grand total mensuel tous mois confondus (précédent record : 240,1 mm en septembre 2001).

D'autres records ont été égalés ou battus l'année dernière. Les énumérer tous ici nous entraînerait trop loin. Des relevés plus détaillés peuvent être trouvés dans les pages ci-dessous :

- Bilans mensuels et saisonniers : <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2023/novembre-2023>.
- Dans la section «Actualités» de notre site web : <https://www.meteo.be/fr/infos/actualite/2023>.

**A.H. / R.D.**  
***D'après un communiqué de l'***  
**Institut Royal Météorologique**  
[www.meteo.be](http://www.meteo.be)





## Rubrique

# C'ÉTAIT DANS *CIEL ET TERRE* IL Y A 95 ANS...

Anne Haubrechts

Le premier numéro du Bulletin – *Ciel et Terre XLV<sup>e</sup> année - N°1 Janvier 1929* – s'ouvre sur le rapport de la séance mensuelle du 24 novembre 1928 présidée par M. E. Lagrange. Après avoir cité les noms et qualités des personnes qui sollicitent leur admission comme membre de la Société, le Président est *heureux de signaler spécialement à l'assemblée la précieuse demande de participation à [nos] travaux de M. le général Neefs* (commandant de l'École Militaire à Bruxelles) *dont la haute autorité en fait d'éducation scientifique est pour [notre] œuvre un sérieux appui.*

Sous le titre *Vitesse de la lumière (Suite) VII* on trouve l'article de M.-E.-J. Gheury De Bray présentant *la méthode du miroir tournant remise en opération au cours de déterminations de la vitesse de la lumière faites par deux savants américains, Prof. A.-A. Michelson et Prof. Simon Newcomb.*

*Quetelet poète* est un article de Paul Bergmans. *Ce titre peut paraître assez bizarre. On a quelque peine à se figurer que l'illustre savant auquel la ville de Gand est fière d'avoir donné le jour ait sacrifié aussi aux Muses et cultivé la poésie. Et cependant Quetelet fut poète, du moins dans sa jeunesse. C'est un côté de sa physionomie qui, pour être peu important, sans doute, n'en offre pas moins un certain intérêt à cause de l'éminente personnalité de Quetelet* qui est évoqué par l'auteur en [s'] aidant notamment de la biographie de Mailly.

*Croce meravigliosa* est la célèbre

*Croix du Sud* d'Andrea Corsali qui la signala dès l'an 1515. A. Piérot, Professeur, présente une étude (lue lors de la séance mensuelle dont il est question ci-dessus) sur *cette brillante constellation* qu'il a observée en 1906, en novembre, le premier soir de [mon] arrivée en Afrique. Après une présentation lyrique de son observation suivie d'un dessin, A. Piérot décrit la constellation dans les détails. Il conclut par l'émotion ressentie qui le poursuit 22 ans après.

*Les hautes tensions électriques et l'énergie de l'éclair.* R. Berce, docteur en sciences et ingénieur agronome, écrit le texte qui porte ce titre en s'appuyant sur un travail de M. A. Mac Adie, de l'Observatoire de Blue Hill (Etats-Unis), « *Franklin's kite experiment and the energy of lightning* », paru dans *Monthly Weather Review*, Vol 56, n°6, juin 1928, p 216 dont il tire aussi deux photos. La première représente une photographie d'éclair naturel faite par A.-H. Binden et la seconde est une décharge « presque éclair » comme on en obtient dans les laboratoires de la *General Electric Co*, à Pittsfield (E-U) sous la direction de M. F.-W. Peek. Affirmant d'entrée de jeu que *le progrès de nos connaissances scientifiques au sujet de la constitution de la matière est intimement liée à la production de courants électriques de voltages de plus en plus élevés*, R. Berce présente des expériences et des observations. Il termine son texte en constatant que *... des estimations extrêmes données par les différents expérimentateurs et de la valeur moyenne donnée par M.*

*Mac Adie, nous pouvons constater que des savants allemands ont commencé des essais pour emprunter à l'électricité atmosphérique les tensions extrêmes dont on aurait besoin pour la destruction des atomes.*

*Longitudes par télégraphie sans fil* est un petit texte non signé faisant état des points importants abordés par la commission des *Longitudes par télégraphie sans fil* réunie sous la présidence de M. le général Ferrié lors de la troisième assemblée de l'Union Astronomique internationale (Leyde 3 - 13 juillet 1928).

Suivent *Le temps en décembre 1928* (EVDL) et *Février astronomique* (GC).

La rubrique *Notes* est très étoffée : (1) *Prévisions sismiques* par le Prof. Dr A. Belar suivie de quelques précisions au sujet de l'apport du Prof. Belar en sismologie ; (2) *Le problème des longitudes en mer* signée E. L. ; (3) *Océanographie et Hydrographie marine et continentale* signée E. L. ; (4) *Johannes Bayer et les Constellations* signée E. L. ; (5) *Sur l'influence de l'électricité et du relief sur la production de la grêle* signée Fid.D. ; (6) *Le Soleil et les orages magnétiques* signée Fid D. ; (7) *L'été de 1928 et les variations solaires d'après M. Mémery* signée Fid. D. et (8) *Société Orion* signée E. L.

Les rubriques *Bibliographie* et *Bibliographie des travaux belges* (Juillet à septembre 1928) terminent ce Bulletin N°1 de janvier 1929.

Dans le numéro 2-3 suivant, on ajoutera que la page 3 de couverture présente une publicité pour des moteurs à gaz suivie d'une autre pour une revue internationale de synthèse scientifique *Scientia* dont les bureaux sont à Milan. La page 4 de couverture présente une publicité pour le nouveau livre de l'Abbé Moreux, Chanoine honoraire, Directeur de l'Observatoire de Bourges : *Astronomie Moderne, Le Ciel et l'Univers*. On y trouve également un insert sur papier rose indiquant en avant-première page en recto deux Avis du Président E. Lagrange rédigés à la suite de l'Assemblée Générale du 26 janvier concernant respectivement l'augmentation de la contribution des membres de la Société (40,00 francs) et l'organisation d'un Banquet Amical [qui] réunirait les Membres de la Société et les Dames de leur famille et en verso une publicité pour les instruments astronomiques Zeiss. En dernière page du feuillet, on trouve toujours sur papier rose en recto un *Bulletin d'adhésion* ou *demande d'inscription comme membre effectif de la Société* et, au verso, la liste des *Ouvrages de l'abbé Th. Moreux*.

En entrée de ce double numéro, on lit d'abord une rectification au procès-verbal de la séance du 28 novembre puis successivement : le procès-verbal de la séance du vendredi 4 janvier 1929, le procès-verbal de l'assemblée générale du 26 janvier 1929 (ouverte à 4 heures) qui comprend le rapport du Président et du Trésorier suivi par celui de la séance mensuelle du 26 janvier 1929 ouverte à 5 heures et qui s'est terminée à ... 19 heures (sic).

La réorganisation des messages météorologiques pour l'aéronautique fait l'objet du premier article. Depuis que la Conférence Aéronautique Internationale a mis à l'étude la réorganisation de l'échange des renseignements mé-

téorologiques pour l'Aéronautique, un fait nouveau s'est produit : la Conférence Radiotélégraphique Internationale, réunie à Washington en 1927, a rédigé une Convention Radiotélégraphique internationale et un Règlement Général qui entre en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 1929. L'un des éléments les plus importants de la nouvelle réglementation est la répartition de longueurs d'onde entre les différents services. L'article détaillé comporte trois tableaux : (I) *Division de l'Europe en régions et sous-régions* ; (II) *Forme et conditions de rédaction des avertissements de phénomènes dangereux et des avis d'amélioration* ; (III) *Horaires des émissions régionales belges*. Le texte est signé par Albert de Dorlodot, Météorologiste-correspondant de l'Institut Royal Météorologique de Belgique.

Le Dr G. Quignon signe l'article suivant intitulé *Observation à l'œil nu des satellites de Jupiter*. Suite à une observation réalisée le 12 octobre 1928 vers 22 h 15 m T.U. M. Quignon a interrogé M. Delporte lors de la réunion d'octobre sur l'hypothèse qu'il émet au sujet de l'identification de l'objet brillant qu'il a observé à l'œil nu à proximité de Jupiter, à savoir le III<sup>e</sup> satellite de Jupiter. Sa question a suscité une réponse écrite qui lui a été transmise et qu'il présente dans le Bulletin.

A. Piérot a rédigé l'article suivant : *Visions lunaires. Palus putredinis*. Une vision captivante d'après l'auteur qui décrit cette région de la Lune avec beaucoup d'emphase et de précision. Son texte est illustré par un dessin de sa main.

Une autre région de la Lune est décrite juste après sous le titre *Le cirque Hévélius*. Félix-Ch. Lamèch de l'Observatoire de Corfou y présente un fort joli dessin d'Hévélius accompagné de quelques notes intéressantes pour l'étude du grand

cirque effectuée le 30 juillet 1928 avec l'assistance de M. Jean Focas de la Société Astronomique de Grèce.

Dans une nouvelle suite (VIII) de l'article *La vitesse de la lumière*, M.-E.-J. Gheury de Bray détaille de nouvelles expériences.

Adolphe Quetelet historien des sciences et biographe. Aug. Collard, dans un article qui comportera une suite, y présente la contribution à l'histoire des sciences de A. Quetelet dans le cadre des cours dont il fut chargé aussi bien au Musée de Bruxelles des leçons publiques de physique et d'astronomie qu'au Musée des Sciences et des Lettres de Bruxelles (1826).

Sous le titre *Les subsides de l'État aux sociétés scientifiques*, E. Lagrange rend un hommage reconnaissant à M. le président Félix De Roy qui est en même temps son délégué auprès de la Fédération belge des Sociétés scientifiques, pour l'énergie et le talent avec lesquels il a mené le bon combat pour la revendication de nos droits scientifiques et le bien de la science belge.

Le numéro se termine par les rubriques habituelles : *Mars astronomique* et *Avril astronomique* de Gaston Coutrez ; une série de *Notes* comprenant successivement : (1) *Activité solaire et Physique terrestre (E.L.)* ; (2) *Exposition nationale de l'histoire de la Science en Italie (E.L.)* ; (3) *La structure de la rosée (R. Berce)* ; (4) *Observatoire de Liverpool* ; (5) *Société Orion* ; (6) *L'Observatoire de Modène* ; (7) *G. Montanari, Une carte de la Lune ignorée (E.L.)* ; (8) *Société d'Astronomie d'Anvers* ; (9) *La mesure des températures minima sur gazon (R.B.)* ; (10) *Une chaire de Météorologie et de Climatologie à Salonique (E.L.)* ; (11) *Un nouveau Manuel de Climatologie (R.B.)* ; et enfin *Bibliographie* portant sur onze recensions.

## COUPS D'ŒIL SUR LE CIEL DE MARS-AVRIL 2024

R. Dejaiffe

Heures exprimées en temps universel pour Uccle (UT)  
 Pour la Belgique, ajouter UNE heure (DEUX heures  
 à partir du 31 mars 2024) pour obtenir l'heure officielle.

## Mars

- 03 (3) Juno (+8,6) en opposition avec le Soleil dans le sud de la constellation du Lion  
**Dernier Quartier de Lune** à 15 h 23 m
- 10 **Nouvelle Lune** à 9 h 00 m
- 14 La comète C/2021 S3 (PANSTARRS) au plus près de la Terre à 1,2976 unité astronomique (ua) soit 194,12 millions de kilomètres à 23 h
- 15 Disparition de l'étoile 59  $\kappa$  Tau (GSC/TYC\* 1820-01416) (+5,4) au bord sombre de la Lune à 18 h 36,5 m (hauteur : 55°)
- 17 **Premier Quartier de Lune** à 4 h 11 m
- 20 Début du printemps astronomique à 3 h 06 m
- Disparition de l'étoile 19  $\lambda$  Cnc (1928 - 01817) (+5,9) au bord sombre de la Lune à 0 h 01,7 m (hauteur : 39°)
- 23 Disparition de l'étoile 77  $\sigma$  Leo (0270 - 01148) (+4,0) au bord sombre de la Lune à 21 h 12,4 m (hauteur : 40°)
- 24 Mercure (-0,1) en plus grande élongation PGE (19° E) à 23 h (coucher de Mercure à 19 h 53 m)
- 25 **Pleine Lune** à 7 h 00 m  
*Eclipse de Lune par la pénombre, en partie visible en Belgique de 4 h 51,0 m (hauteur : + 7°) (entrée dans la pénombre) à 5 h 38,0 m (hauteur = 0) (coucher de Lune à Uccle)*
- 30 *Pour les amateurs de **photographie** du ciel : bonne occasion pour saisir le passage de la comète C/2021 S3 (PANSTARRS) en bordure ouest de l'amas de Brocchi dans la constellation du Petit Renard (Vulpecula) aux environs de l'étoile  $\Upsilon$  Cyg (Sadr) (+2,20) vers 0 h*

## Avril

- 02 **Dernier Quartier** de Lune à 03 h 15 m
- 07-09 Au matin, (4) Vesta (+8,3) à  $\frac{1}{2}^\circ$  au nord de l'amas stellaire ouvert M35 dans la constellation des Gémeaux
- 08 *Eclipse totale de Soleil, invisible en Europe de 15 h 42 m à 20 h 52 m*  
**Nouvelle Lune** à 18 h 21 m
- 10-11 La comète 12P/Pons-Brooks (+4,5 ?) à 24° du Soleil (dans les environs de Jupiter) : la Lune, Jupiter, Uranus et la comète dans la même zone du ciel à l'ouest à la limite des constellations du Bélier et du Taureau le 10 et aux environs de l'amas stellaire ouvert des *Pléiades* le 11 vers 20 h
- 11 Disparition de l'étoile 36 Tau (1814 - 01647) (+5,5) au bord sombre de la Lune à 20 h 52,0 m (hauteur : 15°)
- 15 **Premier Quartier** de Lune à 19 h 13 m
- Disparition de l'étoile 2  $\omega$  CNC (1930 - 01821) (+5,9) au bord sombre de la Lune à 21 h 57,3 m (hauteur : 40°)
- 19 Jupiter (-2,0) en conjonction à 31' au sud avec Uranus (+5,8) vers 08 h. D'où, ce soir et demain soir, aux environs de la Pleine Lune, possibilité d'avoir les deux planètes dans un même champ visuel !
- 22 (6) Hebe (+9,9) en opposition avec le Soleil au sud dans la constellation du Bouvier
- 23 **Pleine Lune** à 23 h 49 m

## Visibilité des planètes

## Mars

Visibles à l'œil nu : Mercure (-1,7/+1,2) (à partir de la mi-mars), Jupiter (-2,2/-2,1)  
 A l'aide d'un instrument : Uranus (+5,8/+5,8)  
 Inobservables : Vénus, Mars, Saturne, Neptune

## Avril

Visibles à l'œil nu : Jupiter (-2,0/-2,0), Saturne (+1,0/+1,1) (matin)  
 A l'aide d'un instrument : Uranus (+5,8/+5,8)  
 Inobservables : Mercure, Vénus, Mars, Neptune

Pour davantage d'information :  
 Annuaire 2024 de l'Observatoire Royal de Belgique (ORB)  
 (En vente à l'ORB : 13,00 EUR + frais d'expédition)

\* (GSC pour Guide Star Catalog / TYC pour catalogue Tycho-2)